

沉积学研究在沉积和层控矿床勘查中的作用(代序)

周 琦^{1,3}, 吴冲龙^{1,2}, 杜远生^{1,2}, 张志庭^{1,2}, 覃永军¹

(1. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国地质大学(武汉) 地质信息科技研究所, 湖北 武汉 430074; 3. 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳, 550081)

[摘 要]这次贵州省重点矿产资源大精查,不仅要探明精查对象的资源储量,还要开展矿产形成、分布规律研究,为进一步的深部和外围预测奠定基础。贵州省的优势矿产资源,多数是沉积矿产和层控矿产。为了认识并掌握其形成、分布规律,需要深入开展沉积学研究,分析和判别其沉积相和沉积环境。本文以 4 个案例,说明了沉积学研究在本次优势矿产资源大精查中的作用,其中包括:获取成矿过程的同沉积证据、揭示成矿环境条件和成矿过程、查明矿体厚度分布的同期破坏因素和基于沉积相模式的成矿机制分析和外围预测等方面。实践结果表明,系统而准确的岩(矿)芯和露头观察,是识别沉积构造并获取其特征信息,判别其沉积相和沉积环境的基本方法,也是揭示沉积矿床和层控矿床形成条件、机制和分布规律的有效途径。

[关键词]沉积矿床;层控矿床;沉积构造;沉积相;同沉积现象;矿体厚度变化;成矿机制

[中图分类号]P512.2;P588.2;P611 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2021)02-0109-10

沉积矿产和层控矿产的形成过程,除了与物源及运移方式有关外,还与一定的沉积环境、水动力条件、介质物理化学条件和水生生物条件等相关。由此,必然会在这类矿床的矿体、夹石和围岩中,打下一些相关的烙印。这些烙印以隐性或者显性形态存在,可以通过岩性、岩相、沉积相和层位等特征分析来感知。贵州省的优势矿产资源,基本上都是沉积矿产和层控矿产,为了认识并掌握其形成、分布规律,需要深入开展沉积学研究,细致地观察、识别、研究和提取其特征信息。因此,加强沉积学特征的观察、搜集和研究,对这次重要矿产资源大精查而言,意义是不言而喻的。下面结合若干示例,谈谈在这次贵州省重要矿产资源大精查中,开展沉积学研究和采集沉积学数据的作用。

1 获取成矿机制的同沉积证据

黔东南的一系列超大型、大型菱锰矿矿床,具有明显的内生外成特征。从露头、岩芯和薄片中发现了许多重要现象,提出了全新的含锰矿气液喷溢沉积成矿模型(周琦等,2013,2016,2017,2019;袁良军等,2018;张遂等,2015)。在这次大精查中,通过岩芯观察,又发现了许多具有成因标识意义的沉积构造,可补充在深水环境中同沉积成矿的证据(图 1)。其中包括在岩(矿)芯中普遍发育的滑塌构造(图 1a)、同生砾(图 1b)、粒序层理(图 1e 下)、火焰构造(图 1e 下)、负载构造(图 1e 下)、砂球构造(图 1c 下)和条带状互层层理(图 1d)和递变粉砂层,以及不完整的鲍玛序列(图 1c 中上和图 1e 中)。

[收稿日期]2021-03-29 **[修回日期]**2021-05-03

[基金项目]2020 年贵州省重点矿产资源大精查项目和黔科合平台人才[2018]5618 号。

[作者简介]周琦(1964—),男,研究员,博士,主要从事矿产地质研究及评价工作。Email:103zq@163.com。

[通讯作者]吴冲龙(1945—),男,教授,博士生导师,从事矿产地质及信息科技研究工作。Email:804077427@qq.com。

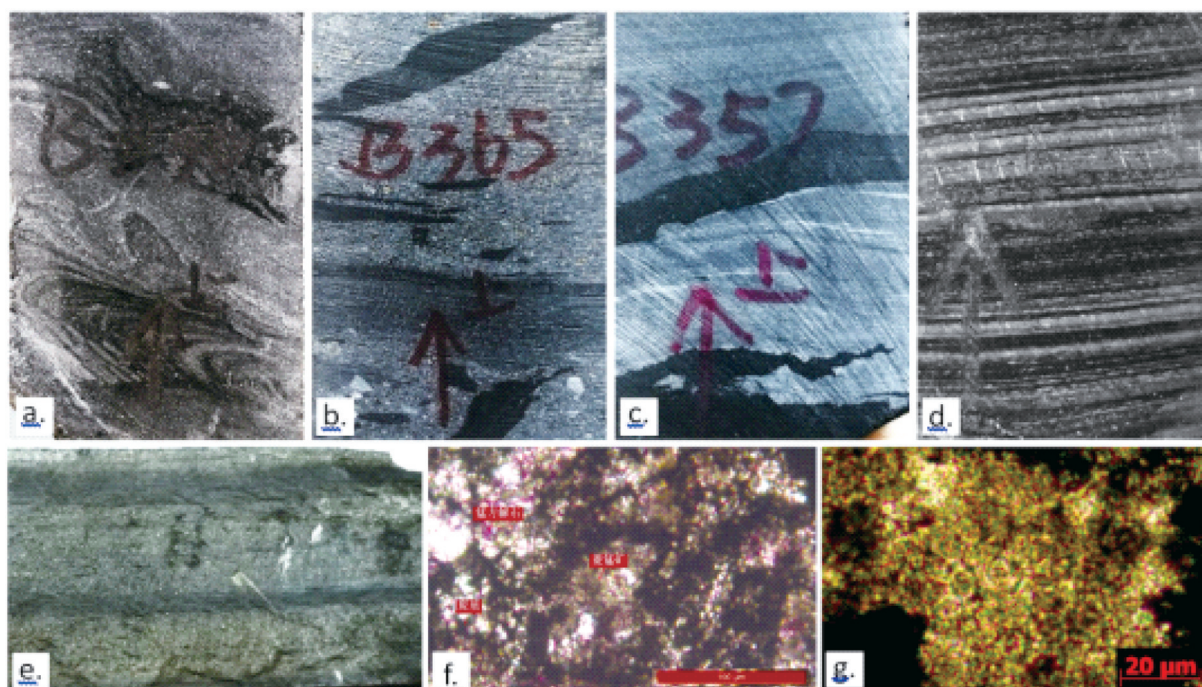


图1 菱锰矿层(灰黑色条带)与水下重力流沉积(滑积、碎屑流、浊积,a-e)以及菱锰矿团块状构造(f,g)

Fig. 1 Rhodochrosite seam (grey and black belt) and under water gravity flow deposit

在图1中,灰黑色碎屑状物质为细砂级和粉砂级菱锰矿泥晶团块,它们与炭泥质碎屑混杂共生(图1f),部分菱锰矿泥晶具明显的鲕状特征(图1g)。灰白色碎屑为陆源碎屑,应属异地重力流成分。上述沉积构造在大塘坡组一段大量出现,并分别与水下重力流沉积亚相对应(图2),即滑塌构造对应滑积亚相,同生砾对应碎屑流亚相;而粒序层理、火焰构造、负载构造、砂球构造、不完整的鲍玛序列、条带状互层层理和递变粉砂层,则分别对应浊积亚相的近端、中部和远端微相。这些现象说明,菱锰矿矿层形成于较深水体底部,属

于该处海底原地的原生沉积物。层理中的每一个菱锰矿泥晶条带,可能是一次含锰流体底辟喷溢到水底后与原地炭泥质混合(凝聚)的产物。堆积于喷溢口附近的互层状菱锰矿泥晶薄层-炭泥质碎屑薄层,被卷入滑塌事件的情况表明重力流作用的规模较大。在一个滑塌构造中,被卷入的菱锰矿泥晶条带越多,说明重力流事件规模越大。碎屑流和浊流沉积层的存在,表明重力流事件规模较小。水下重力流的成因,可能与含锰热流体大规模底辟-喷溢作用有关,也可能与风暴、地震等事件有关,有待系统的沉积学研究来揭示。

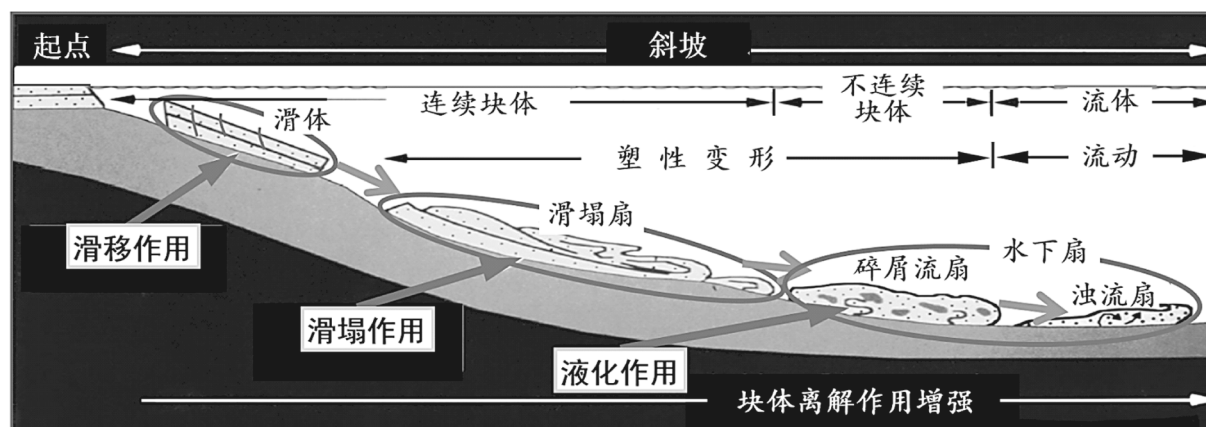


图2 水下重力流沉积模式及其沉积物沉积构造空间分布(据 Shanmugam 等,1995)

Fig. 2 Under water gravity sedimentary mode and its sedimentary structure spatial distribution of sediment

此外,在岩芯中还发现了含锰气液有三种不同的喷溢方式,即导管式喷溢、烟雾式喷溢和喷泉式喷溢。这三种喷溢方式,同样说明含锰气液流体底辟上涌到达海底时,大塘坡组一段仍处于沉积过程中。喷溢方式的差异,反映了含锰气液喷溢动力的强弱不同,以及含锰热流体喷溢成矿机制的差异。对此,将另外撰文介绍。

2 揭示成矿环境条件和成矿过程

铝土矿在贵州省内分布广泛,前人做过大量研究工作,在成矿地质背景、物质来源、赋存位置、矿床规模、埋藏条件、成矿过程和成矿规律等,都取得了丰硕的成果。已有的研究证明,贵州省的铝土矿多为一水硬铝石型铝土矿,总体上属于风化壳中的异地沉积矿床;铝土物质历经了风化、剥蚀和搬运作用,沉积于海湾环境中,又经分选、淘洗得到初步富集,然后在地下水化学系统中通过脱硅和脱铁再富集,最后通过淋漓作用而进一步得到富集(陈履安, 1993; 殷科华, 2009; 翁申富等, 2010; 韩忠华, 2008; 余文超等, 2013; 崔滔等, 2013; 杜远生等, 2014, 2015; 金中国等, 2018)。然而,对于与成矿过程和机制相关的一些关键细节问题,还需要进一步研究和阐明。例如,成矿铝土物质在水体中是如何沉积的? 是一次性异地搬运沉积而成,还是经过异地搬运沉积后,又经微异地迁移再沉积而成? 不同矿石类型分别具

备什么沉积相,反映了什么水动力条件? 富矿体和贫矿体各自的空间分布特征和分布规律如何? 主要控制因素是什么? 等等。

这些问题的进一步解决,同样需要通过系统的岩芯和露头沉积相分析来实现。在这次大精查中,尽管我们没有条件开展系统的工作,但仅通过ZK15906的初步观察,就已经发现了一些有助于这些问题解决的重要信息——沉积相标志。从ZK15906的岩芯上所看到的沉积相标志,主要是含矿层大竹园组中的一些宏观沉积构造。为了便于说明这些沉积相标志所反映的相关信息,需要循着沉积过程由下而上进行阐述。

在大竹园组下部,即通常所说的由绿泥石粘土岩、含黄铁矿粘土岩和粘土组成的“粘土岩”段,实际上是具有大量撕裂状泥质同生砾和浑浊状(包卷?)层理的灰黑色泥岩(图3),其中夹有多个代表原地沉积的薄层水平纹理泥岩和粉砂质泥岩。从垂向层序和横向分布状况推测,可能属于海湾潮下带环境中形成的泥质碎屑流沉积。它们可能是潮坪上半固结或未固结的泥质碎屑,在风暴发生时被卷入潮下带较深水处的。

向上至铝土矿层底部,为具负载构造和砂球构造的细砂级铝土矿(岩)分层,内部具块状构造,即块状铝土矿(岩),应属铝土质浊积岩(图4a上部)。与下伏灰黑色铝土质泥岩呈连续沉积关系,相互间无沉积间断,可能是在某种动力(风暴或地震)作用下,停积在滨岸或潮坪上的铝土质碎



图3 旦坪中二叠统大竹园组下部灰黑色铝土质碎屑流沉积中的铝土质同生砾和原地水平纹理状泥岩

Fig. 3 Aluminum intraformational conglomerate and autochthonous horizon veiny mudstone in black aluminum debris-flow deposit in lower Dazhuyuan formation of middle Permian in Danzhong

屑,以浊流形式进入潮下带沉积而成的。

再向上为具土状、半土状的铝土矿富矿分层(图4b),显示出清晰的变形层理,大量不规则的黄灰色铝土质团块与灰黑色泥质砾屑混杂在一起。这些铝土质团块和泥质砾屑,具有明显的内

碎屑特征,应属于铝土质碎屑流沉积。究其成因,可能是更大规模和强度的风暴作用,以碎屑流形式将停积在滨岸或潮坪上富铝沉积物,卷入潮下带沉积而成的。从沉积学角度看,铝土质碎屑流也是水下重力流的一种类型。



图4 铝土岩层中不同含矿段的沉积特征

Fig. 4 Sedimentary characteristics of different ore bearing seam in aluminum rock layer

再向上是具有鲕、豆状结构的贫矿分层,其中的鲕、豆粒状铝土矿颗粒形态完整,粒度分选较好,即便破损也形成完整的再生鲕、豆,表明均为原生鲕粒和豆粒,后生风化和改造并不明显(图5c)。鲕粒和豆粒是波浪做垂向运动时,使从下伏铝土质碎屑流沉积物中析出的氧化铝凝胶上下翻滚、逐步凝聚而成的,指示潮下带浪基面附近较深水环境。粒度越大,表明波浪作用的动力越强并且持续过程越长。鲕粒密集堆积而铝品位低,可能与未经淋漓脱硅、脱铁有关,也可能与鲕、豆粒间充填大量非铝土质碎屑有关。

再向上是肾状铝土岩分层,为品位低的非矿分层。其铝土质颗粒的形态同样较完整,粒度明显加大,长轴可达1~2 cm,分选差。粗大的肾状颗粒是多个破碎豆粒联合再生的,但颗粒形态仍较完整(图5d),同样说明是原生沉积产物。顶部

肾粒的破碎加剧(图5e),表明水动力增强,指示潮下带浪基面以上较浅水沉积环境。

再向上是梁山组煤层,显示海水已经退出,转变为海陆交互的成煤环境。

综上所述,ZK15906的大竹园组含矿层岩芯,为我们清晰地展示出了早二叠世的一个较完整的海退沉积序列,即自下而上:由浪基面以下的潮下带深水环境,到浪基面附近的潮下带较深水环境,再到浪基面以上的潮下带较浅水环境,最后到海陆交互的成煤环境。在大竹园组沉积初期,风暴作用由弱而强,不间断地发生并对铝土矿的成矿作用产生强烈影响。我们由此而有理由认为,只要能够对务正道铝土矿田的全部或大部钻孔岩芯、露头,进行系统沉积相和沉积环境观察和分析,就一定能够进一步深化已有的各项研究成果,全面把握这里的铝土矿矿床的成因条件、控矿因素和分布规律。

3 查明矿体厚度分布的同期破坏因素

对贵州开阳-瓮福磷矿的成因及其分布规律的研究成果很多,特别是从沉积学角度对其成矿机理和成矿模式的认识,已经得到普遍认同,其预测模式也很成熟了(朱士兴,王砚耕,1983;东野脉兴,2001;陈国勇等,2015;王泽鹏等,2016;杜远生等,2017;张亚冠等,2016;刘建中等,2019)。然而,在具体工作中,还是常被一些意想不到的状况所困惑。例如,明明是磷质成矿最有利的部位,却为何矿层分叉变薄甚至消失?为什么明明应该

是高品质、高纯度矿体出现的部位,却被一大堆角砾状的铝硅质或碳酸盐质碎屑所占据?是后期构造现象还是同沉积现象?所有这些问题,也可以通过岩芯、露头的沉积学观察和分析来解决。下面拟以瓮福磷矿田大湾勘查区的一个典型事例来加以说明。

瓮福磷矿田的围岩是硅化岩系,包括硅化白云岩和硅化碎屑岩系。通过对岩(矿)芯的观察,发现a、b磷矿层之间的夹石层几乎全由水下重力流沉积构成,同样包含滑塌堆积、碎屑流堆积和浊流沉积,沉积物的粒度、圆度和球度不同,分选性极差,成分主要是白云岩和碎屑岩,具有滑塌构造、递变粒序层理和负载构造(图5)。



图5 大湾磷矿区a矿层和b矿层之间夹石层的水下重力流特征

Fig. 5 Under water gravity flow characteristics of middle band between a seam and b seam in Dawan phosphor deposit

大湾磷矿区及其外围的a矿层和b矿层夹石层的等厚线,呈现出向北东伸出的扇形。根据其整体的厚度变化趋势,推测是一个向东伸出的大型重力流扇体(图6a)。这个夹石层等厚度图,与a矿层+b矿层的等厚度图(图6b),正好构成此消彼长的对应关系。这种情况说明,磷灰石的沉积成矿作用与重力流作用同时进行,后者的频繁出现干扰和破坏了前者的沉积环境,导致磷矿层厚度与重力流扇厚度互为消长。

有证据表明,同成矿期的水下重力流对瓮福磷矿田各矿床的影响和破坏,是一种普遍现象。

甚至在开阳磷矿田,都存在此种现象。如果我们能够在钻探岩芯编录时,注意这个问题,对整个瓮福磷矿田乃至开阳磷矿田的所有钻孔,重新进行一次全面的沉积相观察和分析,并且制作其沉积相分布图、夹石层(水下重力流)和磷矿层累计厚度分布图,便有可能掌握同沉积期近岸水下重力流活动情况、空间分布及其对磷矿层厚度的影响,进而对磷矿层厚度及品位的空间变化趋势做出准确预测。这对于勘探靶区选择、勘查区范围划定和勘探工程的部署,以及见矿情况的预测将会有很大好处。

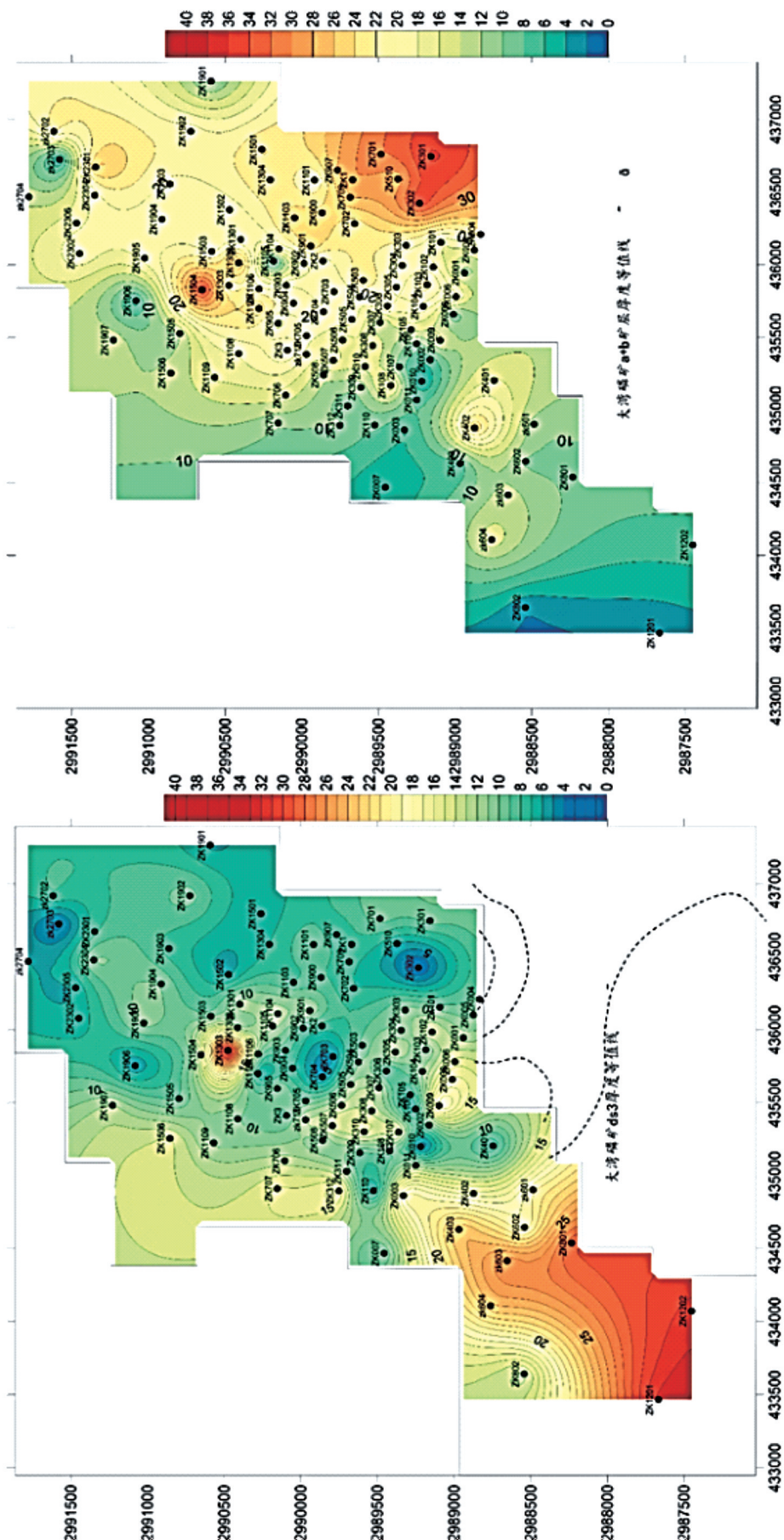


图6 大湾磷矿区a、b矿层之间的夹石(左)和a+b矿层(右)厚度等值线图(虚线为推测等值线)

Fig 6 The thickness contour map of middle band (left) between a, b seam and a+b seam (right) in the Dawan phosphor deposit

4 基于沉积相模式开展矿区外围的成矿预测

天柱-新晃重晶石成矿带,位于扬子地块东南缘的晚震旦世-早寒武世陆缘裂谷边缘。对于该重晶石矿床的成因,虽然还有一些分歧,但越来越多的证据表明,应属于海底热液喷流沉积型(胡清洁,1997;吴朝东等,1999;彭军等,1999;方维萱等,2002;夏菲等,2004;杨瑞东等,2007),其中可能有生物有机质共同作用(高怀忠,1998;韩善楚等,2014)。一系列重晶石矿床沿着一条深断裂平行展布,分别处于深部含矿热流体喷涌的热点上(杨瑞东等,2007),表明该深断裂是含矿热流体喷涌的同沉积导矿断裂。

但是,目前对于矿床中的重晶石颗粒状碎屑是如何沉淀的?其厚度变化规律如何?受到什么因素控制?尚缺乏从沉积学角度开展研究。显然,这几个问题的解决,对于了解这些矿床的成矿机制,开展深部和外围的成矿预测,有重要的意义。在这次大精查中,通过对寨脚勘查区多个钻孔的含矿段岩(矿)芯和野外露头进行系统观察,同样找到了许多典型的沉积相标志。这些沉积相标志,基本上都是反映与水下重力流有关的沉积构造,例如滑塌构造、碎屑流构造和浊流构造。其中,滑塌构造包括滑塌褶皱、包卷层理或变形层理(图7a);碎屑流构造包括同生砂泥角砾和撕裂砂泥块(图7b,c);浊流构造包括负载构造、砂球构造、砂枕构造和递变层理(图7d,e),甚至构成不完整的鲍玛序列。

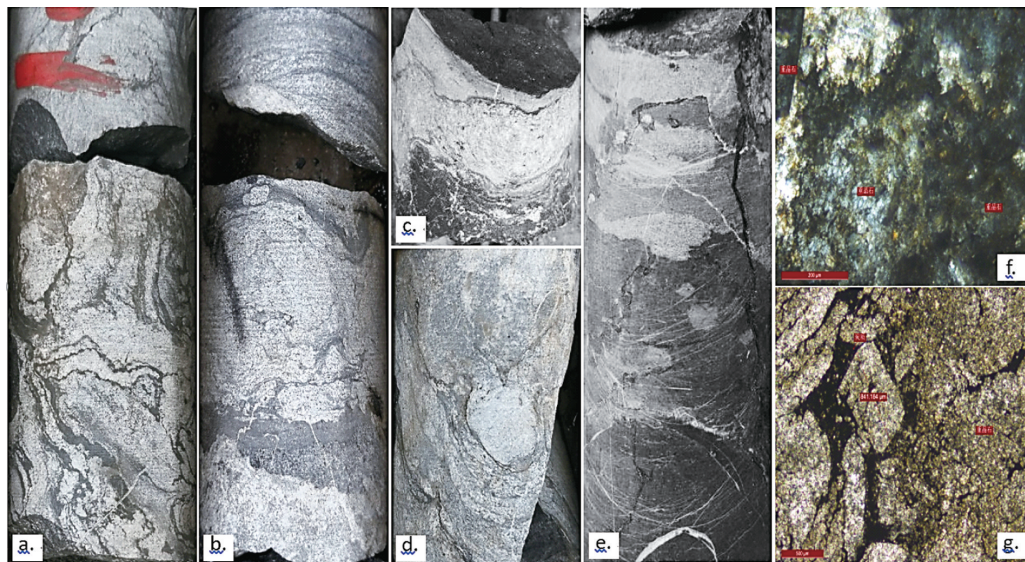


图7 重晶石质浊流沉积中的负载构造、砂球构造和变形构造(右侧图片为镜下照片)

Fig. 7 Load structure, sand ball structure and deformation structure in the barite turbidity deposit

这些反映不同类型和不同动力学条件的水下重力流沉积构造,不但普遍存在于矿区内所有重晶石岩(矿)芯中,更在平面上有规律地分布着,而且与重晶石矿层的厚度有很好的对应关系(图8)。以钻孔中该段岩(矿)芯的主要沉积构造所反映的沉积环境为标志,以重晶石矿层厚度4.0 m和2.5 m为界,大致可以把寨脚重晶石矿体划分为滑积亚相、碎屑流亚相和浊积亚相。三个亚相及其空间分布,很好地刻画出了寨脚矿区重晶石水下重力流扇的结构、形态和形成机制——由南向北、由南东向北西方向倾泻而来。

这实际上是由多个规模大小不等的水下重力流扇叠置而成的复合体,因而在扇头部的厚度最

大,中部其次,而扇尾部最薄。而且,根据重力流的形成机制,滑塌现象靠近碎屑物料原始堆积处(近源),碎屑流现象离碎屑物料原始堆积处较远,而浊流现象离碎屑物料堆积处最远(远源)。这种情况说明,寨脚勘查区重晶石矿层的厚度变化,一方面受控于与导矿同沉积深断裂及热流体喷溢口的距离,另一方面受控于同沉积水下重力流的作用,而与成矿期的裂谷古地形和后期的逆冲推覆断层改造、破坏,关系并不大。根据这一基本认识,利用大河边-寨脚勘查区的全部钻孔资料,制作了重晶石矿层等厚线图(图9),并开展基于水下重力流扇沉积模式的矿区外围勘探靶区预测。

5 若干初步认识

在岩(矿)芯编录中进行细致观察,识别并正确地提取其中的沉积相标志,是一项基础性的沉积学工作。通过以上的观察和分析,得到以下几点初步认识:

(1)贵州省的优势矿产资源,多是沉积矿产和层控矿产。在勘查中开展系统的沉积学研究,对于认识其形成、分布条件和成矿机制有重要意义。

(2)在本次优势矿产资源大精查中,沉积学研究的作用主要体现在如下几个方面:获取成矿机制的同沉积证据、揭示矿床形成的环境条件和成矿过程、查明矿体空间分布的准同生破坏因素和基于沉积相模式开展矿区外围的成矿预测等。

(3)实践表明,系统而准确地进行岩(矿)芯和露头观察,是识别沉积构造并获取其特征信息,判别其沉积相和沉积环境的基本方法,也是揭示沉积矿床和层控矿床形成条件、机制和分布规律的根本途径,需要加强这方面的学习和工作。

(4)水下重力流是较深水环境的时常发生的事件沉积,因此滑塌构造、碎屑流构造和浊流构造等水下重力流沉积构造,常见于海底热流体喷溢沉积矿体中,这在已有的工作得到了初步证实,今后还需特别注意相关的观察、分析和研究。

上述观察和分析十分粗略,介绍的目的是为了说明沉积学工作的重要性。如果要查明各个精查区的矿床成矿背景、控矿因素、成因机制和空间分布规律,进而提供进行外围和深部矿床勘探靶区预测的有效依据,还需要进行系统而深入的沉积学研究。

[参考文献]

- 崔滔,焦养泉,杜远生,等. 2013. 黔北务正道地区铝土矿沉积特征及分布规律[J]. 地质科技情报,32(1):52-56.
- 陈国勇,杜远生,张亚冠. 2015. 黔中地区震旦纪含磷岩系时空变化及沉积模式[J]. 地质科技情报,34(06):17-25.
- 陈履安. 1993. 黔中铝土矿成矿作用的研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,12(4):218-219.
- 东野脉兴. 2001. 扬子地块陡山沱期与梅树村期磷矿区域成矿规律[J]. 化工矿产地质,23(4):193-209.

- 杜远生,周琦,金中国,等. 2014. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿成矿模式. 古地理学报,16(1):1-8.
- 杜远生,周琦,金中国. 2015. 贵州务正道地区二叠系铝土矿沉积地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 杜远生,陈国勇,张亚冠,等. 2017. 贵州省震旦纪陡山沱组磷矿沉积地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 方维萱,胡瑞忠,苏文超,等. 2002. 大河边新晃超大型重晶石矿床地球化学特征及形成的地质背景[J]. 岩石学报,18(2):247-256.
- 高怀忠. 1998. 中国早寒武世重晶石及毒重石矿床的生物化学沉积成矿模式[J]. 矿物岩石,18(2):71-78.
- 韩忠华. 2008. 贵州道真县大塘铝土矿沉积相特征[J]. 矿产与地质,22(5):428-432.
- 韩善楚,等. 2014. 贵州天柱早寒武世黑色岩系重晶石矿床有机地球化学研究[J]. 地球化学,43(4):386-398.
- 胡清洁. 1997. 新晃贡溪超大型重晶石矿床的岩石学特征与沉积成岩作用[J]. 湖南地质,16(2):106-111.
- 金中国,刘辰生,邹林,等. 贵州务-正-道地区二叠纪铝土矿沉积环境地球化学证据[J]. 地质学报,92(4):817-927.
- 刘建中,王泽鹏,杜远生,等. 2019. 贵州开阳地区富磷成矿作用过程与找矿潜力[J]. 贵州地质,36(01):10-17.
- 彭军,夏文杰,伊海生. 1999. 湖南新晃贡溪重晶石矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 成都理工学院学报,26(1):92-96.
- 王泽鹏,张亚冠,杜远生,等. 2016. 黔中开阳磷矿沉积区震旦纪陡山沱期定量岩相古地理重建[J]. 古地理学报,18(03):399-410.
- 翁首富,赵爽. 2010. 黔北务正道铝土矿床特征及成矿模式——以务川大竹园铝土矿床为例[J]. 贵州地质,6(7):185-192.
- 吴朝东,杨承运,陈其英. 1999. 新晃贡溪-天柱大河边重晶石矿床热水沉积成因探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版),35(6):774-785.
- 夏菲,马东升,潘家永,等. 2005. 天柱大河边重晶石矿床铅同位素特征及来源探讨[J]. 地球化学,34(5):501-507.
- 杨瑞东,魏怀瑞,鲍森,等. 2007. 贵州天柱上公塘-大河边寒武纪重晶石矿床海底热水喷流沉积结构、构造特征[J]. 地质论评,53(5):675-680.
- 殷科华. 2009. 黔北务正道铝土矿的成矿作用及成矿模式[J]. 沉积学报,4(4):452-457.
- 袁良军,周琦,姚希财,等. 2018. 贵州松桃高地特大型富锰矿床主要地质特征[J]. 贵州地质,35(4):314-318.
- 余文超,杜远生,顾松竹,等. 2013. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿多期淋滤作用及其控矿意义[J]. 地质科技情报,32(1):35-39.
- 张遂,周琦,张平壹,等. 2015. 黔东南松桃西溪堡南华系大塘坡组超大型锰矿床地质特征与找矿预测[J]. 地质科技情报,34(6):8-16.
- 张亚冠,杜远生,陈国勇. 2016. 黔中开阳地区震旦纪陡山沱期富磷矿沉积特征与成矿模式[J]. 古地理学报,18(4):581-594.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 地质学报,91(10):2285-2298.

- 周琦,杜远生,覃英. 2013. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 矿床地质,32(3):457-466.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2016. 黔湘渝毗邻区南华纪裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用[J]. 地球科学,41(2): 177-188.
- 周琦,杜远生,等. 2019. 华南古天然气渗漏沉积型锰矿[M]. 北

- 京:科学出版社.
- 朱士兴,王砚耕. 1983. 关于开阳磷块岩矿床成因的探讨[J],科学通报,28(19):1191-1194.
- Shanmugam G, Bloch R B, Mitchell S M, et al. Basin-floor fans in the North Sea: sequence stratigraphic models vs sedimentary facies. AAPG Bulletin, 79:477-512.

The Role of Sedimentological Studies in Sedimentary and Stratified Deposit Exploration(Preface)

ZHOU Qi^{1,3}, WU Chon-glong^{1,2}, DU Yuan-sheng^{1,2}, ZAN Zhi-ting^{1,2}, QIN Yong-jun¹

(1. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China; 2. Institute of Geological Information Science and Technology, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China; 3. GuiZhou Geological survey, 550081 Guiyang, Guizhou, China)

[Abstract] In Big Detailed Exporation of key mineral resource of Guizhou province, we should not only prove the resource reserves of the object, but also carry out the study of its formation and distribution law, so as to lay a foundation for further deep and peripheral prediction. The dominant mineral resources of Guizhou Province are mostly sedimentary minerals and layer-controlled minerals. In order to understand and master its formation and distribution, it is necessary to carry out deep sedimentological research to analyze and distinguish its sedimentary facies and sedimentary environment. In this paper, four typical cases are presented, introduces the role of sedimentology in the Big Detailed Exporation of important mineral resources, including: obtaining the co-sedimentary evidence of metallogenic process, revealing the environmental conditions and metallogenic process of ore deposit formation, identifying the Same period destruction factors for ore body thickness distribution and based on sedimentary facies model, metallogenic mechanism analysis and peripheral prediction of mining area and so on. The practical results show that systematic and accurate observation of rock(ore) core and outcrop is the basic method to identify sedimentary structures and obtain their characteristic information, and to distinguish their sedimentary facies and sedimentary environment. It is also the effective approaches to understand the formation conditions, mechanism and distribution law of sedimentary deposits and stratabound deposits.

[Key Words] Sedimentary deposit; Strata-bound ore deposit; Sedimentary structure; Sedimentary facies; Consedimentary phenomena, Change of orebody thickness; Metallogenic mechanism

数字勘查与地矿勘查行业数字化转型

吴冲龙^{1,2,3}, 张夏林^{1,2,3}, 周琦², 田宜平^{1,2,3}, 张志庭^{1,2,3},
李俊杰³, 李岩³, 徐凯^{1,2,3}

(1. 中国地质大学(武汉)地质信息科技研究所, 武汉 430074; 2. 自然资源部基岩区矿产资源勘查
工程技术创新中心, 贵阳 550081; 3. 武汉地大坤迪科技有限公司, 武汉 430205)

[摘 要]:在数字勘查实践中,采用与数字化转型相适应的设计思路和解决方案,研发了多项具实际应用价值的关键技术,并提出构建数据链的设想。研究和实践结果表明,数字勘查与省域玻璃国土工程、历史勘查数据抢救工程和大数据成矿预测研究,是实现地矿勘查行业数字化转型及其与大数据深度融合的四项基础。未来发展还需要进一步考虑基于 5G 赋能的智慧化转型问题,并且要兼顾经营管理信息化问题。产学研结合体制,是推进省域地勘工作数字化转型的保障。

[关键词]数字勘查;数字化转型;信息化;智慧化;玻璃国土;大数据;5G 赋能

[中图分类号]P62;P628;TP317.4 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2021)02-0119-10

1 引言

数字化是一种历史潮流。20 世纪 80 年代,人类进入了信息化时代;21 世纪 10 年代,人类进入了大数据时代;21 世纪 20 年代之后,人类将迈向智能化时代。数字化、信息化、智慧化的理念已深入人心,也成为了地矿勘查行业创新和发展的方向。然而,与商业和制造业相比较,地矿勘查行业在业务内容和服务对象上有许多显著的差异。社会上所谓企业“数字化转型”,主要是指企业经营管理信息和商业运作信息的数字化表达,而地质矿产勘查行业本身是一种特殊的信息行业(吴冲龙等,2005a),其业务工作包含专业探测和经营管理两个方面,前者就是指地矿数据的采集、整理、管理、处理和服务,其产品是地矿数据和信息。因此,地矿勘查行业的数字化转型需同时考虑并解决专业探测和经营管理的需求。这两方面的信息系统建设和应用,既有密切联系又是相互独立的。

在《自然资源部信息化建设总体方案》(2019)中提出的“推进智能化地质矿产调查,探索智慧探矿新模式,到 2025 年要形成对自然资源动态监测和态势感知能力,建成以自然资源‘一张图’为基础的自然资源大数据体系”,实际上是指专业探测方面的信息化,反映了地矿行业数字化转型的国家目标。在本次贵州省重点矿产资源大精查中开展数字勘查,正是对这个“方案”的积极响应。数字勘查的科学目标,是在地质信息科学理论和方法论框架下,运用集成化的地质信息技术,建立完善的数据资源体系,使数据流转顺畅、充分共享,进而打通勘查、设计、开采、选冶和管理、决策等各个环节,为实现探采一体化和智能化奠定基础。显然,数字勘查的目标应是国家目标和科学目标的有机结合。

2 地勘行业信息化转型的设计思路

为了加速推进地矿行业的数字化转型,相关

[收稿日期]2021-03-20 **[修回日期]**2021-04-10

[基金项目]贵州省自然资源厅“重要矿产资源大精查”项目。贵州省科技厅重点科研项目(黔科合支撑[2017]2951、黔科合支撑[2020]4Y039 和黔科合平台人才[2018]5618);贵州省地质矿产勘查开发局重点科研项目(黔地矿科合[2017]2 号和黔地矿科合(2018)07)。

[作者简介]吴冲龙(1945—),教授,中国地质大学(武汉)。从事矿产勘查与地质信息科技教学与研发工作。

的顶层设计和计划安排,首先应当从实际出发,即从现有的基础和现实需求出发,清理贵州省地矿局经过多年努力已经完成和正在建设的各类数据库,并且总结已研发并采用的软件成果和已实现计算机辅助化的作业流程,加强对年轻的技术骨干的培养,并充分调动他们的积极性。其次,应当从数字勘查在地矿行业数字化-信息化转型的全局定位出发,以数字勘查为基础、以地勘单位为主体,着重研究并解决相关的大数据管理问题、技术研发问题、工作效率问题、经济效益问题、管理体制问题、思想观念问题、作业习惯问题、流程改造问题,等等。

在实际数字化转型的过程中,既要目标高远而又要循序渐进,脚踏实地,经由数字化到信息化,再到智能化;既要顾及方方面面,又要突出重点,统筹兼顾,注重统一的数据中心、数据中台和分布式的边缘数据中心、业务中台建设。地矿勘查信息化的基础在于数字化,因此应当以数据库建设为支点,着重加强大数据资源体系建设,开展数据治理。为了使地矿勘查数据在各个工序和各个环节流转顺畅,充分共享,应当在实施数字勘查过程中开展主流程改造,建立轨道约束体制;同时,还需要同步解决规范、标准体系和数据安全体系的建设问题,以便为地矿勘查行业数字化转型的顺利实现,提供强有力的保障体系。

经过多年来的建设和实践,各基层地勘单位已经建立了许多各种类型的数据库,形成了多源多类异质异构的电子化数据资源,并且在若干环节采用了数字化作业和网络作业方式。然而,由于缺乏系统性、整体性和完整性,并未实现勘查工作的整体信息化转型。所谓缺乏系统性,是指各个作业环节的计算机应用并非密切联系、互相依存的,而是各自独立的,缺乏层次支承性和横向协同性,未能形成首尾相接的作业流水线,数据未能在勘查和管理主流程中顺畅流转;所谓缺乏整体性,是指各作业环节的计算机应用缺乏统一规划、部署,相互间不具一致性和协调性,未形成统一的数据标准和数据链,因而出现一系列信息孤岛;所谓缺乏完整性,是未进行地质大数据资源体系建设,大量历史数据还没有入库,更没有建设完整的地质信息系统和统一的数据中心、数据中台、业务中台和数据利用、挖掘的技术体系,而且各个业务环节的计算机应用基础设施和硬软件配置也不齐备。

地矿勘查工作信息化的内涵可归纳为:采用信息系统对传统的地矿勘查工作主流程进行了充分改造,实现了全程计算机辅助化,数据在各道工序间流转顺畅、充分共享(吴冲龙等,2005a,b)。在地矿勘查工作各环节应用上计算机技术,只是地矿勘查行业数字化-信息化转型的开端,而非地矿勘查行业数字化-信息化转型的完成。这是一项复杂的系统工程,而且地质矿产勘查对象和数据极其复杂,为了迅速赶上历史发展步伐,贵州省地矿局及其所属的各单位,需要在已有基础上,探索并选择正确的途径,从实际出发,整体设计,分步实施,通过本次大精查来推进勘查工作的信息化转型。

3 地勘工作信息化转型的解决方案

根据上述基本认识,地勘单位的勘查工作信息化包含如下三项密切联系且相辅相成的内容(吴冲龙等,2005b):①建立以主题式点源地质数据库为基础的共用数据平台,避免系统内出现大量数据冗余,并实现了多源多类异质异构空间数据和属性数据的一体化存储和管理;②采用“多S”技术并进行技术集成、网络集成、数据集成和应用集成,使各种技术方法与应用模型有机地结合起来,形成完整的地质信息系统,数据在其中流转顺畅、充分共享,并且实现三维可视化;③利用地质信息系统对地矿勘查工作主流程进行充分改造,实现从资源预测、靶区选择,到野外数据采集、室内综合整理、编图、三维建模、储量估算、专题研究,再从成果保存、管理、使用到资源评价、决策的全程计算机辅助化。

3.1 从四个方面推进数字化转型

地质矿产勘查工作信息化建设与应用是一个系统工程,需要从多个方面着手进行,同时也需多方面的密切的配合,并努力追求整体的最优化。目前,贵州省地质矿产勘查开发局的勘查工作数字化转型,着重从四个方面强力推进。

(1)开展省域数据资源体系建设 在限期完成全局各单位全部历史勘查报告和成果图件的清理、编目并载入 Web3D 系统之后,进行扫描存储,然后选择其中的重要者进行矢量化转换。在此基础上,采用集中式与分布式结合的策略,构建局级

大数据中心和队院级边缘数据中心,并利用数据湖能以自然格式存放和配置数据的优势(Wikipedia Foundation, 2018)对多源多类异质异构数据库和数据文件集群进行管理、调度和服务。

(2)有计划地全面开展数字勘查 在实施的贵州省重点矿产资源大清查项目中,率先在7个矿床开展了数字勘查试点。通过制定统一的数据标准,采用以点源主题式数据库为核心的成熟地质信息系统软件——QuantyPES,并根据源自系统分析的逻辑结构对勘查作业流程进行改造,实现了从岩心编录到图件编绘、矿床三维地质建模和资源储量估算的全过程计算机辅助化和数字化。随后,推广到所有矿产勘查项目中。

(3)构建全省域多尺度玻璃国土 采用具有快速、动态、精细、全息三维地质建模功能的成熟软件——QuantyPES,开展全省域多尺度、多要素的三维地质建模,使之成为地质大数据的最佳载体。在自然资源厅支持下,已经完成了全省域1:50万玻璃国土建设,实现了海拔-2500m以浅17.6万平方千米国土的透明化。目前正在进行若干片区1:25万、若干整装勘查区1:5万和若干超大型矿床1:5千三维地质模型的构建。

(4)开展基于大数据的资源预测 以黔东南大塘坡式隐伏锰矿床和黔西南卡林型隐伏金矿床为例,基于所获取的全体地物化遥数据,以寻找相关关系为基本目标,把无模型与有模型分析结合起来,采用数据密集型计算方式进行成矿预测实验。通过这项工作,在总结相关地勘单位多年来的工作成果和实践经验的基础上,以“复盘”方式探索并验证了利用大数据和机器学习法进行成矿预测的途径,取得了显著效果。

3.2 支撑数字化转型的 QuantyPES 架构

本次数字勘查实验的主打软件 QuantyPES,具有“多S”结合与集成特征,其中包含有DBS、DWS、GIS、CADs、3dMS、RS、GPS、DPS、MIS、DSS、OAS、ANNS和ES等多个系统的成分,由数据采集、数据管理、图件编绘、三维建模、储量估算、综合评价和成矿预测等7个功能子系统和数百个功能模块组合而成,是一个庞大的地矿信息系统技术平台。其架构为技术方法与应用模型的层叠式复合结构(图1),由下而上、由里到外为数据采集

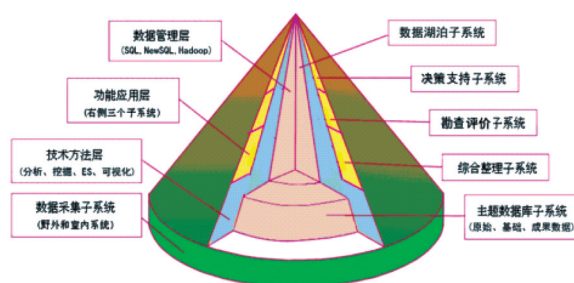


图1 以地质大数据资源体系为核心的地质信息系统结构
(据吴冲龙等,2005a,修改)

Fig. 1 Structure of Geological Information System with Geological Big Data Resource System as the core(modified by Wu Chong et al., 2005a)

层、数据管理层、技术方法层和功能应用层。其逻辑结构如图2所示。

在该应用架构中,由下而上可分为数据采集层、数据管理层、技术方法层和功能应用层等4个层次。其中,数据采集层包括支持地物化遥数据采集的各类台式、手持式、移动式工具;数据管理层由一系列异构数据库和数据文件集群,以及海量的多源多类异质数据构成,采用数据湖的思路、方法和技术来管理、索引和调度;技术方法层由一系列数据分析、数据挖掘、智能计算、三维可视化功能模块,以及各种模型库、方法库和知识库构成;功能应用层以业务中台为依托,包含数据综合整理、资源勘查评价和决策支持3个部分。其中,资源勘查评价部分包括常规勘查工作中的图件编绘、三维建模、储量估算、专题研究和成矿预测等。决策支持部分提供资源预测和勘查开发决策的分析模型。为了实现数据顺畅流转和充分共享,除了数据中台和业务中台之外,还应进行基于微服务架构的云平台研究和建设。

3.3 支撑向勘查智能化过度的数据链构建

为了“推进智能化地质矿产调查,完善并推广地质调查智能化技术,整合一站式地质调查业务管理系统,探索智慧探矿新模式”(自然资源部,2019),需要在推进省域地矿勘查工作数字化-信息化转型的同时,根据信息系统的逻辑结构,对工作主流程进行改造,同时采用物联网、云技术和5G技术,构建天空地深一体化地矿勘查数据链(图3,4)。只有这样才能沟通各道工序、联结各个环节,形成完整的信息反馈回环,实现地质大数据的高效汇聚、调度、融合、和同化,为未来的智能化和探采一体化奠定基础。

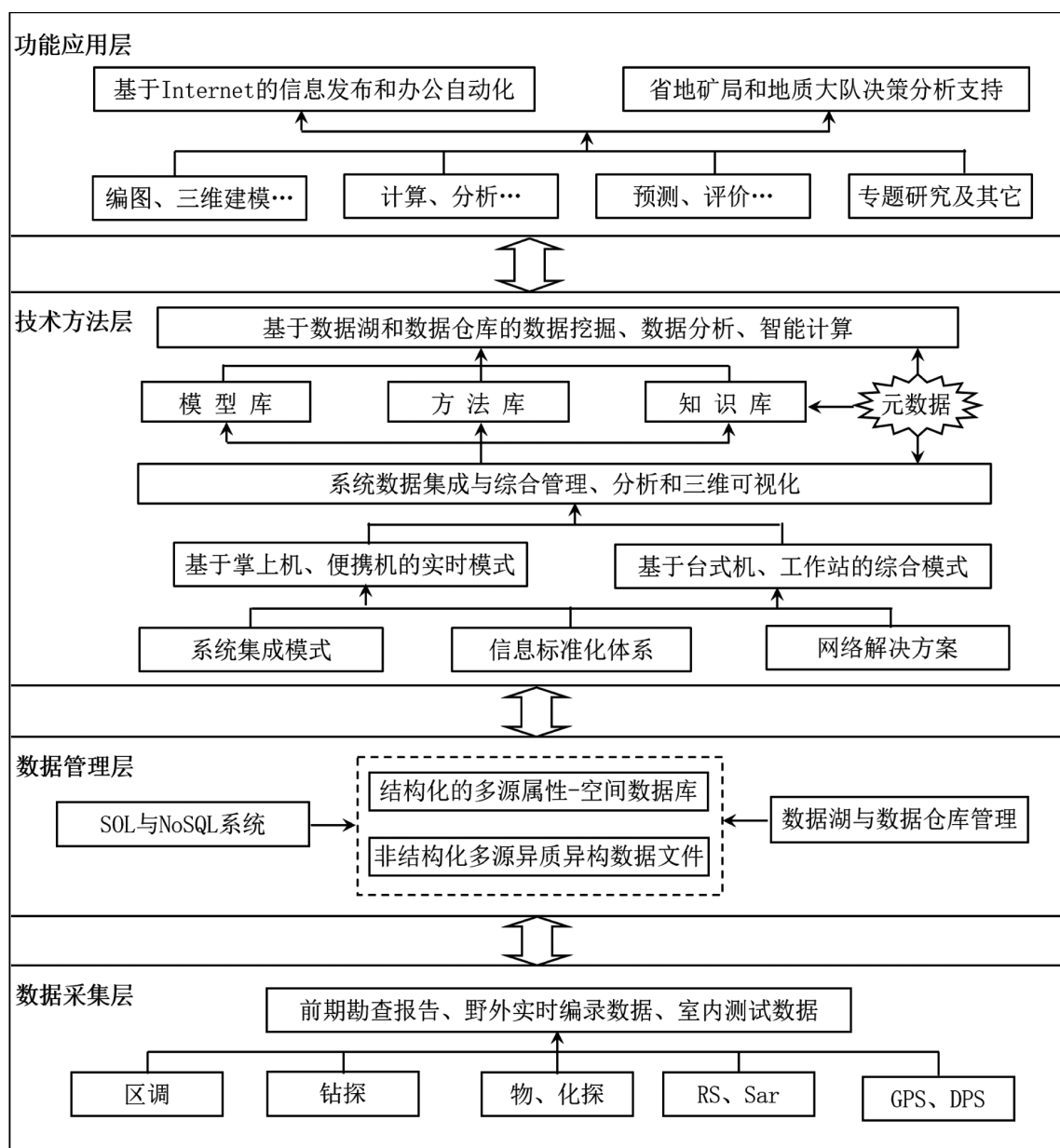


图 2 基于多 S 结合与集成的 QuantyPES 数字勘查系统集成的层次体系

Fig. 2 A hierarchical system based on a multi-S combined and integrated QuantyPES digital exploration system



图 3 地矿勘查大数据链和信息回环的形成

Fig. 3 Formation of big data chain and information loop in geological mine exploration

在这个地矿勘查大数据链和信息回环中(图4),基于问题驱动的数据采集,是野外工作的主要业务内容;基于模型驱动的数据融合,是资料综合和图件编绘的主要业务内容;基于知识驱动的数据分析,是矿床特征和控矿因素研究的主要业务内容;基于应用驱动的数据同化,是成矿作用和成矿过程模拟的主要业务内容;而基于数据驱动的数据挖掘则是成矿预测和知识创新的主要业务内容。在这样的数据链条中,各作业环节承接有序、相辅相成,将支撑地矿勘查工作的数字化转型及对智慧探矿新模式的探索(吴冲龙等,2016)。

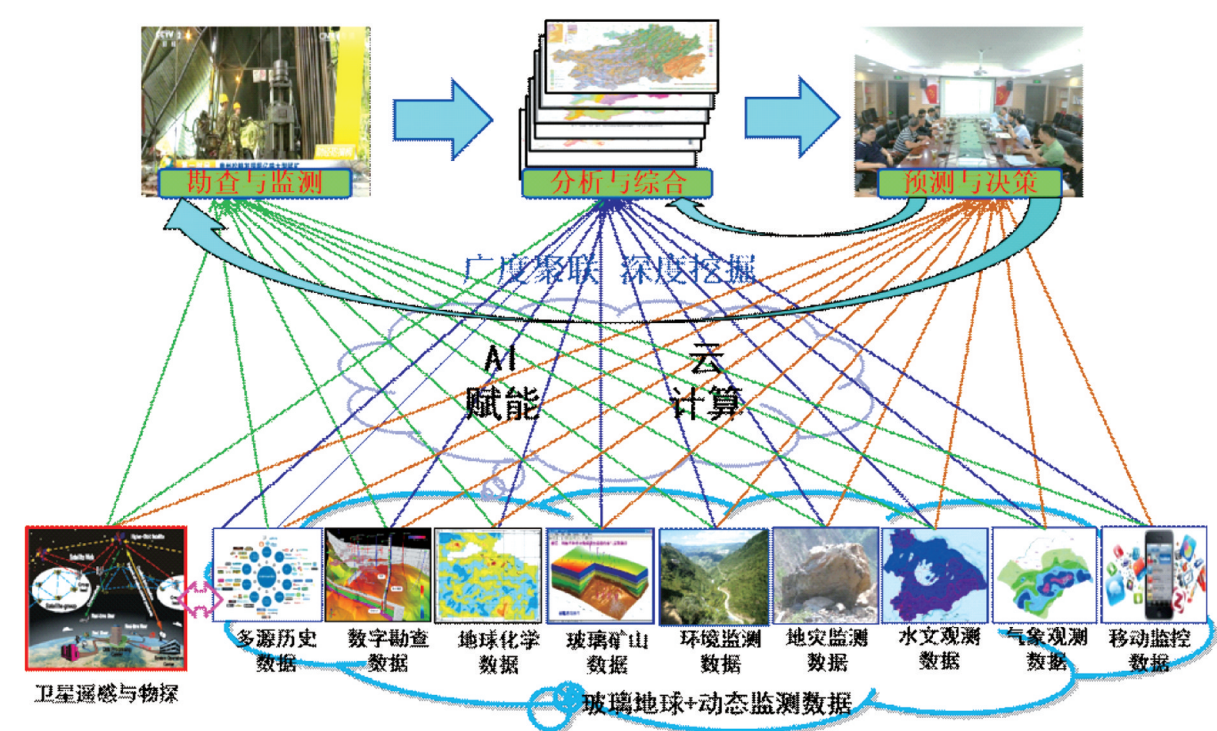


图 4 地质资源环境时空数据汇聚与大数据链组织

Fig. 4 Aggregation space and temporal data of geological resource and environment and organization of big data chain

4 数字勘查所涉及的地质信息技术

数字勘查所涉及的地质信息技术,包括数据采集、数据传输、数据管理、数据分析、数据挖掘、图件编绘、三维建模、储量估算、过程模拟、资源预测评价等。限于篇幅,本文仅对数据采集、数据挖掘、图件编绘、三维建模、储量估算和资源预测等做些介绍和探讨。

4.1 地质矿产数据的数字化采集技术

地质数据来源包括:野外露头地质观测、钻探岩心编录、地球物理勘探与遥感、地球化学勘探、室内岩矿分析测试和图形编绘。其采集方式的数字化,是实现地矿勘查数字化转型的关键一步。由于种类繁多、结构复杂,其采集方式不可能划一。

目前,各种数字化采集技术得到快速发展,其中包括数字化的物探技术、化探技术、遥感技术、测井技术、岩矿鉴定技术、化学成分测试技术,以及数字化的素描、摄影、录像、录音等多媒体技术,等等。针对野外地质露头和钻孔岩心编

录是本次贵州省重点矿产资源大精查项目的主要地质数据来源,研发并应用集成 RDBS、GIS、RS 和 GPS 于一体的平板电脑的数据采集系统(张夏林 等,2020)。这一措施,也是改变野外露头岩心编录手工作业落后面貌的第一步。随着 5G 时代的来临,人工智能技术和云服务技术将会被逐步应用于智能化的地质数据采集中去,甚至可能成为野外地质数据采集的主流技术(陈根深 等,2019)。由于硬件性能快速增强,传感器趋向多样化,测量精度不断提升,所采集的野外地质数据将会更加丰富、全面。将智能感知和识别技术、时空信息处理技术、SQLite 数据库技术和图形图像处理技术,引入野外数据采集设备中,对于提高地质资源和地质环境勘查的信息化水平,有重要的现实意义。

与此同时,需要着力进行数据采集内容的标准化、代码化,提高数据模式的通用性,利用传感器辅助编录、语音识别辅助编录、可定制字典辅助编录、界面自定义、地质分类词库匹配和语音控制记录,以及实时平、剖面图编绘的数据采集方法,能够在人机交互技术支持下,辅助进行野外地质数据的快捷、智能化采集工作,并且实现数据的现场制图及可视化表达,大大提高野外地质数据采集的效率。

4.2 大数据与勘查工作融合技术

地质数据计算机处理的内容,包括物探方法模型的正、反演计算、化探及地质编录数据的统计分析、地质特征的空间分析、矿产储量的估算、工程和水文数据分析、钻孔设计和孔斜校正等。近期,随着大数据方法的兴起,通过数据挖掘直接在大数据中发现知识的方式,成为重要的数据处理新方法(Han et al., 2012)。大数据方法以数据为中心,采用全体数据和多类数据而非抽样数据和单一数据,可突破样本空间狭小、仅凭少量随机抽样观测数据和模式进行判断的限制,更具客观性(吴冲龙等, 2019, 2020)。

4.2.1 地质大数据挖掘的任务和内容

地质大数据挖掘的基本任务,是在不同的概念层次中挖掘出各种类型的知识,并用相应的知识模型来表示,然后根据所采用的知识表示方法设计出推理模型,为不同领域、不同层次和不同需求的用户提供行之有效的辅助决策支持(李德仁等, 2013)。常用的知识表示法为:基于规则、基于逻辑、基于关系、基于模型、基于本体、面向过程、面向对象,以及语义网络、脚本和模拟,等等。简言之,就是直接从数据库、数据仓库和数据湖中发现知识,并提供科学认知和决策支持。地质大数据挖掘的主要内容,是可能发现的地质知识类型(吴冲龙等, 2016),其中包括地质特征关联规则、地质特征分布规则、地质异常规则、地质趋势变化规则、地质时空定位规则、地质时空分类规则、地质时空关联规则、地质时空演化规则等,用于进行矿产资源预测和矿产资源勘查开发决策。

4.2.2 地质数据挖掘的基本方法

地质数据挖掘的理论基础涉及:确定集合论、扩展集合论、机器学习、仿生学、可视化和文本挖掘等六类(李德仁等, 2013)。其中,利用机器学习进行地质大数据挖掘,是当前的研究热点。机器学习是一种数据驱动的模式训练过程,是人工智能的核心内容——通常用仿生学的人工神经网络(循环神经网络、递归神经网络和卷积神经网络及其组合)算法来实现深度学习,即通过构建多隐层的机器学习模型和海量的训练数据来进行学习,提升分类或预测的准确性(Hinton et al., 2012; Schmidhuber, 2015)。目前,基于机器深度学习的地质大数据挖掘研究和应用,主要集中于岩

石、矿物和岩相的识别和分类(张强等, 2015; Adrielle and Irineu, 2015),以及利用地球化学和遥感地球化学数据等进行异常信息提取和成矿预测(刘艳鹏等, 2018; 徐凯等, 2020)。此外,常用于机器学习的算法还有主成分分析法(PCA)、决策树(DT)、支持向量机(SVM)、联合/集成分类器(CC)、随机森林法(PRF)、蚁群算法(ACA)、遗传算法(GA)等。实践结果表明,基于大数据的地质知识发现是个复杂的过程,单靠数学方法和挖掘算法难以解决地质体、地质现象和地质过程认知和矿产资源预测问题,关键在于如何在认知规律的引导下进行算法建模和数据组织(吴冲龙等, 2020)。

4.2.3 地质大数据挖掘的算法建模问题

通过大数据挖掘进行知识发现,是一个多源多类异质异构跨界数据广度聚联和深度挖掘的复杂过程,即融合地利用地物化遥数据的地质认知过程。一般认为,实现知识发现的数据挖掘是一种无模型挖掘(Mayer-Svhnberger and CuKier, 2013)。实际上,无模型挖掘是指不给定目标知识模型和先验评判模型,但有两种模型是必要的,即研究领域长期以来形成的背景知识模型和数据挖掘的算法模型。前者是数据挖掘的必要知识基础,后者是数据挖掘必要的方法基础。由此而论,在开展地质大数据挖掘和知识发现之前,首先要准备背景知识模型并进行系列算法模型构建,即无模型与有模型相结合。

研究领域的背景知识模型是指由基础地质理论模型、矿床学一般理论模型、矿床基本成因模型和矿床基本预测模型;系列算法模型包括:地质对象认知模型、地质数据感知模型、地质数据挖掘模型,以及矿产资源和勘查决策计算模型,等等。其中,地质数据挖掘的算法模型,通常以研究主题为导向,按一定工作流程进行构建。以固体矿产勘查开发大数据挖掘为例,其无模型与有模型结合的工作流程如图5所示。

4.3 地矿勘查图件的机助编绘技术

应用计算机辅助设计技术来编制地质图件,既能保证质量,减少编图、制图和修编的工序和时间,还有利于图形的存贮、保管和使用,保证实现图形数据共享。国内、外在这方面都进行了许多研究和开发并取得进展,所涌现的许多应用软件进

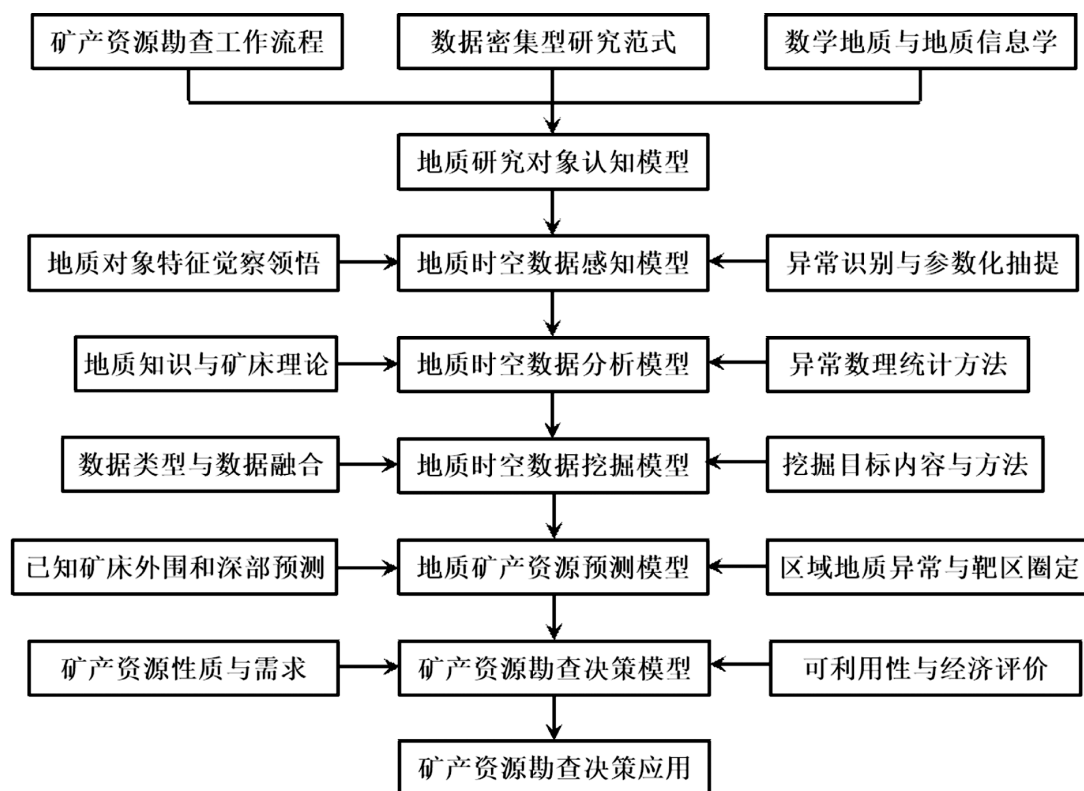


图5 无模型与有模型结合的固体矿产勘查大数据挖掘工作流程

Fig. 5 Big data mining workflow of solid mineral exploration based on the combine that no model with model

入了地矿勘查工作的主流。在这次大精查中采用的 QuantyPES 软件,所含有的主要编图模块有:钻孔(井)综合柱状图、实测地质剖面图、勘探剖面图、储量估算图、资源预测评价图、构造纲要图及各种综合地质图。在本次贵州省重点矿产资源大精查中,所采用的地矿图件计算机辅助编绘子系统,着力在若干技术的发展方面进行了研发。其一,是分专业、分矿种构建多种完善的标准图式、图例、花纹库和色标库,以满足不同专业、不同矿种的编图需求;其二,是以数据中台和业务中台为依托,提高了数据和软件的共享性;其三,是与三维图示技术结合,特别是图切剖面的制作,实现了与三维矿床地质模型的构建一体化;其四是与智能计算和机器学习技术相结合,提高地矿信息提取、转换和成图的自动化、智能化程度。

4.4 矿床三维精细全息建模技术

深埋于地下的地质体和地质现象,不同程度地存在着结构信息不全、参数信息不全、关系信息不全和演化信息不全的情况。地质学本质上是一种三维科学(Diepolder, 2011),开展多源数据融合,实施精细、全息三维可视化建模,可以在三

维虚拟地质环境中,让地质技术人员直观地理解复杂的地质结构,提高洞察力和分析判断力,深入进行矿床地质分析和成矿系统分析,有助于直观地感知和理解成矿机理和过程,构建成矿预测模型(图6)。从而可在新的高度上支撑矿产勘查信息化,有助于感知和发现隐伏矿床。

显然,开展矿床三维地质建模不是为了好看,而是为了好用,应使它成为三维可视化地质信息系统和地质大数据的最佳载体。换言之,矿床三维地质模型不仅要表达研究区精细的构造-地层格架建模,还要凝聚海量的多源多类多主题多要素属性信息,反映地质对象精细的非连续、非均质特征。它必须具备支持三维可视化表达、三维可视化分析、三维可视化设计、三维可视化仿真和三维可视化决策的能力(吴冲龙等,2011;田宜平等,2020)。这也正是开展快速、动态、精细、全息的矿床三维地质建模,被列为本次重点矿产资源大精查重要内容的原因。所谓快速,是指能够在较短时间内完成;所谓动态,是指能够随时进行局部更新而不必推到重来;所谓精细,是指能够描述地层细节及其非均质性;所谓全息,是指能够凝聚和赋存所获取的全部空间和属性特征(吴冲龙等,2019)。

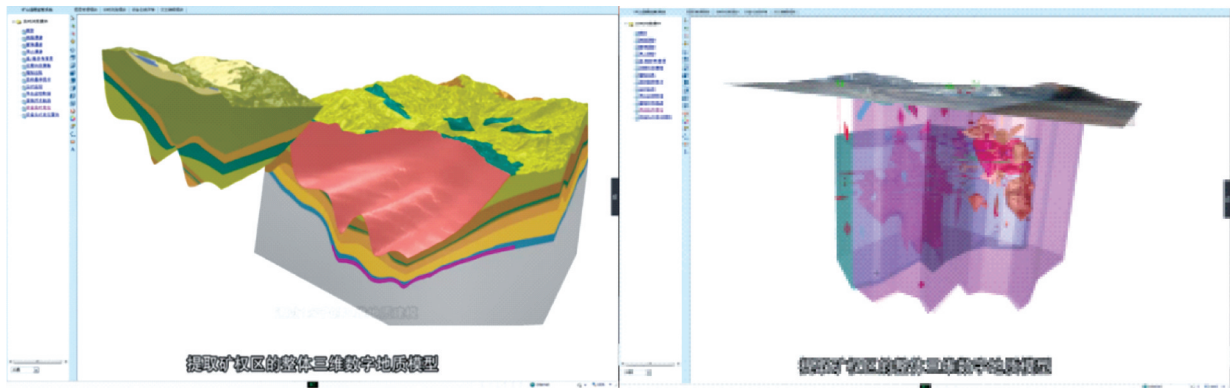


图 6 三维可视化的矿床地质模型示意

Fig. 6 Show of deposit geological model for 3 D visualization

在这次重点矿产资源大精查中,矿床三维地质建模采用 1:0.5 万的比例尺和精度进行构建。它是多尺度多要素多层级的省域“玻璃国土”的基本组分。具体构建时,采用了基于数据仓库(集市)的地下-地上、地质-地理、结构-属性一体化建模方式(吴冲龙 等,2019;张夏林 等,2020b)。在所采用的 QuantyPES 中,精细的构造-地层格架建模,采用基于地质知识驱动和系列勘查剖面拓扑推理相结合方法(何珍文,2008);而精细的非连续、非均质特征建模,采用多点克里格随机模拟方法(陈麒玉,2018)。

4.5 资源储量多方法动态估算技术

采用多方法资源储量动态估算技术,是数字勘查的重要组成部分。针对传统几何法资源储量动态估算存在的可视化及分析程度和精度较低的问题,运用三维可视化技术对其实现方式、方法进行改造,以真实的三维地质几何模型取代抽象的规则几何体,开发出符合中国资源勘查及储量分类特点的三维可视化动态估算子系统。主要模块包括:二维传统几何法储量估算、三维传统几何法储量估算和三维多种克里格储量估算。在利用各种方法进行储量估算时,均要求实现计算和编图一体化,实现各种底图绘制、岩性花纹填充、样品自动组合与标注、矿体边界交互圈定、面积及平均品位自动计算、储量自动汇总输出、储量计算相关图件及报表快速编制输出等功能。

其中,二维传统几何法储量估算模块,要实现地质块段法和剖面法两种传统估算方法,可输出符合规范的成果图件及报表;三维传统法储量估算模块,可在三维可视化环境中集地质图件编制、三维地质建模、动态储量估算于一体,又以真实的

三维地质模型取代抽象的规则几何模型,提高资源储量的估算精度和可靠性,并解决在勘查和开采进程中的储量动态估算问题(李章林 等,2020)。三维地质统计学储量估算模块,要针对不同矿床和矿体形态及空间分布特征,提供普通克里格、泛克里格、对数克里格、指示克里格等多种克里格储量估算模块,以供选择使用。对比结果表明:本储量估算子系统各个模块的储量估算结果,与传统的手工计算误差在 1% 以下,具有较高的精确性和可靠性,而且做到了方便、快捷和可视化。

本储量估算子系统的特色功能,是能够实现基于规则的通用型多金属矿产资源储量估算(图 7),能很好地解决多金属矿床的多矿石类型、

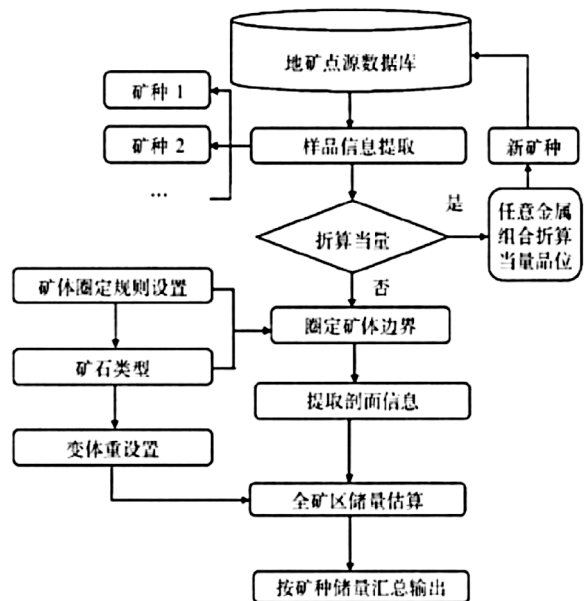


图 7 基于规则的支持多金属的矿产资源储量估算系统实现方法(陈国旭 等,2012)

Fig. 7 Implementation Method of Multi-Metal Mineral Resource Reserve Estimation System Based on Rules(Chen Guoxu et al., 2012)

变体重计算、夹石及采空区扣除等问题(陈国旭等,2012),对支持复杂多金属矿床的资源储量估算有重要的现实意义。

4.6 矿产资源人工智能预测评价技术

这是地矿勘查数字化转型的高级形态之一。由于地质对象的极端复杂性,对地质现象的识别、地质资料的分析和地质过程的认知,在很大程度上依赖专家的知识 and 经验。人工智能技术可以充分发挥专家的作用,能使一般地质人员象专家那样进行工作,从而提高找矿和勘探效果。因此,这个领域的研究一直十分活跃。经过多年的研发,涌现了一批基于已有成矿理论和成矿模式建立智能预测评价软件系统。

然而,已有成矿理论和成矿模式本身并不完善,基于这些理论和模式建立的成矿预测系统的有效性和命中率有限。大数据思路与方法的引进,使得我们有可能采用数据密集型工作方式,对所获取的全部地物化遥勘查数据进行挖掘。但仅依靠简单的数据挖掘方法,并不能完成矿产资源的智能预测,还需要借鉴地质异常分析(赵鹏大,1999)的思路,探索并解决如何从致矿地质异常→专属地质异常→综合地质异常→矿床地质异常→矿体地质异常逐步深入;以及如何从成矿可能地段→找矿可行地段→找矿有利地段→潜在资源地段→远景矿体地段逐步聚焦。也就是在大数据和第四范式支配下,如何把数据挖掘技术与地质学、矿床学、勘查学、物化探技术和数据仓库技术等紧密结合起来,采用“广度聚联”和“深度挖掘”的策略和方法,从区域到点位、从浅层到深层,从单态到多态的系统挖掘过程,再由单一参数的挖掘,转向多源多类异质异构数据的聚合、融合与挖掘。

在本次重点矿产资源大精查中,研发团队以黔东南“大塘坡式”锰矿整装勘查区为例,采用数据驱动方式把无模型和有模型结合起来,成功地进行成矿预测过程的“复盘”和深部控矿条件的追索,证明了基于大数据的成矿预测是可行的(吴冲龙等,2020)。

5 总结与展望

综上所述,贵州省数字勘查取得的初步成功,证明所采用的设计思路和解决方案切实可行,所

研发的多项关键技术应用价值显著。数字勘查与全省域玻璃国土工程、历史勘查数据抢救工程和大数据成矿预测研究,既是实现地矿勘查行业数字化转型及其与大数据深度融合的四项基础,也是地质信息科技的重要组成(吴冲龙等,2014)。

未来发展除了不断完善、优化和升级应用软件系统外,还需要进一步加强大数据资源体系建设并考虑智能化转型问题,即采用5G技术赋能,实现露头观测、岩心编录、剖面实测和矿区填图的智能化。其中包括构建矿物、岩性、岩相、沉积相、岩浆相、变质相、古生物化石、生物痕迹、结构、构造的庞大知识图谱和知识库,以及采用智能算法和机器学习方法,进行系统训练和自动计算、识别,实现野外地质现象观测、识别和测量的智慧化。

数字勘查的进一步发展,还将涉及实现信息感知的横向数据融合和纵向层次协同,因此应当兼顾探测业务与经营管理的信息化转型。前者需要建立跨领域数据与多学科知识的同层面横向融合机制,实现针对同一研究主题的数据能在多学科分析中快速流转,促进理论认识不断迭代升华。后者需要解决跨层次数据与多目标管理的协同机制,实现针对同一研究对象的数据能在多目标决策中实时流转,促进实际效益持续增量优化。因此,经营管理信息化也应当是地矿勘查数字化转型需要关注的重要内容。

在产学研结合的体制下,只要勇于实践并认真总结,定能探索并建立一套切合实际情况和需要的省域地勘工作数字化转型的理论、方法和技术体系。

[参考文献]

- 陈根深,刘军旗,何忆,等.2019.基于World Wind移动端的地质数据野外采集系统[J].计算机系统应用,28(4):96-104.
- 陈麒玉.2018.基于多点地质统计学的三维地质体随机建模方法研究[D].中国地质大学.
- 陈国旭,吴冲龙,张夏林,等.2009.支持多金属的矿产资源储量估算方法研究[J].中国矿业,18(4):99-106.
- 何珍文,吴冲龙,刘刚,等.2012.地质空间认知与多维动态建模结构研究[J].地质科技情报,31(6):46-51.
- 李德仁,王树良,李德毅.2013.空间数据挖掘理论与应用(第二版)[M].北京:科学出版社.
- 李章林,吴冲龙,张夏林,等.2020.地质科学大数据背景下的矿体动态建模方法探讨[J].地质科技通报,2020,39(4):59-68.
- 刘艳鹏,朱立新,周永章.2018.卷积神经网络及其在矿床找矿预测中的应用研究;以安徽省兆吉口铅锌矿床为例[J].岩石学报,34(11):3217-3224.

- 田宜平,吴冲龙,刘刚,等. 2020. 地质大数据可视化关键技术探讨[J]. 地质科技通报,39(4):29-36.
- 吴冲龙,刘刚,田宜平,等. 2005a. 论地质信息科学[J]. 地质科技情报,24(3):1-8.
- 吴冲龙,刘刚,田宜平,等. 2005b. 地矿勘查信息化的理论与方法问题[J]. 地球科学,30(3):359-365.
- 吴冲龙,刘刚,张夏林,等. 2016. 地质科学大数据及其利用的若干问题探讨[J]. 科学通报,61(16):1797-1807.
- 吴冲龙,张夏林,李章林,等. 2019. 固体矿产勘查信息系统[M]. 北京:科学出版社.
- 吴冲龙,刘刚,周琦等. 2020. 地质科学大数据综合应用的基本问题[J]. 地质科技通报,39(4):1-11.
- 吴冲龙,何珍文,翁正平,等. 2011. 地质数据三维可视化属性、分类和关键技术[J]. 地质通报,30:642-649.
- 吴冲龙,刘刚,田宜平,等. 2014. 地质信息科技概论[M]. 北京:科学出版社.
- 徐凯,袁良军,杨炳南,等. 2020. 伴生-次生矿物遥感数据组式挖掘与黔东北隐伏锰矿信息提取[J]. 地质科技通报,39(4):37-43.
- 张强,许少华,富宇. 2015. 基于过程神经网络的储层微观孔隙结构类型预测[J]. 化工自动化及仪表,42(8):893-897.
- 张夏林,师志龙,吴冲龙,等. 基于移动设备的野外地质大数据智能采集和可视化技术[J]. 地质科技通报,2020a,39(4):21-28.
- 张夏林,吴冲龙,周琦,等. 基于勘查大数据和数据集市的锰矿床三维地质建模[J]. 地质科技通报,2020b,39(4):12-20.
- 赵鹏大. 1999. 地质异常与成矿预测[A]. 当代矿产资源勘查评价的理论与方法[M]. 北京:地震出版社,98-106.
- 自然资源部. 2019. 自然资源部信息化建设总体方案[S]. 北京.
- Adrielle A S, Irineu A L. 2015. Artificial neural networks to support petrographic classification of carbonate-siliciclastic rocks using well logs and textural information[J]. Journal of Applied Geophysics, 117:118-125.
- Diepolder G W. 2011. German Geological Surveys: Federal-State Collaboration for 3-D Geological Modeling[C] //Berg R C, Mathers S J, Kessler H, et al. Synopsis of Current Three dimensional Geological Mapping and Modeling in Geological Survey Organizations. Illinois State Geological Survey Circular 578, 48-52.
- Han J, Kamber M, Pei J. 2012. Data mining: Concepts and techniques (3rd edition)[J]. Burlington: Morgan Kaufmann.
- Hinton G E, Deng L, Yu D, et al. 2012. Deep neural networks for acoustic modeling in speech recognition: The shared views of four research groups[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 29(6):82-97.
- Mayer-Svöhnberger V, CuKier K. 2013. Big Data: A revolution that will transform how we live, work and think[M]. New York: Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company.
- Schmidhuber J. 2015. Deep learning in neural networks: An overview[J]. Neural Networks, 261:85-117.
- Wikipedia Foundation, Inc. Data lake. https://en.wikipedia.org/wiki/Data_lake. [2018-07-16].

Digital Exploration and Digital Transformation of Geological Exploration Industry

WU Chong-long^{1,2,3}, ZHANG Xia-li^{1,2,3}, ZHOU Qi², TIAN Yi-ping^{1,2,3},
ZHANG Zhi-ting^{1,2,3}, LI Jun-jie³, LI Yan³, XU Kai^{1,2,3}

(1. Institute of Geological Information Technology, University of China, Wuhan 430074, Hubei, China;
2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones,
Ministry of Natural Resources, Guiyang, 550081, Guizhou, China; 3. Wuhan Didakundi
Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, Hubei, China)

[Abstract] In the practice of digital exploration in Guizhou Province, the design ideas and solutions suitable for the digital transformation are adopted, and many key technologies with practical application value are developed, and the idea of constructing the data chain is proposed. Theoretical research and Practice results show that digital exploration, the provincial glass land engineering, historical exploration data rescue engineering and big data Mineralization prediction research are the four bases for realizing the digital transformation of geological exploration industry and its deep integration with big data. In the future development, it is necessary to further consider the intelligent transformation based on 5G enabling, and take into account the problem of management informatization. The combination system of industry, university and research is the guarantee to promote the digital transformation of provincial geological prospecting work.

[Key Words] Digital exploration; Digital transformation; Informatization; Intelligentization, Glass land; Big data, 5G enabling

华南南华纪武陵锰矿成矿带松桃李家湾-高地-道坨地堑盆地 研究新进展和潜力预测

沈红钱^{1,2,3}, 张 遂^{1,2,3}, 曾 飞¹, 谢小峰^{1,2,3}, 杨炳南^{1,2,3},
谢兴友^{1,2,3}, 蔡国荣¹, 沈小庆^{1,2}, 朱 璞¹, 姚希财^{1,2,3}, 吴应值¹, 杨 俊¹

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300; 2. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术
创新中心, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队, 贵州 铜仁 554300)

[摘 要] 华南南华纪武陵锰矿成矿带松桃李家湾-高地-道坨地堑盆地控制形成了系列著名的大型-超大型锰矿床。本文依托 2020—2021 年实施的贵州松桃高地超大型锰矿床大精查(勘探)项目最新成果, 运用锰矿气液喷溢沉积成矿理论与隐伏锰矿找矿预测技术体系, 对该地堑中的含锰岩系、(富)锰矿体厚度、矿石品位等变化规律及气液喷溢矿石相特征进行综合研究, 进一步确定该地堑中呈北东 70° 方向展布的气液喷溢沉积中心, 由里往外依次形成中心相、过渡相、边缘相三个矿石相, 富锰矿体均分布在中心相区。中心相面积达 5.5 km², 说明锰矿大规模喷溢成矿作用强烈。预测该地堑矿权空白区资源量可能还有 2 亿吨, 以致整个地堑盆地锰矿总资源量可达 5 亿吨, 是一个隐伏的世界级巨型锰矿田。

[关键词] 南华纪; 李家湾-高地-道坨; 地堑盆地; 潜力预测; 贵州

[中图分类号] P618.32; P542.3⁺2 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2021)02-0129-10

1 引言

黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿床具有世界上独特的成矿环境和机制(张夏林等, 2018), 是一种新的矿床类型, 即“内生外成”气液喷溢沉积型锰矿床(周琦等, 2012, 2013, 2018, 2019), 形成于新元古代 Rodinia 超大陆裂解背景下的南华裂谷盆地(杜远生等, 2015), 扬子地块与华夏地块分离导致南华裂谷盆地形成, 南华纪早期, 南华裂谷盆地沿秀山、黔阳和金兰寺等壳-幔韧性剪切带再次发生裂陷, 分别形成三个Ⅱ级构造单元, 即武陵次级裂谷盆地、雪峰次级裂谷盆地和其间的天柱-怀化地垒等(周琦等, 2016a;

2017)。武陵次级裂谷盆地控制形成了华南武陵锰矿成矿带, 内部由 3 个Ⅲ级地堑、2 个Ⅲ级地垒和至少 16 个Ⅳ级地堑组成(周琦等, 2016b)。其中, 松桃-古丈Ⅲ级地堑是武陵次级裂谷盆地的裂陷中心, 锰矿成矿作用强烈, 形成的锰矿资源量巨大(张遂等, 2015, 2018), 已成为世界级锰矿资源富集区之一。Ⅳ级地堑则控制形成大型-超大型锰矿床, 而在地垒区则无锰矿体分布。控制南华纪地堑盆地和锰矿形成分布的同沉积断层均为北东东向(袁良军等, 2016), 与地表燕山期北东向构造相差 40° 左右(谢小峰, 2018; 袁良军等, 2019)。松桃高地、道坨超大型锰矿床和松桃杨立掌、李家湾、大路等锰矿床均集中分布于南华纪李家湾-高地-道坨Ⅳ级含锰地堑盆地。

[收稿日期] 2021-01-26 [修回日期] 2021-04-11

[基金项目] 黔科合平台人才[2018]5618、黔科合平台人才[2020]6019、黔地矿科合[2020]1 号、中地调研合同[2020]第 284 号、黔地矿科合[2020]03 号、黔科合支撑[2019]2868、黔地矿科合[2019]2 号、黔地矿科合[2019]06 号联合资助。

[作者简介] 沈红钱(1988—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事矿产勘查工作。Email: 1024583324@qq.com。

[通讯作者] 张遂(1968—), 男, 研究员, 主要从事矿产勘查及找矿预测工作。Email: zhangsui85697503@163.com。

本次大精查(勘探)的贵州松桃高地(富)锰矿床,位于松桃县城南西 260° 方向,平距约37 km,辖属冷水溪镇、乌罗镇管辖。2014—2018年,贵州省地矿局103地质大队锰矿资源预测评价科技创新人才团队,运用团队创立的锰矿气液喷溢沉积成矿原创理论和隐伏新类型锰矿找矿勘查原创技术体系,通过贵州省铜仁松桃国家整装勘查区转化运用实践,成功发现的又一隐伏超大型(富)锰矿床。是该整装勘查区继普觉、道坨、桃子坪等三个隐伏超大型锰矿床之后找到的又一个隐伏超大型锰矿床,2018年贵州省地矿局103地质大队详查提交资源量1.61亿吨,其中富锰矿石资源量0.72亿吨,为亚洲第二大的锰矿床,同时也是我国首个特大型富锰矿床(袁良军等;2018)。为尽快将该矿产开发利用,贵州省决定对该矿进行大精查(勘探)。本文在综合分析该矿床勘探最新成果的基础上,结合道坨、李家湾、大路等锰矿床资料,介绍南华纪武陵锰矿成矿带松桃李家湾—道坨—高地地堑盆地研究新进展,并对该地堑盆地锰矿资源潜力进行预测,为该地区下步锰矿找矿工作部署提供依据。

2 地质特征

2.1 地层

研究区地层由老至新地层层序有青白口系清水江组(Qbq)、南华系两界河组(Nh_2l)、铁丝坳组(Nh_2t)、大塘坡组(Nh_2d)、南沱组(Nh_3n)、震旦系陡山沱组(Z_1d)、老堡组(Z_1l)、寒武系牛蹄塘组(E_{1-2n})、九门冲组(E_{2jm})、变马冲组(E_{2b})、杷榔组(E_{2p})、清虚洞组(E_{2q})、高台组(E_{3g})、石冷水组(E_{3s})、娄山关组(E_{3-4ls})、奥陶系桐梓组(O_1t)、红花园组(O_1h)、大湾组(O_{1-2d})及第四系(Q)等(图1)。下面主要介绍与锰矿相关的含锰岩系特征。

含锰岩系即大塘坡组第一段(Nh_2d^1),锰矿赋存于含锰岩系下部。含锰岩系全隐伏于地下,厚度较大,以ZK2903、ZK2701、ZK2905为中心向四周逐渐变薄,总体沿北东往南西变薄的趋势,与上下伏地层整合接触,厚度23.25~71.59 m。其岩性组合特征由上往下叙述如下:

上覆地层:大塘坡组第二段(Nh_2d^2):深灰色粉砂质

页岩,页理清晰,发育顺层分布的粉砂质平行纹层,纹层宽度0.5~4 mm,由上往下碳质含量逐渐增多。

⑭黑色炭质页岩,页理清晰,断口见炭质镜面光泽,发育顺层分布的黄铁矿及方解石细脉。厚8.32~31.60 m

⑬灰绿色薄层粘土岩,可见顺层分布的星点状、颗粒状黄铁矿。厚0.02~0.11 m

⑫黑色碳质页岩,岩石中发育顺层分布的黄铁矿条带,断口处可见光滑碳质镜面。厚4.41~27.21 m

⑪灰色含黄铁矿粘土岩,发育细线状黄铁矿细脉及颗粒状黄铁矿晶体。厚0.03~0.18 m

⑩黑色炭质页岩,页理清晰,断口见炭质镜面光泽,发育顺层分布的黄铁矿细脉,脉宽1~10 mm。厚5.27~26.45 m

⑨钢灰色条带状菱锰矿,多数钻孔中夹1~3层厚0.29~1.81 m的黑色含锰碳质页岩,不构成工业矿体,仅少数钻孔见厚0.53~1.36 m菱锰矿矿体,且分布不连续,距离下部主矿体较远。该层菱锰矿总体无工业利用价值。厚0.52~3.32 m

⑧黑色碳质页岩,页理清晰,部分钻孔中该层底部见灰色凝灰质粘土岩,厚度0.08~0.72 m,该层凝灰岩区域上不连续,无对比性,分布无规律,呈透镜状分布。厚0.33~3.02 m

⑦钢灰色块状菱锰矿,断口面见金属光泽,见杂乱分布的白色石英细脉,局部钻孔中夹黑色碳质页岩,厚度0.11~1.16 m。厚0.56~5.89 m

⑥钢灰色气泡状菱锰矿,断口见金属光泽,气泡多呈椭圆状,长轴方向顺层理分布,气泡中充填黑色沥青及黄褐色黄铁矿,气泡边缘被白色玉髓包裹,气泡大小0.5×1.0 mm~6.0×12.0 mm,发育网状分布的石英细脉,个别钻孔中夹厚度0.32~2.50 m的块状菱锰矿。厚0.79~10.85 m

⑤黑色含锰碳质页岩,页理清晰,发育星点状黄铁矿。厚0.31~2.41 m

④钢灰色气泡状菱锰矿,断口见金属光泽,发育黄豆大小椭圆状气泡,长轴方向近于水平排列,气泡大小0.5×1.0 mm~7.0×12.0 mm,局部钻孔中夹厚度0.66~2.49 m的块状菱锰矿。厚0.42~4.71 m

③黑色含锰碳质页岩,页理清晰,发育细线状、断线状黄铁矿细脉。厚0.30~2.90 m

②钢灰色块状菱锰矿,断口发育金属光泽,个别钻孔中夹厚度0.17~2.44 m的黑色碳质页岩。厚0.69~4.69 m

①黑色碳质页岩,页理清晰,发育顺层分布的细线状、星点状黄铁矿。厚0~2.61 m

下伏地层:铁丝坳组(Nh_2t):灰色块状含砾杂砂岩,上部偶夹黑色碳质页岩,局部见0.10~1.32 m条带状、块状及气泡状菱锰矿。

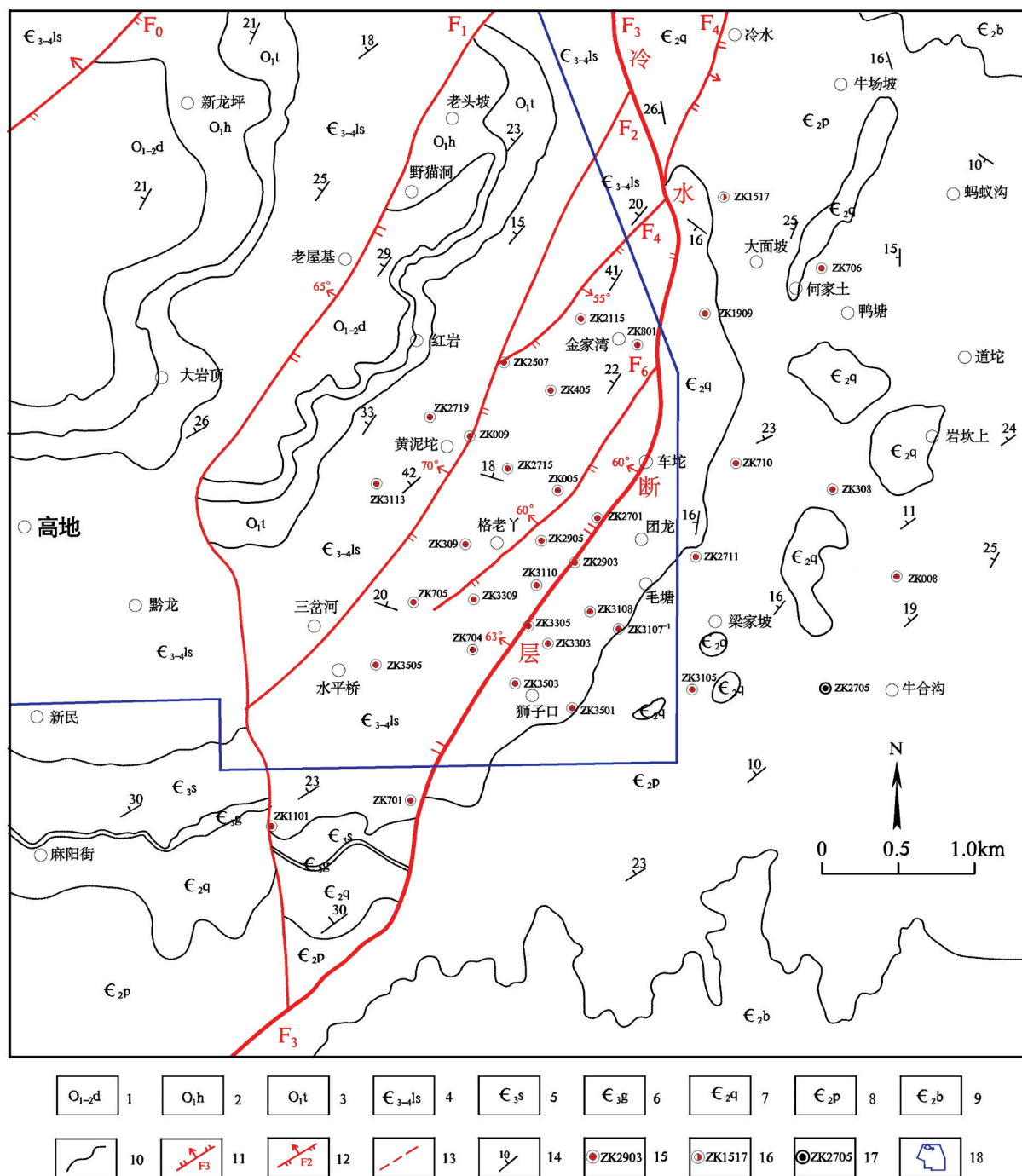


Fig. 1 Geological sketch of Songtao Manganese Deposit, Guizhou Province

1—大湾组;2—花园组;3—桐梓组;4—娄山关组;5—石冷水组;6—高台组;7—清虚洞组;8—杷榔组;9—变马冲组;10—地质界线;11—正断层;12—逆断层;13—性质不明断层;14—地层产状;15—见矿钻孔及编号;16—见矿化钻孔及编号;17—未见矿钻孔及编号;18—高地锰矿探矿权范围

2.2 构造

研究区大地构造单元位于上扬子陆块、鄂渝湘黔前陆褶断带,全国 26 个重要成矿区带中的上扬子东缘成矿带(肖克炎等,2016)。区域构造上位于梵净山穹状背斜北东侧,以一系列北北东、北

东向断裂、褶曲为主的构造格架。主要褶皱构造有猴子坳向斜,区域性断裂有三阳断层、杨立掌断层、木耳断层及冷水断层等。研究区位于区域性木耳断裂北东侧,梵净山穹状背斜北东部,猴子坳向斜南东翼。主体为一单斜岩层,总体倾向北西,倾角 $16^{\circ} \sim 26^{\circ}$ (图 1)。区内主要为燕山期构造,

断层断距小、延深浅,对区内矿体无影响,仅 F_3 断距大且深,(谢小峰 等,2018)认为 F_3 必然切断锰矿体,造成锰矿体的不连续;张遂等(2020)认为

F_3 犁式正断层上陡下缓,延伸至大塘坡组粉砂质页岩软弱地层后尖灭,其未对锰矿体造成破坏。矿区主要构造特征如下(见表 1)。

表 1 松桃李家湾-高地-道坨锰矿区构造特征简表

Table 1 Brief table of structural characteristics of Songtao Lijiawan-Gaodi-Daotuo manganese mining area

构造名称及编号	构造特征简述
冷水断层(F_3)	延伸数百公里,走向北东,倾向北西,倾角上陡下缓,为 $35^{\circ}\sim 69^{\circ}$,断距中上部大,达 1 000 m 以上,往深部逐渐变小,为 50~500 m,剖面上表现为犁式正断层特征。
红沙井断层(F_0)	延伸长 4 km,走向北东 30° ,倾向北西,倾角 65° 左右,断距 10~50 m,为逆断层。
老屋基断层(F_1)	延伸长 5 km,走向北东 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$,倾向北西,倾角 $65^{\circ}\sim 73^{\circ}$,为逆断层。
黄泥洞断层(F_2)	延伸长 4 km,走向北东 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$,倾向北西,倾角 $55^{\circ}\sim 70^{\circ}$,为逆断层。
道岔断层(F_4)	延伸长 1.5 km,走向北东 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$,倾向南东,倾角 55° ,断距 30~50 m,为正断层。
格老丫断层(F_6)	延伸长 2.3 km,走向北东 $33^{\circ}\sim 50^{\circ}$,倾向北西,倾角 60° ,断距 20~50 m,为逆断层。

3 含锰地堑特征

3.1 含锰岩系厚度变化规律

(1)南东至北西方向(地堑短轴方向),含锰岩系厚度呈由薄变厚再变薄的变化规律(图 2)。各钻孔的含锰岩系厚度分别为:最南东侧的 ZK2705 (15.08 m)~ ZK3105 (35.24 m)~ ZK3107⁻¹ (43.53 m)~ ZK3108 (53.88 m)~ ZK2701 (71.59 m),厚度达到最大值,即为高地含锰地堑中心位置;继续往北西方向逐渐减薄 ZK2715 (66.01 m)~ ZK009 (53.75 m)~ ZK2719 (50.06 m),最靠近北西侧钻孔中的含锰岩系继续往北西方向延伸。含锰岩系的最大厚度分布区位于 ZK2903、ZK2701、ZK2905 即团龙附近一带,为高地含锰地堑的沉积中心位置,从南东往北西方向含锰岩系的厚度变化规律反映地堑盆地的沉积特征。

(2)南西至北东方向(地堑长轴方向):含锰岩系厚度同样具有由薄逐渐变厚再变薄的变化规律(图 2)。各钻孔的含锰岩系厚度分别为:南西侧王家坡矿区的 ZK1101 (18.12 m)~ ZK701 (28.98 m)~ ZK3505 (38.94 m)~ ZK704 (43.73 m)~ ZK3309 (50.11 m)~ ZK3110 (58.11 m)~ ZK2903 (70.63 m)~ ZK2701 (71.59 m),厚度达到最大值,即地堑的高值沉降中心位置;继续往北东方向开始逐渐减薄 ZK403 (52.35 m)~ ZK801 (45.60 m)~ 道坨矿区 ZK706 (38.74 m)。以 ZK2903、ZK2905、ZK2701 附近一带为地堑沉降中心,沿南西和北东方向含锰岩系厚度均逐渐变薄,

从南西往北东方向含锰岩系的厚度变化规律同样反映地堑盆地的沉积特征。

3.2 锰矿体厚度变化规律

(1)南东往北西方向(地堑短轴方向),菱锰矿体的厚度变化规律与含锰岩系厚度变化规律一致,同样具有由薄变厚、再由厚变薄的变化规律(图 3)。各钻孔的矿体厚度分别为:最靠近南东侧的 ZK2705 未见菱锰矿体~ ZK3105 (4.51 m)~ ZK3107⁻¹ (4.62 m)~ ZK3108 (8.88 m)~ ZK3309 (9.71 m)~ ZK2903 (22.10 m),达到该地堑盆地锰矿体厚度最大值;继续往北西方向矿体厚度开始逐渐减薄 ZK2905 (16.01 m)~ ZK005 (14.22 m)~ ZK2715 (13.90 m)~ ZK009 (12.18 m)~ ZK2719 (7.07 m),最靠近北西侧钻孔中的矿体继续往北西方向延伸。以 ZK2903 为矿体厚度沉积中心,沿北西和南东方向矿体厚度均逐渐变薄,矿体倾角南东缓 ($5^{\circ}\sim 12^{\circ}$),北西部相对较陡 ($15^{\circ}\sim 23^{\circ}$)。矿体平均倾角 19° 。从南东往北西方向矿体厚度变化规律同样反映地堑盆地的沉积特征,大厚度菱锰矿体集中分布在 ZK005、ZK2905、ZK2903 孔附近一带,为该地堑盆地的锰矿喷溢沉积中心。

(2)南西往北东方向(地堑长轴方向):菱锰矿体厚度变化规律与含锰岩系变化规律一致,同样具有由薄逐渐变厚、再变薄的变化规律(图 3),各钻孔的矿体厚度分别为:位于最南西侧王家坡矿区的 ZK1101 (1.90 m)~ ZK3505 (8.00 m)~ ZK705 (8.36 m)~ ZK3309 (9.94 m)~ ZK3110 (11.35 m)~ ZK2903 (22.10 m),达到该地堑盆地锰矿体厚度最大值,即为矿体厚度的高值沉降中

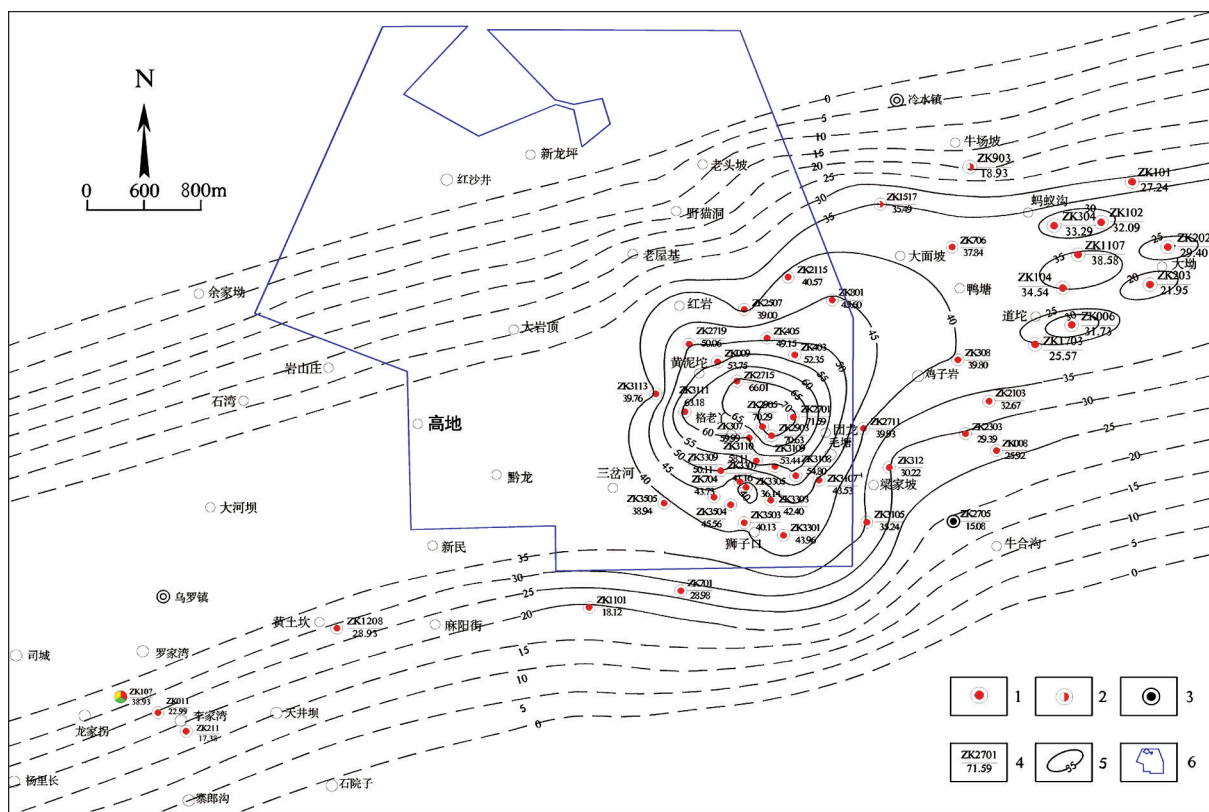


图2 松桃李家湾-高地-道坨南华纪地堑含锰岩系厚度等值线图

Fig. 2 The thickness contour map of the manganese layer in Lijiawan-Gaodi-Daotuo Graben, Songtao area

1—见矿钻孔;2—见矿化钻孔;3—未见矿钻孔;4—钻孔编号/含锰岩系厚度(m);5—含锰岩系厚度等值线;6—高地锰矿探矿权范围

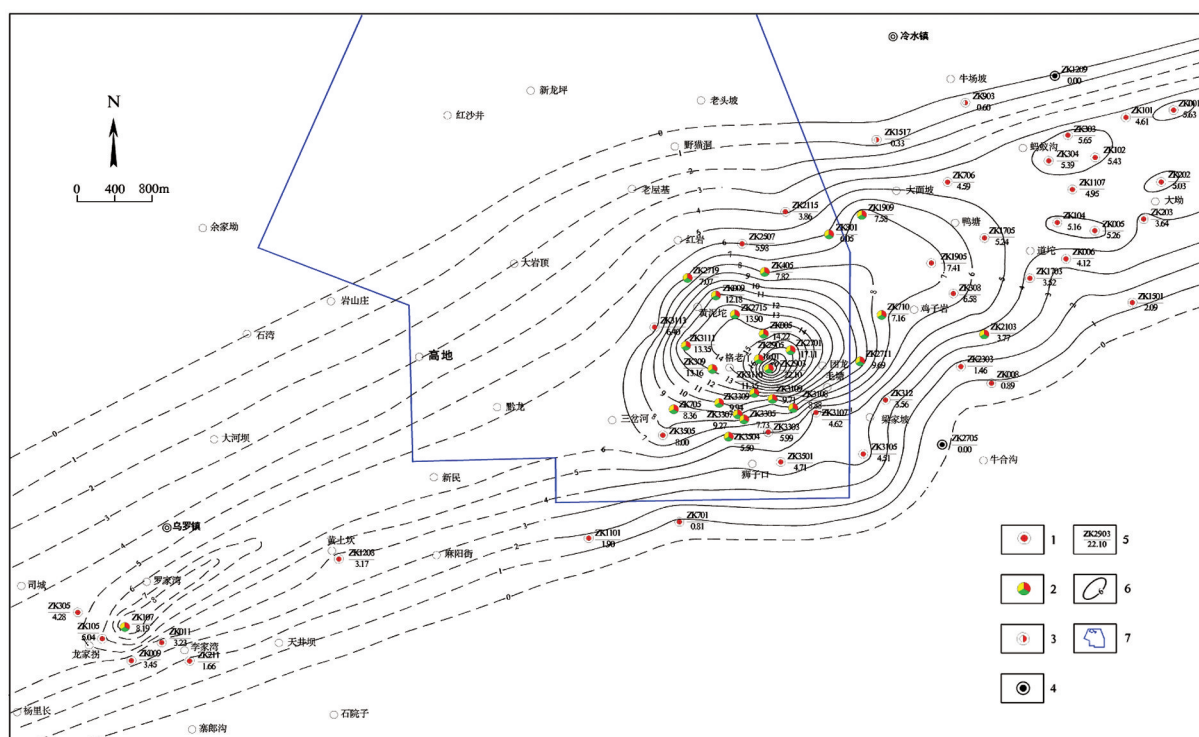


图 3 松桃李家湾-高地-道坨南华纪地堑锰矿体厚度等值线图

Fig. 3 The thickness contour map of the manganese ores in Lijiawan-Gaodi-Daotuo Graben, Songtao area

1—见矿钻孔;2—见气泡状富菱锰矿钻孔;3—见矿化钻孔;4—未见矿钻孔;5—钻孔编号/矿体厚度(m);6—矿体厚度等值线;7—高地探矿权范围

心;继续往北东方向矿体厚度开始逐渐减薄 ZK2701(17.11 m)~道坨矿区 ZK710(7.16 m)~ZK308(6.58 m)~ZK1705(5.24 m),最靠近北东侧钻孔中的矿体还继续往北东方向延伸。以 ZK2903 为主体沉降中心,沿南西和北东地堑长轴方向矿体厚度均逐渐变薄,从南西往北东方向矿体厚度变化情况同样可以反映地堑盆地的沉积特征,大厚度锰矿体集中分布在 ZK2903、ZK2701 孔附近一带,为该地堑盆地中锰矿气液喷溢的沉积中心。

3.3 富锰矿体厚度变化规律

菱锰矿矿体中具块状构造夹被沥青充填的气泡状构造的矿石,其 Mn 品位均大于 25%,即富菱锰矿石。富锰矿体与含锰岩系、锰矿体呈正相关关系,均是以 ZK2903 为中心向四周逐渐变薄,处于高地地堑盆地中心(图 4)。富锰矿产于锰矿体中部,无论走向上、倾向上均以上、下两层富锰矿的形式出现,间夹贫锰矿或少量碳质页岩,与气泡状菱锰矿的分布基本一致。

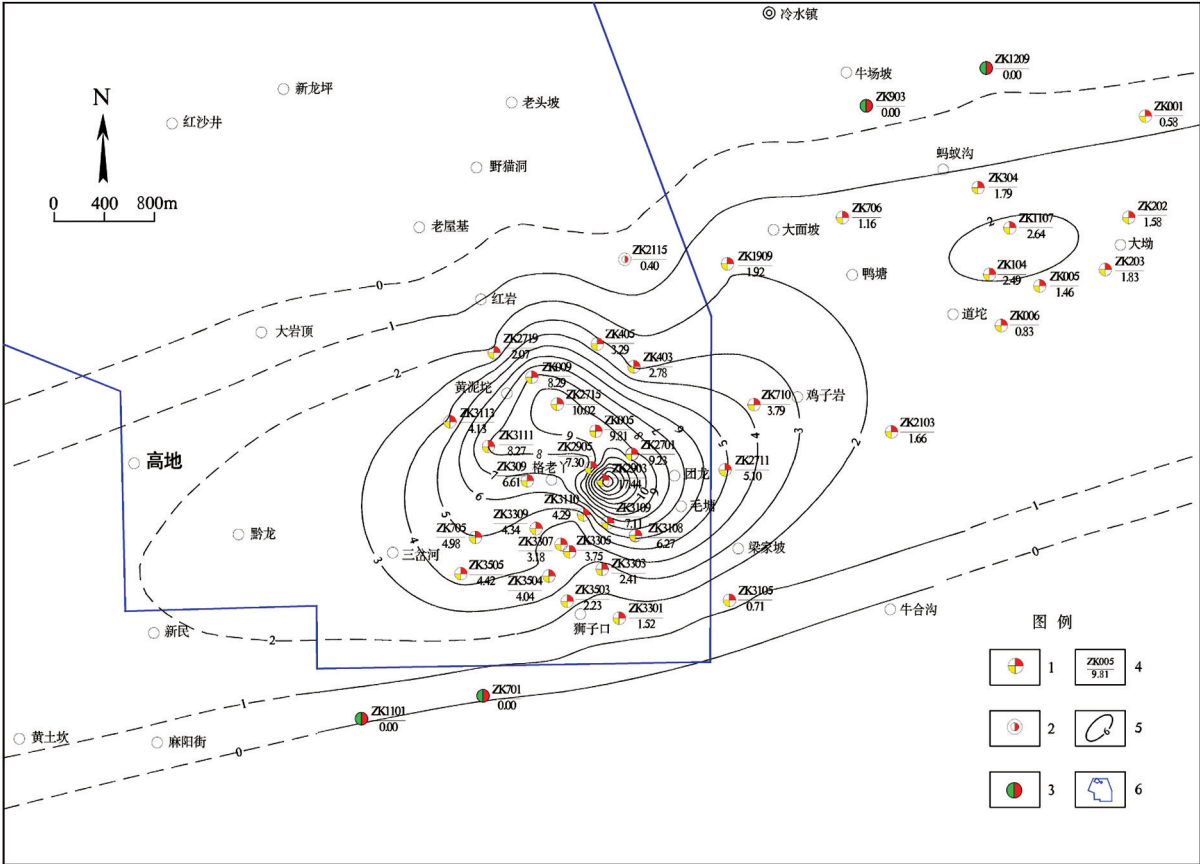


图 4 松桃李家湾-高地-道坨南华纪地堑富锰矿体厚度等值线图

Fig. 4 The thickness contour map of the manganese-rich ores in Lijiawan-Gaodi-Daotuo Graben, Songtao

1—见富锰矿体钻孔;2—见富锰矿化钻孔;3—未见富锰矿体钻孔;4—钻孔编号/富锰矿体厚度(m);5—富锰矿体厚度等值线;6—高地探矿权范围

(1)南东往北西方向(地堑短轴方向),富锰矿体厚度变化规律与含锰岩系厚度、锰矿体变化规律一致,同样具有由薄变厚、再由厚变薄的变化规律(图 4)。沿南东到北西方向,各钻孔的富锰矿体厚度分别为:ZK3105(0.71 m)~ZK3107-1(1.90 m)~ZK3108(6.27 m)~ZK3109(7.11 m)~ZK3110(4.29 m)~ZK2903(17.11 m)~ZK005(9.81 m)~ZK2715(10.02 m)~ZK009(8.29 m)~ZK2719(2.07 m),以 ZK2903 为富锰矿体喷溢

沉积中心。

(2)南西往北东方向(地堑长轴方向):富锰矿体厚度变化规律与含锰岩系、锰矿体变化规律一致,同样具有由薄逐渐变厚、再变薄的变化规律(图 4)。沿南西到北东方向,各钻孔的富锰矿体厚度分别为:ZK1101(0 m)~ZK3505(4.42 m)~ZK705(4.98 m)~ZK309(6.61 m)~ZK2903(17.44 m)~ZK2701(9.23 m)~ZK710(3.79 m)~ZK2103(1.66 m),同样以 ZK2903 为富锰矿体

喷溢沉积中心。

3.4 锰矿体品位变化规律

通过对高品位的富菱锰矿石和发育气泡状构造菱锰矿石的钻孔进行空间分布位置统计分析,发现富菱锰矿石和气泡状构造菱锰矿石均集中分布在该地堇含锰岩系厚度与矿体厚度高值区,以ZK2903、ZK2701一带为矿石品位高值区,沿地堇的短轴南东到北西方向,各钻孔的菱锰矿品位分别为:ZK2705(未见矿)~ZK3105(18.59%)~ZK3107-1(20.47%)~ZK3108(23.09%)~ZK3109(22.94%)~ZK2903(25.06%)~ZK2715(24.14%)~ZK009(23.62%)~ZK2719(22.32%)。以ZK2903为高品位矿石沉积中心,向四周矿石品位逐渐降低。通过对比高地地堇南东至北西方向矿体厚度、含锰岩系厚度及矿石品位三者关系曲线叠合图,发现含锰岩系的厚度、矿体的厚度及矿石的品位三者曲线变化趋势基本一致,从南东至北西方向三者逐渐递增,到ZK2903三者均达到变化最大值,之后开始逐渐减小的总体趋势。

根据钻探单工程采样分析结果,富锰矿单件样品Mn品位25.00%~33.11%,平均28.27%;工程平均Mn品位25.08%~27.79%,平均25.80%;按样品分析结果统计,锰品位最大频率区间在大于25%的富锰矿体,其频率占29%,其次为20%~25%,其频率占28%,15%~20%,其频率占27%,10%~15%,其频率占16%,矿区锰矿石Mn品位大于20%的矿石,其频率占57%,矿石品位总体偏富。

综上所述,在高地成锰地堇中,含锰岩系厚度、菱锰矿体厚度以及菱锰矿体品位三者的变化规律在空间位置上大致重合,从地堇中心到地堇边缘,菱锰矿体厚度逐渐变薄,含锰岩系沉积厚度逐渐减薄,锰矿体品位逐渐降低,三者的变化规律一致,呈正相关性(图5),同时反映三者受相同的同沉积断层控制。气液喷溢口严格控制锰矿矿体的分布,越靠近喷溢口的位置,喷溢沉积成矿作用强烈,矿体厚度越厚、品位越富,从地堇中心往地堇边缘,含锰岩系厚度逐渐减薄,菱锰矿体层数减少,单层厚度变薄,菱锰矿体的品位逐渐贫化,直至尖灭。

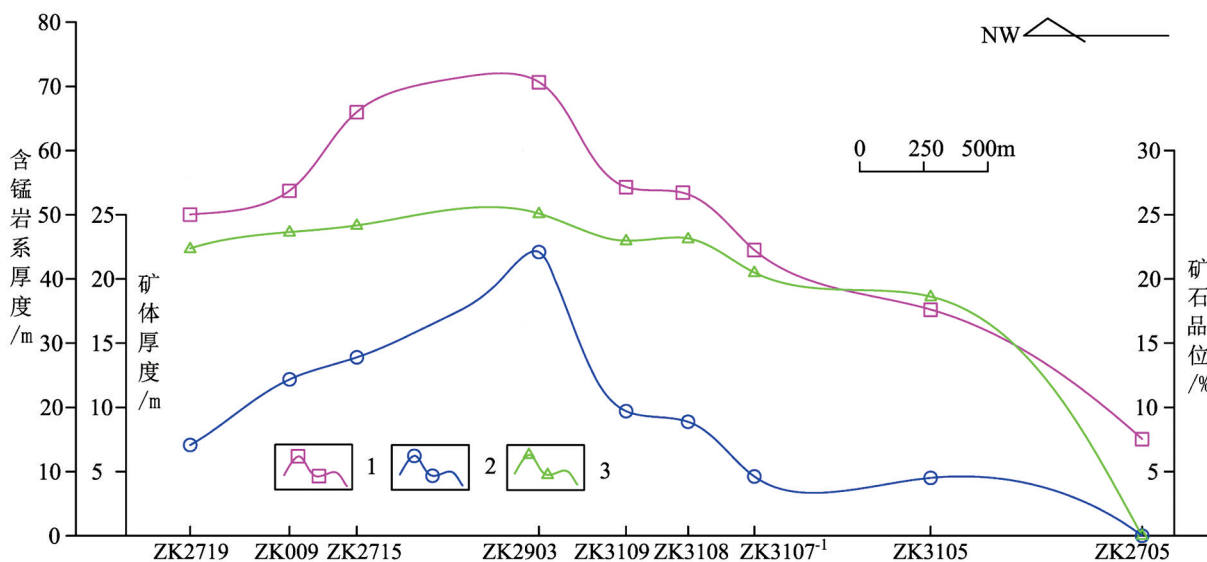


图5 松桃李家湾-高地-道坨南华纪地堇矿体、含锰岩系厚度及矿石品位三者关系曲线图

Fig. 5 The relation graph of the manganese ores, manganese layer thickness and ore grade in Lijiawan-Gaodi-Daotuo Graben, Songtao area

1—含锰岩系厚度曲线;2—矿体厚度曲线;3—矿石品位曲线

3.5 气液喷溢矿石相特征

根据周琦等建立的南华纪锰矿气液喷溢沉积型锰矿床成矿模式(周琦等,2016a,2017),气液喷溢成矿过程中依次形成中心相、过渡相、边缘相三个矿石相,中心相特征显示为地堇喷溢口位置,

喷溢口即深部含锰气液沿同生断裂上升到地堇中心喷溢沉积成矿作用最强烈的区域(刘雨等,2015),具有独特的气液喷溢沉积构造,以喷溢口为中心,向四周菱锰矿体厚度逐渐变薄、尖灭,矿石品位逐渐变低。其喷溢口是该类型锰矿床的中心,亦是矿体厚度最大、含锰岩系所含矿体自然层

数最多以及矿石品位最富的区域。根据李家湾—高地—道坨地堇盆地中含锰岩系、(富)锰矿体以及矿石品位等变化规律,运用锰矿气液喷溢沉积成矿理论与隐伏锰矿找矿预测技术体系,准确圈

定李家湾—高地—道坨成锰地堇盆地长轴方向呈北东70°方向展布,地堇长大于10 km,宽约3.0~5.0 km,其地堇气液喷溢沉积成矿作用形成的矿石相特征如下(图6)。

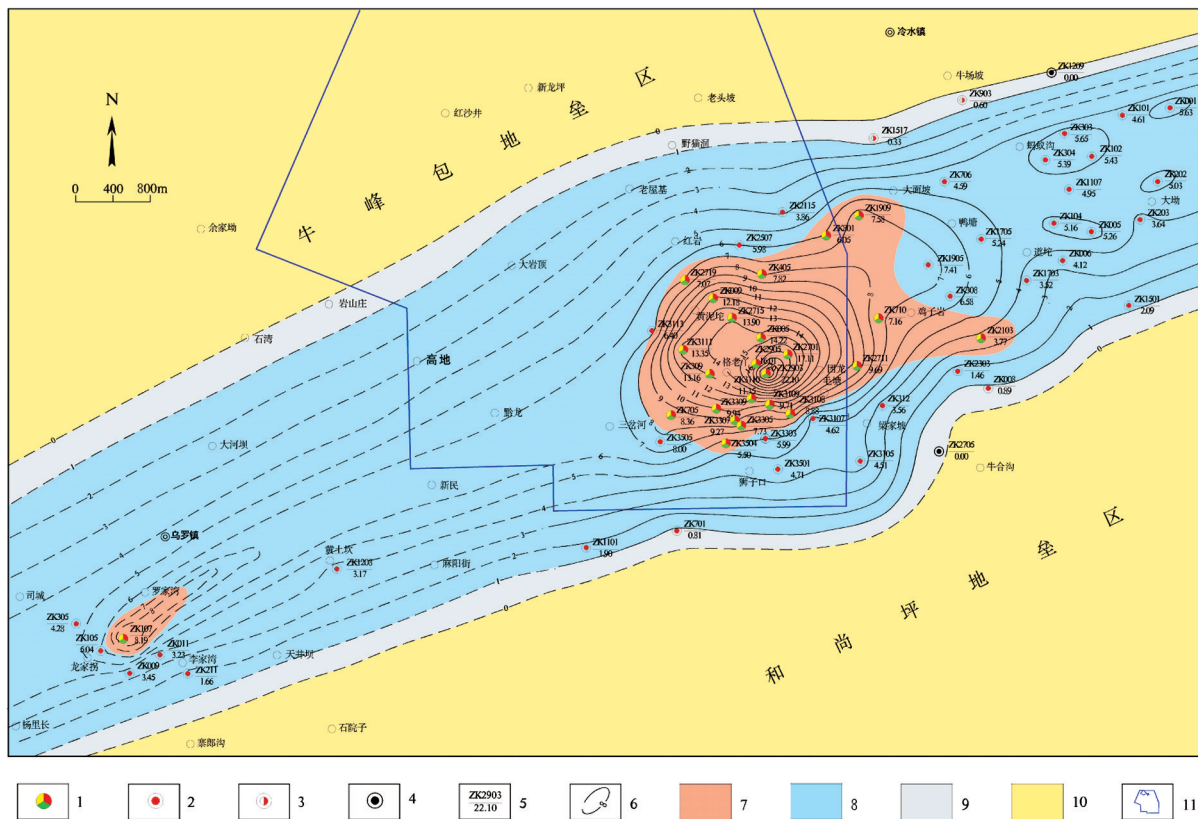


图6 松桃李家湾—高地—道坨南华纪含锰地堇与找矿预测图

Fig. 6 The manganese graben and prospecting forecast map of the Lijiaowan-Gaodi-Daotuo Graben, Songtao area

1—见气泡状富菱锰矿钻孔;2—见矿钻孔;3—见矿化钻孔;4—未见矿钻孔;5—钻孔编号/矿体厚度(m);6—矿体厚度等值线;7—地堇中心相;8—地堇过渡相;9—地堇边缘相;10—地堇区;11—高地探矿权范围

(1) 中心相:以 ZK705、ZK2903、ZK1905 孔附近一线为中心,呈狭长带状不规则分布。该相带典型特征是在底部菱锰矿体中均可见气泡状被沥青充填的菱锰矿石以及气液喷溢成矿过程中产生的一系列软沉积变形纹理构造、底劈构造等,根据已施工的钻孔统计,24 个钻孔中见气泡状菱锰矿,为锰矿成矿的喷溢中心矿石相的典型特征标志,富锰矿体均分布在中心相区,姚希财等认为以 ZK2715 为喷溢中心(姚希财等,2017),通过本次工作重新确定以 ZK2903 为地堇喷溢中心位置,中心矿相面积大,高达到 5.5 km²,喷溢成矿作用强烈,成矿规模大,矿体厚度大,矿体层数多,反映出大规模和多期次的锰矿成矿作用特征,是一个典型的气液喷溢沉积型锰矿床。该矿石相区分布有多层菱锰矿体,矿体单层厚度大,矿体平均品位最高,出现一层或多层凝灰质粘

土岩等,矿体厚度 5.50~22.10 m,矿石类型以气泡状、块状的菱锰矿为主,平均品位大于 25%,含锰岩系的厚度 36.14~71.59 m。该相带宽 0.5~2.0 km,长度 9.0 km,主要分布在格老丫、团龙等区域。

(2) 过渡相:该相带围绕中心相周围环绕分布,矿石特征主要为块状、条带状菱锰矿石,无气泡状菱锰矿石出现,矿体中下部主要分布块状菱锰矿石,矿层的上部一般分布层条带状菱锰矿石,发育 2~3 层菱锰矿体。矿体厚度 1.46~7.41 m,较中心相薄,矿石品位 16.16%~22.73%,较中心相略低,含锰岩系的厚度为 25.92~43.96 m,该相带单侧宽度为 1.5~3.0 km,单侧长度大于 3.5 km。过渡相区锰矿石资源量是矿床的主体,主要分布在大河坝、黔龙、老屋基、道坨、大坨、梁家坡、狮子口等区域。

(3) 边缘相:该相带以环绕过渡相带分布,相带特征为条带状的菱锰矿石与碳质页岩互层,矿体厚度小于1 m,锰矿体品位10.74%~15.45%,品位相比过渡相又有所降低;含锰岩系的厚度15.08~28.98 m。越靠近地堑盆地的边缘部分,菱锰矿体厚度越来越薄,直至到地堑盆地边缘彻底尖灭,宽度约0.5 km,主要分布在石湾、野猫洞、牛场坡、牛合沟等区域。

4 潜力预测

通过对李家湾-高地-道坨南华纪地堑盆地含锰岩系、锰矿体厚度、品位等变化规律及矿体结构特征的综合研究,该区在南华纪大塘坡早期存在一个巨型隐伏Ⅳ级成锰地堑盆地,地堑盆地沿NE70°方向展布,长度大于15 km、宽3~5 km(图6)。地堑气液喷溢中心矿石相区面积达5.0 km²,喷溢成矿作用强烈,矿体厚度大,矿体层数多,反映出大规模喷溢和多期次的锰矿成矿作用特征。在最靠近地堑盆地最北西方向的ZK3113-ZK2719-ZK2507一线,其含锰岩系厚度、矿体厚度依次为39.76 m(6.40 m)、50.06 m(7.07 m)、39.00 m(5.98 m),认为在北西部分区域以及地堑盆地的南东延伸方向,成锰条件好,目前该地堑的南东方向狮子口、梁家坡一带以及道坨、大坳一带已经完全控制,但大岩顶-老屋基-红岩一带,锰矿找矿潜力依然巨大,目前已控制的资源量已逾3亿吨,预测空白区资源量可突破2亿吨,故整个成锰地堑总资源量可突破5亿吨。

5 结论

(1) 通过对松桃李家湾-高地-道坨南华纪地堑盆地中含锰岩系、(富)锰矿体厚度、矿体品位等变化规律及气液喷溢矿石相特征的综合研究,重新圈定了该巨型隐伏地堑盆地的空间分布范围,地堑盆地长轴沿NE70°方向展布,长度大于15 km、宽3~5 km,以ZK2903钻孔附近一带为该地堑盆地喷溢沉积中心位置。

(2) 通过对该地堑盆地气液喷溢矿石相特征研究分析,气液喷溢成矿过程中依次形成中心相、过渡相、边缘相三个矿石相,气液喷溢中心矿石相区面积可达5.5 km²,喷溢成矿作用强烈,成矿规

模大,矿体厚度大,矿体层数多,反映出大规模喷溢和多期次的锰矿成矿作用特征。松桃高地隐伏超大型锰矿正位于该地堑中心相区,故富锰矿资源量大,而松桃道坨隐伏超大型锰矿床主体位于该地堑的过渡相区。

(3) 预测该地堑矿权空白区资源量还有2亿吨的潜力,加上已控制的锰矿资源储量3亿余吨,以致该地堑锰矿资源可突破5亿吨,是一个世界级的隐伏巨型锰矿田。

[参考文献]

- 杜远生,周琦,余文超,等. 2015. Rodinia 超大陆裂解、Sturtian 冰期事件和扬子地块东南缘大规模锰成矿作用[J]. 地质科技情报,34(06):1-7.
- 刘雨,周琦,袁良军,等. 2015. 黔东大塘坡锰矿区古天然气渗漏喷溢口群发现及地质意义[J]. 贵州地质,32(04):250-255.
- 田景江,姚希财,沈红钱,等. 2018. 贵州省松桃县高地锰矿详查报告[R]. 贵州省地质矿产局 103 地质大队.
- 肖克炎,邢树文,丁建华,等. 2016. 全国重要固体矿产重点成矿区带划分与资源潜力特征[J]. 地质学报,90(07):1269-1280.
- 谢小峰,杨坤光,钱山,等. 2018. 黔东松桃地区燕山期构造特征研究-以高地超大型锰矿床为例[J]. 地质论评,64(3):623-632.
- 袁良军,周琦,张遂,等. 2016. 黔东李家湾-道坨南华纪早期成锰盆地原型结构特征及锰矿潜力预测[J]. 矿床地质(增刊1),37-38.
- 姚希财,田景江,张平壹,等. 2017. 贵州松桃高地超大型锰矿床矿体空间分布规律与找矿预测[J]. 贵州地质,34(01):9-17.
- 袁良军,周琦,姚希财,等. 2018. 贵州松桃高地特大型富锰矿床主要地质特征[J]. 贵州地质,35(04):314-318.
- 袁良军,周琦,潘文,等. 2019. 贵州松桃高地隐伏超大型锰矿床主要特征与找矿实践[J]. 贵州地质,36(03):197-206.
- 张遂,周琦,张平壹,等. 2015. 黔东松桃西溪堡南华系大塘坡组超大型锰矿床地质特征与找矿预测[J]. 地质科技情报,34(06):8-16.
- 张遂,周琦,张平壹,等. 2018. 贵州松桃普觉超大型锰矿床主要特征与找矿实践[J]. 贵州地质,35(04):304-313.
- 周琦,杜远生. 2012. 古天然气渗漏与锰矿成矿[M]. 北京:地质出版社.
- 周琦,杜远生,覃英. 2013. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 矿床地质,32(03):457-466.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2016a. 黔湘渝毗邻区南华纪武陵裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用[J]. 地球科学,41(02):177-188.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2016b. 贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区地质找矿主要进展及潜力预测[J]. 贵州地质,33(04):237-244.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿

- 模型——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 地质学报, 91(10): 2285–2298.
- 周琦, 杜远生, 袁良军, 等. 2018. 黔东及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿研究历史、主要进展及展望[J]. 贵州地质, 35(04): 270–281.
- 周琦, 杜远生, 等. 2019. 华南古天然气渗漏沉积型锰矿[M]. 北京: 科学出版社.
- 张夏林, 吴冲龙, 周琦, 等. 2020. 贵州超大型锰矿集区的多尺度三维地质建模[J]. 地球科学, 45(02): 634–644.

New Research Progress and Potential Prediction of Lijiawan–Gaodi–Daotuo Graben Located in Songtao Area, Wuling Manganese Ore Belt in Nanhua Period, South China

SHEN Hong-qian^{1,2,3}, ZHANG Sui^{1,2,3}, ZENG Fei¹, XIE Xiao-feng^{1,2,3}, YANG Bing-nan^{1,2,3},
XIE Xing-you^{1,2,3}, CAI Guo-rong¹, SHEN Xiao-qing^{1,2}, ZHU Pu¹,
YAO Xi-cai^{1,2,3}, WU Ying-zhi¹, YANG Jun¹

(1. 103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology & Mineral Exploration and Development, Tongren 554300, Guizhou, China; 2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China; 3. Guizhou Province Manganese Ore Resources Forecasting and Evaluation Technology Innovation Talent Team, Tongren 554300, Guizhou, China)

[**Abstract**] A series of famous large to super large manganese deposits were formed in the Lijiawan–Gaodi–Daotuo Graben, Wuling Manganese Ore Belt, South China. This study is based on the latest research implemented in 2020–2021 about the meticulous investigation (exploration) of the Gaodi Super Large Manganese Deposit in Songtao area, Guizhou Province, using the gas–liquid effusion–sedimentary metallogenic theory of manganese deposits and prospecting prediction technology system of concealed manganese deposits, the variations of manganese layer, ore thickness and ore grade, ore facies characteristics of manganese deposits are analyzed, which prove that the gas–liquid effusion–sedimentary center which spread along 70° NE is divided into central facies, transitional facies and marginal facies, and manganese-rich ores are distributed in the center facies. The area of the central facies is 5.5 km², and characterized by strong large-scale metallogenesis. It can be predicted that there are still 200 million tons left in the graben, and the total amount of manganese ores in the whole graben can reach 500 million tons, forming a world-class giant concealed manganese deposits.

[**Key Words**] Nanhua period; Lijiawan–Gaodi–Daotuo; Graben; Potential prediction; Guizhou

关于贵州松桃高地超大型锰矿床冷水犁式断层(F_3)特征再认识

张 遂^{1,2,3}, 沈红钱^{1,2,3}, 冯开友¹, 杨炳南^{1,2,3}, 沈小庆¹,
袁良军^{1,2,3}, 谢兴友^{1,2,3}, 姚希财^{1,2,3}, 蔡国荣^{1,2}, 曾 飞¹, 吴应值¹

(1. 贵州省地矿局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300; 2. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程
创新中心, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队, 贵州 铜仁 554300)

[摘 要] 本文结合松桃高地超大型锰矿大精查(勘探)成果对矿区内冷水犁式断层(F_3)特征进行深入研究, 对其特征有了新的认识。 F_3 犁式断层上陡、下缓, 断层在上部的碳酸盐岩脆性层及相对脆性层中较陡, 倾角随深度逐渐变缓, 进入砂页岩等韧性层后迅速变缓, 进入到大塘坡组泥页岩后断层滑脱面趋于平缓, 断面倾角与地层倾角基本一致, 变为层间滑动。音频大地电磁测深与宽频大地电磁测深资料的融合处理与解释也支持这种新的认识。 F_3 犁式断层延伸至大塘坡组地层后可能尖灭, 并未对含锰岩系造成破坏, 使得深部隐伏锰矿体得以较好的保存, 如这一认识成立, 则高地超大型锰矿床北西深部仍具有较大找矿潜力。

[关键词] 犁式断层; 特征; 新认识; 高地锰矿; 贵州松桃

[中图分类号] P618.32; P542 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2021)02-0139-07

1 引言

贵州松桃高地超大型隐伏锰矿床位于贵州省松桃县乌罗镇。该矿床是 2013—2019 年, 贵州省地矿局 103 地质大队“贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队”, 运用原创理论和隐伏新类型锰矿找矿勘查原创技术体系(周琦等, 2012, 2013, 2016, 2017), 通过贵州省铜仁松桃国家整装勘查区转化运用实践, 成功发现的又一隐伏超大型(富)锰矿床。详查提交备案的锰矿石资源量 1.61 亿吨(其中富锰矿石资源量 7 166 万吨, 达特大型规模), 为仅次于松桃普觉超大型锰矿床的亚洲第二大的锰矿床。该矿床产于南华裂谷锰矿成矿区、武陵锰矿成矿带、石阡—松桃—古丈锰矿成矿亚带(图 1)、李家湾—高地—道坨 IV 级地堑盆地中心(周琦等, 2016), 该 IV 级地堑盆地控制形成了松桃高地、道坨 2 个超大型锰矿床和李家湾、杨

立掌、大路等大中型锰矿床和关口坳、钢厂等小型锰矿床, 提交的锰矿资源储量近 4 亿吨(图 2)。为了尽快将资源优势转化为产业优势、经济优势, 贵州省决定开展该锰矿床大精查(即勘探)工作。

贵州省松桃县高地锰矿大精查(勘探)已施工的钻孔全部见矿。矿体厚度 2.86 ~ 22.10 m, 平均 7.88 m; 锰品位 16.16% ~ 25.06%, 平均 22.22%。富锰矿体厚度 1.69 ~ 17.44 m, 平均 4.36 m; 富锰矿体锰品位 25.00% ~ 27.79%, 平均 25.79%。预估算碳酸锰矿石资源量将略大于详查备案的锰矿资源量。

谢小峰等(2018)以松桃高地超大型锰矿床为例, 对黔东松桃地区燕山期构造特征进行了研究, 初步认为高地锰矿区内主要为燕山期构造, 断层断距小、延深浅, 对区内矿体影响较小。但认为 F_3 犁式正断层断距大且深, 越往矿区北西侧的深部, 分析该断裂应切断锰矿体, 造成锰矿的不连续, 形成拉空带(谢小峰等, 2018)。

[收稿日期] 2021-01-05 [修回日期] 2021-04-16

[基金项目] 黔科合平台人才[2018]5618、黔科合平台人才[2020]6019、黔地矿科合[2020]1号、黔地矿科合[2020]03号、黔科合支撑[2019]2868 联合资助。

[作者简介] 张遂(1968—), 男, 研究员, 主要从事矿产勘查及找矿预测工作。Email: zhangsui85697503@163.com。

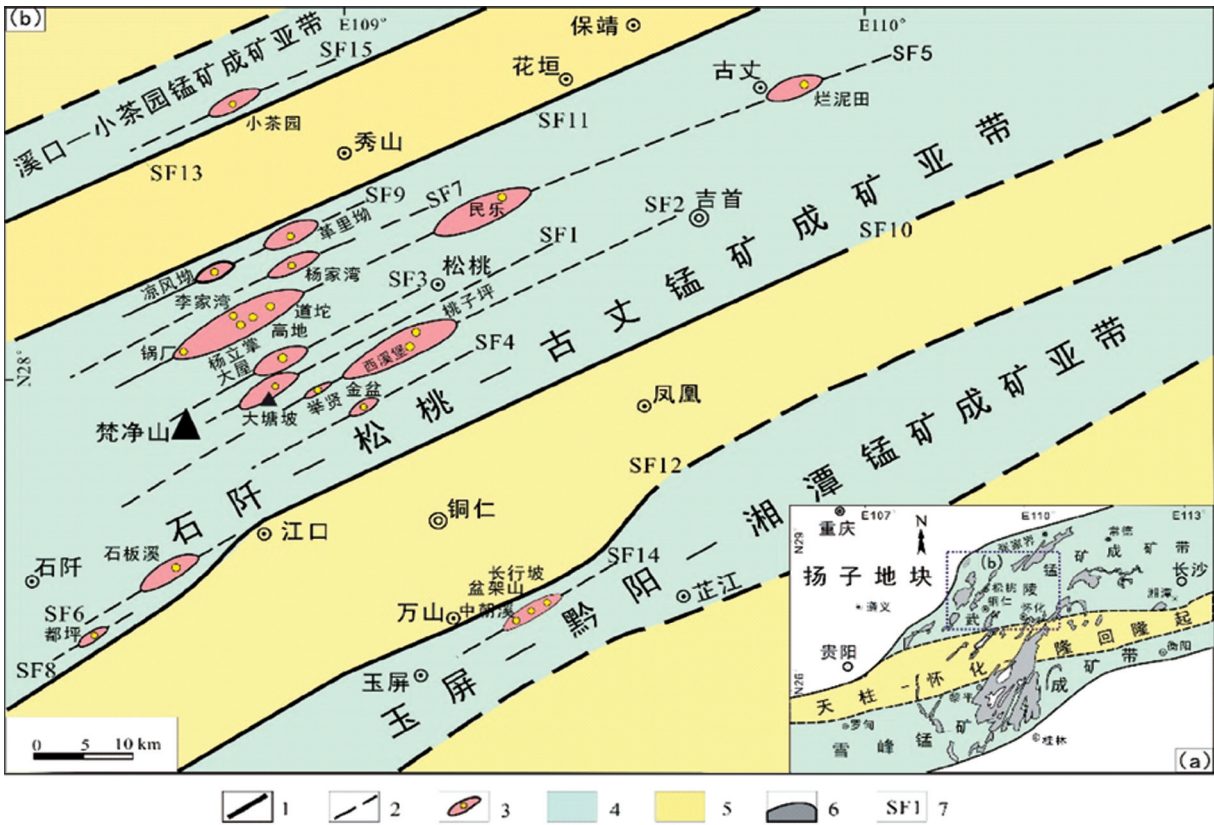


图1 华南南华纪武陵锰矿成矿带成矿亚带分布图(周琦,杜远生 等,2016)

Fig.1 Distribution of metallogenic subzones of the nanhua period wuling manganese metallogenic belt in South China (ZHOU Qi, DU Yuan-sheng et al. ,2016)

1—控制Ⅲ级地堑盆地的同沉积断层;2—控制Ⅳ级地堑盆地的同沉积断层;3—Ⅳ级地堑盆地(含锰盆地);4—Ⅲ级地堑盆地;5—地垒;
6—南华系地层分布区;7—同沉积断层编号

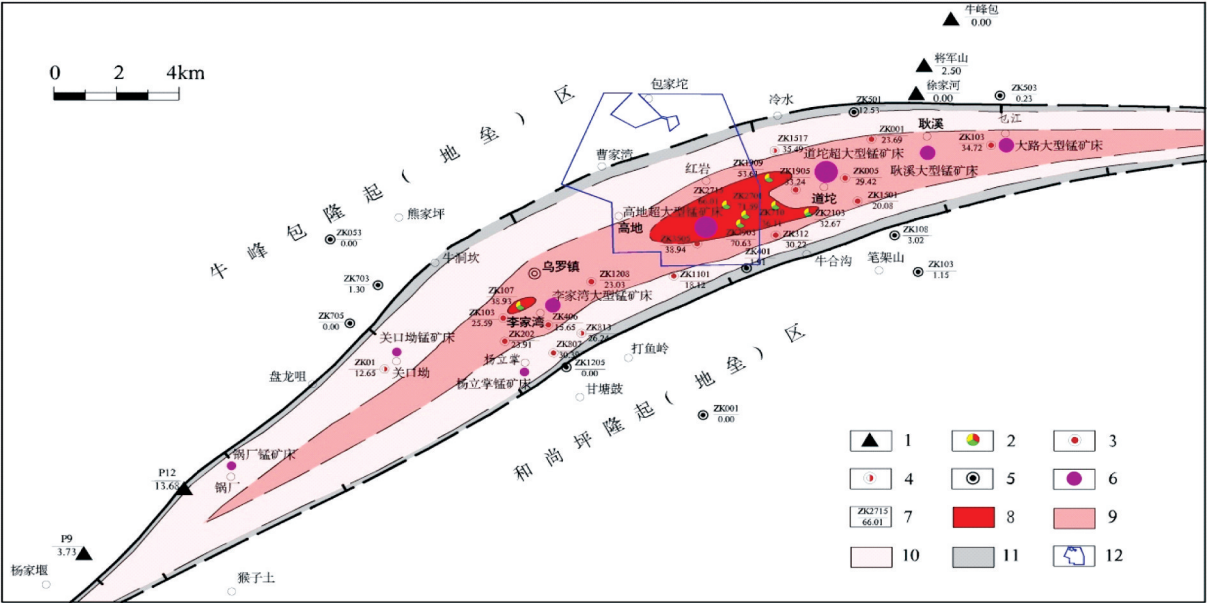


图2 松桃李家湾-高地-道坨南华纪大塘坡期Ⅳ级含锰地堑盆地矿石相图(袁良军 等,2019,略有修改)

Fig.2 Songtao Lijiawan-Gaodi-Daotuo Nanhua Period Datangpo Stage IV Manganese Graben Basin Ore Facies Diagram (YUAN Liang-jun et al. ,2019,slight modification)

1—实测剖面位置;2—见气泡状矿钻孔;3—见矿钻孔;4—矿化钻孔;5—未见矿钻孔;6—矿床位置;7—钻孔编号/含锰岩系厚度(m);
8—中心相;9—过渡相;10—边缘相;11—黑色页岩;12—高地矿区范围

2 矿区地质

2.1 矿区地层

矿区地层由老至新有青白口系清水江组(Qbq),南华系两界河组(Nh₂l)、铁丝坳组

(Nh₂t)、大塘坡组(Nh₂d)、南沱组(Nh₃n),震旦系陡山沱组(Z₁d)、老堡组(Z₁l),寒武系牛蹄塘组(Є₁₋₂n)、九门冲组(Є₂jm)、变马冲组(Є₂b)、杷榔组(Є₂p)、清虚洞组(Є₂q)、高台组(Є₃g)、石冷水组(Є₃s)、娄山关组(Є₃₋₄ls),奥陶系桐梓组(O₁t)、红花园组(O₁h)、大湾组(O₁₋₂d)等(图3)。清水江组主要为变余砂岩夹板岩。两界河组主要长石

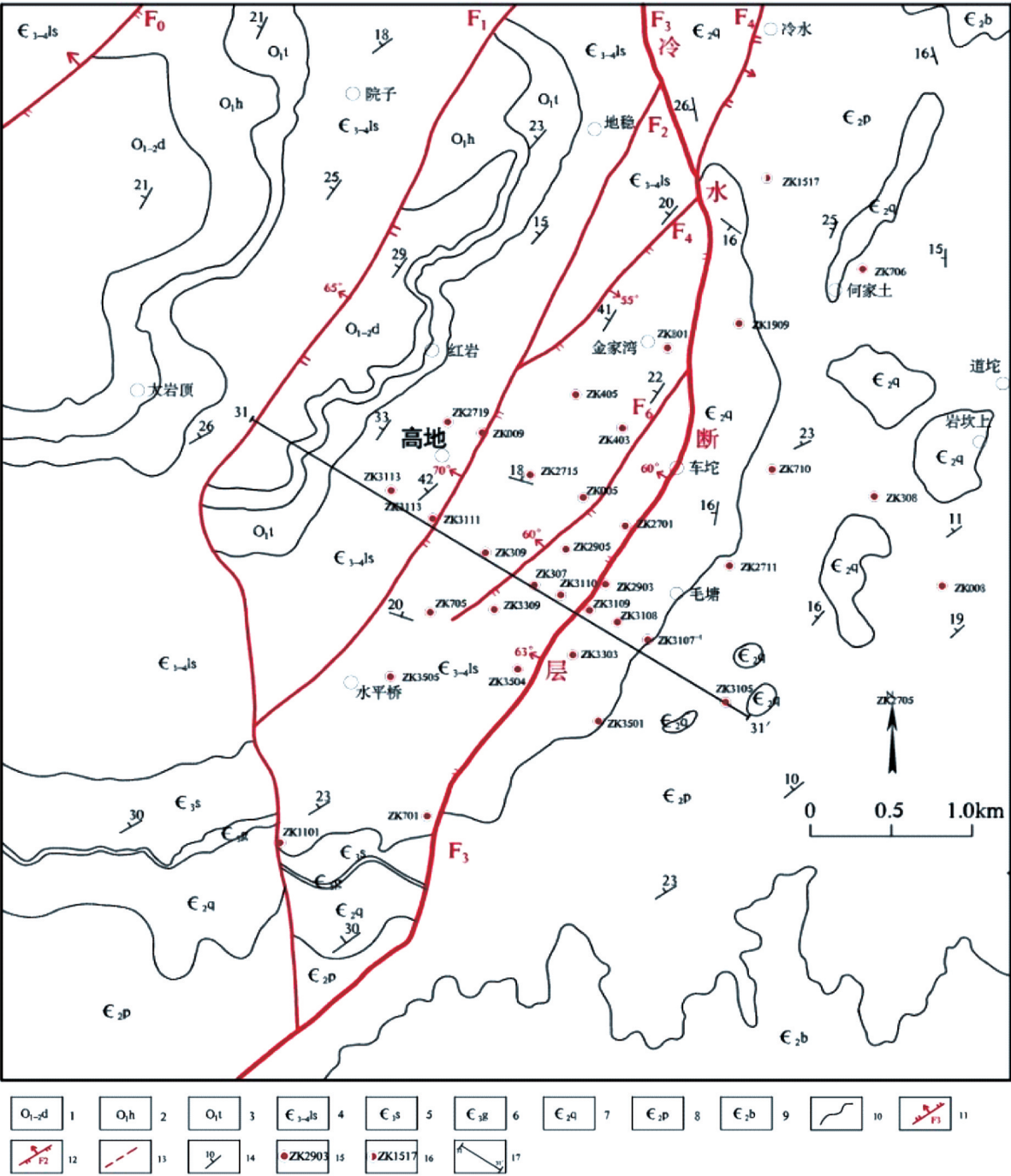


图3 松桃高地锰矿区地质简图

Fig. 3 Geological Diagram of the manganese area in Songtao Gao Di

1—大湾组;2—红花园组;3—桐梓组;4—娄山关组;5—石冷水组;6—高台组;7—清虚洞组;8—杷榔组;9—变马冲组;10—地质界线;11—正断层;12—逆断层;13—性质不明断层;14—地层产状;15—见矿钻孔及编号;16—见矿化钻孔及编号;17—剖面位置

石英砂岩。铁丝坳组主要为含砾砂岩。大塘坡组下部为含锰岩系,主要为碳质页岩夹菱锰矿,上部主要为粉砂质页岩。南沱组主要为含砾砂岩。震旦系主要为白云岩。寒武系下部牛蹄塘组至杷榔组主要为一套砂页岩,上部清虚洞组至娄山关组主要为一套碳酸盐岩。

2.2 矿区构造特征

矿区位于区域性木耳断裂北东侧,梵净山穹状背斜北东部,猴子坳向斜南东翼,主体为单斜岩层,总体倾向北西,倾角一般在 $16^{\circ} \sim 26^{\circ}$, 平均 20° 左右。发育红沙井断层(F_0)、老屋基断层(F_1)、黄泥洞断层(F_2)、冷水断层(F_3)、道岔断层(F_4)、格老丫断层(F_6)等(图3)。 F_0 为正断层,断面倾向 SE, 断层两侧寒武系与奥陶系地层接触,可以观察到 F_0 断层两侧地层倾向相反。 F_1 为逆断层,寒武系娄山关组逆冲于奥陶系地层之上,应该为区内自东向西逆冲过程中形成的反冲断层。 F_3 为矿区内最主要的一条断裂,为正断层,根据钻孔资料显示,其断面倾向 NW,往深部逐渐变缓,切割深度大。

3 冷水犁式断层(F_3)特征及对锰矿体的保存作用

3.1 平面展布特征

冷水犁式断层(F_3)为矿区内的主要断层,位于矿区南东侧,呈“S”型弯曲状贯穿整个矿区(图3),区域延伸约 15 km,走向 $NE25^{\circ}$ 左右,倾向 NW,地表倾角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,断距 1 000 m 左右。断层破碎带宽约 5~20 m,上断面较为平滑,下断面呈波浪型或 W 型(图4),是典型的犁式断层,以断层角砾及断层泥充填,角砾成分主要为深灰色白云岩,具弱硅化特征,被钙质、白云质或白云砂泥质胶结,呈杂基支撑,角砾形态呈棱角状、次棱角状,大小不等,多在 $0.5 \times 0.5 \text{ cm} \sim 5 \times 8 \text{ cm}$ 之间。两盘地层因受断层影响而见碎裂岩,角砾岩,断层透镜体、牵引构造、揉曲面或次级断面等现象。断层上盘(北西盘)较新地层下降,主要为寒武系娄山关组;下盘(南东盘)较老地层上升,主要为寒武系清虚洞组或杷榔组地层。

3.2 剖面展布特征

高地锰矿普查、详查和勘探共有 24 个钻孔揭露冷水犁式断层(F_3),剖面展布形态特征以矿区内

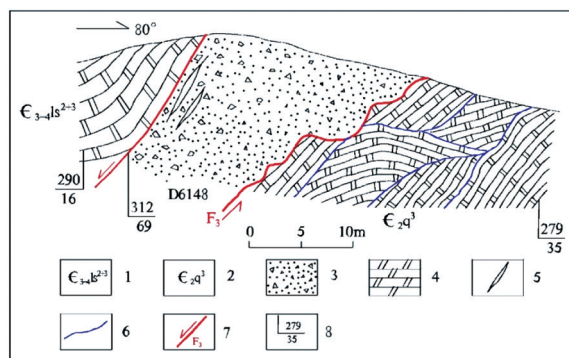


图4 松桃高地锰矿区冷水犁式断层(F_3)
D6148 地质点素描图

Fig. 4 Sketch Diagram of D6148 geological point of Lengshui Listric Fault(F_3) in Songtao Gaodi manganese mining area

1—娄山关组第二、三段;2—清虚洞组第三段;3—断层破碎带;4—白云岩;5—方解石脉;6—软弱滑动面;7—断层面;8—地层产状

31号勘查线为例(图5)。该断层倾角上陡、下缓,地表及浅部倾角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$,断距 1 000 m 左右;倾角随深度变缓,断面呈现弯曲状,且凹面向上,形似标准的“犁状”,碳酸盐岩结束,往深部进入寒武系杷榔组、变马冲组、南华系南沱组等砂页岩地层后逐渐变缓为 35° 左右,断距减小为 300~400 m;越往深部进入到南华系大塘坡组页岩、粘土岩后断层滑脱面越趋于平缓,断面倾角与地层倾角基本一致,为 20° 左右,变为层间滑动,断距仅为数十米。

冷水犁式断层(F_3)的形成与断层通过上部脆性及相对脆性沉积岩层段和下部韧性层有关。在上部的碳酸盐岩脆性层及相对脆性层中较陡,进入泥页岩等韧性层迅速变缓并滑脱,特别是下部韧性岩层泥页岩在断层面往下变缓中起着重要的作用。由于韧性,降低了岩层的内摩擦力,使断层面的角度变缓,同时,由于泥页岩具有异常压力,降低了沉积剖面岩层上覆的负荷强度,使断面变缓并沿沉积层面滑动(袁良军等,2013)。通过音频大地电磁测深与宽频大地电磁测深资料的融合处理与解释,AMT31剖面北西段 F_3 断层上盘一侧地下电性结构为“高-低-中低”的三元结构,与“碳酸盐岩-碎屑岩-变质岩”的地层结构相吻合。剖面南东段地下电性结构为“低-中高”的二元结构,与“碎屑岩-变质岩”的地层结构一致(图6)。对 AMT25 和 AMT31 反演剖面综合分析,两条剖面的断层形态特征一致(图7), F_3 断层在浅部倾角约 60° ,随着断层向深部发育,倾角逐渐变缓,该断层在大塘坡组软弱岩层中有可能尖灭,对深部隐伏锰矿体可能没有造成破坏。

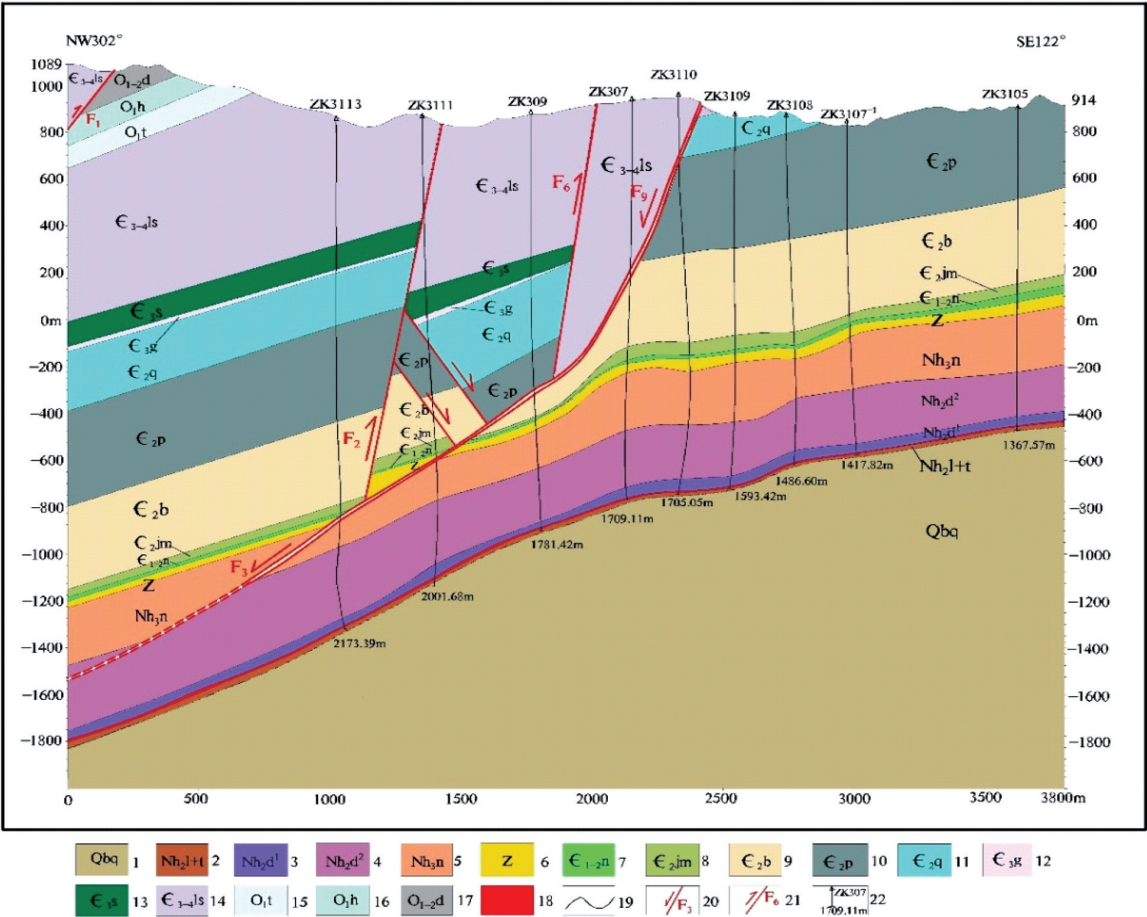


图5 松桃县高地锰矿床31号勘查线剖面图

Fig. 5 Geological section view of No. 31 exploration line of Songtao Gaodi manganese mining area

1—清水江组;2—两界河组、铁丝拗组;3—大塘坡组第一段;4—大塘坡组第二段;5—南沱组;6—震旦系;7—牛蹄塘组;8—九门冲组;9—变马冲组;10—杷榔组;11—清虚洞组;12—高台组;13—石冷水组;14—娄山关组;15—桐梓组;16—红花园组;17—大湾组;18—锰矿体;19—地质界线;20—正断层;21—逆断层;22—钻孔剖面位置、编号及孔深

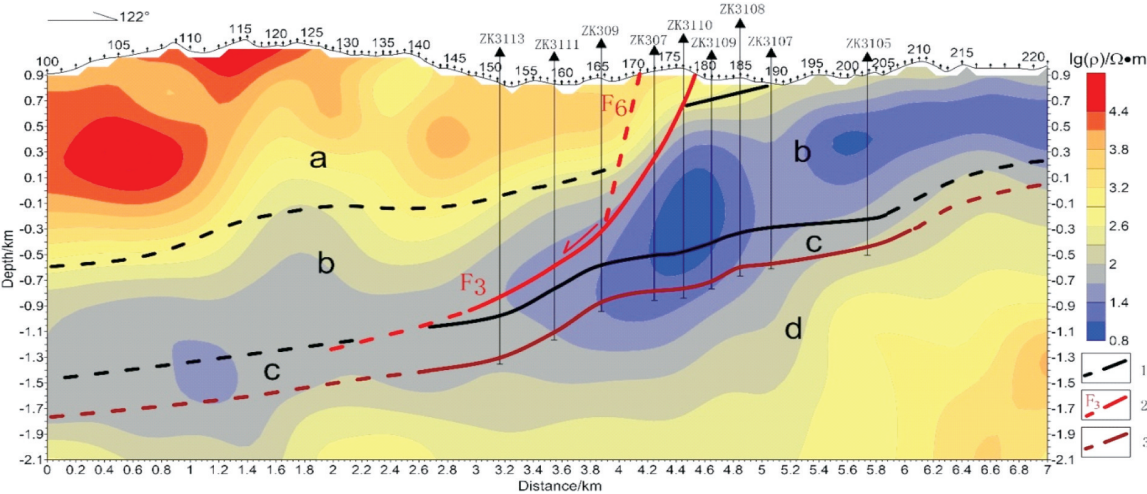


图6 松桃高地锰矿区AMT31号剖面NLCG反演成果图(沈小庆等,2021)

Fig. 6 result map of NLCG inversion and AMT31 section in Songtao Gaodi manganese mining area (SHEN Xiao-qing and so on, 2021)

1—推测及钻孔控制地层界线;2—推测及钻孔控制断层;3—推测及钻孔控制锰矿体;a—露奥陶至下寒武统碳酸盐岩为主地层组合;b—下寒武统至南华系南沱组碎屑岩为主地层组合;c—大塘坡组地层;d—南华系铁丝拗组、青白口系地层

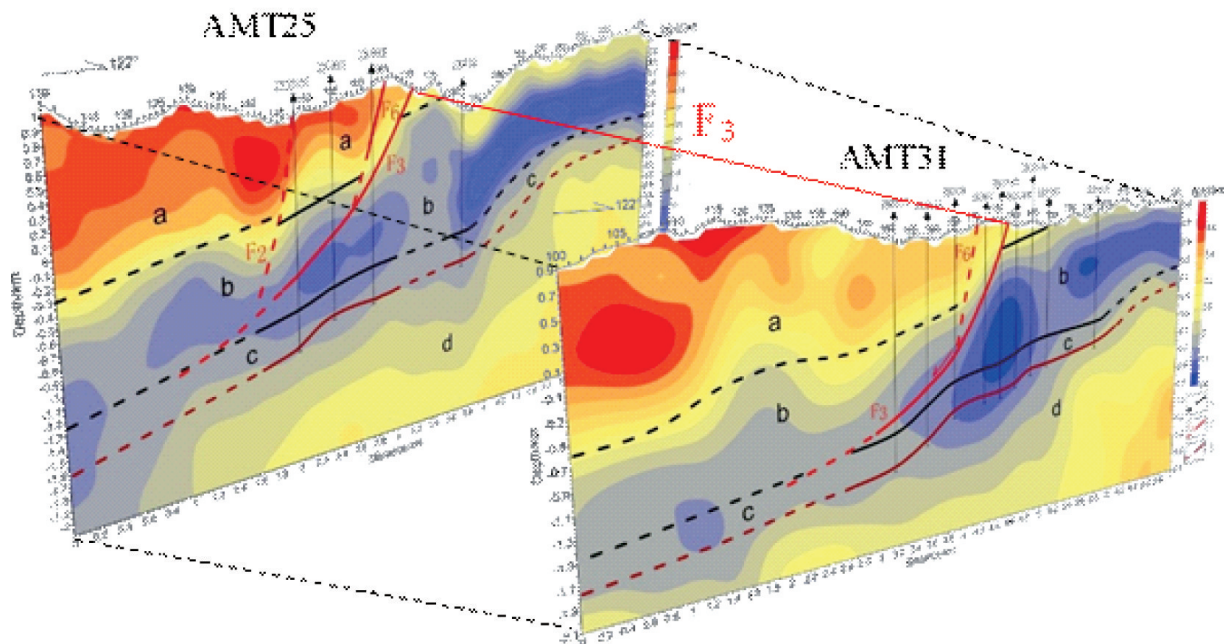


图7 松桃高地锰矿区AMT剖面反演综合成果图(沈小庆等,2021)

Fig. 7 Comprehensive results map of AMT profile inversion in Songtao Gaodi manganese mining area (SHEN Xiao-qing et al., 2021)

1—推测及钻孔控制地层界线;2—推测及钻孔控制断层;3—推测及钻孔控制锰矿体;a—露奥陶至下寒武统碳酸盐岩为主地层组合;
b—下寒武统至南华系南沱组碎屑岩为主地层组合;c—大塘坡组地层;d—南华系铁丝垅组、青白口系地层

3.3 犁式断层对锰矿体的保存与找矿预测

高地锰矿冷水断层(F_3)为典型的犁式正断层,平面展布规模大,地表及浅部断距大,致使断层通过处缺失了部分地层。 F_3 犁式正断层上陡下缓,断层越往深部滑脱面越趋于平缓,断层延伸至大塘坡组地层后可能已经尖灭,可能并未对含锰岩系造成破坏,使深部锰矿体得以较好保存,故预测矿床北西深部仍具有较大的找矿潜力。

4 结论

(1)松桃高地锰矿区发育的冷水犁式正断层(F_3)为区内十分重要的一条断层,在平面上呈“S”型弯曲状贯穿整个矿区,断面呈W型,断层倾角上陡($60^\circ \sim 70^\circ$)、下缓(35° 左右),随深度增加,断层倾角进一步变缓,与地层倾角逐渐趋于一致。

(2)通过音频大地电磁测深与宽频大地电磁测深资料的融合处理与解释,认为该断层进入南华系大塘坡组地层后可能逐渐尖灭,可能使深部隐伏锰矿体得以较好保存,如这一认识成立,则高

地锰矿床北西深部仍具有较大的找矿潜力。

(3)黔东及毗邻地区的“大塘坡式”锰矿区,普遍发育犁式正断层,其对锰矿体的破坏和后期保存有重要的影响。在今后的锰矿勘查过程中,除了要考虑锰矿成矿期地堑盆地的原始展布方向外,还应加强后期构造特征的研究,特别是犁式正断层等构造对深部隐伏锰矿的影响。

[参考文献]

- 田景江,姚希财,沈红钱,等. 2018. 贵州省松桃县高地锰矿详查报告[R]. 贵州省地质矿产局 103 地质大队.
- 谢小峰,杨坤光,钱山,等. 2018. 黔东松桃地区燕山期构造特征研究—以高地超大型锰矿床为例[J]. 地质论评, 64(3): 623-632.
- 姚希财,田景江,张平壹,等. 2017. 贵州松桃高地超大型锰矿床矿体空间分布规律与找矿预测[J]. 贵州地质, 34(01): 9-17.
- 杨炳南,周琦,杜远生,等. 2015. 音频大地电磁法对深部隐伏构造的识别与应用:以贵州省松桃县李家湾锰矿为例[J]. 地质学报, 34(6): 26-32.
- 袁良军,周琦,杜光映,等. 2013. 贵州松桃西溪堡大型锰矿床 F_1 犁式断层特征及对锰矿体破坏与保存作用探讨[J]. 贵州地质, 30(03): 170-176.
- 袁良军,周琦,姚希财,等. 2018. 贵州松桃高地特大型富锰矿床主要地质特征[J]. 贵州地质, 35(04): 314-318.
- 袁良军,周琦,潘文,等. 2019. 贵州松桃高地隐伏超大型锰矿床主要特征与找矿实践[J]. 贵州地质, 36(03): 197-206.

- 张遂,周琦,张平壹,等. 2018. 贵州松桃普觉超大型锰矿床主要特征与找矿实践[J]. 贵州地质, 35(04): 304-313.
- 周琦,杜远生,覃英. 2013. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 矿床地质, 32(03): 457-466.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2016. 黔湘渝毗邻区南华纪武陵裂谷盆地结构及其对锰矿的控制作用[J]. 地球科学, 41(02): 177-188.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 地质学报, 91(10): 2285-2298.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2018. 黔东及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿研究历史、主要进展及展望[J]. 贵州地质, 35(04): 270-281.
- JOHN W. SHELTON. 1984. AAPG. V. 68, No. 7, 801-813, 武汉地质学院. 孙家振译. 1986. 犁式正断层综述. 地质科技情报, 5(1): 35-39.
- Graham Williams Ian Vann. 1987. Journal of Structural Geology. Vol. 9, No. 7: 789-795, 刘少峰译. 犁式正断层的几何特征及其上盘变形. 地质科学译丛, 1988(4): 34-40.

A New Understanding of the Characteristics of Cooling Water Listric Fault(F_3) in the Super Large Manganese Deposit in Songtao Gaodi, Guizhou

ZHANG Sui^{1,2,3}, SHEN Hong-qian^{1,2,3}, FENG Kai-you¹, YANG Bing-nan^{1,2,3}, SHEN Xiao-qing¹,
YUAN Liang-jun^{1,2,3}, XIE Xing-you^{1,2,3}, YAO Xi-cai^{1,2,3}, CAI Guo-rong^{1,2},
ZENG Fei¹, WU Ying-zhi¹

(1. 103 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development of Guizhou Province, Tongren 554300, Guizhou, China; 2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China; 3. Team of scientific and technological Innovation Talents on the Prediction and Evaluation of Manganese Resources in Guizhou Province, Tongren 554300, Guizhou, China)

[Abstract] In this paper, combined with the results of a large-scale detailed survey (exploration) of the Songtao Gaodi super large manganese deposit, the characteristics of the Cooling Water Listric Fault (F_3) in the mining area are deeply studied, and a new understanding of its characteristics is obtained. The F_3 Listric Fault is steep at the top and slow at the bottom, and the fault is steeper in the upper carbonate brittle layer and relatively brittle layer. The dip angle gradually slows down with depth. After entering the arenaceous shale, it quickly slows down, it quickly slows down, and enters after the argillaceous shale of the Datangpo Formation, the slippage surface of the fault tends to be gentle, and the dip angle of the fault surface is basically the same as the dip angle of the stratum, which becomes interlayer gliding. This new understanding is supported by the fusion processing and interpretation of audio magnetotelluric sounding and broadband magnetotelluric sounding data. After the F_3 Listric Fault extends to the Datangpo Formation, it may disappear without destroying the manganese-bearing rock series, so that the deep concealed manganese ore body can be better preserved. If this understanding is established, the northwestern deep part of the Gaodi super-large manganese deposit still has great prospecting potential.

[Key Words] Listric fault; Characteristic; New understanding; Gaodi manganese ore; Songtao, Guizhou

贵州松桃高地超大型锰矿床绿色勘查探索与实践

蔡国荣^{1,2}, 张 遂^{1,2,3}, 沈红钱^{1,2,3}, 曾 飞¹,
朱 璞¹, 冯开友¹, 覃永印¹, 刘明民¹, 吴应值¹

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300; 2. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程
创新中心, 贵州 贵阳 550003; 3. 贵州省锰矿资源预测评价科技技术创新人才团队, 贵州 铜仁 554300)

[摘 要] 本文选择贵州松桃高地锰矿作为研究对象, 从实际情况出发, 编写了实施方案, 在勘查过程中, 分别从现场分区规划、道路修筑、生活区、工作区、安全环保文化建设、水资源保护以及固体废弃物管理七个方面进行具体实施, 采用“一基多孔”技术, 选择环保型清洗液, 对开挖的地块进行了复垦复绿工作, 整个勘查过程实现了生态环境的保护, 环境恢复治理的落实, 和谐地勘的推广。绿色勘查取得成功表明, 通过实施绿色勘查可以最大限度的减少勘查工作对生态环境的扰动和影响, 实现了资源勘查和生态环境双赢。

[关键词] 绿色勘查; 环境保护; 高地锰矿; 贵州松桃

[中图分类号] P618.32; P624 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2021)02-0146-06

1 引言

贵州是全国矿产资源大省, 松桃高地锰矿是近年来贵州省地矿局 103 地质大队锰矿产学研协同创新团队, 运用原创的锰矿内生外成气液流体喷溢成矿模式与找矿模型进行找矿预测(周琦等, 2013, 2017, 2018), 准确地圈定了南华纪高地地堑盆地, 在贵州铜仁松桃县锰矿国家整装勘查区内找到的又一个隐伏超大型锰矿床(周琦等, 2016; 张遂等, 2018), 碳酸锰矿石资源量 1.61 亿吨(其中富锰矿石资源量 7 166 万吨, 达特大型规模), 成为亚洲第二大的锰矿床(袁良军等, 2018)。2020 年对高地锰矿实施了大精查(即勘探), 在对该矿床实施大精查工作时, 绿色勘查纳入了矿区大精查设计, 并在野外地质勘查工作中, 严格执行, 以最大限度地减少勘探工作对生态环

境的扰动, 实现地质勘查与生态环境保护协同发展(巩鑫等, 2018; 雷晓力等, 2019; 郭方方等, 2020)。

2 研究现状

2.1 国外研究现状

绿色勘查作为一种先进的发展模式, 国外已得到广泛的实践, 如美国、澳大利亚、加拿大等, 他们在矿产勘查过程中很重视生态环境保护, 且规范、法律等也比较健全(刘乃刚, 2018)。澳大利亚联邦政府在 1999 年颁布了《环境和生物多样性保护法》, 明确了在找矿或采矿之前, 必须要先在环境方面进行评估和获得批准, 如果要勘探或者开采, 还要获得当地社区组织的统一支持和认可(马聘等, 2019); 加拿大在 2003 年制订了《勘探工程

[收稿日期] 2020-12-07 [修回日期] 2021-04-04

[基金项目] 黔科合平台人才[2018]5618、黔科合平台人才[2020]6019、黔地矿科合[2020]1 号、中地调研合同[2020]第 284 号、黔地矿科合[2020]03 号、黔科合支撑[2019]2868、黔地矿科合[2019]2 号、黔地矿科合[2019]06 号联合资助。

[作者简介] 蔡国荣(1992—), 男, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事矿产勘查及数字勘查工作。Email: 835603626@qq.com。

[通讯作者] 张遂(1968—), 男, 研究员, 主要从事矿产勘查及找矿预测工作。Email: zhangsui85697503@163.com。

卓越手册》,规范和指导勘探过程中的环境管理问题(王婉琼,2020);美国虽对环境方面没有设置保护区,对敏感区也没有明令禁止进行矿产资源勘查活动,但是在矿产勘查方面要想拿到探矿权、采矿权,就必须经过严格的环境影响评估,通常需要上交涉及勘查技术手段,采矿选矿“三废”处理方案,环境影响评估报告主要有地表土壤植被破坏程度、野生动植物的保护、文化遗址保护、地下水保护、复垦计划等多方面。只有满足上述要求的企业才可以进行矿产勘查活动(谢丽丽,2019)。

2.2 国内研究现状

李在文(2012)在“2012年生态文明论坛-贵阳”会议上,率先提出了“绿色勘查”的概念。青海省铜金山矿区在钻探过程中从道路修筑、生活区营地、工作区修筑、水资源保护以及固体废弃物的管理五个方面进行绿色勘查(刘海声等,2020);青海有色地勘局在绿色勘查方面探索了多种减低勘查活动对环境扰动的办法,如在采样时“以铲代镐”;在地质勘查时,采用便携式轻便钻机“以浅钻代替槽探”等(罗长海,2019);江西德兴市水石坞金矿区实施绿色勘查时,分别从绿色勘查原则、绿色勘查设计以及绿色勘查实践进行实施,在过程中主要从探槽施工、钻孔施工、坑道施工、水资源利用和保护、野生动物、探槽回填及和谐勘查方面来减少对环境的扰动(王国龙,2018);湖北大冶市龙角山一付家山矿区运用了“一孔多支”的技术来开展勘查活动,在保康竹园沟、连三坡、走马岭等矿区采用空中轮式滑动索道运输钻探设备和材料(吴龙等,2020);甘肃省在早子沟、格尔托及大水等金矿勘查中,采用了“一基多孔活扇形孔、放射孔”进行绿色勘查施工。甘肃省地矿局第二地勘院在甘南夏河县恰勒布金矿区采用了“方格化”草皮保养快速恢复技术,对复绿复垦做好及时回填(张新虎等,2017);贵州省2019年发布了全国首个绿色勘查地方标准《固体矿产绿色勘查技术规范》(DB52/T 1433-2019),为贵州实施绿色勘查奠定了基础。

3 矿区概况

松桃高地超大型锰矿床位于云贵高原向湘西丘陵过渡的斜坡地带(谢小峰,2018;袁良军等,

2019),属中低山地形,局部因风化、构造等原因形成陡坡或陡崖,地形起伏较大,沟谷切割深。山脉多呈北东向分布,相对高差最大可达624.33 m。区内属于亚热带季风性湿润气候,冬冷夏凉,雨量充足,地下水水质良好,植被发育较好。区内土壤主要为黄壤和石灰土,森林覆盖较广,溪沟交错,属长江流域沅江水系。

矿区地层由老至新有青白口系清水江组(Qbq),南华系两界河组(Nh₂l)、铁丝坳组(Nh₂t)、大塘坡组(Nh₂d)、南沱组(Nh₃n),震旦系陡山沱组(Z₁d)、老堡组(Z₆l),寒武系牛蹄塘组(Є₁₋₂n)、九门冲组(Є₂jm)、变马冲组(Є₂b)、杷榔组(Є₂p)、清虚洞组(Є₂q)、高台组(Є₃g)、石冷水组(Є₃s)、娄山关组(Є₃₋₄ls),奥陶系桐梓组(O₁t)、红花园组(O₁h)、大湾组(O₁₋₂d)(沈红钱等,2021)。

4 绿色勘查

4.1 场地建设与日常管理

场地建设是决定施工便捷的方式,主要从施工现场分区规划、道路修建、工作区建设、生活区建设、安全环保文化建设、水资源保护、固体废弃物管理等七个方面。

在施工现场分区规划中,因地制宜,根据实际情况,高地矿区全部采用的工艺是绳索取芯金刚石钻进技术,对施工现场本着少破坏、少占地的绿色勘查原则,有序划分施工操作区、工人休息区、原始植被层管护区、工具摆放区、消防器材区、钻杆摆放区、油料材料区、岩心箱摆放区、垃圾回收区等。道路修建方面,矿区兼顾了项目各勘查阶段施工及当地社会经济发展的需要。充分利用当地现有公路、居民区通道及农耕地等,对开垦的路线及施工现场,开挖前采用编织袋把上层根植土装袋保存,以便完成工作后进行高效的回填,恢复其原有地貌;工作区建设方面,矿区严格控制工作区面积,严禁超挖,在钻机安装前,在地面铺有隔离层,防止油污对地表土壤造成污染(图1);生活区建设方面,选择的是远离施工区的当地居民房,在生活区悬挂了相关图牌,包括组织机构、岗位职责、管理制度、相关工程图表等。在安全环保文化建设方面,每个施工进场通道两侧布置绿色勘查及



图 1 土工布铺设及辅助工具集中摆放点

Fig. 1 Geotextile paving and centralized placement of auxiliary tools

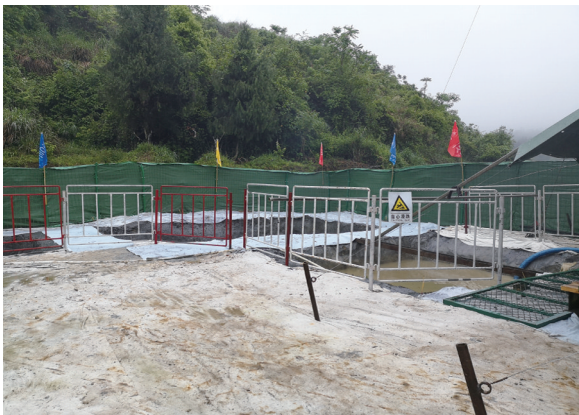


图 2 坑池四周围栏设置

Fig. 2 Column setting around the pit pool



图 3 管材堆放

Fig. 3 Pipe stacking

安全施工的管理制度和图表,图牌版面材料采用环保板材,主要图牌:工程概况牌、安全环保警示牌、危险源识别控制牌、施工管理制度牌、岗位责任牌、施工现场平面布置图、环境恢复治理方案图、设备及施工安全操作规程。在水资源保护方面,无论是生产用水还是生活用水都非常节约,在建设水池、泥浆池、沉砂池及循环槽时,底部都采

用水泥浆做好防渗处理,且周围采用了防护栏维护,做到封闭式管理(图 2);在钻杆的堆放时,采取集中堆放(图 3)。在施工过程中产生的废机油,润滑油等废油以及施工后的废浆都是集中收集后交由就近的废弃物处理中心处理,避免了乱排乱放对周边环境造成的污染;在固体废弃物管理方面,矿区建立了健全的废弃物管理制度,并且对废弃物进行分类,定期把固废运往处理中心集中处理。

4.2 使用环保冲洗液,保护地下水水质

钻探施工过程中,矿区整体采用了环保型泥浆,不仅有效的推进了钻探的进度,还减少了在施工过程中“三废”对环境的影响。冲洗液的类型也是根据各个场地的地层情况。矿区选择的环保型冲洗液可降解钻探过程中产生的大量废水及废石,同时也更大限度地对地下水层的水质、储量以及流量等起到了保护作用。在孔壁较稳定的地层,采用了清水、自然造浆、细分散冲洗液作冲洗液;在较破碎胶结性差的地层,采用了生物聚合物环保泥浆,它不仅具备封堵、润滑、防塌等钻探性能外,还能不破坏当地地下水、无毒性、保持酸碱平衡,可以有效的避免生态环境以及地下水的污染。

4.3 采取一基多孔技术,减少对环境的扰动

以保护生态环境为优先,推进先进技术在项目上的应用。因此,在矿区采取一基多孔技术(图 4),整个过程减少了设备搬运,节约了勘查经费,



图 4 钻孔 ZK2901 与 ZK2903 现场位置图

Fig. 4 Site location plan of ZK2901 and ZK2903

降低对生态环境的扰动,钻机选择了 CSD-3000 型全液压钻机,其中钻孔 ZK2901 方位角为 90°, 倾角 85.5°, 钻孔 ZK2903 方位角为 315°, 倾角 88°,在钻进的过程中,对一些造斜、破碎的地层,

在钻压、钻速和泵量等方面都严格把控。对每次测斜数据都进行详细分析,按照设计的目的,稳中求进,不仅达到了勘探目的(图 5),更是有效的诠释了一基多孔技术在高地矿区绿色勘查的应用。

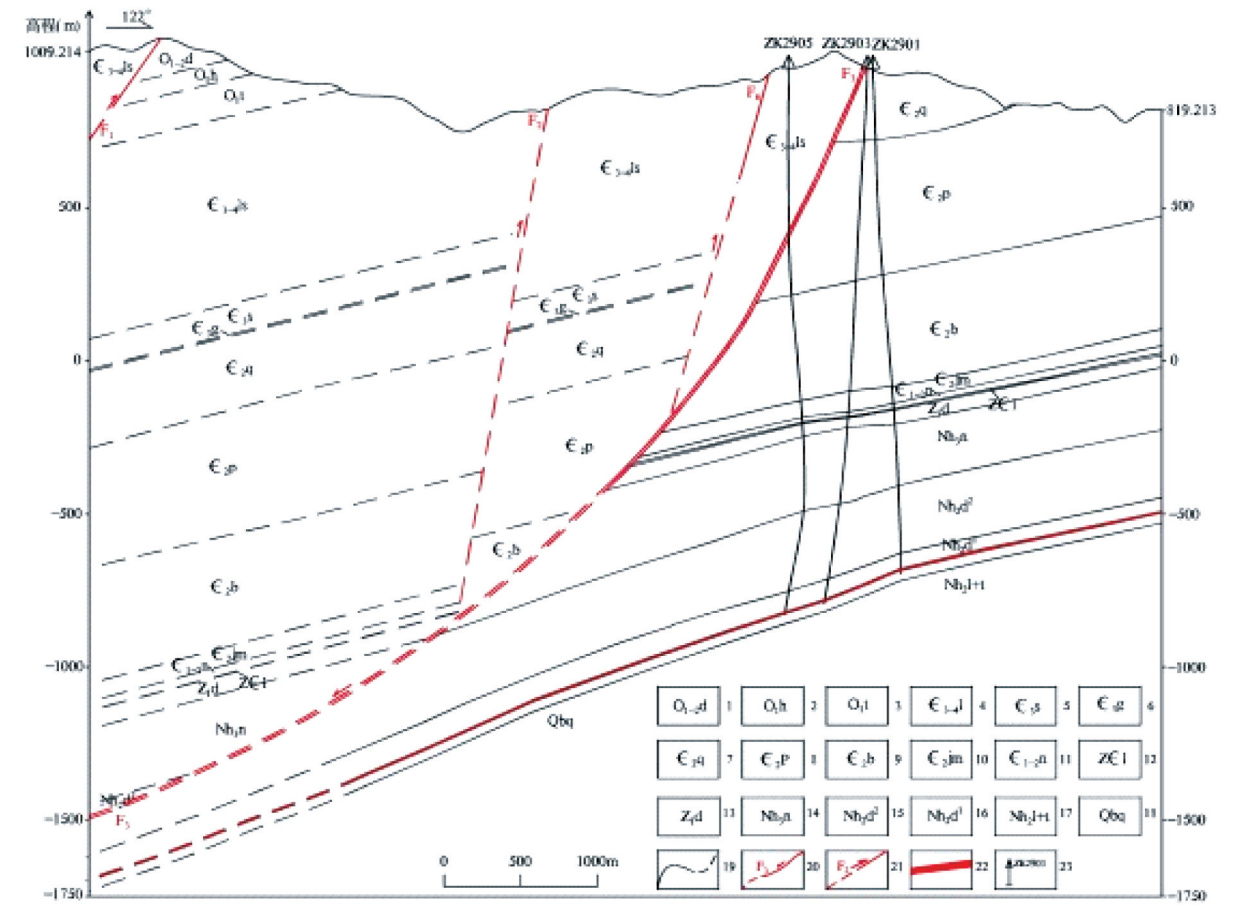




图 6 (a) 钻孔 ZK3303 土地复垦前

Fig. 6 (a) ZK3303 before land reclamation



图 6 (b) 钻孔 ZK3303 土地复垦后

Fig. 6 (b) ZK3303 after land reclamation

对林地复垦首先是恢复其地貌,再严格按照要求对复垦林地进行植树,植树的间距为 2 m,树苗高度超过 50 cm,如钻孔 ZK3504 选择柏树进行林地复垦(图 7),道路林地复垦也是如此(图 8)。

4.6 和谐社区创建

道路的修建、设备的搬运以及复垦复绿等工作都得到了当地居民的支持,在降噪、防止大气污染、土地复垦以及林地复绿等方面,都是得到当地居民的肯定和认可。工作人员吃住都在就近的农家,工作人员严格恪守职业素养,和当地居民结下了深厚的鱼水之情,构建了和谐社区。



图 7 钻孔 ZK3504 林地复垦实景图

Fig. 7 Real reclamation of ZK3504 forest land



图 8 钻孔 ZK3305 道路林地复垦实景图

Fig. 8 Real reclamation of ZK3305 road forest land

5 结论

(1)高地锰矿勘探采用了一基多孔技术,减少了对环境的破坏,降低了对生态环境的扰动。同时,整个过程减少了设备搬运,节约了勘查经费,勘查经济合理。

(2)对开挖的地块,因地制宜、高效、有序的开展复绿复垦工作,实现了对生态环境的保护,环境恢复治理的落实,恢复治理效果好,当地村民满意。

(3)实施高地锰矿绿色勘探,地质勘查全过程环境影响最小化控制,最大限度地减少了勘查工作对生态环境的扰动和影响,实现地质勘查与环境保护、地方经济同步发展,生态环境保护和资源勘查双赢。

[参考文献]

- 巩鑫,吴昭阳,杜茜,等. 2018. 贵州道真新民铝土矿区绿色勘查应用与实践[J]. 贵州地质,35(3):205-209.
- 郭方方,王春永. 2020. 绿色勘查技术在豫西银多金属矿勘查中的应用[J]. 西部探矿工程,294(10):151-153.
- 雷晓力,张瑶,张福良,等. 2019. 新时期我国绿色勘查典型实践与技术研究[J]. 中国矿业,28(S2):124-128.
- 刘海声,穆元红,庞怀玮,等. 2020. 绿色勘查钻探技术在青海省铜金山矿区的应用[J]. 化工矿产地质,42(04):315-317.
- 刘乃刚. 2018. 新时代践行“绿水青山就是金山银山”理念研究[J]. 鄱阳湖学刊,000(004):29-36.
- 李在文. 2012. 树立绿色理念倡导绿色勘查[N]. 贵州地质,29(003):161-162.
- 罗长海,李福军,马德庆,等. 2019. 青海省绿色勘查工作开展情况及成效分析——以多彩整装勘查区为例[J]. 地质找矿论丛,34(3):471-477.
- 马骋,张福良,雷晓力,等. 2019. 绿色勘查环境管理制度研究:以澳大利亚昆士兰州为例[J]. 中国矿业,28(06):77-80.
- 沈红钱,张遂,谢小峰,等. 2021. 黔渝毗邻区杨家湾-老木湾南华纪含锰地堑特征与找矿预测[J]. 贵州地质,38(01):1-7.
- 王国龙. 2018. 江西省德兴市水石坞金矿绿色勘察的实践与探索. 市场周刊·理论版(34),74-75.
- 王婉琼. 2020. 国内外绿色勘查浅析[J]. 西部资源,000(05):184-186.
- 谢丽丽. 2019. 绿色勘查——新时代地质找矿新模式[J]. 世界有

色金属,000(023):76-78.

- 谢小峰,杨坤光,钱山,等. 2018. 黔东南松桃地区燕山期构造特征研究——以高地超大型锰矿床为例[J]. 地质论评,64(03):623-632.
- 叶尔那·胡莎音. 2019. 探讨便携式钻机在绿色勘查中的应用[J]. 世界有色金属,000(23):257-258.
- 袁良军,谢兴友,郑超,等. 2019. 贵州松桃高地隐伏超大型锰矿床主要特征与找矿实践[J]. 贵州地质,36(3):197-206.
- 袁良军,周琦,姚希财,等. 2018. 贵州松桃高地特大型富锰矿床主要地质特征[J]. 贵州地质,35(04):314-318.
- 张遂,周琦,张平壹,等. 2018. 贵州松桃普觉超大型锰矿床主要特征与找矿实践[J]. 贵州地质,35(04):40-49.
- 张新虎,刘建宏,黄万堂,等. 2017. 绿色勘查理念:认知、探索与实践[J]. 甘肃地质,000(01):5-11.
- 周琦,杜远生,覃英. 2013. 古天然气渗漏沉积型锰矿床成矿系统与成矿模式——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 矿床地质,32(03):457-466.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2016. 贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区地质找矿主要进展及潜力预测[J]. 贵州地质,33(04):237-244.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 地质学报,91(10):2285-2298.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2018. 黔东南及毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿研究历史、主要进展及展望[J]. 贵州地质,35(04):270-281.

Exploration and Practice of Green Exploration of Super Large Manganese Deposit in Gaodi, Songtao of Guizhou

CAI Guo-rong^{1,2}, ZHANG Sui^{1,2,3}, SHEN Hong-qian^{1,2,3}, ZENG Fei¹,
FENG Kai-you¹, ZHU Pu¹, QIN Yong-yin¹, LIU Ming-min¹, WU Ying-zhi¹

- (1. 103 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Exploration & Development of Guizhou Province, Tongren 554300, Guizhou, China; 2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550003, Guizhou, China; 3. Team of scientific and technological Innovation Talents on the Prediction and Evaluation of Manganese Resources in Guizhou Province, Tongren 554300, Guizhou, China)

[Abstract] This paper selects the Guizhou Songtao Gaodi manganese mine as the research object. Starting from the actual situation, the implementation plan is compiled. During the survey process, the site area planning, road construction, living area, work area, safety and environmental protection culture construction, water resources protection, and The seven aspects of solid waste management were implemented in detail, using the “one mother hole with multiple laterals” technology, environmentally-friendly cleaning fluids were used, and reclamation and green restoration of the excavated land. The entire investigation process realized the protection of the ecological environment and the environment. The implementation of restoration governance and the promotion of harmonious geological prospecting. The success of green surveys shows that the implementation of green surveys can minimize the disturbance and impact of surveys on the ecological environment and achieve a win-win situation for resource surveys and the ecological environment.

[Key Words] Green exploration; Environmental protection; Gaodi manganese ore; Guizhou Songtao

音频大地电磁法对黔东高地锰矿床电性结构及犁式正断层的识别

沈小庆^{1,2}, 杨炳南^{1,2,5}, 周琦^{2,3}, 张德实^{1,2},
何帅^{1,2}, 沈红钱^{1,2}, 何永川⁴

(1. 贵州省地矿局 103 地质大队, 贵州 铜仁 554300; 2. 自然资源部基岩区矿产资源勘查工程技术创新中心, 贵州 贵阳 550081; 3. 贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550003; 4. 贵州省地矿局 104 地质大队, 贵州 都匀 558000; 5. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074)

[摘 要] 黔东高地锰矿是我国第一个特大型富锰矿床, 也是黔东地区典型的南华纪“大塘坡式”沉积型锰矿床。区内主要断裂构造为犁式正断层(F_3), 该断层对区内锰矿层的保护与破坏具有重要影响, 其空间展布特征以及与含锰岩系接触关系的勘查分析对区内找矿预测尤为重要。为了识别犁式正断层在地下深部的展布特征, 调查其对含锰岩系的破坏程度, 采用音频大地电磁法 (AMT) 对研究区地下电性结构特征和断裂构造进行研究。在物性分析的基础上, 结合钻孔揭露的地层信息, 建立了简单的正断层理论模型, 采取不同的反演模式对理论模型进行反演计算, 经对比分析, 优选出了区内二维反演模式。通过实测 AMT 数据反演, 查明了剖面电性结构特征。结合钻孔工程控制, 有效的识别了犁式正断层在剖面上呈上陡下缓的展布特征。推测 F_3 断层未对含锰岩系造成破坏, 为研究区锰矿深部找矿提供了地球物理支撑。

[关键词] 高地锰矿; 犁式正断层; 音频大地电磁法; 电性结构; 贵州

[中图分类号] P618.32; P631.3⁺25; P542.3⁺1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2021)02-0152-09

1 引言

近十年来, 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队在黔东地区以华南南华纪含烃气液喷溢沉积型锰矿床为研究对象, 运用锰矿裂谷盆地喷溢沉积成矿理论 (周琦等, 2019), 通过长期团体协作, 联合攻关, 实现了我国锰矿地质找矿重大突破 (周琦等, 2016, 2017)。多年来, 针对黔东地区锰矿成矿地质背景、成矿系统以及找矿关键技术等开展了大量的研究工作, 但对锰矿体

深部埋藏特征与后期保存条件的研究程度不高。因此, 在区内开展具有较大探测深度的音频大地电磁法, 研究锰矿体深部埋藏特征具有重要意义。

2 地质概况及地球物理特征

2.1 地质概况

研究区位于扬子地块与华夏地块之间的江南造山带西南段, 全国 26 个重要成矿区带中的上扬

[收稿日期] 2021-01-03 **[修回日期]** 2021-04-23

[基金项目] 贵州省重点矿产资源大普查松桃县高地锰矿勘探项目、贵州省锰矿资源预测评价科技创新人才团队 (编号: 黔科合平台人才[2018]5618)、贵州省科技计划项目 (编号: 黔科合支撑[2019]2868、黔科合平台人才[2019]5654)、贵州省地矿局地质科研项目 (编号: 黔地矿科合[2019]2 号) 联合资助。中国地质调查局发展研究中心《贵州铜仁松桃锰矿矿集区矿产地质调查 (大湾地区)》项目 (编号: 中地调研合同[2020]第 284 号)

[作者简介] 沈小庆 (1987—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事地球物理勘查与应用工作。E-mail: 125796350@qq.com。

[通讯作者] 杨炳南 (1985—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事地球物理勘查与应用工作。E-mail: 648417001@qq.com。

子东缘成矿带(陈毓川等,2006),处于石阡-松桃-古丈Ⅲ级地堑盆地中的李家湾-高地-道坨Ⅳ级地堑盆地中心(图1)。高地超大型锰矿床属华南黔湘渝地区众多新元古代南华纪早期菱锰矿床之一,是一种新的锰矿床类型——含烃气液喷溢沉积型锰矿床(周琦等,2019)。

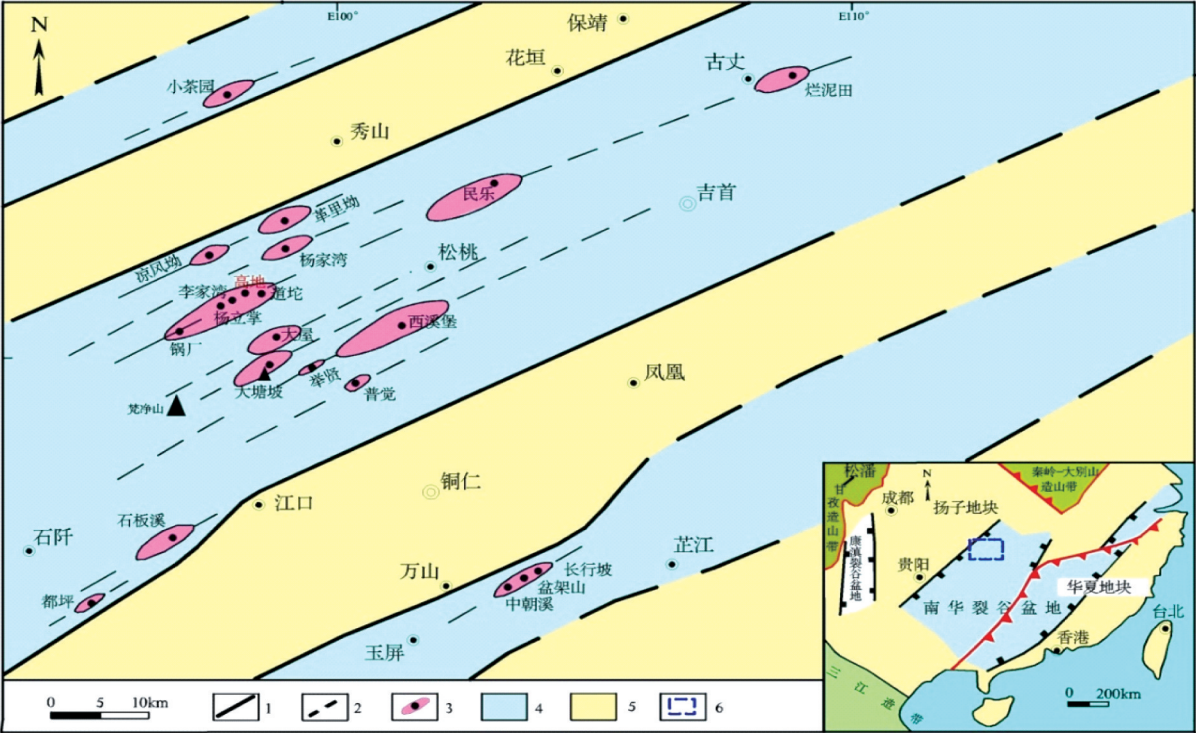


图1 黔渝湘毗邻区南华纪早期武陵次级裂谷盆地结构与构造古地理图(周琦等,2016)

Fig. 1 Structural and tectonic paleogeographic sketch of the Early Cryongenian Wuling Secondary Rift Basin in the Guizhou-Hunan-Chongqing Border Area, South China(after Zhou Qi et al., 2016)

1—控制Ⅲ级断陷盆地和隆起的同沉积断层;2—控制Ⅳ级断陷盆地和隆起的同沉积断层;3—Ⅳ级断陷盆地及所控制的锰矿床名称;4—Ⅲ级断陷盆地范围;5—Ⅲ级隆起范围;6—研究区大地构造位置

区内出露地层有震旦系陡山沱组(Z_1d)、老堡组(Z_6l)、寒武系牛蹄塘组($\epsilon_{1-2}n$)、九门冲组(ϵ_{2jm})、变马冲组(ϵ_{2b})、杷榔组(ϵ_{2p})、清虚洞组(ϵ_{2q})、高台组(ϵ_{3g})、石冷水组(ϵ_{3s})、娄山关组($\epsilon_{3-4}ls$)、奥陶系桐梓组(O_1t)、红花园组(O_1h)、大湾组($O_{1-2}d$)及第四系(Q)(田锦江等,2018)。

矿区位于梵净山穹状背斜北东侧,区域构造发育,形迹复杂,以一系列北北东、北东向断裂、褶曲为主的构造格架。区内褶皱主要有猴子坳向斜,断层主要有:红沙井断层(F_0)、老屋基断层(F_1)、黄泥洞断层(F_2)、冷水溪断层(F_3),见图2。区内地表及浅部断裂构造相对较复杂,但深部延伸不大,仅 F_3 延深较大,其北西盘下降,南东盘上升,主断裂倾向NW,倾角 $35^{\circ}\sim 65^{\circ}$,为犁式正断层性质(谢小峰等,2018)。该断层对区内矿体有一定的控制作用。含矿层及矿体呈缓倾单斜样式,相对而言,构造复杂程度较简单。

2.2 地球物理特征

在综合分析矿区及毗邻矿区以往物探工作获取的物性资料基础上(杨炳南等,2015),结合实测毗邻李家湾锰矿井下含锰岩系物性数据、钻孔岩性物性数据、岩矿石地表露头物性数据,进行对比分析,归纳了包括白云岩、灰岩、砂岩、炭质页岩、页岩、含砾砂岩、锰矿石、板岩等不同岩(矿)石的物性特征(表1)。经物性特征分析,区内寒武系中上部娄山关组至清虚洞组地层岩性主要为灰岩、白云岩,综合电阻率大于 $3\,000\,\Omega\cdot m$,呈高阻电性特征;寒武系中下部杷榔组至南华系大塘坡组地层岩性主要为页岩、炭质页岩、含砾砂岩,综合电阻率小于 $1\,000\,\Omega\cdot m$,呈低阻电性特征;南华系铁丝坳组至板溪群地层岩性主要为含砾砂岩、板岩,其综合电阻率大于 $1\,500\,\Omega\cdot m$,呈相对高阻电性特征。总体上研究区地层岩性由上至下划分为“碳酸盐岩-碎屑岩-浅变质岩”的三层结构,地下电性结构对应

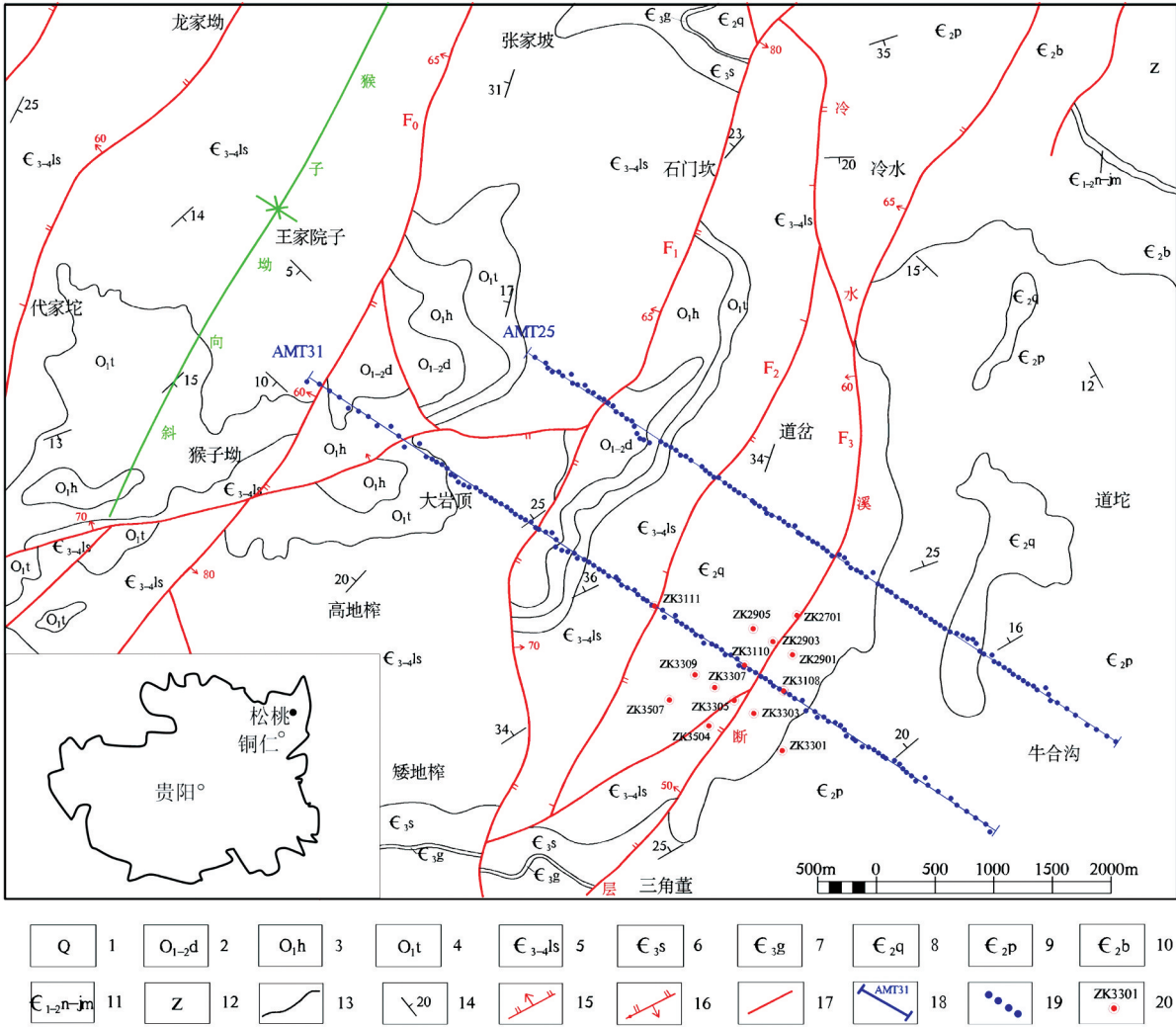


图2 研究区地质及AMT工作布置简图

Fig. 2 Sketch map of geological structure and the AMT station

1—第四系;2—大湾组;3—红花园组;4—桐梓组;5—娄山关组;6—石冷水组;7—高台组;8—清虚洞组;9—杷榔组;10—变马冲组;11—九门冲和牛蹄塘组;12—震旦系;13—地层界线;14—地层产状;15—正断层;16—逆断层;17—性质不明断层;18—AMT剖面及编号;19—AMT观测点位;20—见矿钻孔及编号

呈“高阻—低阻—中高阻”三层模式(图3)。

锰矿成矿地质体(大塘坡组第一段,即含锰岩系)主要由炭质、粉砂质粘土岩夹条带状、块状菱锰矿等组成,综合电性特征呈低阻。其上覆的南沱组(Nh_{3n})含砾粉砂岩和下伏铁丝坳组(Nh_{2t})含砾砂岩均为高阻电性特征。含锰岩系与上覆、下伏地层岩性电性特征差异明显,具备音频大地电磁法测量前提条件。

表1 岩(矿)石物性特征统计				
Table 1 Statistics of physical properties of rocks				
岩性名称	地层代号	样点数(点)	电阻率平均值($\Omega \cdot m$)	极化率平均值(%)
地表粘土	Q	31	135.71	1.62
白云岩	$E_{3-4}ls, E_{2q}, Z_1d$	52	3 203.29	1.86
灰岩	E_{2q}	38	5 121.47	1.67
砂岩	E_{2p}, E_{2b}	40	1 677.38	1.88
页岩	Nh_2d, E_{2jm}	35	540.98	2.3
炭质页岩	Nh_2d	41	24.41	20.28
含砾砂岩	Nh_3n, Nh_2t	45	1 662.41	2.76

续表				
岩性名称	地层代号	样点数(点)	电阻率平均值($\Omega \cdot \text{m}$)	极化率平均值(%)
板岩	Qbh	68	1 382.7	2.22
氧化锰矿石	Nh ₂ d	30	49.86	8.27
块状锰矿石	Nh ₂ d	35	19.04	11.98

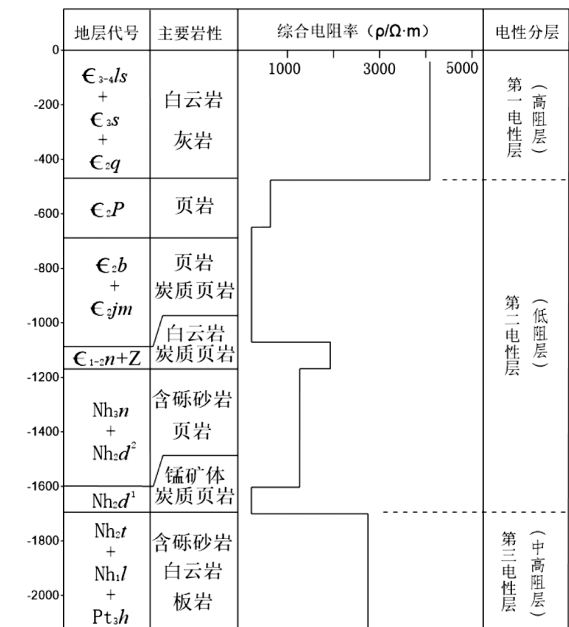


图3 研究区电性结构特征图

Fig. 3 The resistivity structure map of study region

3 AMT 数据采集与处理

大地电磁法(MT)是一种采用天然交变电磁场为场源,对地下目标体进行探测的地球物理方法(Cagnaird,1953;Chave and Jones,2012)。经过多年来的深入研究与实践,大地电磁法已经逐步成为应用最广泛的电磁勘探方法之一。音频大地电磁法(AMT)是大地电磁法在高频段的衍生,被广泛的应用在地热、矿产、工程、环境及地灾勘探中(郑彦丰等,2017;严小丽等,2019),具有探测深度大、不受高阻屏蔽、对低阻层分辨率高、施工简单等优点(刘国兴,2005)。

3.1 数据采集

采用加拿大凤凰公司生产的V8多功能电法工作站开展音频大地电磁测深剖面的数据采集工作。采集频率范围10 400 Hz~0.35 Hz,采集频点共计60个。采用四分量张量观测方式(E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y),采集参数包括由两个通过不极化电极测量的电道数据和两个利用磁探头测量的磁道数据。野外采用“十”字型布置方式(图4),单点采

集时间大于60 min。通过V8-6R主机和V8-3ER辅助机共用磁参考、深埋磁棒、旁移测点等方式压制人文干扰。两条音频大地电磁测深剖面方位角122°,与区内主构造走向大致垂直(图2),剖面间距600 m,点距50~100 m,25号剖面长6 000 m,31号剖面长7 000 m,共计测点234个。

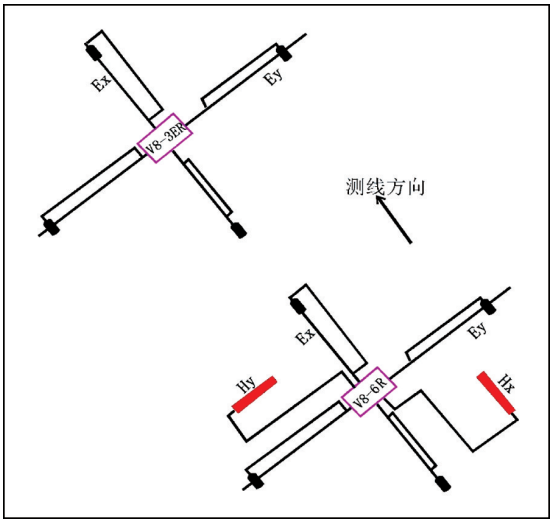


图4 音频大地电磁测深观测系统示意图

Fig. 4 Diagram of AMT measuring device

3.2 数据处理

使用凤凰公司的SSMT2000软件对数据进行预处理。首先按照野外班报记录更改每个测点的参数信息,然后对原始的时间序列的AMT记录进行傅氏变换,之后用Robust功能模块对每个测点的数据进行再处理,得到了用于编辑的互功率谱,使用MTeditor进行子功率谱挑选,剔除受干扰而畸变的子功率谱。预处理后的数据导入MTSoft2D软件,进行编辑平滑、极化模式识别(Egbert et al.,1986)、静态校正(Jiracek,1990)、地形校正(韩骑等,2015)、空间滤波等处理。

4 正断层模型建立与反演计算

4.1 正断层模型建立

据ZK3504、ZK3111等钻孔资料,研究区主要

岩性自上而下依次为娄山关组白云岩、石冷水组白云岩、清虚洞组灰岩、杷榔组页岩、变马冲组页岩及炭质页岩、南沱组含砾砂岩、大塘坡组第二段粉砂质页岩、大塘坡组第一段炭质页岩及锰矿体、铁丝垌组含砾砂岩。结合物性特征,建立电性结构特征为“高-低-高”三层的简化正断层模型。通过钻孔揭露的上部碳酸盐岩高阻组合层厚度约为1 km,中部碎屑岩低阻组合层厚度约为1 km,含锰岩系(锰矿成矿地质体)位于低阻层底部。不考虑地形和岩层产状因素,建立了如图5所示的简单的正断层理论地电模型,通过选取不同的反演参数进行反演计算,定性分析其对断裂构造的识别效果,以此确定实测AMT数据的最优反演参数。

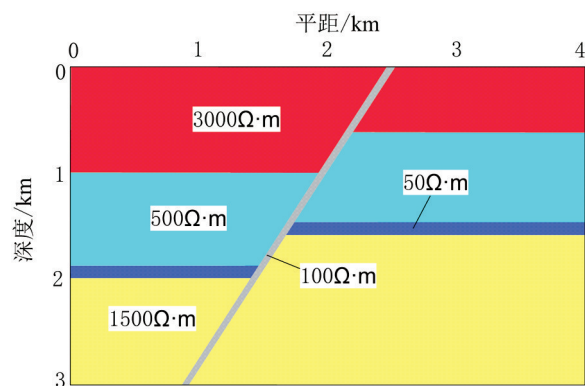


图5 正断层地电模型

Fig. 5 Normal fault geoelectric model

该模型包含了由地表至深部电阻呈“高-低-高”的三层电性结构。模型长度为4 km,深度为3 km,在平距2.5 km处加入正断层。模型上部1~2 km表示寒武系中上统娄山关组至清虚洞组碳酸盐岩高阻层,其电阻率填充为 $3\,000\,\Omega\cdot\text{m}$,模型中部2~3 km表示寒武系下统杷榔组至南华系大塘坡组碎屑岩低阻层,其电阻率填充为 $500\,\Omega\cdot\text{m}$,在该低阻层底部加入了表示含锰岩系的低阻薄层,设置电阻率为 $50\,\Omega\cdot\text{m}$ 。模型深部2~3 km电阻率填充为 $2\,500\,\Omega\cdot\text{m}$,表示南华系铁丝垌组至青白口系清水江组含砾砂岩、板岩高阻层。断层电阻率填充为 $100\,\Omega\cdot\text{m}$ 。使用Mitssoft2D正反演软件采用矩形网格剖分对该模型进行了二维有限元正演(刘云等,2010),其中横向、纵向网格数量为 50×50 ,在 $10\,400\,\text{Hz}\sim 0.35\,\text{Hz}$ 频率范围内按对数等间距取60个计算频点。

4.2 正断层模型反演计算

目前,音频大地电磁法常用的反演方法较多,

国内较主流的有Bostick反演法(周虬,1985)、非线性共轭梯度反演法(Rodi W L et al., 2001)、Occam反演法等(Groothedlin C et al., 1990)。Bostick反演法是一种拟二维的近似反演方法,其优点是能够快速直观的反映视电阻率随深度的变化情况,但其反演结果精度不高。Occam反演法是求一个多层地球物理模型的最光滑解,具有稳定的收敛性,对初始模型和参数依赖较弱,但其反演耗时长。非线性共轭梯度反演法(NLCG)属于非启发式非线性反演方法,反演过程无需取雅克比矩阵 G 和 G^T ,利用麦克斯韦方程组的叠加原理和格林函数性质,通过雅克比矩阵与一向量乘积的整体运算大大降低了反演时间,相对于其他反演方法,其效率高,计算稳定,对构造模型反映更加准确,但对初始模型的依赖性较强。基于以上常用反演方法优缺点对比(康敏等,2017),分别以Bostick和一维Occam反演为初始模型进行二维非线性共轭梯度反演来对比优选反演参数。

图6为采用不同初始模型及反演参数对正断层模型开展二维NLCG反演的结果对比。其中,a是以一维Occam-TE数据为初始模型的NLCG-TE数据二维反演结果;b是以一维Occam-TE数据为初始模型的NLCG-TM数据二维反演结果;c是以一维Occam-TE数据为初始模型的NLCG-TE&TM数据二维反演结果;d是以Bostick-TE数据为初始模型的NLCG-TE数据二维反演结果;e是以Bostick-TE数据为初始模型的NLCG-TM数据二维反演结果;f是以Bostick-TE数据为初始模型的NLCG-TE&TM数据二维反演结果。六种反演模式在整体上均反映出了模型“高-低-高”的三层电性结构特征,但细节上表现上有所不同。以一维Occam-TE数据为初始模型的反演结果对中部低阻层厚度的反映更为客观,而以Bostick-TE数据为初始模型的反演结果所反映的中部低阻层厚度小于模型中该低阻层设计的厚度。在对正断层的识别能力方面,b、c、e、f均呈现有断裂异常特征,a和d的断裂异常特征不够明显,表明无论采用一维Occam或Bostick作初始模型,NLCG+TE数据二维反演对横向电性变化反映不灵敏,对断层的识别效果较差。b、c、e、f中b和c能更好的识别出正断层属性,断层上盘、下盘的错动特征显著。由此认为,采用一维Occam-TE数据为初始模型更有利于断层的识别。b和c效果较相

似,但 b 在识别断层的同时更好的呈现了低阻层整体层状特征。综合分析认为,采用 b 反演模式对“高-低-高”三层电性结构的正断层模型识别

效果较佳,本次研究区实测 AMT 数据反演采用一维 Occam-TE 数据为初始模型进行 NLGC-TM 的二维反演方法来实现。

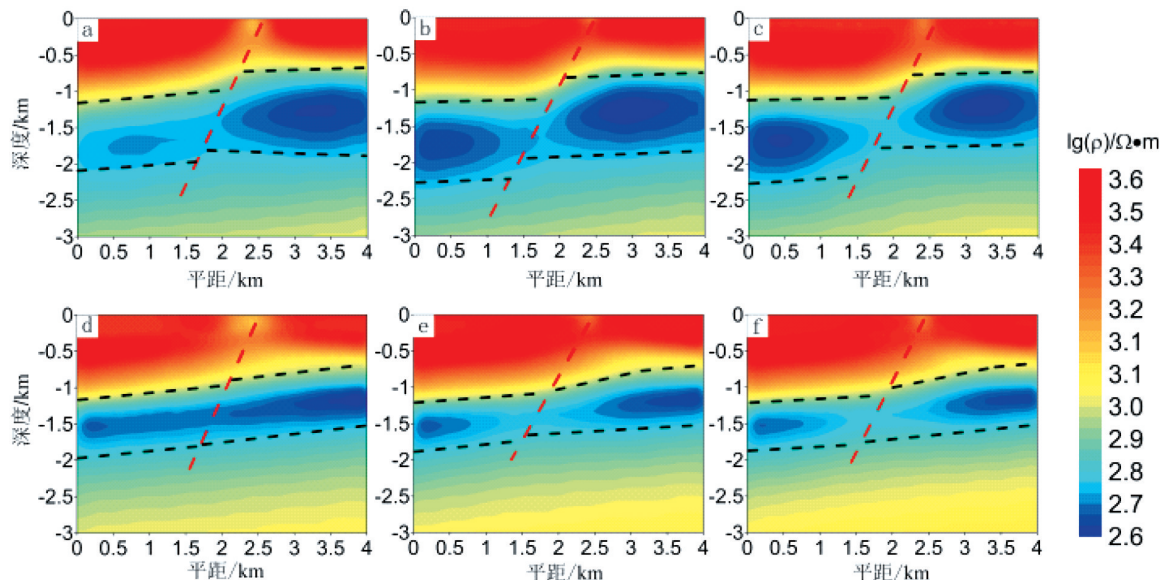


图6 不同初始模型及参数的 NLGC 反演结果

Fig. 6 Fig. 6 NLGC inversion results of different initial models and inversion methods

a—初始模型 Occam-TE 数据+TE 反演;b—初始模型 Occam-TE 数据+TM 反演;c—初始模型 Occam-TE 数据+TE&TM 反演;d—初始模型 Bostick-TE 数据+TE 反演;e—初始模型 Bostick-TE 数据+TM 反演;f—初始模型 Bostick-TE 数据+TE&TM 反演

5 实测剖面反演结果分析

以 AMT31 反演剖面为例分析(图 7)。总体上,电阻率反演剖面北西段(左侧)垂向电性结构为“高-低-中高”的三层结构,剖面南东段(右侧)垂向电性结构为“低-中高”的二层结构。根据剖面电阻率等值线特征,结合钻孔工程控制,划分了 a、b、c、d 四个岩性组合区块。其中,a 区块呈高阻电性特征,推测为奥陶统-下寒武统岩性以碳酸盐岩为主地层组合;b+c 区块呈低阻电性特征,推测为下寒武统-南华统岩性以碎屑岩为主地层组合,结合剖面上 ZK3110 等九个钻孔对大塘坡组顶界和锰矿体的控制,划分 c 区块为大塘坡组地层;d 区块上部呈相对低阻,中下部呈中高阻,根据正断层模型反演计算结果,位于低阻层下方的中高阻层电阻率等值线在反演断面上呈现由低阻向中高阻渐变的特征,推测 d 为铁丝垌组和清水江组地层组合。

根据钻孔对锰矿体的揭露情况,圈定了 150-205 号点范围内大塘坡组及锰矿体的空间展布形态,锰矿体位于大塘坡组地层底部,断面图上表现为相对低阻的综合电性特征,位于由低阻向中高阻

渐变的过渡带,其表现特征与模型反演结果一致。结合大塘坡组横向呈低阻和下伏铁丝垌组、清水江组呈高阻的延伸展布特征以及钻孔控制的大塘坡组厚度,推测了锰矿体和大塘坡组地层在断面上的空间展布形态,锰矿体埋深由北西至南东呈较缓阶梯状减小,海拔由-1 750 m 抬升至海拔 50 m。

横向上,170-180 号点范围在 1 km 以浅呈现有明显的电阻率分界面,倾角约 60°,推测为 F_3 断层在浅部的表现特征,钻孔 ZK307、ZK3110 证实了 F_3 断层在剖面 1 km 以浅的发育形态。随着 F_3 断层向深部发育,进入下寒武碎屑岩低阻组合层,由于 F_3 断层具有张性构造特征,破碎带较宽,表现为低阻电性特征,在低阻地层中难以识别。根据钻孔 ZK3113、ZK3111、ZK309 在深部对 F_3 断层的揭露情况,圈定了 F_3 断层在低阻层中(地下 1~2 km 深度范围)的展布特征,其在深部倾角逐渐变缓。根据剖面底部呈中高阻电性特征的铁丝垌组和清水江组地层组合横向上连续延伸展布特征,推测 F_3 断层延伸至大塘坡组软弱岩层后尖灭,未延伸至铁丝垌组地层,对锰矿体未造成破坏。135-150 号点中深部电阻率等值线发生了较明显的下陷,横向上表现出明显的不连续性,推测为 F_2 断层引起的异常响应。

6 结论

(1)在物性分析的基础上,结合钻孔资料,建立了“高-低-中高”三层电性结构的简单正断层理论模型,通过选用不同初始模型及参数对理论模型进行反演计算,优选出了以一维 Occam-TE 为初始模型的 NLGG-TM 二维反演模式,用于研究区 AMT 实测数据反演。

(2)根据电阻率等值线特征,结合钻孔工程控制,查明了研究区地下电性结构。区内北西方向电性结构呈“高-低-中高”的三层结构,南东方向为“低-中高”的二层结构。识别了区内大塘坡地层及锰矿体在剖面的空间展布形态。

(3)音频大地电磁法有效的识别了犁式正断层(F_3)的空间展布形态,对其在深部的发育情况获得了新的认识,即犁式正断层(F_3)上陡下缓,延伸至大塘坡组地层可能已经尖灭,可能未对含锰岩系造成破坏。因此,高地锰矿床北西深部仍具有较大的找矿潜力。

[参考文献]

- 陈毓川,朱裕生,肖克炎,等. 2006. 中国成矿区(带)的划分[J]. 矿床地质, 25(S1): 1-6.
- 韩骑,胡祥云,程正璞,等. 2015. 自适应非结构有限元 MT 二维起伏地形正反演研究[J]. 地球物理学报, 58(12): 4675-4684.
- 康敏,胡祥云,康健,等. 2017. 大地电磁二维反演方法分析对比[J]. 地球物理学进展, 2(2): 476-486.
- 刘国兴. 2005. 电法勘探原理与方法[M]. 北京:地质出版社.
- 刘云,王绪本. 2010. 大地电磁二维自适应地形有限元正演模拟[J]. 地震地质, 32(3): 382-391.
- 田锦江,姚希财,沈红钱,等. 2018. 贵州省松桃县高地锰矿详查报告[R]. 贵州省地质矿产勘查开发局 103 地质大队.
- 谢小峰,杨坤光,钱山,等. 2018. 黔东南松桃地区燕山期构造特征研究——以高地超大型锰矿床为例[J]. 地质论评, 64(03):

623-632.

- 杨炳南,周琦,杜远生,等. 2015. 音频大地电磁法对深部隐伏构造的识别与应用:以贵州省松桃县李家湾锰矿为例[J]. 地质学报, 34(6): 26-32.
- 杨炳南,胡祥云,周琦,等. 2018. 华南南华纪古天然气渗漏沉积型锰矿 AMT 勘查技术方法研究[J]. 地质学报, 35(4): 369-375.
- 严小丽,康慧敏,王光杰,等. 2019. AMT 方法在鳌山卫花岗岩地区深部地热构造勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 34(5): 1945-1953.
- 周虬. 1985. 一种简易的一维大地电磁测深反演方法——博斯蒂克法反演及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 20(1): 88-96.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2016. 贵州铜仁松桃锰矿国家整装勘查区地质找矿主要进展及潜力预测[J]. 贵州地质, 33(4): 237-244.
- 周琦,杜远生,袁良军,等. 2017. 古天然气渗漏沉积型锰矿床找矿模型——以黔湘渝毗邻区南华纪“大塘坡式”锰矿为例[J]. 地质学报, 91(10): 2285-2298.
- 周琦,杜远生. 2019. 华南古天然气渗漏沉积型锰矿[M]. 北京:科学出版社.
- 郑彦丰,朱通,赵晓亮,等. 2017. 音频大地电磁与浅层地震在隧道地质勘查中的应用[J]. 地球物理学进展, 32(3): 1417-1422.
- Cagniard L. 1953. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting[J]. Geophysics, 18(3): 605-635.
- Chave A D, Jones A G. 2012. The magnetotelluric method—Theory and practice[M]. Cambridge University Press.
- Egbert G D, Booker J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 87(1): 173-194.
- Groothedlin C, Constable S C. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data[J]. Geophysics, 55(5): 1613-1624.
- Jiracek G R. 1990. Near-surface and topographic distortions in electromagnetic induction[J]. Surveys in Geophysics, (2-3): 163-203.
- Rodi W L, Mackie R L. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. Geophysics, 66(1): 174-187.

Identification of Audio Magnetotellurics to the Electrical Structure and Plough-type Normal Fault of Gaodi Manganese Deposit in Eastern Guizhou

SHEN Xiao-qing^{1,2}, YANG Bing-nan^{1,2,5}, ZHOU Qi^{2,3}, ZHANG De-shi^{1,2}, HE Shuai^{1,2},
SHEN Hong-qian^{1,2}, HE Yong-chuan⁴

- (1. 103 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Developmeng, Tongren 554300, Guizhou, China; 2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China; 3. Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Developmeng, Guiyang 550003, Guizhou, China; 4. 104

*Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Duyun
558000, Guizhou, China; 5. China university of geosciences, Institute of geophysics &
geomatics, Wuhan 430074, Hubei, China)*

[**Abstract**] The Gaodi manganese deposit in east Guizhou is the first super-large manganese deposit in China and a typical Datangpo type deposit of Nanhua period in eastern Guizhou. The main fault structure in the area is the plough-type normal fault (F_3), which has an important influence on the protection and destruction of the manganese deposits in the area. The spatial distribution characteristics of the fault and the exploration analysis of the contact relationship between the fault and the manganese bearing rock series are particularly important for the prospecting prediction in the area. In order to identify the distribution characteristics of plough-type normal fault in deep underground and investigate the damage degree of the plough-type normal fault to the manganese-bearing rock system, the characteristics of underground electrical structure and fault structure in the study area were studied by audio magnetotellurics (AMT). Based on the analysis of physical properties and the stratigraphic information revealed by borehole, a simple theoretical model of normal fault was established, and different inversion modes were used to calculate the theoretical model. Through comparative analysis, the best two-dimensional inversion mode is selected. Through the inversion of the measured AMT data, the characteristics of the profile electrical structure are found out. Combined with drilling engineering control, the plough-type normal fault is effectively identified in the profile as upper steep and lower gentle distribution characteristics. It is speculated that the F_3 fault does not damage the manganese-bearing rock series, which provides geophysical support for deep prospecting of manganese deposits in the study area.

[**Key Words**] Gaodi manganese deposit; Plough-type normal fault; Audio magnetotelluric; Electrical structure; Guizhou

(上接第 168 页)

Geological Characteristics and Formation Environment Analysis of Ore Bearing Rock Series in Mazongling Bauxite Deposit of Northern Guizhou

YANG Xiao-song, ZHAO Yuan-you, SHI Zai-ping, ZHOU Guo-chen, CAI Xiao-qin

*(The 3rd General Team of Guizhou Nonferrous Metals and Nuclear Industry Geological Survey
Bureau, 563000 Zunyi, Guizhou, China)*

[**Abstract**] Through the study of lithology, rock (ore) structure, chemical composition and mineral composition of ore bearing rock series, consider: The lithologic association of ore bearing rock series has strong regularity. The bottom is dark chlorite bearing aluminous mudstone, and the top is light colored aluminous mudstone. The middle part is pisolitic clastic honeycomb semi earthy bauxite dominated by diaspore, the upper part is compact massive bauxite dominated by boehmite, and the top part is pisolitic and clastic bauxite dominated by boehmite. The formation of bauxite ore is due to the fact that The ore-forming parent material experienced wind oxidation, denudation, transportation, deposition, exposure and leaching, and finally formed the present bauxite. The chlorite bearing aluminous mudstone at the bottom of the ore bearing rock series was formed in the brackish water environment of the transitional phase, and the bauxite (rock) in the middle and upper part was formed in the continental lake environment. Pyrite in ore bearing rock series is formed by the reaction of sulfur brought in by fluid with iron oxide in rock (ore) during the process of diagenesis after sedimentation and precipitation in pores.

[**Key Words**] Bauxite; Ore-bearing rock series; Geological characteristics; Formation environment; Northern Guizhou

黔北马鬃岭铝土矿床含矿岩系地质特征及形成环境分析

杨晓松,赵远由,石再平,周国臣,蔡小勤

(贵州省有色金属和核工业地质勘查局三总队,贵州 遵义)

[摘 要]通过对含矿岩系的岩性、岩(矿)石结构构造、化学组成、矿物组成等的研究,认为:含矿岩系的岩性组合规律性强。底部为深色含绿泥石铝质泥岩,之上为浅色铝质泥岩。中部为以一水硬铝石为主的豆鲕-碎屑-蜂窝状-半土状铝土矿,中上部为以勃姆石为主的致密块状铝土矿,顶部为以勃姆石为主的豆状、碎屑状铝土岩(矿)。铝土矿的形成,是成矿母质经历了风化氧化、剥蚀、搬运、沉积、暴露淋滤,最终形成现在的铝土矿。含矿岩系底部含绿泥石铝质泥岩形成于过渡相的半咸水环境,中部及上部铝土矿(岩)形成于陆相湖泊环境。含矿岩系中的硫铁矿是沉积后的实成岩过程中,流体带入的硫,与岩(矿)石中的氧化铁反应,在孔隙处沉淀而成。

[关键词]铝土矿;含矿岩系;地质特征;形成环境,黔北

[中图分类号]P618.45;P588.2 [文献标识码]A [文章编号]1000-5943(2021)02-0161-09

1 引言

务(川)正(安)道(真)成矿区是黔中-渝南铝土矿成矿带的重要组成部分,是全国第一批 47 个整装勘查区之一。铝土矿资源丰富,该矿带内找矿成果丰硕。目前已发现矿床(点)20 余个,探明大型铝土矿床 9 个,已探明铝土矿资源×亿多吨,已经成为了贵州新的铝工业基地。马鬃岭铝土矿是整装勘查重要成果之一,位于务正道铝土矿成矿区南西部(图 1),“贵州省正安县马鬃岭铝土矿勘探”为 2020 年贵州省重点矿产资源大精查项目之一。

近年关于铝土矿成矿地质特征、成矿规律、矿床成因及找矿潜力分析的公开文献报道较多,但针对铝土矿含矿岩系的岩性组合、地球化学特征、矿物组合特征研究不多。本文通过含矿岩系及顶底板岩性组合、化学组成、矿物组成分析研究,旨在查明马鬃岭矿区含矿岩系地质特征,分析含矿岩系形成环境,以指导区域铝土矿找矿和勘查工作。

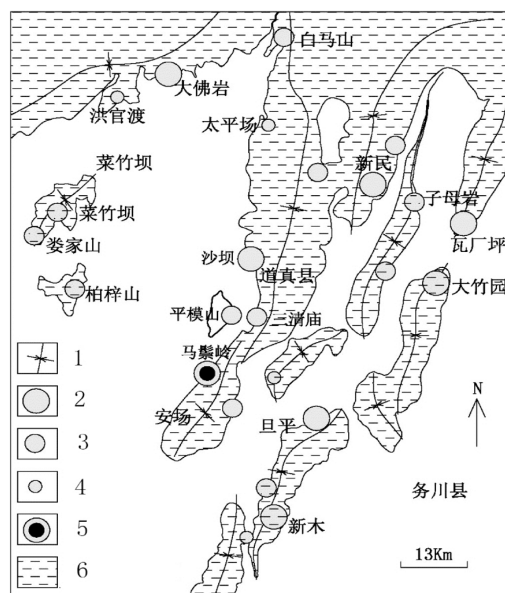


图 1 黔北务-正-道铝土矿成矿带斜构造及矿床(点)分布略图(据赵远由,2014 年,修改)

Fig. 1 Distribution sketch of Bauxite mineralization zone Tectonic and Deposit (points) in the area of Wuchuan-Zhengan=Daozhen, north Guizhou (added from ZHAO Yuan-you, 2014)
1—向斜轴;2—大型矿床;3—中型矿床;4—矿点;5—马鬃岭铝土矿;6—含矿岩系分布区

[收稿日期]2021-01-25 [修回日期]2021-04-28

[基金项目]贵州省 2020 年重点矿产资源大精查项目之“贵州省正安县马鬃岭铝土矿勘探”。

[作者简介]杨晓松(1965—),男,地质工程师,学士学位,从事矿产勘查工作。

[通讯作者]赵远由(1967—),男,应用技术研究员,工程硕士学位,长期从事矿产勘查工作。Email:615710308@qq.com。

2 地质背景

黔北务正道地区铝土矿成矿区位于黔中古陆北缘、上扬子陆块鄂湘渝黔前陆褶断带内。区域主构造线呈北北东向,局部近南北向。向斜较开

阔,背斜较狭窄,发育沿背斜轴或向斜两翼分布的断裂,断裂长度十至数十千米。铝土矿矿床(点)均分布在向斜内(图1),断层均为成矿后断层,破坏矿体的连续性。马鬃岭铝土矿位于安场向斜西翼北段,岩层倾向135°~150°,倾角一般25°~75°,岩层倾角南缓北陡、露头往深部变陡(图2)。

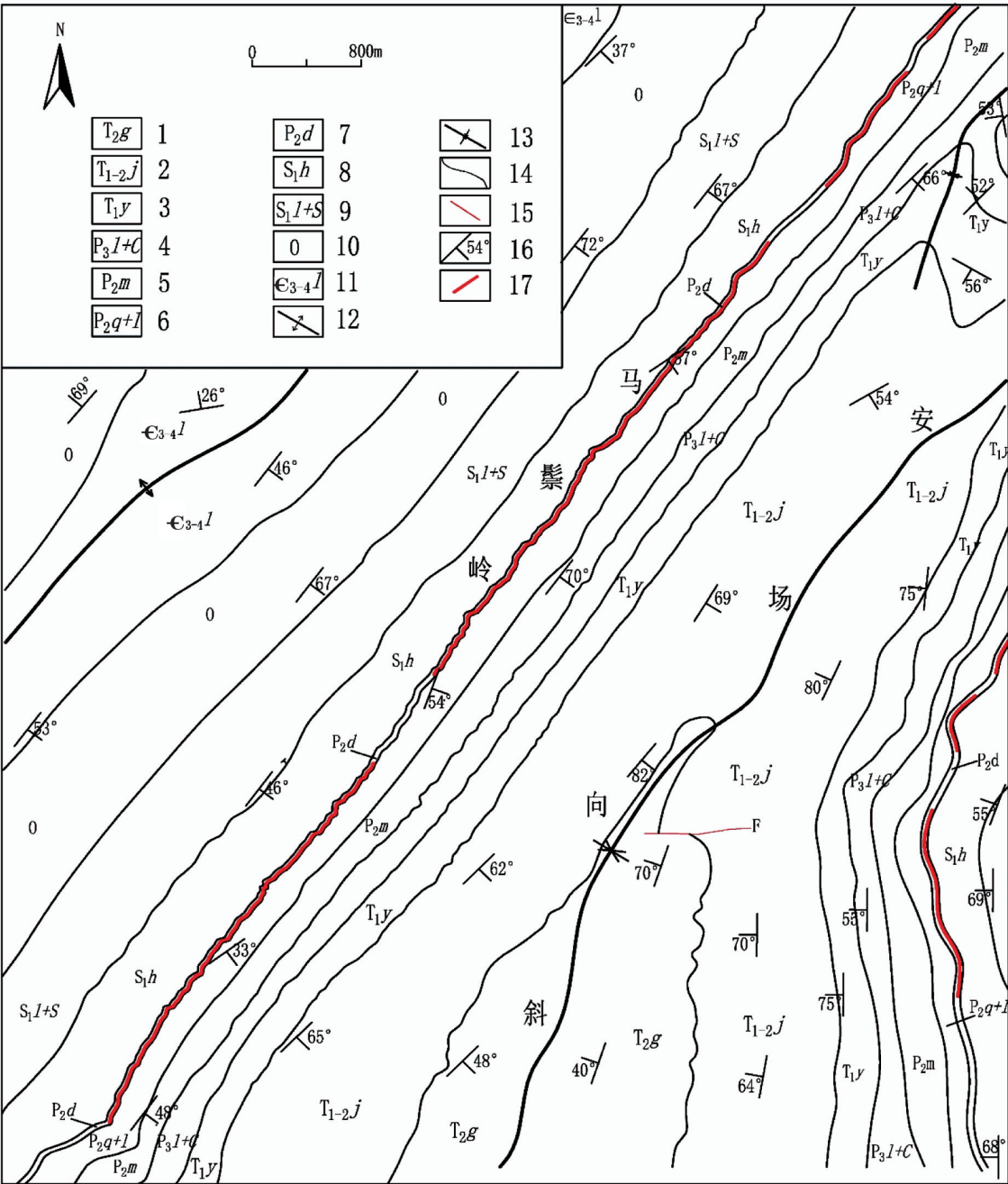


图2 黔北马鬃岭铝土矿区地质略图

Fig.2 Geological sketch of Mazongling bauxite mining area in northern Guizhou

1—三叠系中统关岭组;2—三叠系下统嘉陵江组;3—三叠系下统夜郎组;4—二叠系乐平统龙潭组、长兴组;5—二叠系乐平统茅口组;6—二叠系乐平统栖霞组、梁山组;7—二叠系乐平统大竹园组;8—志留系兰多维列统韩家店组;9—志留系兰多维列统龙马溪组、石牛栏组;10—奥陶系;11—寒武系第三统-芙蓉统娄山关组;12—背斜轴;13—向斜轴;14—地质界线;15—性质不明断层;16—岩层产状;17—铝土矿体露头

矿区出露的地层有寒武系第三统-芙蓉统娄山关组,奥陶系、志留系、石炭系、二叠系、三叠系。

二叠系阳新统大竹园组是矿区的唯一含矿层,上覆地层是二叠系阳新统梁山组,下伏地层是志留系兰多维列统韩家店组,局部为上石炭统黄龙组。

鬃岭铝土矿床位于安场向斜西翼北段。铝土矿体赋存于阳新统大竹园组中上部,矿体厚度与大竹园组厚度成正相关关系。

矿体呈层状、似层状产出,倾向140°左右,地表倾角18°~64°,平均倾角:42°,深部倾角:60°~74°,平均69°,受断层影响,由地表往深部急剧变陡。矿体长约8 500 m,已控制矿体倾向斜长800 m。平均厚1.69 m。矿体厚度比较稳定,变化较小(图3)。

矿石结构有豆状、碎屑状、致密块状、蜂窝状等。矿石矿物以一水硬铝石为主,次为勃姆石。为产于泥页岩(碳酸盐)侵蚀面上的一水硬铝石

铝土矿矿床。

3 含矿岩系地质特征

含矿岩系大竹园组为一套高铝岩石,底板为志留系兰多维列统韩家店组(局部为上石炭统黄龙组),上覆地层为阳新统梁山组(图3)。含矿岩系与下伏和上覆地层均为平行不整合接触。含矿岩系厚1.82~12.34 m,一般6~9 m。在马鬃岭矿区南部的下寺河往南,含矿岩系逐渐变薄(图4),铝土矿厚度变小,质量变差,直至含矿岩系缺失。矿区往北过顺河含矿岩系变薄,直至无矿。含矿岩系变薄主要是上部的铝土矿层和铝土岩层缺失,就是含矿岩系的3、4、5、6小分层缺失,下部的深灰色、灰黑色含绿泥石铝质泥岩则一直连续,直至整个含矿岩系缺失时尖灭。含矿岩系厚度越大,矿越好,当含矿岩系厚度<3 m时,一般无矿。

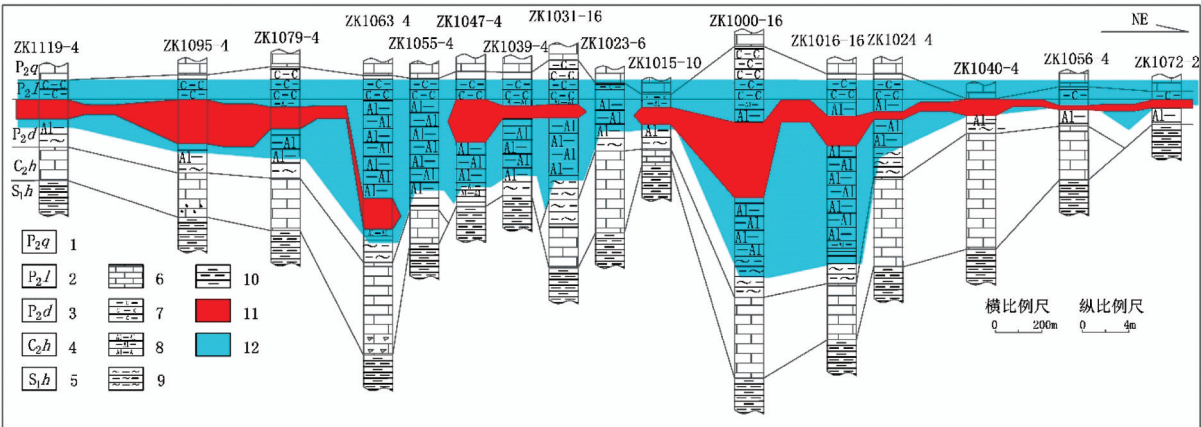


图3 黔北马鬃岭铝土矿区沿走向含矿岩系柱状对比图

Fig. 3 Column contrast of ore bearing rock series along the strike of Mazongling bauxite mining area in northern Guizhou province
1—二叠系阳新统栖霞组;2—二叠系阳新统梁山组;3—二叠系阳新统大竹园组;4—石炭系上统黄龙组;5—志留系兰多维列统韩家店组;
6—中厚层状灰岩;7—炭质页岩;8—铝质泥岩;9—含绿泥石铝质泥岩;10—泥岩;11—铝土矿;12—含矿岩系

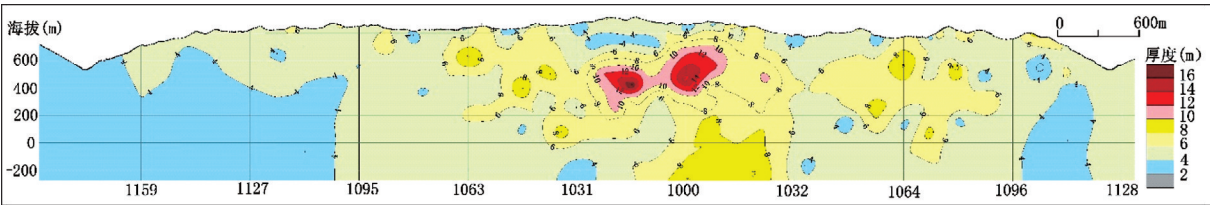


图4 黔北马鬃岭铝土矿含矿岩系厚度等值线图

Fig. 4 Thickness contour map of ore bearing rock series in Mazongling bauxite deposit, northern Guizhou

矿区南部与北部矿体延深比中部延深小,中部最大深度控制1 200 m左右,下部仍有矿,未封边。地表含矿岩系风化强烈,含矿岩系底部的含绿泥石铝质泥岩风化后颜色变浅,因含铁较高,颜色呈褐黄、砖红等色。中部含黄铁矿的铝土岩和铝土矿

风化后呈褐红色。风氧化深度一般在20 m左右。
含矿岩系的形成时间为黄龙期之后至阳新世梁山期之前。受广西运动影响,矿区地壳普遍上升,在晚石炭世,由海洋环境转变为海陆交互环境,此时沉积了一套深灰、灰绿、灰黑色含绿泥石

铝质泥岩。之后上升为陆地环境,韩家店组、黄龙组暴露地表,风氧化后成为成矿物源。包括马鬃岭矿区在内的务、正、道地区为一个南、东、西较高,中部及北部较低的地形。周边高处的风氧化产物被水带到低洼处河湖中,沉积成矿。矿区在梁山期下降,海水由北往南侵,初期沉积了一套含碳高的泥岩,即梁山组。

3.1 含矿岩系岩性特征

含矿岩系大竹园组按岩性不同大致分为 6 层,各小分层发育不完整,一般 4~5 层居多。从上至下岩性组合(见图 5)。

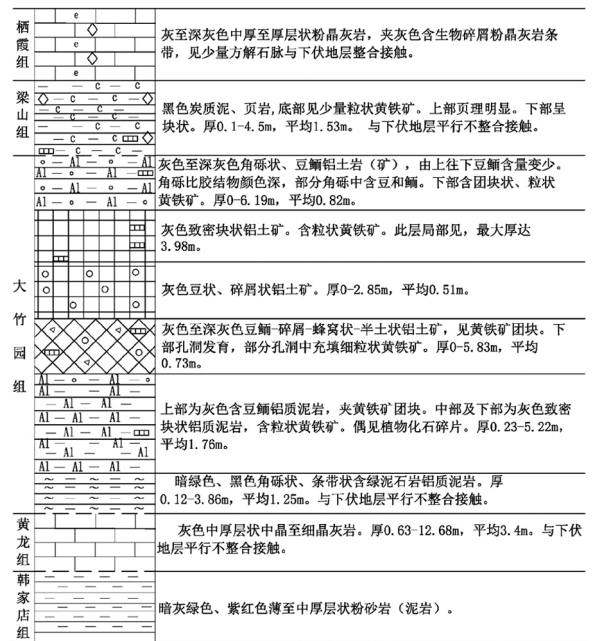


图 5 含矿岩系柱状图

Fig. 5 Department of the histogram of the ore bearing rock series

含矿岩系之上为梁山组,之下为黄龙组,详细情况如下:

上覆地层:二叠系阳新统梁山组(P_2l)

上部以粉砂质、钙质页岩为主,下部以黑色炭质泥岩为主,呈渐变关系。上部页理明显,含石英和方解石较多,次为伊利石和高岭石。下部呈块状,以伊利石为主,次为高岭石。厚 0.1~4.5 m,平均 1.53 m。连续分布。

-----假整合-----

二叠系阳新统大竹园组(P_2d)-含矿岩系:

(6)灰色至深灰色含豆鲕致密状铝土岩,由上往下豆鲕含量逐渐减少而成块状铝土岩。含细粒状黄铁矿。此层较稳定,局部因勃姆石含量增高而成铝土矿。厚 0~6.19 m,平均 0.82 m。与上部梁山组呈突变关系。

(5)灰色致密块状铝土矿,含细粒状黄铁矿。此层局部见,最大厚达 3.98 m。与上部铝土岩层呈渐变关系。

(4)灰色豆状、碎屑状铝土矿。此层较稳定,厚 0~2.85 m,平均 0.51 m。为主矿层之一。与上部块状铝土岩层呈渐变关系。

(3)灰色至深灰色豆鲕-碎屑-半土状铝土矿,见团块状黄铁矿。厚 0~5.83 m,平均 0.73 m。此层较稳定,为主矿层。与上部豆状碎屑状铝土矿层呈渐变关系。

(2)上部为灰色含豆鲕铝质泥岩,含团块状黄铁矿。中部及下部为灰色致密块状铝质泥岩,含细粒状黄铁矿。偶见植物化石碎片。厚 0.23~5.22 m,平均 1.76 m。此层稳定,分布广。与上部铝土矿层呈突变关系。

(1)暗绿色、黑色角砾状、条带状含绿泥石铝质泥岩。厚 0.12~3.86 m,平均 1.25 m。此层稳定,分布广。

-----假整合-----

下伏地层:黄龙组(C_2h)

灰色中厚层状细晶灰岩。厚 0.63~12.68 m,平均 3.4 m。分布广(图 2)。

3.2 矿床矿石矿物

在矿区内选择 ZK1023-10 和 ZK1064-6 两个钻孔,采集代表性样品 19 件,作 X 射线衍射分析。结果表明:含矿岩系矿物成分以粘土矿物为主,有一水硬铝石、勃姆石、伊利石、高岭石、绿泥石、蒙脱石,另有少量角闪石、方解石、白云石、石膏、铁矿物等(表 1)。

一水硬铝石含量变化很大,从微量到 99.4%,是含矿岩系中部的豆状、碎屑状、蜂窝状铝土矿的主要矿物组成。勃姆石含量变化大,从微量到 96.5%,是含矿岩系中上部致密状铝土矿(岩)的主要矿物组成。高岭石含量变化大,从微量到 78.5%,是含矿岩系底部灰色、深灰色铝质泥岩的主要矿物组成。在含矿岩系中普遍存在。蒙脱石含量较均一,从微量到 7.7%,在含矿岩系中平均为 3.0%。在梁山组和含矿岩系底部的铝质泥岩中含量较高。绿泥石在含矿岩系底部的铝质泥岩中含量较高,达 11.6%,在铝土矿中极微量。伊利石含量少,微量至 11.8%,主要出现在含矿岩系底部铝质泥岩中,中上部含量低。梁山组的伊利石含量很高,最高达 78.1%。长石和角闪石主要出现在含矿岩系底部的铝质泥岩中,长石含量 2.5%左右,角闪石含量 1.2%左右。含矿岩系中几乎不含白云石和石膏(表 1)。

3.3 地球化学特征

在矿区内选择 ZK1023-10 和 ZK1064-6 两个

钻孔,采集有代表性样品 19 件,由贵州省有色金属和核工业地质勘查局物化探总队分析,其中 Li、Sc、Ga、Hf、REO、Ge、B 由有色金属桂林矿产地质测试中心测试。分析成果见表 2。

含矿岩系上覆层梁山组化学组成稳定, Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、S 五项之和为 80.82%~83.52%。

含矿岩系化学组成以 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、S 为主,五项之和在 79.54%~90.68%间,平均 84.78%,其含量远高于其在地壳中的平均含量(迟清华 等,2007)。含矿岩系底部的含绿泥石铝质泥岩中, Al_2O_3 含量在 20%~32%间,大部分在 30%左右,比 SiO_2 含量低,其上部岩(矿)石中 Al_2O_3 含量均比 SiO_2 高。 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 含量很低,远低于地壳平均含量。

Ga 在豆状、碎屑状、半土状铝土矿中明显富集,平均达 136×10^{-6} ,在致密块状铝土矿、铝土岩、铝质泥岩中含量较低且均匀,平均 31×10^{-6} 。Li 则明显在铝质泥岩、铝土岩和致密状铝土矿中富集最高达 897×10^{-6} ,平均 536×10^{-6} 。在豆状、鲕状、碎屑状、土状铝土矿中含量很低,平均 4×10^{-6} 。Mn 在含矿岩系中总体含量低,在底部的含绿泥石铝质泥岩中含量较高,但变化大, $150.40 \times 10^{-6} \sim 755.58 \times 10^{-6}$,在上部平均 49.23×10^{-6} ,远低于大陆地壳 Mn 元素丰度 1300×10^{-6} (迟清华 等,2007)。REO 在含矿岩系下部的灰白色块状铝质泥岩和含绿泥石铝质泥岩中富集,达 $337 \times 10^{-6} \sim 1211 \times 10^{-6}$,平均 710×10^{-6} ,而上部的铝土矿和铝土岩中平均 220×10^{-6} 。含矿岩系底部灰黑色含绿泥石铝质泥岩中 B 含量为 $67 \times 10^{-6} \sim 95 \times 10^{-6}$,其上部岩(矿)石中 B 含量平均为 38×10^{-6} ,均远高于大陆地壳 B 元素丰度 7.6×10^{-6} (迟清华 等,2007)(表 2)。

4 讨论

经统计,含矿岩系按岩性大致可分为 6 小分层。岩性组合规律性强,底部为含绿泥石铝质泥岩,之上为浅色铝质泥岩。中部为以一水硬铝石为主的豆鲕、碎屑、蜂窝状、半土状铝土矿,中上部为以勃姆石为主的致密块状铝土矿,顶部为以勃姆石为主的豆状、碎屑状铝土岩(矿)。

含矿岩系底部的含绿泥石铝质泥岩在全矿区乃至整个务正道地区直到重庆境内(赵远由 等,2013),广泛分布,层位稳定。碳质、铁质含量高,原生岩石呈灰绿-黑色(图 3-f),岩石色深,无一

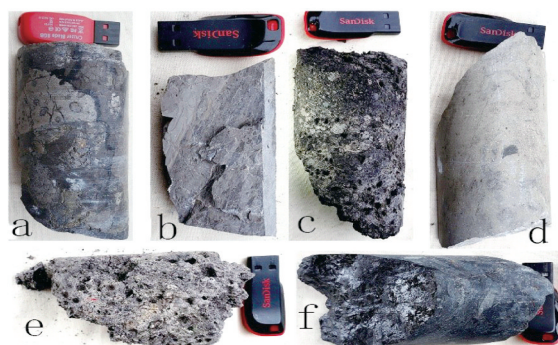


图 6 矿岩系中代表性的岩(矿)石

Fig. 6 Contains representative rock (ore) stones in the mineral rock system

水铝石矿物, B 含量 67~95 ppm,地表风化后呈浅黄、褐黄色。局部三氧化二铁含量达 40%,原岩风化后成铁矿体。相比含矿岩系上部各小分层,其绿泥石含量相对较高。有研究认为,铝土矿中 w(B) 是指示古盐度的常用标志。其中淡水陆相盆地 $w(\text{B}) < 60 \times 10^{-6}$,海相盆地 $w(\text{B}) > 100 \times 10^{-6}$,过渡相盆地 $w(\text{B})$ 为 $60 \times 10^{-6} \sim 100 \times 10^{-6}$ (黄智龙 等,2014,李国胜 等,1992,邓宏文 等,1993,崔滔 等,2013,翁申富 等,2013)。表明在大竹园早期,整个务正道地区地形平坦,气候湿热(管章志 等,2007),应为以悬浮搬运沉积为主的海陆过渡相低能环境。含绿泥石铝质泥岩之上的灰、灰白色块状铝质泥岩其化学组成以 SiO_2 、 Al_2O_3 为主,铁含量低。其矿物以高岭石为主,最高达 78%,色浅(图 3-d),矿物组成较单一。应以悬浮搬运沉积为主的低能氧化环境(崔滔 等,2013)。

含矿岩系中部的豆鲕-碎屑-蜂窝状-半土状铝土矿(岩)物成分以一水硬铝石为主(图 3-c),含量超 95%。 Na_2O 、 K_2O 、 CaO 、 MgO 含量很低, B 含量 21~46 ppm,与下伏铝质泥岩呈突变关系,局部蜂窝状构造明显(图 3-e)。说明含矿岩系中上部形成于陆相湖泊环境。此层在矿区分布较广,厚度较大,是矿区的主要矿石类型(含矿岩系之第 3 小分层)。矿石的豆鲕和碎屑的一水硬铝石含量高,表明以韩家店组泥页岩为主(黄智龙 等,2014)的成矿物质经历了强烈风化后,搬运到此沉积,形成初期的铝土矿。豆鲕-碎屑状铝土矿形成于具有一定水动力强度的湖滨湿地环境(崔滔 等,2013)。蜂窝状-半土状铝土矿是豆、鲕-碎屑状的铝土矿形成后,湖水位下降,使之经历了暴露淋滤作用,以至豆或鲕的核被溶蚀(余文超 等,2013),留下以一水硬铝石为主的土状物(高品质铝土矿)。

表 1 含矿岩系矿物组成

Table 1 Mineral composition of ore bearing rock series		ZK1023-10-1	ZK1023-10-2	ZK1023-10-3	ZK1023-10-4	ZK1023-10-5	ZK1023-10-6	ZK1023-10-7	ZK1023-10-8	ZK1064-6-1	ZK1064-6-2	ZK1064-6-3	ZK1064-6-4	ZK1064-6-5	ZK1064-6-6	ZK1064-6-7	ZK1064-6-8	ZK1064-6-9	ZK1064-6-10	ZK1064-6-11
样号	岩矿名称	黑色含碳质粉砂岩	灰色致密块状铝土矿	灰色致密块状铝土矿	深灰色碎屑状、豆状铝土矿	灰色致密块状铝土矿	灰黑色含绿泥石铝质泥岩	灰色中厚层状灰岩	灰绿色泥岩	黑色含碳质粉砂岩	灰色致密块状铝土矿	灰至深灰色豆状铝土矿	灰至深灰色豆状铝土矿	灰至深灰色豆状铝土矿	灰色半土状铝土矿	灰至深灰色碎屑半土状铝土矿	灰色铝质泥岩	灰黑色含绿泥石铝质泥岩	灰色中厚层状灰岩	灰绿色泥岩
石英		1.8	y	0.6	0.6	y	8	1.2	82.1	16.5	3	y	0.6	y		y	4.3	3.0	0.3	81.5
叶蜡石		4.3	0.6	0.4			y		4.2	y	y		0.3					y		
高岭石			28.6	1.4	1.1	53.5	55.2			7.4	39.6	1.6	y			y	78.5	73.1	0.8	4.2
蒙脱石		6.2	3.6	0.8	2.7	4.0	5.5		y	4.4	3.4	3.2	1	0.4	0.6	y	5.4	7.7	2.4	3.7
伊利石		78.1	1.0	0.7		2.1	11.8		9.3	14.3	3.2	1.0	y	0.4		0.5	4.7	5.2	0.6	5.6
角闪石		1.0	0.7	0.3		0.6	1.4			1.4	0.8	y	y				1.0	1.1		1.0
长石			1.0		y	0.8	2.7		1.0	1.2	0.7						1.0	2.4		1.0
方解石			0.6	y		y	0.8	93.0		45.0	3.0	0.5	y		y		3.1	1.2	96	1.6
白云石		y	y				y	5.0		y	1.0	y					y	0.6	y	y
铁矿物		4.5	y		4.2	36	1.8			8.5	2.0	0.3	1.0	1.2		1.0	1.0	1.0		
绿泥石		3.0	y		y	2.3	11.6		3.4	1.3	y	y					1.0	3.4		1.4
勃姆石		1.1	63.9	96.5		0.7	0.7	0.8		y	43.3	y	0.4				y	1.3		y
硬水铝石				89.7							93.4	96.7	98	99.4	98.5					
石膏				1			0.5													
锐钛矿											y									

注:y表示含量微。

表2 马鬃岭铝土矿含矿岩系元素组成(常量元素单位 1×10^{-2} ,微量元素单位 1×10^{-6})
Table 2 Element composition of ore bearing rock series in Mazongling bauxite deposit
(Constant element unit 1×10^{-2} , Trace element unit 1×10^{-6})

样 号 岩 名 称	ZK1023- 10-1	ZK1023- 10-2	ZK1023- 10-3	ZK1023- 10-4	ZK1023- 10-5	ZK1023- 10-6	ZK1023- 10-7	ZK1023- 10-8	ZK1023- 6-1	ZK1064- 6-2	ZK1064- 6-3	ZK1064- 6-4	ZK1064- 6-5	ZK1064- 6-6	ZK1064- 6-7	ZK1064- 6-8	ZK1064- 6-9	ZK1064- 6-10	ZK1064- 6-11
	黑色含碳 质砂页岩	灰色致密 块状铝土矿	灰色致密 块状铝土矿	深灰色碎 屑状、豆 状铝土矿	灰色致密 状铝泥岩	灰黑色含 绿泥石铝 质泥岩	灰色中厚 层状灰岩	灰绿色 泥岩	黑色含碳 质粉砂岩	灰色致密 状铝土岩	灰至深灰 色豆状铝 土矿	灰至深灰 色豆状铝 土矿	灰至深灰 色豆状铝 土矿	灰色半土 状铝土矿	灰至深灰 色碎屑- 半土状铝 土矿	灰色致密 状铝泥岩	灰黑色含 绿泥石铝 质泥岩	灰色中厚 层状灰岩	灰绿色 泥岩
Al ₂ O ₃	26.25	49.93	62.03	68.82	35.75	25.49	1.86	18.17	25.50	51.83	75.15	76.49	68.91	77.77	65.23	36.54	34.25	0.57	18.18
SiO ₂	40.70	28.64	17.56	5.08	39.87	28.81	2.98	58.59	41.50	26.24	5.41	0.66	0.69	0.86	2.06	41.66	38.24	1.40	57.78
Fe ₂ O ₃	9.57	2.52	1.71	7.21	5.86	24.08	1.59	6.79	8.50	2.21	1.09	2.43	9.61	1.85	12.14	2.85	9.86	2.80	8.07
TiO ₂	1.19	1.29	1.50	2.78	1.58	0.94	0.07	0.78	1.15	1.90	2.33	3.44	2.87	3.88	1.98	1.49	1.33	1.02	0.70
S	5.81	0.36	0.31	4.73	3.15	0.22	0.04	0.08	4.17	0.20	0.33	2.30	8.72	1.84	9.27	1.10	0.15	0.05	0.09
LOI	12.60	14.71	14.35	16.21	16.25	11.75	40.66	6.24	12.13	14.32	14.75	15.75	17.88	15.39	17.84	11.18	12.73	41.97	6.87
Na ₂ O	0.31	0.19	0.16	0.09	0.26	0.22	0.06	0.20	0.34	0.16	0.07	0.05	0.05	0.04	0.05	0.71	0.42	0.05	0.19
K ₂ O	6.54	0.28	0.36	0.17	0.17	2.69	0.36	4.69	6.21	0.74	0.33	0.01	0.03	0.01	0.18	3.58	1.48	0.09	4.48
CaO	0.27	0.09	0.05	0.05	0.11	1.50	50.52	1.42	1.45	0.09	0.05	0.05	0.06	0.04	0.05	0.11	0.15	48.48	0.34
MgO	2.14	1.74	1.05	0.15	0.37	3.32	0.91	3.30	2.45	2.09	0.77	0.05	0.03	0.01	0.09	0.47	1.53	3.43	3.48
Pb	66.85	5.77	7.24	80.88	38.78	84.22	9.67	903.46	42.04	8.97	7.36	38.98	118.36	22.93	119.96	43.94	29.62	1.10	10.22
Zn	148.52	20.56	14.67	7.36	38.70	169.46	16.92	140.20	172.86	24.10	7.97	3.16	6.38	2.14	10.02	15.26	55.93	7.24	115.60
Mn	173.10	35.10	24.19	75.59	56.44	755.58	1239.82	358.82	186.18	36.67	20.10	30.12	91.64	28.60	103.88	39.20	150.40	1767.90	300.76
Co	22.08	7.12	8.44	23.78	37.04	91.28	4.78	24.14	21.88	11.62	17.18	22.79	24.00	31.38	33.33	26.76	52.72	2.24	20.05
As	67.43	6.15	2.99	12.74	4.31	25.54	1.59	11.66	58.93	1.71	1.65	6.89	21.47	8.03	40.81	8.24	3.22	0.76	1.31
P	443.39	52.55	136.73	201.02	119.71	194.82	58.30	584.06	495.42	69.30	71.40	117.10	182.62	84.29	102.78	143.20	204.64	43.30	441.28
Ba	439.66	638.48	257.33	262.24	242.72	252.92	316.08	451.04	470.16	588.23	172.40	71.76	151.95	66.64	90.62	473.19	245.94	179.82	1015.24
Li	61	897	753	195	449	183	9	42	61	685	47	5	4	3	18	592	438	5	47
B	193	45	27	43	36	95	7	116	215	62	21	31	25	46	29	79	67	3	98
Sc	28	49	50	46	39	26	3	18	28	35	33	40	48	34	31	38	37	2	19
Ga	39	32	43	145	26	31	4	27	38	71	117	127	135	117	177	24	31	2	25
Ge	1	1	1	2	1	1	0	2	1	1	2	1	2	1	1	1	1	0	2
Hf	7	8	9	15	10	6	1	4	6	11	12	18	16	17	9	9	8	1	4
REO	484	85	328	438	1211	721	80	317	466	89	113	205	244	232	242	337	574	50	285

矿区中部的豆鲕-碎屑-蜂窝状-半土状铝土矿之上,为一层灰色致密块状铝土矿(图3-b),最厚处达4 m,矿物以勃姆石为主,次为高岭石。由上往下勃姆石含量变高。B含量27 ppm。致密状矿石相对其他类型矿石表现出其特殊性,指示致密状矿石相对于其他类型矿石存在成因机制上的差异(张莹华等,2013)。此层总体以悬浮搬运沉积形成积为主,水动力微弱,沉积环境有别于豆鲕-碎屑-蜂窝状-半土状铝土矿,但仍为陆相湖泊环境。含矿岩系顶部为灰色至深灰色含豆鲕、碎屑铝土岩(矿)(图3-a),由上往下豆鲕和碎屑含量逐渐减少。碎屑棱角分明,含有豆状体。B含量45 ppm。说明此层也形成于陆相湖泊环境。

含矿岩系中,岩(矿)石由下往上表现为块状构造-豆状、碎屑状构造-块状构造-豆鲕状构造。说明含矿岩系形成过程的水动力环境经历了弱-强-弱-强的旋回变化。

含矿岩系之上覆层梁山组以伊利石为主。含矿岩系上部的矿物以勃姆石为主,而中部为一水硬铝石为主,下部和底部以高岭石为主。说明形成含矿岩系的早期、中晚期及形成之后,其物理化学环境有明显差别。含矿岩系在沉积过程中,总体为氧化环境,硫在其中无存在条件,氧化铁有一定含量。在含矿岩系下部和上部的致密状岩(矿)石中,硫铁矿含量很少。在孔隙度较大的碎屑状、蜂窝状矿石中,硫铁矿含量高。应为沉积后的成岩过程中流体带来的硫与岩(矿)中的氧化铁反应而成。

5 结论

(1)含矿岩系的岩性组合规律性强。底部为含绿泥石铝质泥岩,之上为浅色铝质泥岩。中部为以一水硬铝石为主的豆鲕-碎屑-蜂窝状-半土状铝土矿,中上部为以勃姆石为主的致密块状铝土矿,顶部为以勃姆石为主的豆状、碎屑状铝土岩(矿)。说明形成含矿岩系的早期、中晚期及形成之后,其物理化学环境有明显差别。

(2)含矿岩系中部的豆鲕-碎屑-蜂窝状-半土状铝土矿石的形成,是成矿母质经历了风氧化、剥蚀、搬运、沉积、暴露淋滤,最终形成现在的铝土矿。

(3)含矿岩系底部含绿泥石铝质泥岩形成于过渡相的半咸水环境,中部及上部铝土矿(岩)形成于陆相湖泊环境,上覆层梁山组形成于海相环境。含矿岩系中的硫铁矿是沉积后的压实成岩过程中,流体带入的硫,在强还原环境下,与岩(矿)石中的氧化铁反应,在孔隙处沉淀而成。

[参考文献]

- 迟清华,鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 地质出版社.
- 崔滔,焦养泉,杜远生,等. 2013. 黔北务正道地区铝土矿沉积特征及分布规律[J]. 地质科技情报,32(1):53-56.
- 崔滔,焦养泉,杜远生,等. 2013. 黔北务正道地区铝土矿形成环境的古盐度识[J]. 地质科技情报,32(1):46-51.
- 邓宏文,钱凯. 1993年. 论湖相泥质岩石的地球化学二分性[J]. 石油与天然气地质,14(2):85-97.
- 杜远生,余文超. 2020. 沉积型铝土矿的陆表淋滤成矿作用:兼论铝土矿床的成因分类[J]. 古地理学报,22(5):812-826.
- 贵州省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·贵州志[M]. 地质出版社.
- 管章志,师育新,戴雪荣,等. 2007. 安徽龙河口水库流域沉积物中粘土矿物分析及其环境意义[J]. 岩石矿物学杂志,26(1):95-100.
- 黄智龙,金中国,向贤礼,等. 2014. 黔北务正道铝土矿成矿理论及预测[M]. 科学出版社.
- 金中国,武国辉,黄智龙,等. 2009. 贵州务川瓦厂坪铝土矿床地球化学特征[J]. 矿物学报,29(4):458-462.
- 李国胜,杨锐. 1992. 对于硼作为相标志的异议[J]. 岩相古地理, (4):41-45.
- 翁申富,雷志远,陈强,等. 2013. 黔北务正道地区铝土矿沉积相与矿石品质的关系[J]. 地质科技情报,32(1):19-22.
- 余文超,杜远生,顾松竹,等. 2013. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿多期淋滤作用及其控矿意义[J]. 地质科技情报,32(1):34-39.
- 赵远由,苏书灿. 2013. 黔北务正道地区黄龙组地质特征及其找矿指示意义[J]. 地质科技情报,32(1):23-26.
- 张莹华,凌文黎,吴慧,等. 2013. 黔北铝土矿不同类型矿石地球化学特征及其对成矿作用的指示[J]. 地质科技情报,32(1):71-79.

(下转第160页)

贵州正安铝土矿基底地貌控矿作用及找矿意义

——以正安旦坪铝土矿床 I 号矿体为例

李源洪,杜红毅,李信念,刘旭,胡鹏

(贵州省地质矿产勘查开发局 106 地质大队,贵州 遵义 563000)

[摘 要]本文主要基于对正安地区最为典型的旦坪铝土矿床 I 号矿体勘探 146 个工程的矿系厚度、矿体厚度、三氧化二铝、铝硅比值的系统统计,研究该区基底古地貌特征,探究其与矿体厚度、三氧化二铝、铝硅比值的相关关系,并分析其控矿作用机理与找矿意义。研究表明旦坪铝土矿的基底古地貌总体表现出南高北低的特征,北部表现为碳酸盐岩古岩溶地貌,起伏在 5~15 m 间,南部表现为硅酸盐岩风化侵蚀地貌,起伏 0~5 m。矿体厚度、品质与基底地貌凹地深度呈现明显的正相关关系,凹地深度越深往往矿体越厚,微地貌凹地内矿体经历了更长时间的淋滤作用改造,矿石品质更高。因此笔者认为正安地区铝土矿的勘查应特别注重基底古地貌研究,将勘查工程布置于溶蚀凹地内,以提高见矿率,探寻高品质矿体。

[关键词]铝土矿;基底地貌;控矿作用;找矿意义;旦坪;贵州

[中图分类号]P618.45;P531 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2021)02-0169-08

贵州省正安地区铝土矿主要分布于新模、张家院、安场三个向斜构造之中,查明资源量近 3.5 亿吨,为贵州铝土矿在全国保持资源优势起到了举足轻重的作用。旦坪铝土矿是贵州省正安地区发现的一个具超大型规模的铝土矿床,其矿石资源量达 1.1 亿吨,其中 I 号矿体为区内矿石品质最好、控制程度最高、资源规模较大的一个主矿体,其已基本完成勘探工作,单矿体圈定资源规模达到大型矿床规模。因此对其成矿规律的研究可以很好地指导正安地区铝土矿的找矿勘查工作。

1 成矿地质背景

贵州正安旦坪铝土矿位于渝南-黔北铝土矿成矿带-务正道早二叠世阿瑟尔期至亚丁斯克期

铝土矿成矿亚带(徐志刚等,2008,刘平等,1999),区内地层由老至新依次有志留系下统韩家店组,石炭系上统黄龙组,二叠系下统大竹园组,二叠系中统梁山组、栖霞组、茅口组,二叠系上统长兴组、吴家坪组。含矿层位为二叠系下统大竹园组的中上部,基底主要为志留系下统韩家店组页岩,其次为石炭系中统黄龙组,其中韩家店页岩富含水云母,是铝土成矿物源的最大贡献者(韩英等,2014),务正道地区早二叠世紫松期-隆林期古地理环境为一个向北开口的半封闭海湾(崔涛等,2013),研究区旦坪铝土矿的形成环境主要为半封闭海湾向近岸平原过渡的滨岸湿地(图 1)。

[收稿日期]2021-01-25 **[修回日期]**2021-04-28

[作者简介]李源洪(1989—),男,大学本科,工程师,主要从事地质矿产勘查、矿床成因及成矿规律相关研究工作。
Email:451858936@qq.com。

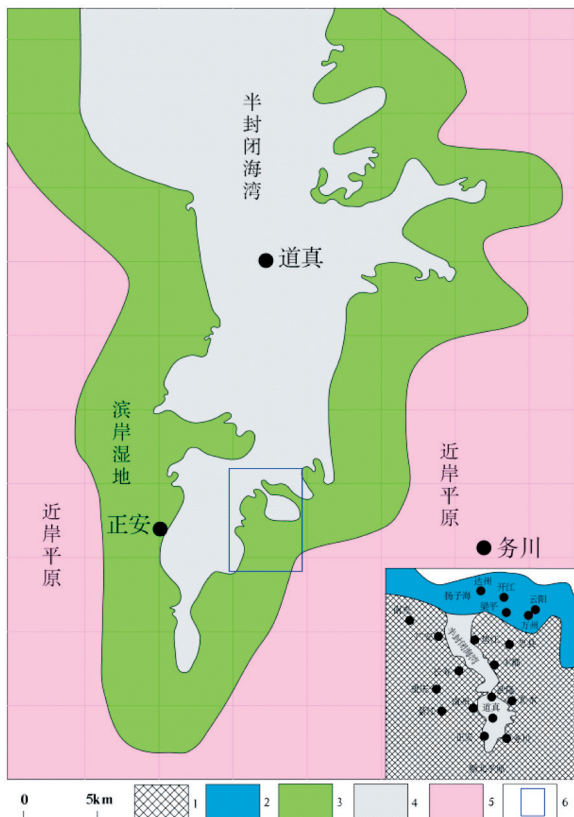


图 1 早二叠世紫松期-隆林期古地理图
(据杜远生 等, 2014)

Fig. 1 Paleogeographic map in Zisong period and Longlin period of early Permian

1—古陆; 2—陆源海; 3—半封闭海湾; 4—滨岸湿地; 5—近岸平原; 6—研究区位置

2 矿床特征

研究区出露地层由老至新依次有志留系下统韩家店组泥、页岩, 石炭系上统黄龙组灰岩, 二叠系下统大竹园组、二叠系中统梁山组粘土岩、铝土矿, 栖霞组、茅口组、二叠系上统长兴组、吴家坪组灰岩。三叠系下统夜郎组及茅草铺组 (见图 2)。区内主体构造格架为新模向斜, 新模向斜为呈 NE-SW 向展布、向西倾伏、向南侧伏、东缓西陡的不对称向斜, 轴面向西倾斜, 侧伏角 70°左右, 枢纽向南倾伏, 倾伏角 2°~7°。矿床内断裂以南北走向及东西走向为主, 大部分为正断层。主要分布在矿体边缘或无矿地带, 对矿体影响较小。

区内含矿层位为二叠系下统大竹园组 (P_1d), 习称铝土矿含矿岩系。其下部为 (浅) 灰绿、黄绿、灰白色绿泥石粘土岩、铁绿泥石岩、水云母粘土岩、含铁质或铁质粘土岩、含豆鲕或碎屑状粘土岩, 偶见黄铁矿 (层) 赤铁矿层; 中上部为灰白色、浅灰色、灰色、深灰至黑灰色碎屑状、豆鲕状、致密状、半土状铝土矿或铝土岩, 常见黄铁矿呈团块状、结核状、星点状、细脉状和叶片状产出; 顶部为灰白、浅灰色、灰色粘土岩, 含豆鲕 (复豆鲕) 状及碎 (砾) 屑状粘土岩, 含植物化石碎片; 含矿岩系内见蕨类植物孢子和裸子植物花粉。

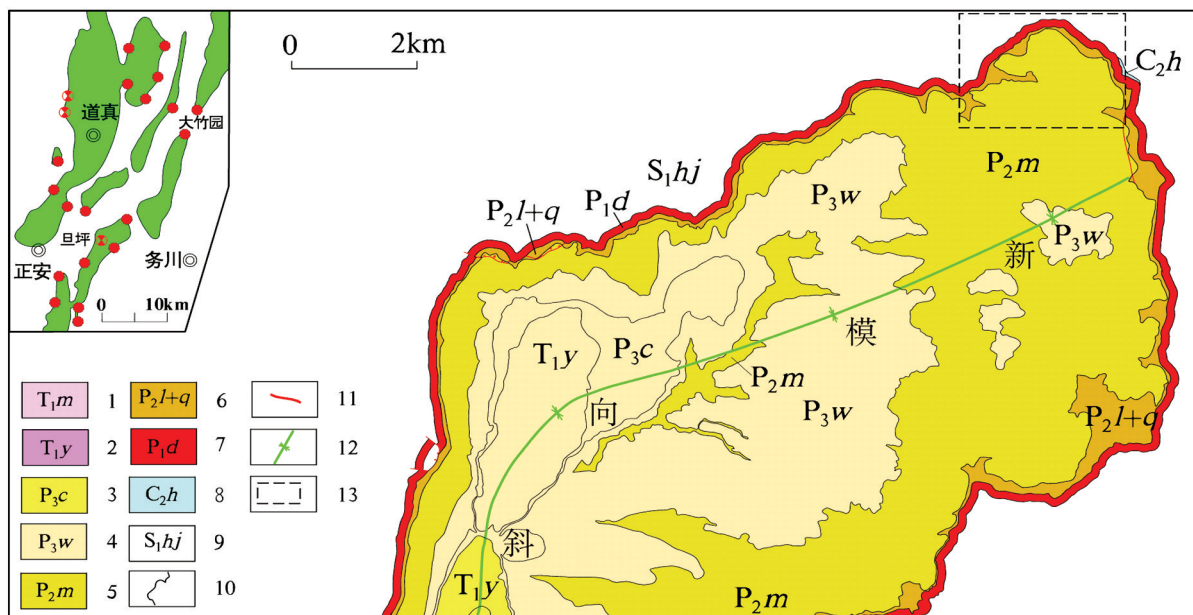


图 2 正安县旦坪铝土矿床地质略图 (据《中国矿产地质志·贵州卷·铝土矿》修编)

Fig. 2 Geological sketch map of Danping bauxite deposit in Zheng'an County

1—下三叠统茅草铺组; 2—下三叠统夜郎组; 3—上二叠统长兴组; 4—上二叠统吴家坪组; 5—中二叠统茅口组; 6—中二叠统梁山栖霞组; 7—下二叠统大竹园组; 8—中石炭统黄龙组; 9—下志留统韩家店组; 10—地层界线; 11—断层; 12—向斜轴; 13—I 号矿体位置

研究区铝土矿属沉积型一水硬铝石铝土矿床,铝土矿层赋存于二叠系下统大竹园组(P_1d)含铝岩系中上部,呈似层状产出,产状与围岩基本一致。据其产出特征及空间分布位置,圈定了有13个矿体,其中I、VI号矿体为主矿体。矿床矿体厚1.19~2.96 m,平均2.11 m;矿床品位 Al_2O_3 55.07%~61.45%,加权平均为57.71%; Al/Si 值3.82~6.47,加权平均为5.28;矿体含 SiO_2 8.96%~14.79%,平均10.94%;矿体含 Fe_2O_3 5.36%~15.28%,平均10.39%;矿体含 TSO 3.15%~4.217%,平均1.847%。

I号矿体分布于新模向斜北端吴二槽一带,呈北西-南东向展布,呈“π”字形,长2.8 km,宽600~1300 m,展布面积2.12 km²,估算矿石资源量1337万吨。矿体单工程厚0.80~5.71 m,平均厚2.33 m,单工程 Al_2O_3 含量为42.67%~74.48%,矿体平均为57.31%, Al/Si 为2.36~61.09,矿体平均为5.57。铝土矿石矿石矿物以一水硬铝石为主,脉石矿物主要为粘土矿物,再次为

铁矿物、钛矿物等。结构以碎屑结构、豆鲕结构状结构为主,少见泥晶结构及粉晶结构,矿石构造有块状构造、半土状构造和致密状构造。矿区铝土矿矿石自然类型有碎屑状、豆鲕状、半土状、致密状四种类型,工业类型以中铁高硫型为主,中铁中硫型次之。

3 样品采集及数理统计

本次研究样品主要来源于旦坪铝土矿I号矿体勘探的146个钻孔数据统计,共计系统统计了矿系厚度、矿体厚度、三氧化二铝含量、铝硅比值、二氧化硅含量数据点5个参数,数据点均为146个(表1)。从标准偏差看本次采用数据中矿系厚度、矿体厚度离散程度较小,数据较为集中,三氧化二铝、铝硅比值及二氧化硅数据相对较为离散,数据变化稍大。但从变异系数看数据变异系数均小于1,整体较为均一,离散程度低,因此本次使用的样品数据具有较好代表性。

表1 旦坪铝土矿I号矿体矿体特征统计表

Table 1 Statistical table of orebody characteristics of No. 1 orebody in Danping Bauxite Mine

	矿系厚度(m)	矿体厚度(m)	Al_2O_3 (%)	Al/Si	SiO_2 (%)
最小值	2.93	0.00	29.27	0.81	1.11
最大值	10.40	5.71	73.10	61.09	41.00
算术平均值	6.20	2.23	55.02	5.99	12.50
标准偏差	1.36	1.12	8.02	5.49	7.25
变异系数	0.22	0.50	0.15	0.92	0.58

表注:依据146个勘探钻孔数据统计结果。

4 基底微地貌特征

4.1 基底微地貌编图方法

研究区铝土矿产于二叠系下统大竹园组中,其直接沉积于下伏志留系韩家店组或石炭系中统黄龙组地层之上,早二叠世时期,受加里东运动影响,务正道地区发生大规模的水位下降,铝土矿基底地层上石炭统黄龙组或下志留统韩家店组长期遭受风化剥蚀而形成准平原化地貌,在准平原化地貌中形成了大小不等、深浅不一的盆地。在此之后沉积了含铝岩系早二叠世大竹园组,该时期务正道地区整体为向北开口的半封闭海湾的沉积环境,而正安地区表现为滨岸湿地环境,仅存在垂向上的水位变化,未发生水平方向的挤压或拉张。

至中二叠世发生长期海侵形成了梁山组泥质岩和栖霞组、茅口组灰岩沉积,为铝土矿含铝岩系或铝土矿的保存提供了足够的盖层条件,使之免受剥蚀。因此利用钻孔揭露矿系厚度可以反应基底古地貌,本次研究编图方法是系统统计研究区I号矿体实施的勘探钻孔矿系厚度,取负值利用 sufer8.0 软件中的表面图、等值线图功能生成基底三维微地貌图来直观反应研究区基底微地貌的特征。

4.2 基底微地貌特征

根据生成的三维基底微地貌图(图3)可以看出研究区铝土矿的沉积基底地形存在明显凹凸不平特征,凹地主要集中在吴二槽北部一带,北部凹地之间相互连通,大小不等,一般在50~250 m之间,南部仅有一个较大的凹地,大面积区域为凸起的台地。总体来看,研究区基底地形特征表现为南

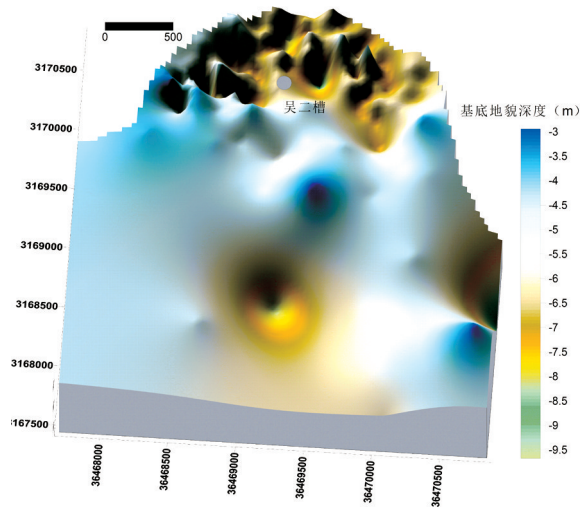


图 3 三维基底微地貌图

Fig. 3 Three-dimensional basement paleomorphology map

高北低,起伏大小上表现为北部起伏大,南部起伏小。通过对研究区黄龙组灰岩的厚度数据进行统计并编制黄龙组灰岩厚度等值线图发现(图 4),区内 146 个钻孔,有 21 个钻孔见石炭系中统黄龙组灰岩,揭露地层厚 0.05 ~ 3.90 m,平均 0.14 m。绘制黄龙组厚度等值线图表明研究区黄龙组的分布基本与基底地形凹地分布区域吻合,集中分布于北部吴二槽一带,而南部台地地区钻孔中均未见黄龙组灰岩,也就是说其北部区域沉积基底主要为碳酸盐岩岩溶地貌,南部则为硅酸盐页岩风化侵蚀地貌。出现这一现象的原因可能有两个方面,一方面在黄龙组沉积时期,南部整体地势较高,北部较低,形成了差异化的沉积。另一方面在准平原化时南部未见黄龙组残留,说明地势较高,风化剥蚀时间长,不利于成矿。北部黄龙组地层残留较多,地势较低,遭受风化剥蚀的时间较短,风化剥蚀较弱,利于成矿。

表 2 旦坪铝土矿 I 号矿体矿体特征数据相关系数矩阵(显著水平=0.05)

Table 2 Correlation coefficient matrix of orebody characteristic data of Danping Bauxite Mine No. 1 orebody(alpha=0.05)					
矿系厚度	矿体厚度	Al ₂ O ₃	Al/Si	SiO ₂	
矿系厚度	1	0.51	0.44	0.21	-0.42
矿体厚度		1	0.50	0.16	-0.58
Al ₂ O ₃			1	0.55	-0.83
Al/Si				1	-0.50
SiO ₂					1

结合研究区矿体厚度、三氧化二铝、铝硅比值等值线图(图 5),可以看出 I 号矿体厚度高值集中在矿体北东、北西一带,南部矿体逐渐尖灭,北

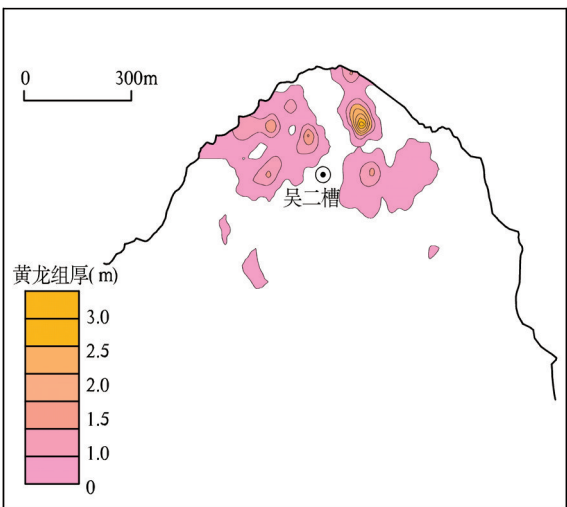


图 4 黄龙组灰岩分布图

Fig. 4 Limestone distribution map of Huanglong Formation

(赵远由 等,2013)。以上两方面的原因造成了研究区南高北低的地貌特征差异。且由于北部存在碳酸盐岩基底,透水性强,利于地下水垂向流动,促进了淋滤作用的强度,造成了北面铝土矿的富集。

4.3 矿体厚度、品位特征及其与矿系厚度的相关性规律

根据研究区矿系厚度、矿体厚度、三氧化二铝含量及铝硅比值相关系数矩阵(表 2),研究区共有样本数 146 个,按 0.05 的显著水平,相关系数检验临界值为 0.162 52,矿体厚度与矿系厚度相关系数为 0.51,Al₂O₃ 含量与矿系厚度相关系数 0.44,呈明显正相关,SiO₂ 与矿系厚度相关系数-0.42,呈明显负相关,Al/Si 值相关系数 0.21,呈现一般正相关,SiO₂ 含量与 Al₂O₃ 含量相关系数-0.83,相关性极强,呈极其明显负相关。

西出现两个无矿天窗,矿石的品质特征基本与之一致。对比研究区矿系厚度等值线图(图 5-a)笔者发现南部 60%面积矿系厚度小于 5 m,且多在

3 m以下,因此大面积无矿,两个天窗所在区域矿系厚度3~4 m,表现为零星有矿,出现无矿天窗,东北部矿系厚度集中在5 m以上,矿体厚度、品质相对稳定,由于矿系厚度的不同表现出厚度、三氧化二铝、铝硅比值略有不同。总结起来笔者认为研究区矿体产出与矿系厚度关系密切,矿系厚度大于5 m,有利于成矿,矿体厚度及品质一般较好,矿系厚度3~5 m,零星有矿体产出,矿系厚度小于3 m,基本无矿体产出。

4.4 研究区沉积基底与古地理、地貌

研究区铝土矿的沉积基底包括2种类型:①志留系下统韩家店组泥质岩;②石炭系上统黄龙组灰岩。从黄龙组厚度等值线图(图4)可以看

出,以韩家店组泥质岩为基底的主要分布在研究区南部,以黄龙组灰岩为基底的则位于北部。这说明在石炭纪时期研究区北部存在一定的浅海相碳酸盐岩沉积,而南部为地势较高的剥蚀区,区内地貌总体存在南高北低的特征,而与道真、务川一带相比研究区黄龙组灰岩厚度较薄,结合前人研究将研究区归属于海相向陆相过度的滨岸湿地环境较为妥当。从研究区含矿岩系的组合特征看,区内矿石以碎屑状、豆鲕状铝土矿为主,约占所有矿石的93%,也体现出该区沉积环境为水动力较强的高能环境,此外前人对该区W(B)进行了采样分析,指示亦接近海陆过渡相,因此可以认为研究区铝土矿形成的古地理为滨岸湿地,总体地势为南高北低。

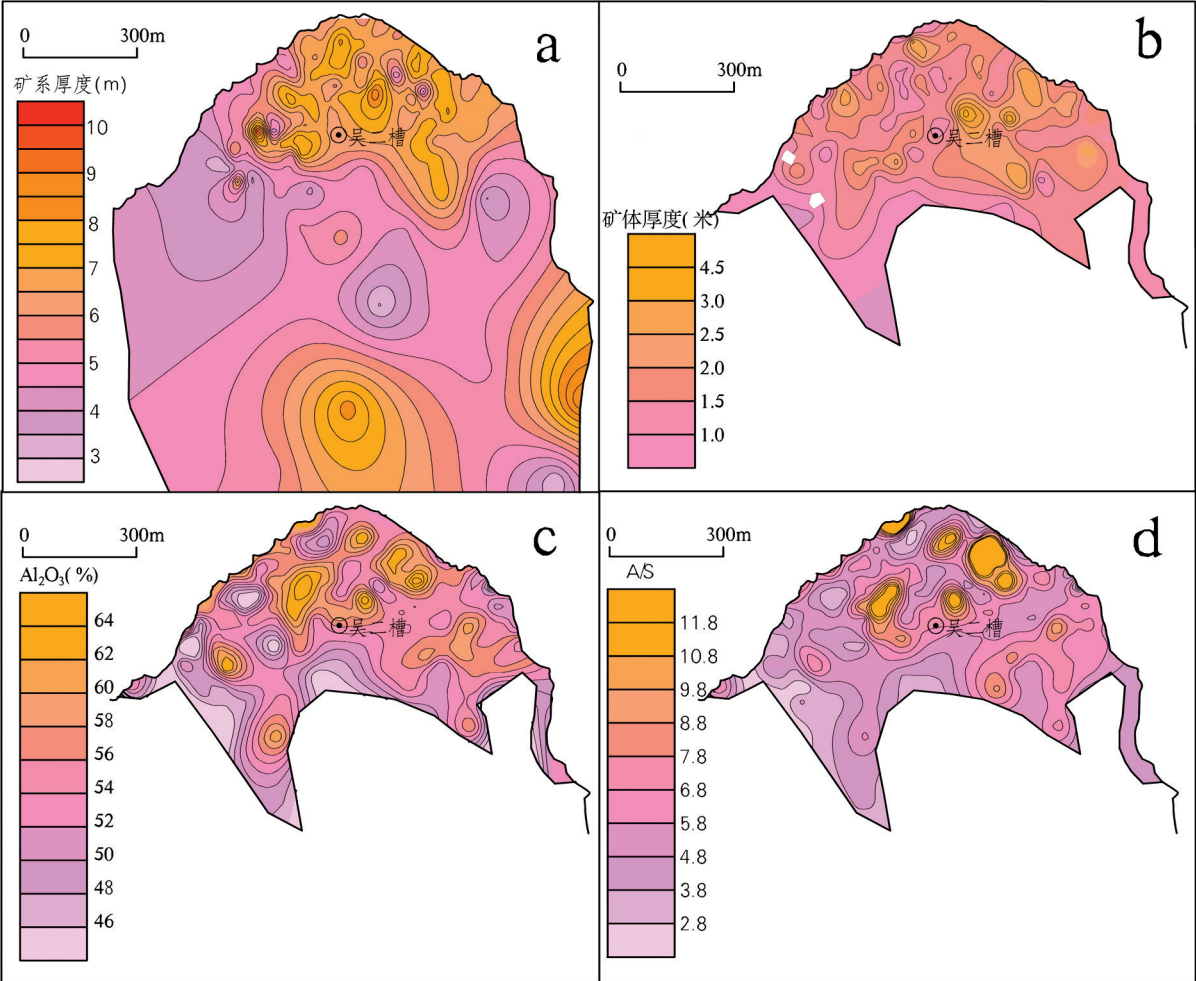


图5 矿系、矿体厚度及品位等值线图

Fig. 5 Contour map of ore series,thickness and grade of ore body

a—矿系厚度等值线图;b—矿体厚度等值线图;c—三氧化二铝含量等值线图;d—铝硅比值等值线图

5 基底控矿作用及找矿意义讨论

5.1 基底微地貌控矿

正安地区铝土矿基底岩性以下志留统韩家店组(S_1hj)灰黄色、紫红色伊利石页岩为主,次为上石炭统黄龙组(C_2h)浅灰色厚层粗晶灰岩。根据正安地区早二叠世铝土矿的成矿模式图(如图6)。铝土矿成矿作用经历了风化作用(红土化或钙红土化作用)、淋滤作用、搬运作用、沉积作用和成岩作用等几个阶段。也就是说正安地区是黔北古陆的含铝碎屑岩及少量的碳酸盐岩经过红土化作用形成了成矿母质,再经过搬运作用到海陆交互的近岸平原、滨岸湿地、半封闭海湾等环境下通过沉积和后期的淋滤等改造作用形成矿体。通过对务正道地区不同类型矿石的分布特征研究已经表明,正安新模向斜地区总体属于海水动力较强的滨岸湿地环境(崔涛等,2013),其古水文地质条件区别不大,此外整个正安地区在成矿期均处于古纬度 8.2° 赤道附近的热带地区,气候湿热,然

而却出现了矿体厚度、矿石品质的较大差异,侧面说明了古地貌在该区铝土矿的形成过程中起到了至关重要的作用。正安地区早二叠世铝土矿沉积盆地主要是硅质陆屑岩的侵蚀平原上的负地貌,虽相对黔中地区铝土矿基底起伏明显平缓,但是从旦坪地区的基底微地貌可以看出仍然存在着深度15米以内起伏,其是控制铝土矿形成过程中矿体的就位和品位的富集的关键因素。从矿体厚度、品位特征及其与矿系厚度的相关性分析及矿体厚度、品位等值线图与矿系厚度等值线图、三维基底微地貌图对比耦合均表明了基底微地貌是研究区的重要控矿因素,其控制了矿体形成、厚度及矿石品质。

前人在黔中、务正道以及龙里地区的研究成果(翁申富等,2013,吴波等,2020,陈文一等,1984,梅冥相等,1991,盛章琪等,2010,陈庆刚等,2012,刘平等,2020)已经表明,务正道地区、黔中地区、凯里地区铝土矿成矿因素大体一致,最大的差别主要体现在含矿岩系厚度上,也就是说基底微地貌的不同,这也侧面说明铝土矿沉积基底的微地貌是控制研究区铝土矿形成关键因素。

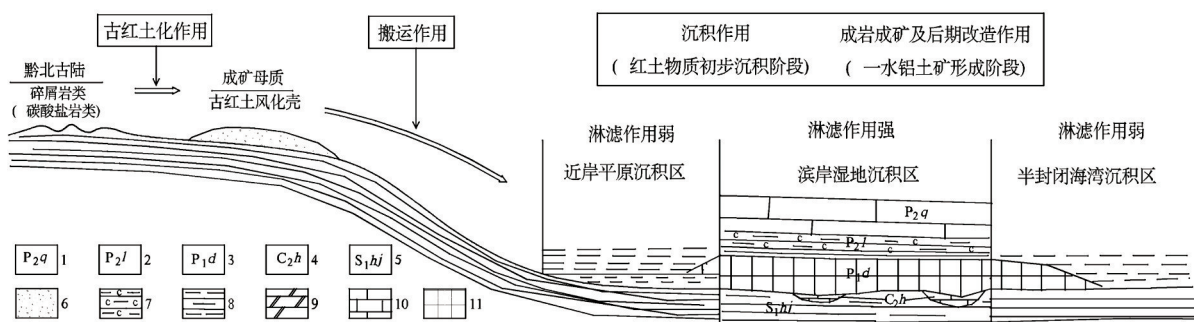


图6 早二叠世铝土矿成矿模式图(据《中国矿产地质志·贵州卷·铝土矿》)

Fig. 6 Early Permian bauxite metallogenic model map

1—栖霞组;2—梁山组;3—大竹园组;4—黄龙组;5—韩家店组;6—红粘土;7—炭质粘土岩;8—粘土岩(泥岩);9—白云岩;10—灰岩;11—含铝岩系

5.2 基底微地貌控矿作用及找矿意义

以往研究成果表明,湿热的气候、负地形地貌、充裕的风化时间、植被和微生物参与、氧化和酸性的沉积环境、通畅的水文系统是铝土矿形成的成矿地质条件(杜远生等,2014, Yu et al. 2019, 余文超等,2013),正安旦坪地区铝土矿形成于滨岸湿地环境,由于其海陆交互的沉积环境,保障了水文系统的通畅,因此在小范围内古地貌条件控

矿作用更为明显,负地貌为风化剥蚀后的含矿物质提供了搬运驻留的储存空间,是矿床形成的基础。储存在负地貌内的铝硅酸盐岩红土,由于洼地的存在,形成了一个淋滤作用的温床,受到后期多期淋滤作用,易溶于水的Fe、Si、Mg、Ca等元素被地下水带走,而难溶于水的Al、Ti等元素则相对富集,从而形成铝土矿床。而由于局部地形洼地则控制了淋滤作用时间的长短,从而控制了铝土矿矿体的厚度及品质,通过整理对比旦坪1号矿体中的矿系厚度最大的钻孔ZK606与矿系较薄

的钻孔 ZK1316 可以明显看出(图 7),ZK606 钻孔经历了 3 个期次的淋滤作用,形成了黑白相间的 3 个淋滤旋回,其矿体厚度达 5.30m 厚,单工程 Al_2O_3 达到 73.63%,铝硅比达 20.92,不仅矿体较厚,品质也更好,而矿系厚度较薄的 ZK1316 钻孔,仅出现了 1 个淋滤旋回, Al_2O_3 最高含量仅 35.32%,未成矿。旦坪地区洼地内铝土矿形成一般经历了 2-4 期的淋滤作用,而高地上则通常只表现为 1 期或无法看出淋滤旋回,洼地内含矿层遭受了更长时间的淋滤,因此高品质的铝土矿往往产于古地貌凹地的中心,向外矿体厚度与品质逐渐变薄、变差,从图 3、图 4 中可以明显看出三氧

化二铝、铝硅比值的浓集中心正好集中在凹地最深区域,很好地印证了这一结论。因此笔者认为研究区铝土矿的沉积基底负地貌是控制矿床形成的基础,为铝土矿的形成提供了淋滤场所,从而控制了铝土矿产出的形态及厚度,而微地貌中的负地形洼地通过影响后期品位富集的关键淋滤作用的时间来控制了矿石品质的好坏。

基于以上成果,笔者认为对于此类铝土矿的勘查应着重注意对基底古微地貌的研究,研究成矿期基底古微地貌特征,找寻地形相对较低的盆地作为找矿靶区,将钻孔布置在盆地中的凹地内,避开台地,有利于提高见矿率,找到大矿、富矿。

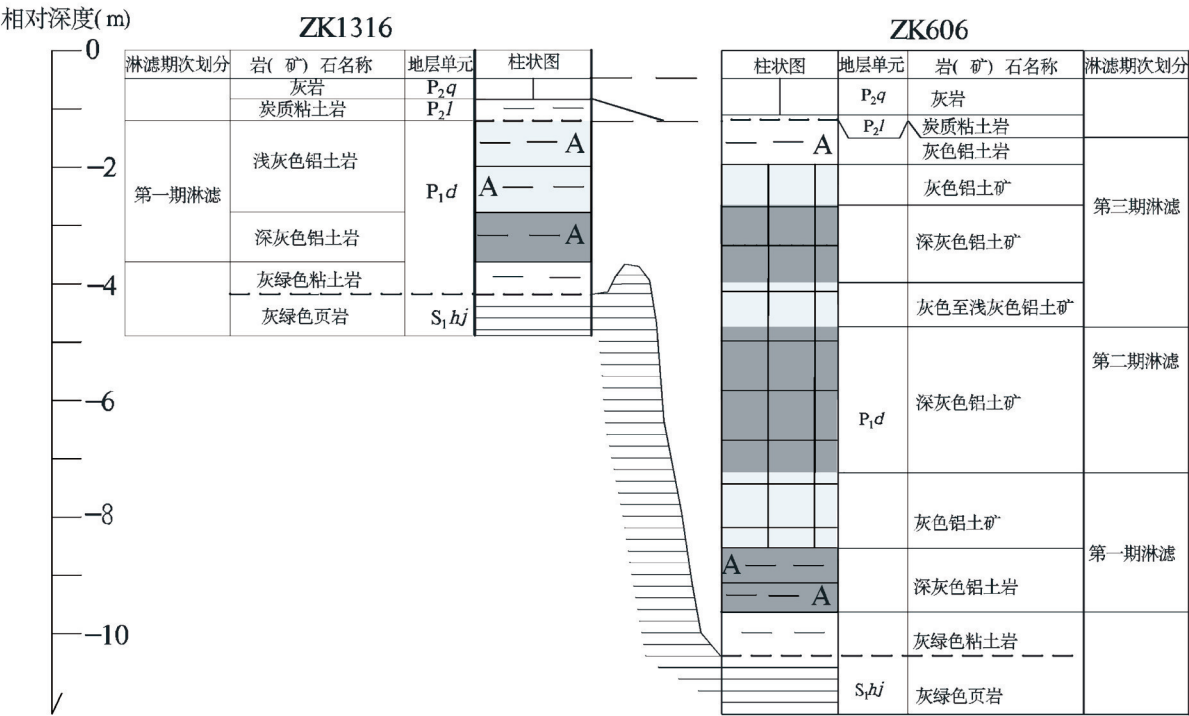


图 7 典型钻孔淋滤期次对比图

Fig. 7 Comparison of typical borehole leaching stages

6 结论

(1) 旦坪铝土矿 I 号矿体沉积古地貌总体表现为南高北低,北部表现为碳酸盐岩古岩溶地貌,南部表现为硅酸盐岩风化侵蚀地貌。

(2) 基底古地貌的凹地深度与矿体厚度、矿石中三氧化二铝、铝硅比值呈现出明显正相关关系,基底古地貌控制了矿体的厚度及品质。研究表明矿系厚度大于 5 m,有利于成矿,常形成厚度、品质稳定的矿体,矿系厚度 3~5 m,零星产出矿体,矿系厚度小于 3 m,不利于成矿,一般不形成矿体。

(3) 正安地区铝土矿的沉积基底微地貌主要通过影响后期淋滤作用的时间长短控制矿体的厚度与矿石品质。

(4) 正安地区的勘查找矿要着重加强对基底古地貌及原型盆地恢复的研究,将勘查重点靶区放在盆地内,工程布置于盆地凹地内,可以提高见矿率,找到大矿富矿。

致谢:文章所用数据来源于旦坪铝土矿精查项目组,成文过程中得到了李沛刚、翁申富、朱永红三位研究员的指导,在此对项目组所有参加人员及三位指导老师表示衷心的感谢!

[参考文献]

- 陈文一,王立亭,叶念曾,等. 1984. 贵州早二叠世岩相古地理研究[J]. 贵州地质,1(1):9-64.
- 陈庆刚,陈群,杨明坤,等. 2012. 黔中地区铝土矿基本特征及成矿模式探讨[J]. 贵州地质,26(3):163-168.
- 崔涛,焦养泉,杜远生,等. 2013. 黔北务正道地区铝土矿形成环境的古盐度识别[J]. 地质科技情报,32(1):46-51.
- 崔涛,焦养泉,杜远生,等. 2013. 黔北务正道地区铝土矿沉积特征及分布规律. 地质科技情报,32(1):52-56.
- 杜远生,焦养泉,凌文黎,等. 2014. 贵州务正道地区铝土矿基础地质和成矿规律研究[R]. 未出版.
- 韩英,王京彬,邹林,等. 2014. 贵州省务正道铝土矿微量元素地质地球化学特征. 矿床地质,87-88.
- 刘平,韩忠华,廖友常,等. 2020. 黔中-渝南铝土矿含矿岩系微量元素区域分布特征及物质来源探讨. 贵州地质,37(1):1-13.
- 刘文凯,肖光华,彭国林. 1993. 黔北地区中石炭统灰岩的发现及其地质意义[J]. 贵州地质,10(2):101-104.
- 雷志远,翁申富,等. 2013. 黔北铝土矿矿带基底岩系组成及空间分布于成矿作用的关系探讨[J]. 地质科技情报,32(1):13-18.
- 梅冥相. 1991. 试论贵州早石炭系铝土铁质岩系的沉积环境及物质来源[J]. 贵州地质,8(4):322-328.
- 盛章琪,廖莉萍. 2010. 贵州古风化壳沉积型铝土矿的沉积方式和成矿作用[J]. 贵州地质,27(4):255-258.
- 翁申富,雷志远,赵爽,等. 2011. 遵义仙人岩铝土矿赋存富集与古岩溶地貌的关系[J]. 贵州地质,28(4):260-264.
- 翁申富,雷志远,陈强,等. 2013. 黔北务正道地区铝土矿沉积相与矿石品质的关系[J]. 地质科技情报,32(1):19-22.
- 吴波,邓克勇,刘应忠,等. 2020. 贵州龙里地区石炭世杜内期铝土矿微地貌及其对铝土矿的控制作用. 古地理学报,22(5):977-988.
- 徐志刚,陈毓川,等. 2008. 中国成矿区带划分方案[R]. 地质出版社.
- 余文超,杜远生,顾松竹,等. 2013. 黔北务正道地区早二叠世铝土矿多期淋滤作用及其控矿意义. 地质科技情报,32(1):34-39.
- 赵远由,苏书灿. 2013. 黔北务正道地区黄龙组地质特征及其找矿意义. 地质科技情报,32(1):25-26.

The Ore-controlling Action of Basement Geomorphology on Zheng'an Bauxite Deposit in Guizhou and Its Prospecting Significance

——Taking No. 1 orebody of Danping bauxite deposit as an example

LI Yuan-hong, DU Hong-yi, LI Xin-nian, LIU Xu, HU Peng

(No. 106 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources, Chinese Academy of Geological of Guizhou Province, Zunyi 563000, Guizhou, China)

[Abstract] This paper is mainly based on the systematic statistics of ore series thickness, ore body thickness, aluminum oxide and aluminum silicon ratio of 146 projects for the most typical Danping bauxite deposit in Zheng'an area. Characteristics, explore its correlation with ore body thickness, aluminum oxide, aluminum silicon ratio, and analyze its ore-controlling mechanism and prospecting significance. Studies have shown that the basement paleo-geomorphology of Danping bauxite mine generally exhibits characteristics of high in the south and low in the north. The northern part is represented by carbonate paleokarst topography, which fluctuates between 5 and 15m, and the southern part is represented by silicate weathering erosion. The fluctuation is 0~5 m. The thickness and quality of the ore body have an obvious positive correlation with the depth of the basement recession. The deeper the recession depth, the thicker the ore body. The ore body in the micro landform recession has undergone a longer period of leaching transformation, and the ore quality is higher. Therefore, the author believes that the exploration of bauxite in Zheng'an area should pay special attention to the study of basement paleo-geomorphology, and arrange the exploration project in the dissolution depression to increase the ore-seeing rate and explore high-quality ore bodies.

[Key Words] Bauxite; Basement landform; Ore-controlling role; Prospecting significance; Danping, Guizhou

瞬变电磁法确定隐伏岩溶在贵州正安旦坪 铝土矿勘探定孔中的应用

蒙应华^{1,2}, 张西君^{1,2}, 刘俊^{1,2}, 王永泰^{1,2}

(1. 贵州省地质调查院, 贵州 贵阳 550081; 2. 贵州省地质物探工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550081)

[摘要] 贵州正安旦坪铝土矿大精查项目位于黔北典型岩溶区, 为在钻探施工中有效避开岩溶, 减少损失, 提高勘查效率, 达到铝土矿勘探定孔目的, 在基本掌握研究区地质背景与地球物理特征的基础上开展物探瞬变电磁法测量。本文简单介绍了物探瞬变电磁法(TEM)的工作原理及探测方法, 着重通过在已知钻遇溶洞钻孔 ZK14604 开展方法性试验, 选取合适观测参数, 再结合地质、钻探资料对物探断面及平面切图视电阻率异常特征进行综合研究定孔, 根据已知到未知的原则, 逐步对矿区其他拟布钻孔展开测量。据钻探成果资料显示, 研究区已施工物探定孔均有效避开隐伏岩溶, 物探成果得到了有效验证。表明利用瞬变电磁法在岩溶区铝土矿勘查定孔中能取得较好效果, 可为今后岩溶地区矿产勘查隐伏岩溶调查提供方法借鉴。

[关键词] 瞬变电磁; 岩溶区; 矿产勘查; 隐伏岩溶; 视电阻率; 铝土矿; 贵州

[中图分类号] P618.45; P631.3⁺25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2021)02-0177-07

1 引言

岩溶是矿产勘查中重点关注对象之一, 由于岩溶发育具有隐蔽性的特点, 给矿产勘查带来诸多施工和安全难题。如: 钻探施工钻遇岩溶导致脱钻、卡钻、漏浆等事故, 造成钻孔报废, 严重影响施工进度, 增加了勘查成本。

贵州正安旦坪铝土矿勘查项目位于黔北典型岩溶区, 岩溶较为发育且物探工作程度较低, 为了查明地下隐伏岩溶特征及分布规律, 解决以上难题, 确保本次大精查铝土矿勘查项目高质量推进, 利用地球物理方法查明地下隐伏岩溶就显得尤为重要。瞬变电磁测深方法作为近年来发展活跃的勘探技术, 是一种轻便高效、抗干扰能力强且受地形影响较小的地球物理勘探方法, 其勘探方式灵活多变, 具有能克服浅表高阻层屏蔽, 对低阻介质

响应灵敏, 横向分辨能力较强, 特别是受地形影响和场地工作条件限制均较小等优点(蒋邦远, 1998; 方文藻等, 1993; 李貅, 2002), 目前在油气勘探、矿产勘查、工程物探、水文物探、地质灾害调查等领域得到了广泛的应用(王亮等, 2010; 蒙应华等, 2015; 张西君等, 2013; 严良俊等, 2004; 胡立强等, 2009; 熊远鹏等, 2019)。本文正是利用了瞬变电磁法这些优点, 在贵州省正安县旦坪铝土矿大精查项目中开展隐伏岩溶物探专项调查。

2 研究区地质与地球物理特征

研究区位于黔北正安芙蓉江与洪渡河地表分水岭处, 即新模向斜台地之上, 处于黔中古陆北缘、上扬子地块东南部, 属碳酸盐岩地区, 典型的喀斯特地貌。由于受河流侵蚀, 地貌景观复杂, 岩

[收稿日期] 2021-01-29 **[修回日期]** 2021-04-22

[基金项目] 贵州省大精查项目办《贵州省正安县旦坪铝土矿勘探》资助。贵州省科学技术厅“贵州省地质物探开发应用工程技术研究中心”(黔科合【2016】平台人才 5401)。

[作者简介] 蒙应华(1982—), 男, 贵州瓮安人, 高级程师, 主要从事物探工作。Email: 32143941@qq.com。

溶峰丛、溶丘与侵蚀山脊沟谷地貌共存,峰丘发育,沟谷深切,地形崎岖,起伏较大。

2.1 地质概况

2.1.1 地层

研究区内主要出露地层由老至新依次有二叠系下统大竹园组 (P_1d)、二叠系中统梁山组 (P_2l)、栖霞组 (P_2q)、茅口组 (P_2m) 及第四系 (Q)。其中,大竹园组为本研究区内铝土矿赋存层位,习称铝土矿含矿岩系(徐彬等,2017;贵州省地质调查院,2020)。各地层岩性分别如下:

大竹园组(P_1d):下部为灰绿、黄绿泥石粘土岩、泥石岩、粘土岩;中上部为灰白色、浅灰色至黑灰色铝土矿或铝土岩;顶部为灰白、浅灰色、灰色粘土岩。

梁山组(P_2l):为一套黑色炭质页岩、炭质粘土岩,含少量黄铁矿。与下伏大竹园组呈假整合接触。

栖霞组(P_2q):为一套碳酸盐岩沉积,岩溶管道发育。底部为细晶灰岩与含泥质灰岩互层;下部为中厚层含燧石结核细晶灰岩;中部为中厚至厚层细晶灰岩;上部为厚层细晶灰岩。与下伏地层梁山组呈整合接触或与下伏地层大竹园组呈假整合接触。

茅口组(P_2m):系区内沉积厚度较大的浅海相碳酸盐岩,岩溶管道发育。由深灰色中厚层灰

岩、厚层细晶灰岩夹燧石团块和条带灰岩、生物碎屑灰岩组成。

第四系(Q):一类是粘土、亚粘土、砂、岩块等残、坡积堆积物。分布在矿区缓坡及地形低洼地带;另一类是中二叠统灰岩在悬崖陡坡边缘崩塌堆积而成的坠积堆积物,岩块大小不等,杂乱分布于悬崖及陡坡之下。

2.1.2 构造

区域构造以宽缓背斜与紧闭向斜组合构成的隔槽式褶皱为主,具典型的侏罗山式褶皱组合特点。向斜变形强烈,常有逆断层发育;背斜变形相对较弱,属于典型的薄皮构造,是地壳浅层复杂滑脱作用的产物,其主要滑脱层是二叠系含煤细碎屑岩和三叠系下部的泥质岩。

褶皱形态背斜部位较为宽缓,向斜部位较为紧闭,显示隔槽式褶皱组合特征。单个褶皱轴在东北向断层发育部位发生S型弯曲,同时,在开阔平缓背斜部位,发育雁行排列的次级褶皱,显示出近东西向挤压和左旋扭动的应力特点。

矿区主体构造是新模向斜,为一大致呈北北东-北东向展布、向西倾伏、向南侧伏、东缓西陡的不对称向斜,断裂构造主要为重力滑移断裂(图1)。

2.2 地球物理特征

对工作区主要岩性单元及矿化露头,进行了小四极视电阻率参数实地测定(见表1)。

表 1 工区岩(矿)石电性参数统计表

Table 1 Area of rock(ore) statistics of electric parameters

地层	岩性	视电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$	平均视电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$
	水	2 ~ 30	20
Q	浮土	88.69 ~ 97.27	90.83
P_{2p+m}	灰岩	2 696.79.0 ~ 5 304.26	3 376.80
P_2l	页岩(粘土岩)	159.4 ~ 375.1	269.5
P_1d	铝土矿	125.63 ~ 947.03	348.56

由表1可知,勘查区主要出露地层岩(矿)石平均视电阻率由灰岩→铝土矿→页岩(粘土岩)→第四系浮土→水依次降低。其中,二叠系中统栖霞-茅口组灰岩视电阻率平均值为3 376.8 $\Omega \cdot m$,最高可达5 304.26 $\Omega \cdot m$,表现为明显高阻反映;大竹园组铝土矿、梁山组页岩(粘土岩)及第四系覆土均表现为低阻,平均值分别为348.56、269.5、90.83 $\Omega \cdot m$;水视电阻率最低,仅为20 $\Omega \cdot m$,与灰岩相比具有明显电性差异。

根据研究区钻探钻遇溶洞情况来看,隐伏岩溶

主要位于二叠系中统栖霞-茅口组灰岩地层,溶洞大小一般在3 ~ 20 m不等(贵州省地质调查院,2020)。结合以往类似隐伏岩溶勘查经验:岩体因溶蚀形成溶洞,破坏了岩体完整性,当溶洞较大且为空洞时,溶洞相对完整岩体表现为极高电阻率特征;当溶洞充水时相对完整岩体表现为低电阻率特征,当溶洞受淤泥充填时电阻率将进一步降低。

综上所述,岩溶与完整岩体间存在明显电性差异,即本研究区具备利用物探瞬变电磁法探测地下隐伏岩溶的地球物理前提。

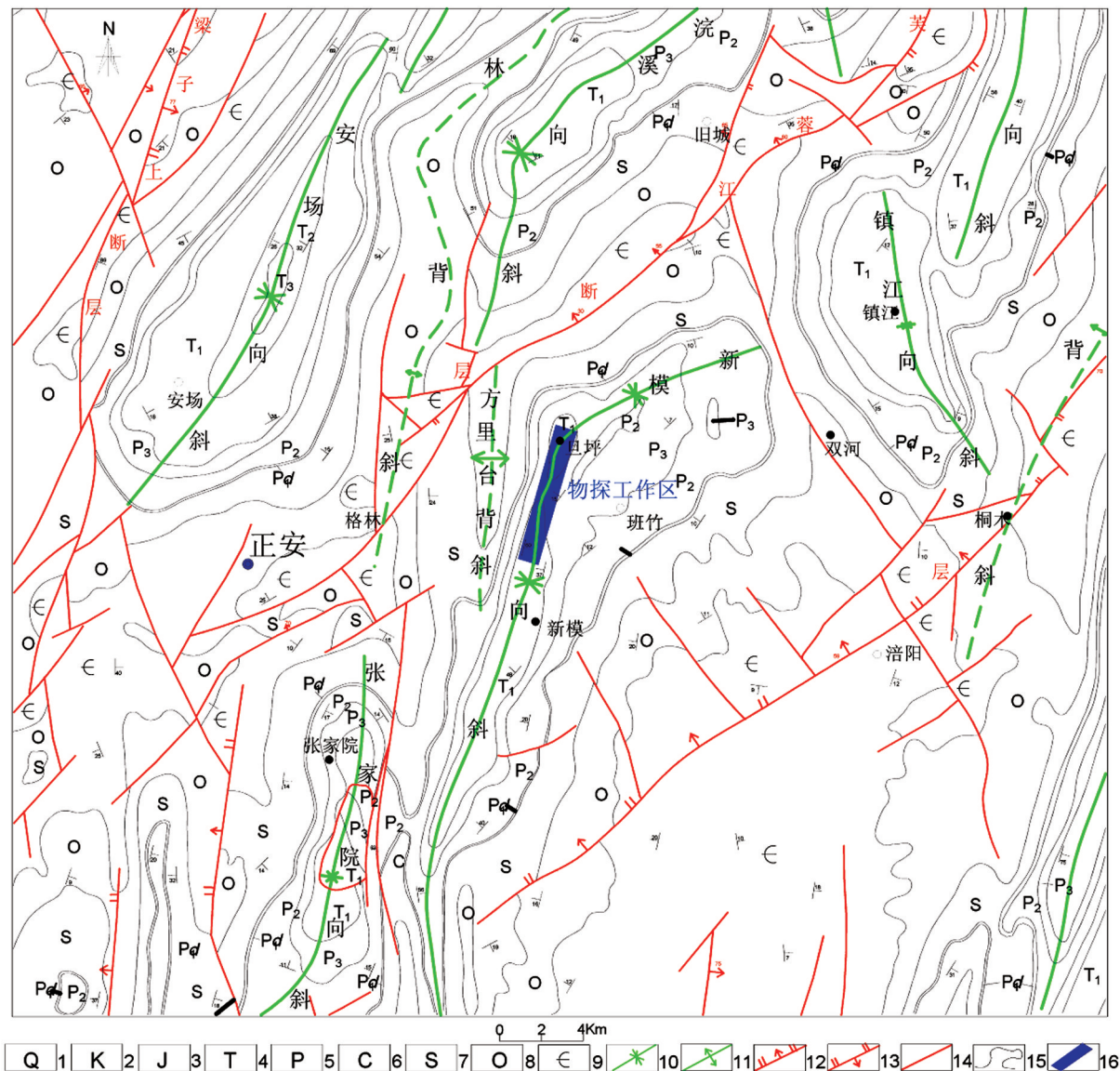


图1 工作区区域地质图

Fig. 1 Geological map of work area

1—第四系;2—白垩系;3—侏罗系;4—三叠系;5—二叠系;6—石炭系;7—志留系;8—奥陶系;9—寒武系;10—向斜;11—背斜;12—正断层;13—逆断层;14—性质不明断层;15—地层界线;16—物探工作区

3 物探工作原理及方法

3.1 工作原理

TEM法又称瞬变电磁法,属于时间域电磁感应类探测方法,利用一个不接地回线向地下发射脉冲电磁波作为激发场源,脉冲电磁波结束后,导电介质在阶跃变化的电磁场下产生涡流场效应,利用接收回线观测由地下地质体产生的感应二次场随时间的变化。由于二次场来源于地下地质体内的感应电流,因此它包含着与地质体有关的地

质信息,所以通过观测二次场随时间的变化,并对所观测的数据进行分析和处理,从而达到研究浅层或中层地电结构(蒋邦远,1998;方文藻等,1993)。TEM法原理示意图见图2。

3.2 工作方法技术

瞬变电磁法勘探中,其重叠回线装置的勘探深度与供电电流大小和线框边长有如下关系:

$$H=0.55\left[\frac{IL^2\rho_1}{\eta}\right]^{1/5}$$

式中: H 为勘探深度; I 为发射电流; L 为发送回线边长;场源磁矩 IL^2 ; ρ_1 为上覆电阻率;最小可

分辨电平 $\eta = R_m N$ (一般为 $0.2 \sim 0.5 nV/m^2$); R_m 为最低限度的信噪比; N 为噪声电平。

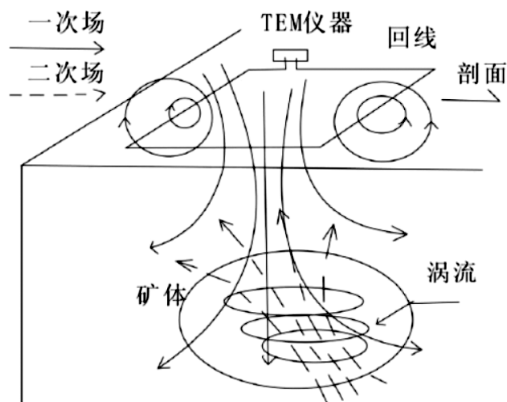


图 2 TEM 法工作原理图(蒋邦远,1998)

Fig. 2 TEM method works Figure

由上式可知,装置的磁矩决定勘探深度,它与供电电流大小和线框边长的平方(即线框的等效面积)有关。由于本次研究区地形切割较大,植被覆盖良好,为了达到勘探深度,并提高工作效率,降低地形、植被不利因素的影响,可通过适量增加线圈的匝数或者增大电流的强度来实现;因此,本次采用瞬变电磁重叠回线装置、大电流、小线框的勘查模式进行(杨农合等,2011),

本次 TEM 法使用仪器为西安强源物探所研制的 EMRS-2B 型电磁矿产勘探仪,采样重叠回线装置沿剖面正向(或反向)做顺序观测,该装置具有体积小,施工方便,工作效率高,异常定位精确,抗干扰能力强的特点。其中,回线边长为 $3 \times 3 m$,共 6 匝,供电脉冲宽为 $4 ms$ 、供电电流在 $1300 A$ 左右,采样率为 $80 \mu s$,采集 400 道数据,滤波合成 22 道: $80 \mu s \sim 19.4 ms$;选择 4 次叠加,在存在干扰或发现异常处适当增加到 8 或 16 次,数据最优时存储数据,异常出现时进行检查并存储检查数据。

3.3 测网布设

为提高物探探测精度,降低钻遇岩溶风险,克服物探因多解性造成的解译误差,最大限度查明钻孔位置岩溶发育情况,更好配合钻探施工、水文调查等研究矿区工程地质条件提供地球物理支撑。据规范要求,测网的选择以能发现有意义的最小异常,能在平面图上清楚地反映探测对象的位置和形态为原则,并保证所得异常完整性及周围有一定范围的背景场。

根据以往务川铝土矿和兴仁泥堡金矿勘查项目的工作经验:点线距为 $15 m$ 或 $20 m$ 的试验测

网中,均存在异常分辨率不高、漏失大小为 $10 m$ 左右溶洞的情况。故本次结合研究区钻遇溶洞规模大小情况及钻探施工对小型溶洞的处理技术等,拟布设点线距均为 $10 m$,网度为 7×9 的测网开展物探测量工作,即以拟布钻孔位置为中心,平行地质勘探线方向布设 7 条剖面,每条剖面 9 个测点,工作布设示意图见图 3。

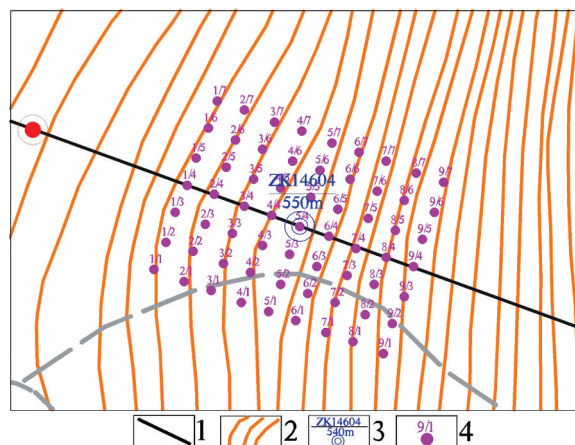


图 3 ZK14604 瞬变电磁测网布设图

Fig. 3 ZK14604 Transient Electromagnetic Measuring

Network Layout Drawing

1—地质勘探线;2—地形等值线;3—设计钻孔及编号;4—物探测点及编号

3.4 数据处理及成图

首先对野外实测数据进行复核算,对因人文干扰导致衰减曲线某些频点出现非正常跳动或突变的数据。利用随机配置软件将原始数据进行滤波和剔除畸变处理,并消除仪器噪声、天然电磁噪声等引起的异常畸变。然后通过烟圈理论的反演公式计算空间视电阻率数据(张西君等,2015)。即:

$$\text{视电阻率公式: } \rho_i = 6.32 \times 10^{-3} b^{8/3} \left(\frac{\varepsilon}{I} \right)^{-2/3} t^{-5/3};$$

$$\text{深度公式: } h_i = -28.08 \sqrt{\rho_i}$$

其中: ρ_i —延时 t 时刻视电阻率 ($\Omega \cdot m$); b —回线边长 (m); ε —感应电动势 (μV); I —供电电流 (A); t —采样时间 (ms); h_i —延时 t 时刻视深度 (m)。

并运用 SURFER 软件对计算结果数据绘制相应图件,具体处理流程如图 4 所示。

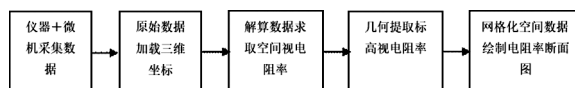


图 4 TEM 数据处理流程图

Fig. 4 TEM data processing flowchart

4 应用效果分析

贵州省正安县旦坪铝土矿大精查项目已多个钻孔钻遇岩溶,其中:ZK14604 两次钻遇较大溶洞,该钻孔设计孔深 520 m,钻探施工过程中在孔深 345~364 m 处遇深 19 m 的大溶洞(邓鹏 等, 2021),钻孔报废后进行移孔 12 m 处理;移孔后在

孔深 335~345.73 m 处再次钻遇溶洞,溶洞深 10.5 m(见图 5)。为客观地查明地下隐伏岩溶空洞的空间分布情况,选出最佳钻孔位置,本次拟对 30 个布钻孔设计了物探专项调查。通过在已知钻遇溶洞钻孔开展瞬变电磁方法有效性试验,并调整合适的测量参数,分析其应用效果,再根据物探从已知到未知的原则逐步开展。现以钻孔 ZK14604 为例进行物探应用效果分析。

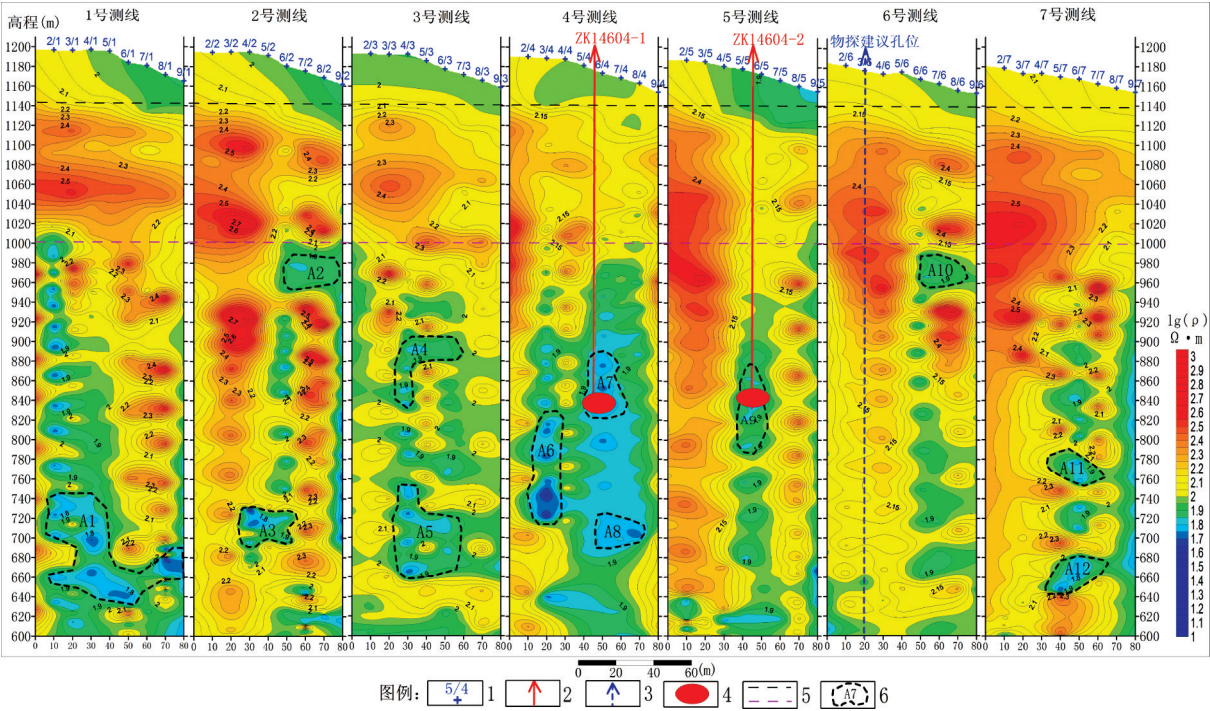


图 5 ZK14604 钻孔 TEM 视电阻率断面图

Fig. 5 ZK14604 drilling TEM apparent resistivity section

1—物探点号/线号;2—原施工钻孔;3—物探建议孔位;4—钻遇岩溶;5—岩层电性分层线;6—物探异常及编号

4.1 断面异常岩溶分布(点)特征分析

图 5 为钻孔 ZK14604 物探(TEM)视电阻率断面图,由图可知,7 条 TEM 剖面总体视电阻率异常形态基本相似,大致可分为 3 个电性层。据地质资料,浅部一般为第四系覆盖,其下为二叠系茅口组地层,再结合岩(矿)石地球物理特征及该钻孔前后两次钻探资料综合分析:其中,海拔标高 1 140 m 至地表(黑色虚线上部)均表现中低阻、低阻,电阻率值一般为 $n \times 10 \Omega \cdot m$,推测上部绿色中低阻应为由第四系覆土及浅部岩石风化所引起;海拔标高 1 000 m~1 140(黑色与粉红色虚线间)表现为完整的中高阻、高阻特征,电阻率值一般为 $n \times 102 \sim 103 \Omega \cdot m$,推测应为二叠系茅口组完整灰岩所致,该地层厚度范围内岩溶尚不发育,地层

相对较为完整;海拔标高 600~1 000 m(粉红色虚线下部)各断面均存在明显的视电阻率中低阻、低阻圈闭异常区,推测圈闭低阻异常为岩溶引起,该电性层应为岩溶发育区。根据视电阻率值及异常形态特征,共圈定了 12 个低阻异常,异常编号分别为 A1~A12。

从图中可以看出,该钻孔第一次施工位置(ZK14604-1)位于 4 号剖面 5~6 号测点间,钻孔在海拔标高 820~880 m 间存在一明显低阻异常 A7,异常呈葫芦状显示,其异常中心点海拔标高约为 830 m,这与钻遇溶洞深度位置吻合较好;移孔处理后,第二次施工位置(ZK14604-2)位于 5 号剖面 5~6 号测点间,钻孔在海拔标高 790~880 m 间同样存在一明显低阻异常 A9,异常为竖直片状显示,相对异常 A7 偏弱,其异常中心点海拔标高约为 840 m,与第二次施工钻遇溶洞深度位置基本

一致,故推测两异常 A7、A9 均为隐伏岩溶所引起。表明:当岩石受溶蚀形成溶洞时,在视电阻率断面中表现为圈闭低阻异常,而未受溶蚀区域一般表现为完整中高阻、高阻异常区。根据物探从已知到未知及推测解译原则,推测钻孔物探圈定的其他低阻异常均为隐伏岩溶引起,即该地层厚度范围内岩溶管道较为发育,为钻孔高风险区。

4.2 平面异常岩溶分布(区)特征分析

为了更客观认识岩溶在平面位置的分布及变化特征,在海拔标高 1 000 ~ 700 m 范围分别以 20 m 深度间距共切取了 16 张视电阻率平面等值

线图。其中,图 6 为 ZK14604 钻孔物探(TEM)视电阻率部分平面切图,低阻异常主要集中于本钻孔物探工作区中心部位,根据图中视电阻率值及等值线形态特征,大致圈定了一个低阻异常区 a1。从图中可以看出:在海拔标高 840 m 处,异常最强、且规模最大,为一北西向条带状低阻异常,钻孔两次施工位置均位于该低阻异常范围内,且与钻遇岩溶部位吻合较好。其中,第一次施工孔位距离低阻异常 a1 的中心较近,异常较强;第二次施工孔位距离异常中心相对较远,异常较弱,这与图 5 中异常 A7、A9 投影位置相一致。随着深度不断增加,异常总体由北西向逐渐转为北东向,且异常呈逐渐减弱的趋势。

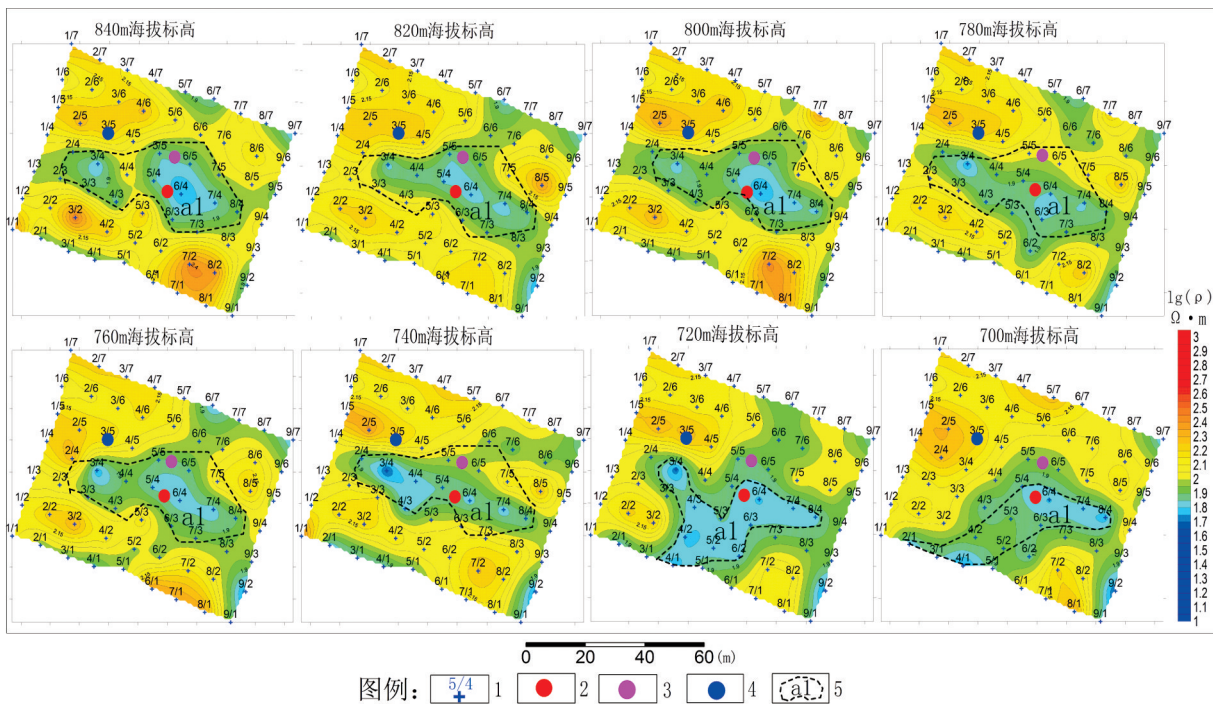


图 6 ZK14604 钻孔 TEM 视电阻率平面切图

Fig. 6 ZK14604 drilling TEM apparent resistivity plane cut

1—物探点号/线号;2—钻遇溶洞孔位 1;3—钻遇溶洞孔位 2;4—物探建议孔位;5—物探异常及编号

综上所述,为了降低钻探风险,使钻孔有效避开岩溶,故物探建议定孔位置为视电阻率较高且相对稳定的 5 号剖面 3 号点。经钻探验证,物探定孔有效规避了岩溶达到铝土矿勘查目的层位。

5 结论

通过贵州省正安县旦坪铝土矿大精查物探专项调查,由试验孔逐步开展对研究区共计 30 个拟布钻孔的瞬变电磁测量,除 12 个钻孔因矿产勘查

设计变更未施工外,其余物探成果定孔中 16 个已施工完成钻孔均有效避开岩溶空洞,取得了良好的效果。

(1)利用物探瞬变电磁成果定孔,需充分对比研究断面和平面异常特征,在规范及设计要求的前提下,尽可能选择高阻异常较完整的部位进行定孔。

(2)在岩溶区矿产勘查中利用瞬变电磁法查找隐伏岩溶,异常特征明显,物探确定隐伏溶洞得到了钻探工程的有效验证,可在类似岩溶区矿产勘查中推广应用。

(3)瞬变电磁大电流、小线框的中心重叠回线装置灵活轻便,在山区复杂地形较为实用,能快速高效解决岩溶区钻探是否钻遇隐伏溶洞定孔的施工和安全难题。

(4)由于该方法理论的局限性,在浅部0~100 m深度范围内存在一定探测盲区,数据较少,分辨率较低,建议利用综合物探方法效果会更好。

[参考文献]

- 邓鹏,黄明勇,方青,等. 2021. 贵州省旦坪铝土矿钻探施工工艺[J]. 钻探工程, 48(3): 78-85.
- 方文藻,李予国,李貅. 1993. 瞬变电磁测深法原理[M]. 西安:西北工业出版社.
- 贵州省地质调查院. 2020. 贵州正安县旦坪铝土矿大精查隐伏岩溶工程地质物探专项调查报告[R].
- 胡立强,高发中,伍校军,等. 2009. 电磁勘探法在岩溶探测中的应用[J]. 物探装备, 19(4): 262-265.
- 蒋邦远. 1998. 瞬变电磁法勘探[M]. 北京:地质出版社.
- 李貅. 2002. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社.
- 蒙应华,汪玉琼,杨仕欲. 2015. AMT法与TEM法在黔南页岩气勘查中的综合应用[J]. 工程地球物理学报, 12(5): 627-632.
- 王亮,张登藩,王秋菊,等. 2010. 激电-瞬变电磁法在黔东南羊坪铅锌矿的应用[J]. 工程地球物理学报, 7(3): 352-358.
- 徐彬,张华松,陈建平,等. 2017. 贵州旦坪铝土矿矿产地质特征及成因探讨[J]. 桂林理工大学学报, 37(4): 570-579.
- 熊远鹏,李开鹏. 2019. 瞬变电磁法在不稳定斜坡勘察中的应用[J]. 贵州地质, 36(2): 180-184.
- 严良俊,陈清礼,胡文宝,等. 2004. 灰岩溶洞发育区浅层瞬变电磁法找水效果[J]. 工程地球物理学报, 1(1): 83-85.
- 杨农合,王辉,徐小林. 2011. 应用瞬变电磁法小线框大电流探测隐伏断层[J]. 物探与化探, 35(1): 80-85.
- 张西君,敖怀欢,王重阳,等. 2013. 瞬变电磁在贵州岩溶山区地下水勘查中的应用[J]. 资源与环境工程, 27(6): 808-811.
- 张西君,敖怀欢,杨胜发,等. 2015. 瞬变电磁法在复杂条件下勘查地下岩溶水效果分析[J]. 工程地球物理学报, 12(2): 151-156.
- 张军,李貅,赵莹,等. 2011. 瞬变电磁法在岩溶水勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 8(5): 521-524.
- 周富隆. 2018. 综合物探方法在石灰岩岩溶勘查中的应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 131(3): 83-85.

The Application of Transient Electromagnetic Method in Determining the Location of Drilling Holes and Concealed Karst in the Exploration of Danping bauxite in Zheng'an, Guizhou

MENG Ying-hua^{1,2}, ZHANG Xi-jun^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, WANG Yong-tai^{1,2}

(1. Guizhou Geological Survey, 550018 Guiyang, Guizhou, China; 2. Guizhou Engineering Research Center for Geologic-Geophysical exploration development and application, Guiyang 550081, Guizhou, China)

[Abstract] Guizhou Zheng'an Danping bauxite mine large-scale investigation project is located in a typical karst area in northern Guizhou, To effectively avoid karst during drilling construction, Reduce loss, Improve survey efficiency, Achieve the purpose of drilling holes in bauxite exploration, Based on the basic grasp of the geological background and geophysical characteristics of the study area, carry out geophysical transient electromagnetic surveys, This article briefly introduces the working principle and detection method of the geophysical transient electromagnetic method(TEM), Emphasis on the methodological test carried out in the known karst cave hole ZK14604, Choose appropriate observation parameters, Combined with geological and drilling data, comprehensively study the apparent resistivity anomaly characteristics of geophysical prospecting sections and plane cuts to fix holes, According to the known to unknown principle, Gradually start surveying other planned boreholes in the mining area. According to drilling results, The geophysical holes that have been constructed in the study area effectively avoid the hidden karst, The results of geophysical prospecting have been effectively verified. It shows that the use of transient electromagnetic method can achieve better results in the exploration of bauxite in karst area. It can provide method reference for future mineral exploration and hidden karst survey in karst areas.

[Key Words] Transient electromagnetic method; Karst area; Bauxite exploration; Apparent resistivity; Zheng'an, Guizhou

黔西南者相二金矿龙潭组沉积特征与金富集规律研究

邓亚梅, 何金坪, 李应辉, 徐良易, 何彦南, 黄露露, 叶 连, 李登明

(贵州省地质矿产勘查开发局 105 地质大队, 贵州 贵阳 550018)

[摘 要] 本文利用岩心、样品分析化验等资料对龙潭组的沉积环境、岩性组合、隐伏断裂构造以及含矿特征进行了研究, 结果表明: 研究区龙潭组为陆表海局限台地、潮控三角洲以及重力流沉积。区内存在两条隐伏断裂, 走向为北西向, 倾向北东的逆断层(F_{20})和走向为北东向, 倾向北西的逆断层(F_x); 龙潭组一段(P_3l^1)零星含矿段、龙潭组二段(P_3l^2) III c ~ III b 含矿层、龙潭组三段(P_3l^3)的 IV c ~ IV b 含矿层具滑动擦痕、滑动镜面、碎裂化和角砾化特征, 含矿层中的生物碎屑灰岩和粉砂质粘土岩、粘土质粉砂岩和钙质粘土岩, 均有不同程度的见矿, 是金富集的有利场所, 为后期找矿预测方向提供了依据。

[关键词] 沉积特征; 岩性组合; 构造控矿分析; 金富集规律; 者相二金矿; 黔西南

[中图分类号] P618.51; P534.51; P512.2 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2021)02-0184-08

者相二金矿大地构造位置位于扬子准地台西南缘与华南褶皱带之右江褶皱带的接合部位, 位于滇黔桂“金三角”的北部(陈发恩等, 2020)。属于水银洞超大型金矿床的东段, 是灰家堡背斜向东延伸及倾伏的地段。碳酸盐岩类矿层主要发育于龙潭组一段、龙潭组二段、龙潭组三段, 部分存在于夜郎组、大厂层。由于龙潭组作为主要含矿层段, 其沉积特征及金矿富集规律, 为后期找矿预测提供依据。

1 区域地质概况

灰家堡背斜位于贵州省西南部, 东起贞丰者相, 西止兴仁大山, 东西长 20 km, 南北宽 6 km(郭振春等, 2006), 埋藏较深, 总体为轴向近东西的宽缓短轴背斜, 贯穿黔西南州中部东西方向。背斜位置位于国家级南盘江-右江成矿区带北部, 是右江褶皱带的西部延伸区(郭振春等, 2006; 刘建中, 2006), 为一狭长的控矿背斜, 面积约 120 km²。

区域上出露泥盆系至三叠系地层, 但以三叠系广泛分布为特征, 其次为二叠系, 在少数背斜核

部可见泥盆系和石炭系地层(陈发恩等, 2012, 2019)。以浅海陆棚局限台地相为沉积特色, 地层由老至新, 从泥盆系至中二叠统, 以碳酸盐岩为主, 夹细碎屑岩和硅质岩(齐少烽等, 2015; 靳晓野, 2017)。区内构造较发育, 主要发育有东西向、南北向和北东向三组褶皱断裂构造, 其中, 东西向的灰家堡背斜控制了整个金矿床的产出, 其次为东西向和南北向的断层(张瑜等, 2010; 刘建中, 2007, 2014)。本次研究范围主要是水银洞超大型金矿者相二矿段的龙潭组地层, 位于灰家堡背斜东段倾伏端, 区域上呈现出自北西向南东延伸的斜歪褶皱(图 1)。

2 矿区地质

2.1 地层特征

者相二金矿钻孔揭露的地层有第四系、嘉陵江组一段(T_1j^1)、夜郎组(T_1y)、大隆组(P_3d)、长兴组(P_3ch)、龙潭组(P_3l)、茅口组(P_2m), 钻孔平均揭露地层厚度约 950 m。本次研究对象层位为

[收稿日期] 2021-01-25 [修回日期] 2021-05-02

[基金项目] 者相二金矿大精查项目。

[作者简介] 邓亚梅(1990—), 女, 硕士, 工程师, 硕士研究生, 从事矿产地质勘查工作。Email: 673957748@qq.com。

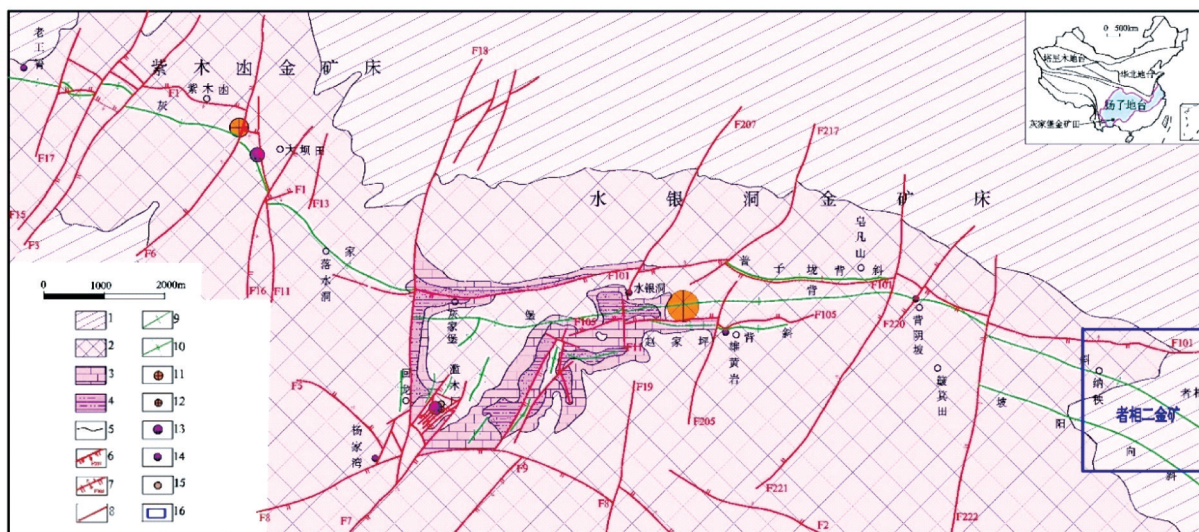


图1 灰家堡金矿田区域地质矿产图(据陈发恩 等,2019 修改)

Fig. 1 The regional geological map of Huijiabao gold deposit

1—嘉陵江组(T_{1j});2—夜郎组(T_{1y});3—长兴组至大隆组(P_{3ch+d});4—龙潭组(P_3l);5—地层界线;6—实测及推测正断层及编号;7—实测及推测逆断层及编号;8—性质不明断层;9—背斜轴;10—向斜轴;11—金矿床;12—金矿点;13—汞矿床;14—汞矿点;15—铊矿点;16—者相二金矿

龙潭组含矿层,通过对本研究区钻遇该层位的25个取心井进行分析,发现龙潭组岩性相对复杂,上部主要为深灰色、灰黑色细砂岩、粉砂岩、粘土质粉砂岩、粉砂质粘土岩夹煤线与深灰色生物碎屑灰岩、泥质灰岩组成不等厚互层,下部为深灰色、灰黑色、黑色粘土岩、粉砂岩夹深灰色生物碎屑灰岩透镜体。本次研究区域为者相二金矿龙潭组地层,是该矿床岩层矿(化)体主要赋矿层位,厚度为475.12~581.64 m。

2.2 构造特征

研究区是灰家堡背斜向东延伸及倾伏的地段,为水银洞金矿床东段。如图1所示,研究区内地层在早期首先受到南北向的应力挤压形成了东西向的构造,然后又受东西向的应力挤压形成了南北向的构造,后期东西向挤压对早期形成的构造进行复合叠加改造后,形成了北东向构造或使东西向构造发生了转向(陈发恩 等,2019;刘建中,2015,2016),区内主要以东西向褶皱断裂构造为主,次为南北向和北东向的褶皱断裂构造。其中,研究区主要发育了东西向 F_{101} 断层和近东西向展布的灰家堡背斜。

(1) 断裂

F_{101} :该断层走向 $110^{\circ}\sim 290^{\circ}$,倾角为 $55^{\circ}\sim 65^{\circ}$,为一倾向向北的逆冲断层,位于灰家堡背斜北翼近轴部,西端在者相附近延伸出研究区,具有

多期性,主要蚀变有褐铁矿化、黄铁矿化、方解石化、硅化,在地表控制了普子垄、皂凡山、背阴坡、猫坡金矿点的产出,在其深部存在隐伏金矿体(陈发恩 等,2019;刘建中,2017)。

(2) 褶皱

灰家堡背斜:是灰家堡主干构造在东段的延伸部分,是一个继承性发育的背斜构造,表现为一轴向近东西向的宽缓短轴背斜,被多条北东向断裂切割而复杂化。研究区轴向为北西西向,近地表与深部褶皱形态不一致,翼部岩层总体倾角 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间,深部局部地段倾角 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间,背斜核部向两翼800 m范围内控制了金矿体的产出。区域上紫木垭大型金矿床、大坝田中型汞矿床、滥木厂大型汞(铊)矿床、水银洞超大型金矿床及等一系列金矿(化)点、汞、铊矿(化)床(点)一同构成了灰家堡背斜Au、Hg成矿带(张贞翔等,2014;陈发恩 等,2019)。

纳秧背斜:位于研究区西北部,也表现为一轴向近东西向的宽缓短轴背斜,延伸较短,是从簸箕田2金矿延伸过来的,轴线长约0.2 km,在一定程度上控制了该区矿体的产出。

3 沉积特征

根据本次揭露龙潭组25个钻孔资料统计分析发现,龙潭组地层厚度总体上呈现自西向东、自

南向北逐渐增厚,碎屑粒度逐渐变细的趋势。根据岩性特征,划分为四个岩石相组合,分别是灰岩相、砂岩相、粉砂岩相、粘土岩相。根据岩性沉积旋回特征,采用标志层及辅助标志层控制地层的方法,将者相二金矿龙潭组地层自下而上划分为三段:龙潭组一段(P_3l^1)、龙潭组二段(P_3l^2)、龙潭组三段(P_3l^3)。

(1) 龙潭组一段(P_3l^1):

本段出露的零星透镜状小矿体受隐伏断裂的控制。厚度为190.42~303.63 m,岩性主要为深灰色、灰黑色粘土岩,局部夹少量深灰色粘土质粉砂岩、细砂岩和生物碎屑灰岩透镜体。粘土岩以块状层理和水平层理为主(于鑫等,2017),粘土质粉砂岩和细砂岩中可见双粘土层、刺穿和砂枕状构造,局部见小型交错层理、波状层理(杨仁超等,2017)。在粘土质粉砂岩中还可可见腕足、腹足、有孔虫、珊瑚类等生物碎屑(图2a、2b)。灰家堡背斜龙潭组一段沉积厚度在区域上分布极不均匀,在研究区的东北部较厚,在西南部和南部区域沉积厚度不足百米,甚至没有接受沉积,沉积厚度差600 m以上,出现这种显著的沉积地层厚度差异可能是由原始地形地貌差异导致的(杨成富等,2007,2020)。研究区该段以灰黑色粘土岩、含粉砂质粘土岩为特征,不含煤层,少见生物碎屑灰岩,黄铁矿多呈脉状、条带状和结核状产出,富含有机质。通过对岩石类型和沉积构造进行分析,认为本段形成于较低能沉积环境,为陆表海局限台地沉积区,属于潮坪相沉积潮间坪亚相的高潮坪微相低能环境。

(2) 龙潭组二段(P_3l^2):

该段为研究区层控碳酸盐型矿体的主要富集地层之一,厚度为117.62~204.87 m,主要为深灰色、灰黑色层粉砂质粘土岩、粘土质粉砂岩、粉砂岩、灰色钙质粉砂岩,夹6~13层厚度约为0.6~6.5 m的深灰色硅化含生物碎屑灰岩,以及夹2~5层厚度为0.5~1.22 m的碳质粘土岩夹煤线,底部为粘土质粉砂岩、粉砂岩(或细砂岩)作为该段与龙潭组一段的分层标志(夏勇,2004)。该段细碎屑岩中主要见到水平层理、波状层理、双粘土层、以及脉状和透镜状层理,局部还可见负载、砂枕状、砂球状构造和小型交错层理(张倚安等,2020),该段碎屑岩和含生物碎屑灰岩中均可见到珊瑚、三叶虫、菊石、腕足、双壳类等生物化石(图

2c~2h)。受热液蚀变作用的影响,该段的黄铁矿呈透镜状、浸染状和纹层状分布。通过对该段岩石类型和沉积构造进行分析,由于本段所含煤层厚度较薄,认为整体上属于一套浅水潮控三角洲平原亚相-沼泽微相向陆表海潮坪相-潮间坪亚相-混合坪微相过渡的中能沉积环境。

(3) 龙潭组三段(P_3l^3):

厚度为97.12~139.55 m,该段为研究区层控碳酸盐型矿体的次要赋矿段,主要岩性为灰色、深灰色粘土质粉砂岩、粉砂质粘土岩、粉砂岩、灰黑色粘土岩与8层灰色、深灰色生物碎屑灰岩呈不等厚韵律互层,上部生物屑灰岩中含深灰色燧石结核或燧石团块,局部夹2~3层厚度较薄的碳质粘土岩或煤线。底部为含生物碎屑灰岩夹少量深灰色粘土质粉砂岩(2.58~6.96 m),作为与龙潭组第二段分层标志。本段灰岩厚度均大于龙潭组二段,厚度较大的灰岩段存在以碎屑岩夹层为特征(如IVb、IVc矿层),是地层和矿体连接对比的重要标志(杨成富等,2020)。在本段细碎屑岩中,可见水平层理、波状层理,脉状层理,双粘土层、砂球、砂枕状构造以及小型交错层理等构造,整段见大量珊瑚、腕足、菊石、有孔虫等生物化石(图2i~2l)。由此可知该段整体为一套浅水潮控三角洲平原亚相-沼泽微相向陆表海局限台地沉积-潮坪相潮间坪亚相-混合坪微相过渡的中能沉积环境。

从以上岩性组合特征,刺穿、砂球、砂枕、负载构造以及波状、小型交错层理等现象,结合生物化石特征(图2),综合分析得出,者相二金矿龙潭组岩层是由河流碎屑物质供应,一开始属于三角洲前缘亚相的巨厚堆积体,且临近于陆表海局限台地沉积区,该三角洲沉积向海推进,受到潮汐作用的强烈破坏和改造,形成一定的坡度,并在潮控三角洲平原分流河道间出现潟湖和潮间坪沉积,由于事件因素的影响,在重力作用下发生滑塌,在龙潭组形成重力流沉积(廖纪佳,2013;裴羽等,2015;杨田等,2020;),整体上一套陆表海局限台地沉积区-潮控三角洲-重力流沉积体系。从龙潭组中碎屑岩和灰岩中存在的珊瑚、双壳、腕足、有孔虫、菊石等生物化石,可推断灰岩夹层应该是在重力流沉积发生时,碎屑岩所携带的部分浅海碳酸盐岩沉积形成。由于细碎屑岩中的灰岩夹层孔隙度较大且受构造作用易产生碎裂,有利于成矿流体运移并产生物理化学作用成矿,具有较好的容矿空间。因此,成为本区主要的赋矿岩层。

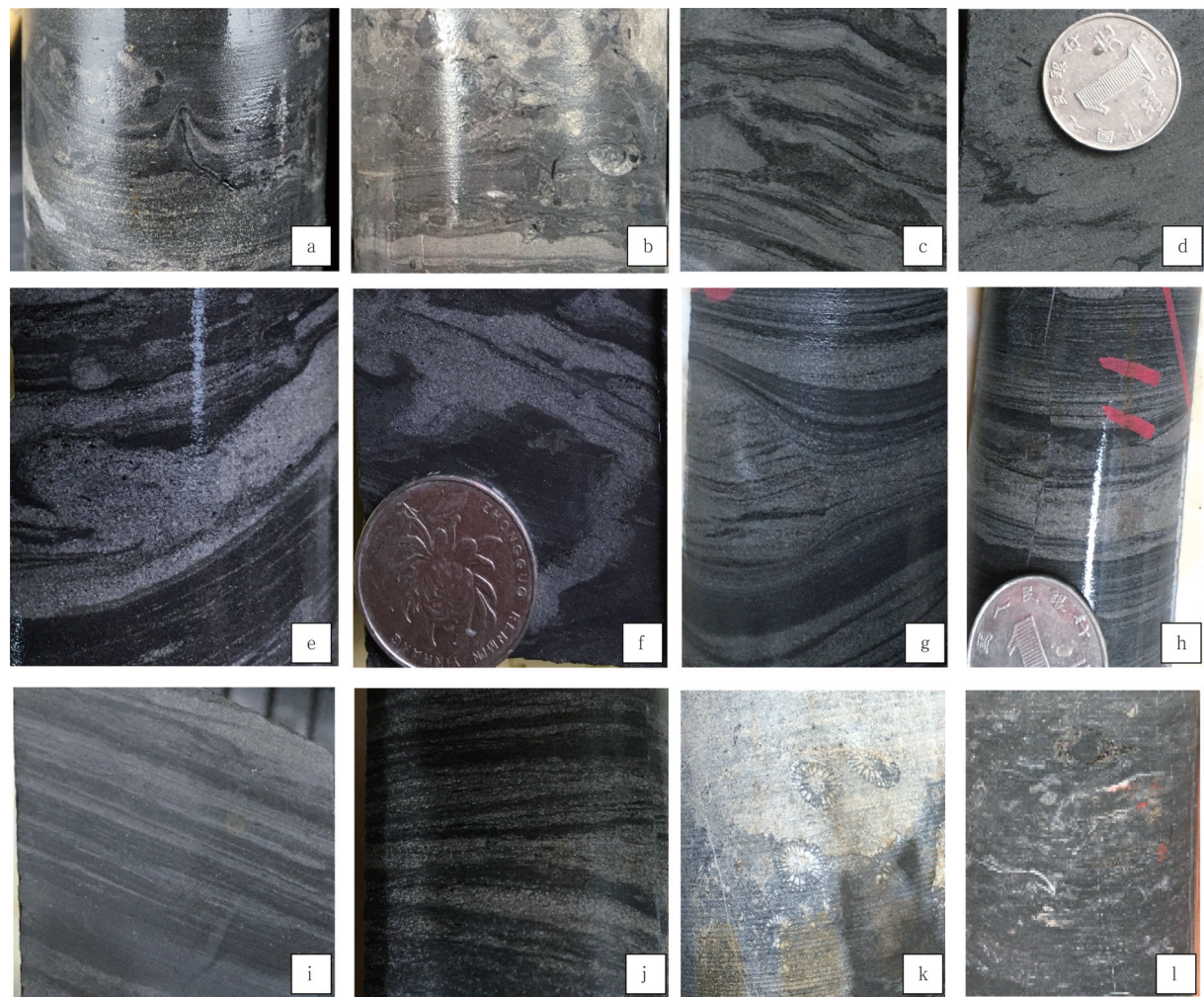


图2 者相二金矿龙潭组深水细粒重力流沉积特征

Fig. 2 Deep-water fine-grained gravity-flow deposits in the P3l Formation, Zhexiang2 gold deposit

a—ZK60908, 龙潭组一段, 粉砂岩相, 刺穿构造; b—ZK60908, 龙潭组一段, 粉砂岩相, 搅浑构造, 见腹足类生物化石, 底部具粉砂质条带; c—ZK60832, 龙潭组二段, 粉砂岩相, 见波状交错层理; d—ZK60832, 龙潭组二段, 块状层理粉砂岩相, 粘土岩撕裂屑; e—ZK60832, 龙潭组二段, 变形层理粘土岩相, 见砂岩透镜体, 砂球状构造; f—ZK60832, 龙潭组二段, 粉砂岩相, 泄水构造; g—ZK61240, 龙潭组二段, 透镜状层理细砂岩相, 顶部见小型交错层理; h—ZK61240, 龙潭组二段, 粘土岩相, 微断层, 见砂岩透镜体; i—ZK60832, 龙潭组三段, 粘土岩相, 双粘土层, 见水平层理; j—ZK61240, 龙潭组三段, 粘土岩相, 见小型交错层理; k—ZK60832, 龙潭组三段, 灰岩相, 见珊瑚类生物碎屑; l—ZK60832, 龙潭组三段, 深灰色粘土岩, 含粉砂质斑块和生物碎屑

4 金富集规律探讨

通过对研究区 25 个取心钻孔龙潭组地层岩心资料、样品分析化验数据以及 608 和 612 勘探线剖面图进行综合分析, 得出研究区金矿富集规律受该区岩性组合特征、断裂构造和层间滑动特征、热液蚀变所控制。

4.1 有利的岩性组合

研究区龙潭组的岩性主要有灰色、深灰色灰岩、生物碎屑灰岩, 灰色细砂岩, 灰色、深灰色粉砂

岩、粘土质粉砂岩, 深灰色、灰黑色粘土岩、粉砂质粘土岩。

研究区粘土岩多含碳屑, 砂岩粒度较细, 砂泥交互频繁, 含矿的灰岩多表现出岩性不纯, 含生物碎屑、方解石等充填物。矿层的含矿性受岩性和孔渗性的控制, 从表 1 可知, 灰岩中的金含量最大, 粘土岩中的金含量最少, 一般来说, 岩性颗粒越粗、粘土质含量越低, 其矿层的含金量越高。对于灰岩来说, 灰岩易于形成溶蚀孔洞, 晶间孔、粒间溶孔广泛存在, 或者当有生物碎屑充填的时候, 易于形成容矿空间, 加之灰岩上下有较厚的致密粘土质盖层, 当含矿流体途径此处时, 容易聚集成矿。

表 1 岩性、含矿性对比数据表

Table 1 The correlation data of lithology and ore-bearing property

孔 号	层 位	样 号	收获率(%)	岩 性	品位 Au(g/t)
ZK60832	P ₃ l	H5	98.0	含生物碎屑灰岩	11.5
	P ₃ l	H20	94.3	粘土岩	0.56
	P ₃ l	H35	94.8	粘土质粉砂岩	1.77
ZK61240	P ₃ l	H61	100	粘土质粉砂岩	1.13
	P ₃ l	H219	100	灰岩	7.70
	P ₃ l	H228	98.8	粘土岩	0.26
ZK60924	P ₃ l	H242	96.7	生物碎屑灰岩	9.58
	P ₃ l	H270	99.0	灰岩	2.88
	P ₃ l	H271	99.0	粘土质粉砂岩	0.23

4.2 热液蚀变作用

在岩心编录中发现,该层位主要蚀变有黄铁矿化、方解石化,硅化,另外还可见到雄雌黄化,并能见到银色辉锑矿,根据前人大量研究表明,主要蚀变是硅化、白云石化、黄铁矿化、毒砂化的都与金矿化密切相关。而其成矿的先决条件是硅化和白云石化,最终是否成矿以及其含矿特征(金含量的高低),主要取决于黄铁矿(热液期)化的强弱,热液蚀变强烈部位往往就是金富集部位(刘建中等,2017)。没有相应的热液蚀变就没有金矿化的产生,研究区热液蚀变较弱的灰岩段一般含矿性较差,甚至不能成矿。

4.3 构造控矿

研究区龙潭组地层整体上受 F₁₀₁断层的影响较小,而本区是灰家堡背斜向东延伸及倾伏的地

段,整体上控制了金矿体的产出,但该层位含矿性受该区隐伏断裂和层间滑动破碎关系更为密切。

通过对研究区勘探线剖面图钻孔横向进行对比,结合地形地质图,在长兴组(P₃ch)、龙潭组(P₃l)、茅口组(P₂m)之间存在隐伏断裂F₂₀(图3、图4),该断裂走向为北西向,倾向向北东,具逆断层性质,断距不大,北西向延伸相交于Fx断层之上,通过对该断层所钻遇的钻孔进行取样分析化验,发现经过该断层的大部分钻孔见矿效果较好(表2),并认为该断层是本区主要的含矿构造,是金富集的主要有利场所。

此外,本次钻孔取心,在长兴组(P₃ch)、大隆组(P₃d)、夜郎组(T₁y)之间发现了另一条隐伏断裂F_x(图3、图4),该断裂走向为北东向,倾向向北西,具逆断层性质,断距不大,北东向延伸相交于F₁₀₁断层之上,西南方向延伸至簸箕田2金矿龙潭组地层,通过对该断层所钻遇的钻孔进行取样分析

表 2 F₂₀断层所遇钻孔含矿性对比数据表

Table 2 The correlation data of ore-bearing potential over drill encountered by fault which named F₂₀

孔 号	层 位	样 号	收获率(%)	岩 性	品位 Au(g/t)
ZK61240	P ₃ l ³	H67	100.0	粉砂质粘土岩	4.69
	P ₃ l ³	H68	100.0	粉砂质粘土岩	4.27
	P ₃ l ³	H69	100.0	灰岩	2.85
ZK60832	P ₃ l ²	H5	98.0	灰岩	11.5
	P ₃ l ²	H6	98.0	灰岩	7.46
	P ₃ l ²	H7	98.0	灰岩	2.78
ZK60024	P ₃ l ²	H139	100.0	灰岩	3.12
	P ₃ l ²	H144	99.1	粘土岩	4.96
	P ₃ l ²	H145	98.8	灰岩	4.81
	P ₃ l ²	H146	96.4	灰岩	3.78
	P ₃ l ²	H147	96.4	灰岩	14.20
	P ₃ l ²	H148	98.8	灰岩	1.35
	P ₃ l ³	H254	98.7	角砾岩	0.98
ZK60908	P ₃ l ³	H255	98.8	粘土岩	2.04
	P ₃ l ³	H256	98.9	粘土岩	3.30
	P ₃ l ³	H257	99.0	角砾岩	1.97
	P ₃ l ¹	H258	99.0	角砾岩	6.72
	P ₃ l ¹	H259	99.2	角砾岩	5.47
	P ₃ l ¹	H260	99.2	钙质粘土岩	1.04

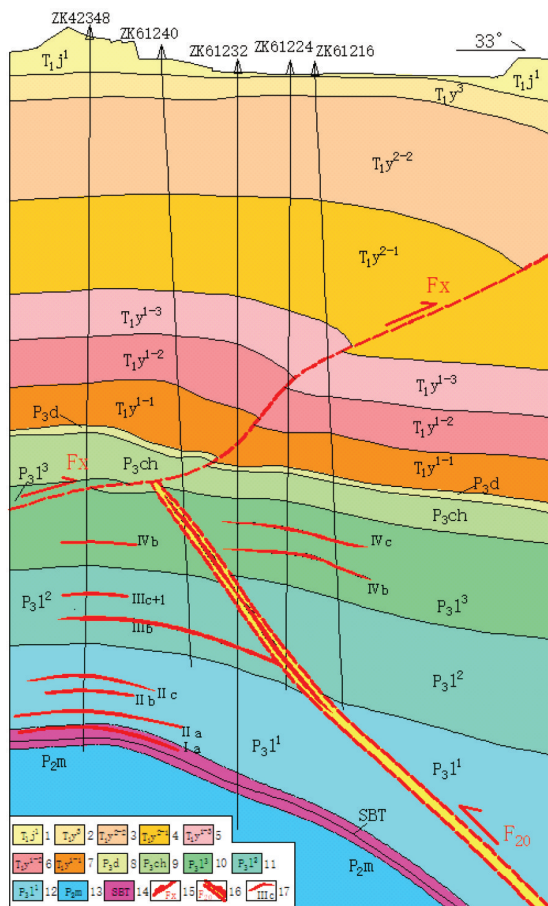


图3 者相二金矿612勘探线剖面图

Fig. 3 NO. 612 Profile of exploration line in Zhexiang2 gold deposit
1—嘉陵江组第一段;2—夜郎组第三段;3—夜郎组第二段第二亚段;4—夜郎组第二段第一亚段;5—夜郎组第一段第三亚段;6—夜郎组第一段第二亚段;7—夜郎组第一段第一亚段;8—大隆组;9—长兴组;10—龙潭组第三段;11—龙潭组第二段;12—龙潭组第一段;13—茅口组;14—构造蚀变体;15—断层及编号;16—断层破碎带及编号;17—金矿体及编号

化验,发现其含金量均低于边界品位(表3),由此可推断该断层不利于含矿流体的保存,当含矿流体侧向运移途径此处时,由于断层具有良好通道,将含矿流体向上运输至夜郎组,因无良好的盖层遮挡,使含矿流体流失,认为该断层途经的部位不利于金富集。

龙潭组三段(P_3l^3)的IVc~IVb含矿层、龙潭组二段(P_3l^2)IIIc~IIIb含矿层在同一层位出现滑动擦痕,滑动镜面,岩心破碎,产状较陡,具碎裂化和角砾化特征的断裂性质,该段岩性为灰色生物碎屑灰岩、深灰色粉砂质粘土岩、粘土质粉砂岩。龙潭组一段(P_3l^1)中上部和下部分别零星出现角砾岩、具碎裂化特征的断裂性质,并可见石英细脉,该段含矿岩性多为灰黑色钙质粘土岩、粘土岩夹深灰色灰岩团块。通过对以上层间滑动段进行取

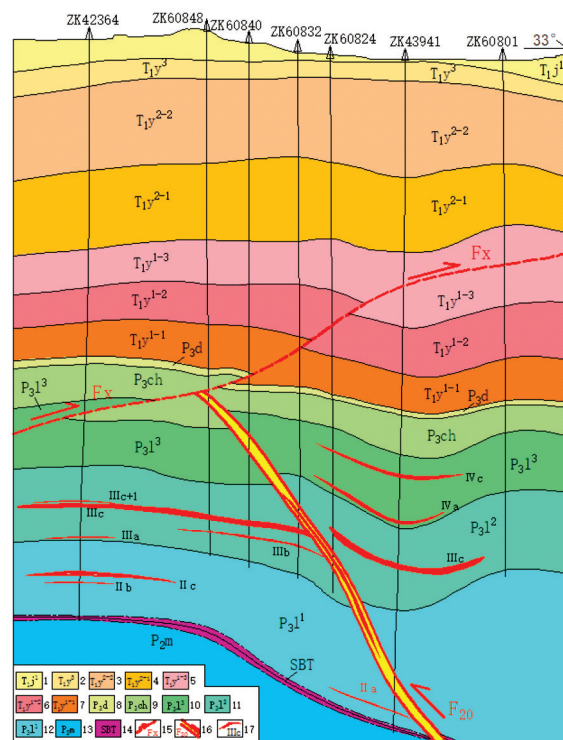


图4 者相二金矿608勘探线剖面图

Fig. 4 NO. 608 Profile of exploration line in Zhexiang2 gold deposit
1—嘉陵江组第一段;2—夜郎组第三段;3—夜郎组第二段第二亚段;4—夜郎组第二段第一亚段;5—夜郎组第一段第三亚段;6—夜郎组第一段第二亚段;7—夜郎组第一段第一亚段;8—大隆组;9—长兴组;10—龙潭组第三段;11—龙潭组第二段;12—龙潭组第一段;13—茅口组;14—构造蚀变体;15—断层及编号;16—断层破碎带及编号;17—金矿体及编号

样分析化验,灰岩和粉砂质粘土岩、粘土质粉砂岩和钙质粘土岩,均有不同程度的见矿(图4),为含金流体次要富集部位。其中生物碎屑灰岩的含矿性明显好于其余岩性,且并不是在该范围内的所有灰岩都见矿,这可能与岩石本身当时的孔渗性和热液热变作用有关。

总之,除了透镜状矿体之外,本区主要为隐伏断裂和层间隐伏断裂控矿,是含金流体聚集的有利场所,应在今后生产勘探和外围勘查工作中加强研究并提高重视。

5 结论

(1)从取心钻孔岩性组合特征,刺穿、砂球、砂枕、负载构造以及波状、小型交错层理等沉积构造以及出现的珊瑚、双壳、腕足、有孔虫、菊石等生物化石现象,分析得出研究区曾受事件沉积因素影响,在重力作用下发生滑塌,形成重力流沉积,整体上为一套陆表海局限台地沉积区—潮控三角洲—

表 3 Fx 断层所遇钻孔含矿性对比数据表

Table 3 The correlation data of ore-bearing potential over drill encountered by fault which named Fx

孔 号	层 位	样 号	收获率(%)	岩 性	品位 Au(g/t)
ZK60801	T ₁ y ¹⁻³	H144	100.0	泥质灰岩	0.06
	T ₁ y ¹⁻³	H145	100.0	角砾岩	0.11
	T ₁ y ¹⁻³	H146	100.0	角砾岩	0.04
ZK60832	T ₁ y ¹⁻¹	H75	99.3	角砾岩	0.03
	T ₁ y ¹⁻¹	H30	100.0	角砾状灰岩	0.01
ZK60848	P ₃ ch	H31	98.8	角砾状灰岩	0.04
	P ₃ ch	H32	100.0	角砾状灰岩	0.05
	P ₃ ch	H33	100.0	角砾状灰岩	0.04
	P ₃ ch	H34	97.7	角砾状灰岩	0.04
	P ₃ ch	H35	97.7	角砾状灰岩	0.07
	P ₃ l ³	H42	100.0	角砾状灰岩	<0.05
ZK42364	P ₃ l ³	H43	100.0	角砾状灰岩	<0.05
	P ₃ l ³	H44	100.0	角砾状灰岩	<0.05

重力流沉积体系。碎屑岩发生重力流沉积时所携带的部分灰岩夹层,由于孔隙度较大且受构造作用易产生碎裂,有利于成矿流体运移并产生物理化学作用成矿,具有较好的容矿空间,成为含矿流体有利的富集场所。

(2)对绘制的剖面图进行横向对比研究,分析认为,在长兴组(P₃ch)、大隆组(P₃d)、夜郎组(T₁y)之间存在一条隐伏断裂Fx,走向为北东向,倾向向北西的逆断层,北东向延伸相交于F₁₀₁断层之上,西南向延伸至簸箕田2金矿龙潭组地层。在长兴组(P₃ch)、龙潭组(P₃l)、茅口组(P₂m)之间存在隐伏断裂F₂₀,该断裂走向为北西向,倾向向北东,具逆断层性质,北西向延伸相交于Fx断层之上,在龙潭组一段(P₃l¹)、龙潭组二段(P₃l²)、龙潭组三段(P₃l³)均出现了不同程度的层间滑动。

(3)通过对取心孔进行分析化验,结合剖面图和地形地质图,综合分析得出,北东向的隐伏逆断层Fx途经的部位并不是含金流体有利的聚集场所;F₂₀逆断层有利于金的富集,其所经部位矿体品位较高;龙潭组一段(P₃l¹)、龙潭组二段(P₃l²)Ⅲc~Ⅲb含矿层、龙潭组三段(P₃l³)Ⅳc~Ⅳb含矿层之间具滑动擦痕、滑动镜面、碎裂化和角砾化等特征,含矿层中的生物碎屑灰岩和粉砂质粘土岩、粘土质粉砂岩和钙质粘土岩,均有不同程度的见矿,是金富集的有利场所。

[参考文献]

陈发恩,张贞翔,刘建中,等. 2012. 贵州省贞丰县皂矾山金矿地质特征及找矿远景[J]. 贵州地质, 29(4): 259-265.

陈发恩,刘建中,杨成富,等. 2019. 贵州省贞丰县水银洞超大型金矿床地质特征及构造控矿分析[J]. 贵州地质, 36(1): 18-27.

陈发恩,刘建中,王泽鹏,等. 2020. 贵州西南部灰家堡金矿田勘查研究进展与深部找矿预测[J]. 贵州地质, 37(2): 115-123.

郭振春,周忠赋. 2006. 黔西南灰家堡背斜金矿勘查实践及“两层楼”模式的建立[J]. 贵州地质, (3): 176-181+186.

靳晓野. 2017. 黔西南泥堡、水银洞和丫他金矿床的成矿作用特征与矿床成因研究[D]. 武汉: 中国地质大学.

刘建中,邓一明,等. 2006. 贵州省贞丰县水银洞层控特大型金矿成矿条件和成矿模式[J]. 中国地质, 33(1): 169-177.

刘建中,夏勇,邓一明,等. 2007. 贵州水银洞超大型金矿床金的赋存状态再研究[J]. 贵州地质, 24(3): 165-169.

刘建中,夏勇,等. 2014. 贵州西南部 SBT 与金锦矿成矿找矿[J]. 贵州地质, 31(4): 267-234.

刘建中,王泽鹏,王大福,等. 2015. 贵州贞丰金多金属成矿区成矿背景研究及找矿方法试验[R]. 16.

刘建中,王泽鹏,李俊海,等. 2016. 贵州西南部 SBT 与金矿成矿动力学及成矿模式找矿模型[J]. 地质论评, 62(S): 117-118.

刘建中,杨成富,王泽鹏,等. 2017. 贵州省贞丰县水银洞金矿床地质研究[J]. 中国地质调查, 4(2)02: 32-41.

刘建中,李建威,周宗桂,等. 2017. 贵州贞丰-普安金矿整装勘查区找矿与研究新进展[J]. 贵州地质, 133(4): 244-254.

廖纪佳,朱筱敏,邓秀芹,等. 2013. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式[J]. 地学前缘,20(2):29-39.

裴羽,何幼斌,李华,等. 2015. 高密度浊流和砂质碎屑流关系的探讨[J]. 地质论评,61(6):1281-1292.

齐少烽,陈发恩,冯琳,等. 2015. 贵州省水银洞金矿地质特征及成因浅析[J]. 中国地质调查,2(6):53-58.

夏勇,苏文超,等. 2004. 黔西南水银洞层控卡林型金矿床成矿机理初探[J]. 矿物岩石地气化学通报,25(增刊):127-129.

于鑫,杨江海,刘建中,等. 2017. 黔西南晚二叠世龙潭组物源分析及区域沉积古地理重建[J]. 地质学报,91(6):1374-1385.

杨成富,刘建中. 2007. 贵州灰家堡背斜构造蚀变体岩石地球化学特征[J]. 贵州地质,34(1):18-25.

杨成富,刘建中,顾雪祥,等. 2020. 黔西南水银洞超大型金矿龙潭组赋矿层岩相特征及对金成矿的控制[J]. 地质通报,39(8):1221-1232.

杨仁超,尹伟,樊爱萍,等. 2017. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组湖相重力流沉积细粒岩及其油气地质意义[J]. 古地理学报,19(5):791-806.

杨田,操应长,田景春. 2020. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识[J]. 沉积学报,1-29.

张瑜,夏勇,王泽鹏,等. 2010. 贵州簸箕田金矿单矿物稀土元素和同位素地球化学特征[J]. 地学前缘,17(2):385-395.

张倚安,李士祥,田景春,等. 2020. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长7段深水重力流沉积类型[J]. 沉积学报,9(5):1-20.

张贞翔,陈发恩,刘艳,等. 2014. 贵州省贞丰县雄黄岩金矿床地质特征及找矿方向[J]. 贵州地质,31(3):182-189.

Research on the Sedimentary Characteristics and the Rule of Gold
Enrichment of P₃l Formation in Zhexiang NO. 2 Gold
Deposit in Southwest Guizhou

DENG Ya-mei, HE Jin-ping, LI Ying-hui, XU Liang-yi, HE Yan-nan,
HUANG Lu-lu, YE Lian, LI Deng-ming

(105 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology Mineral Resources Exploration
and Development, Guiyang 550018, Guizhou, China)

[Abstract] The study of sedimentary environment, lithologic combination, concealed fault structure and metallogenic characteristics of P₃l Formation are conducted, which based on the analysis data of core and sample, etc. The results show that The P₃l Formation is presented as the composition of restricted platform, tidal delta and gravity flow deep-water turbidite fan deposits. There are two hidden faults(reverse fault) in the area, which named F₂₀ and F_x, including NW striking(inclines to NE) and NE striking(inclines to NW). In addition, The Interlaminar sliding emerged as the sporadically concealed faults among the P₃l¹ Formation, appeared between IIIc and IIIb in P₃l², between IVc and IVb in P₃l³, the ore bearing stratum which featured of sliding scratches, sliding mirrors, fragmentation and brecciation. Bioclastic limestone, Silty mudstone, argillaceous siltstone and calcareous mudstone all have different degrees of ore finding among the stratum in the study area. In other word, it was a favorable place for gold enrichment, which provides a basis for prospecting direction in the later period.

[Key Words] Sedimentary characteristics; Lithologic combination; Ore-controlling structure analysis; Rule of gold enrichment; Zhexiang NO. 2 gold deposit; Southwest Guizhou

充电法和高密度电法在贵州贞丰者相二金矿岩溶勘查中的应用

羊 文¹,张西君^{2,3,4},冯 娟¹,陈 丞¹,杨 磊¹

(1. 贵州省地质矿产勘查开发局 105 地质大队,贵州 贵阳 550000;2. 自然资源部基岩区矿产
资源勘查工程技术创新中心,贵州 贵阳 550081;3. 贵州省地质物探开发应用工程技术
研究中心,贵州 贵阳 550081;4. 贵州省地质调查院,贵州 贵阳 550081)

[摘 要]在岩溶矿区钻探过程中,由于揭露、钻遇岩溶发育地层会使冲洗液在岩溶地层中流通,引起井漏、涌水等各种事故,同时揭露和沟通不同含水层,会造成初始岩溶含水系统的破坏。以贞丰县者相二金矿区为例,为避免钻孔施工对矿区内饮用水源龙井(S24)的影响,需查清其径流带在矿区的分布情况,本文针对矿区内龙井(S24)岩溶暗河出口,首先利用水文地质调查手段,初步判决岩溶发育程度、覆盖层厚度及结构,然后采用充电法和高密度电法组合进行深部探测研究,再将物探反演结果与水文、地质等资料进行综合对比分析、解释,揭示矿区内龙井(S24)岩溶暗河的空间形态、规模,指导钻探施工,后经钻探工程验证,未对龙井水(S24)造成影响,有效降低矿区勘探对浅部岩溶水系统的影响,实现了矿区从水文地质、物探勘查到钻探施工各个环节的绿色勘查。

[关键词]岩溶勘查;岩溶暗河;充电法;高密度电法

[中图分类号]P618.51;P631.3 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2021)02-0192-09

1 引言

绿色勘查是指在地质找矿过程中,以绿色发展理念为指导,通过运用先进的勘查手段、方法、设备、工艺和科学管理,最大限度的减少对生态环境的负面影响,实施地质勘查全过程环境影响最小化控制,实现找矿和环保双赢的一直勘查模式(贵州省自然资源厅,2019)。

岩溶作为一种典型的不良地质体,空间发育的不均匀性、不规则性以及覆盖层性质的不确定性,对地质和勘探都是一种挑战,是当今世界性的难题(陈清礼等,2005)。目前,岩溶调查一般采用岩溶地质和水文地质调查,采用高密度电法、瞬变电磁法、浅层地震、可控源音频大地电磁测深等多方法组合探测和钻探(郑智杰等,2017)。本文

以贞丰县者相二金矿勘探区为例,针对研究区内龙井(S24)暗河出口,通过水文地质调查,初步判决岩溶发育程度、覆盖层厚度及结构,采用充电法和高密度电法组合进行探测研究,将反演结果与地质资料相结合进行对比解释,揭示龙井(S24)岩溶暗河的空间形态、规模,并指导钻探施工,有效降低了研究区勘探对浅部岩溶水系统的影响,确保矿区绿色勘查。

2 研究区水文地质及地球物理条件

2.1 岩溶水文地质特征

研究区位于贵州省贞丰县者相镇,属滇黔桂“金三角”中部地区,位于扬子准地台黔北台隆,

[收稿日期]2021-02-06 **[修回日期]**2021-04-22

[基金项目]贵州省重点资源勘查“大精查”项目-贵州省贞丰县者相二金矿勘探资助。

[作者简介]羊文(1986—),男,高级工程师,硕士,主要从事矿区水、工、环地质工作。Email:307099942@qq.com。

[通讯作者]张西君(1987—),男,高级工程师,硕士,主要从事重、磁、电等地球物理方法应用与研究。Email:zhxj_gzddy@163.com。

六盘水断陷,普安北东向旋钮构造变形区,为中国“卡林型”金矿集中产出区域(刘远辉,2015;刘建中等,2010,2014;杨成富,刘建中,2017)。研究区出露地层自上而下主要为:第四系(Q)浮土和砾石层,为残坡积物等,富水性弱,透水性较强,厚度约1~3 m;三叠统嘉陵江组(T_{1j})灰岩、白云岩等,岩溶极为发育,地下水丰富但极不均匀(王明章,2012);下三叠统夜郎组三段(T_{1y}^3)泥灰岩、粘土岩、灰岩等,为相对隔水层,岩溶发育可能性小。

该区中部发育龙井(S24)暗河出口,出口标

高为1 552 m,发育于嘉陵江组一段(T_{1j}^1)灰岩中,枯水期流量为15.5 l/s,平水期流量为43.8~62.5 l/s,丰水期流量可达950 l/s,为相邻村镇居民生活饮用及农田灌溉主要取水点。根据水文地质调查结果,该点上游西北侧发育一落水洞(LS07),洞口标高1 157 m,地表水汇入流量为5 l/s,上游北部发育两个暗河天窗,可大致推测其暗河管道分布范围(图1)。上游设计施工两个钻孔,为确保施工钻孔ZK60001、ZK60908避开岩溶管道,采用充电法及高密度电法探测岩溶管道空间分布。

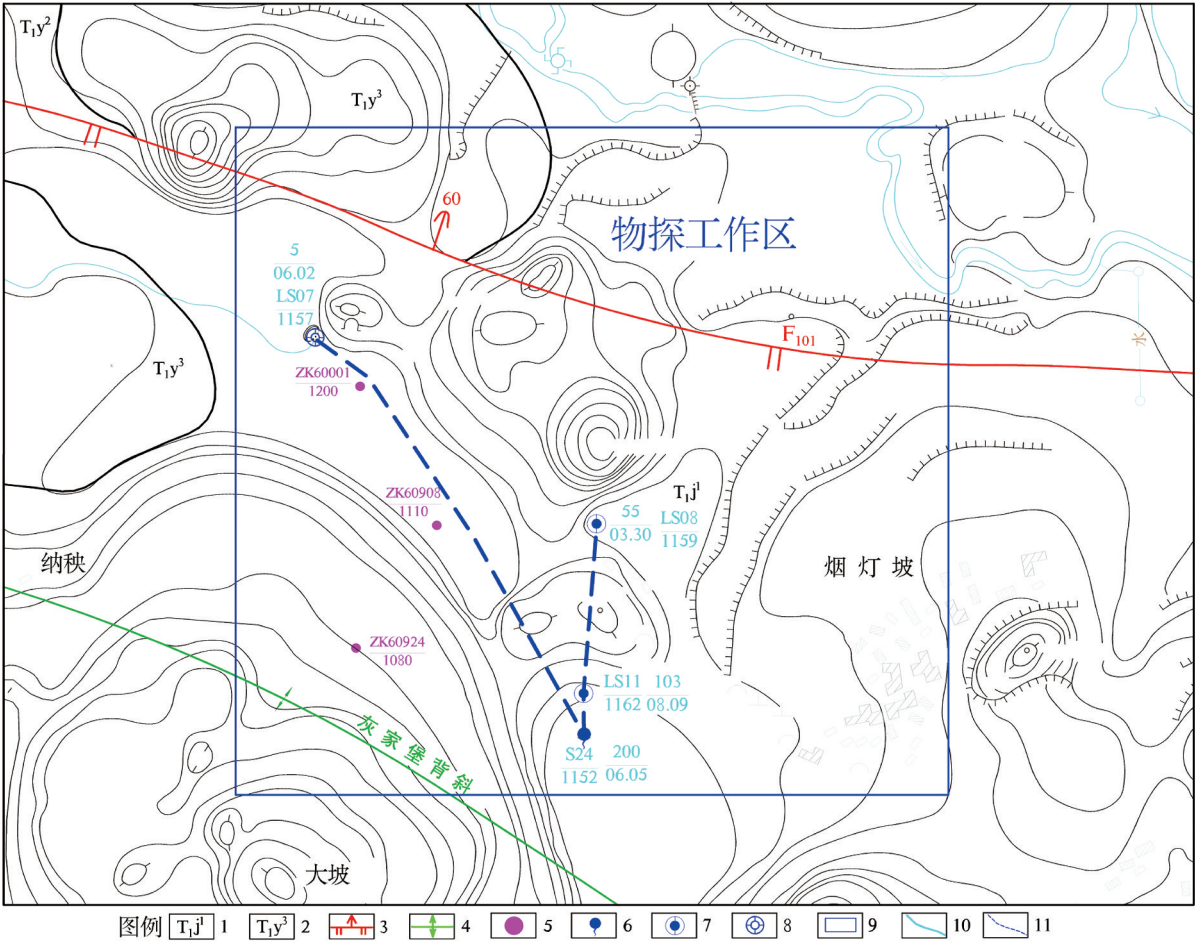


图1 研究区水文地质简图

Fig. 1 Hydrogeological map in the studying area

1—三叠系嘉陵江组一段;2—三叠系夜郎组三段;3—断层;4—背斜;5—设计钻孔;6—S24 出水口;7—暗河天窗;8—有水落水洞;9—物探工作区;10—地表水系;11—推测岩溶暗河管道

2.2 地球物理条件

岩矿石的电性差异是电法勘探的前提条件,也是成果解释的基础,电性差异大小直接影响方法的选取及勘探精度。根据研究区水文地质情况,对出露的岩矿石进行对称小四极实地测量,其

电性参数采测结果见表1。

由表1可知,研究区出露的岩矿石电阻率按灰岩→泥灰岩→粘土→覆土→水排序梯次降低,灰岩电阻率值最高,可达3 975.25 Ω·m,粘土电阻率值最低,约57.36 Ω·m。结合本次工作目的,目标体为物探剖面上可能存在的溶洞、岩溶-

裂隙以及水体等,根据物性特征及以往工作经验,岩石因构造活动破碎且不同程度含水相对围岩表现为低电阻率特征,岩体因溶蚀形成溶洞、裂隙,破坏了岩体完整性,因含空气相对围岩表现为极高电阻率特征,若溶洞、裂隙含水相对围岩表现为低电阻率特征,当溶洞、裂隙充水时电阻率将进一

步降低(张西君等,2013,2015;黄启霖等,2020)。水体相对围岩为良导体,地下水流经管道可视为等势体,在充电法电位梯度曲线上表现为0值点特征。由上可知,测区内各组岩矿石电性差异明显,本区具备开展物探电法工作的物性前提。

表 1 研究区电阻率参数表

Table 1 Parameters of electrical resistivity in the studying area

地层名称	地层代号	岩 性	视电阻率 $\rho(\Omega \cdot m)$	
			变化范围	平均值
第四系	Q	粘土	17.5 ~ 126.2	57.36
三叠系嘉陵江组	T _{1j}	灰岩	788.82 ~ 12 993.3	3 929.75
三叠系夜郎组	T _{1y}	粘土岩	37.8 ~ 174.2	81.42
三叠系夜郎组	T _{1y}	灰岩	603.9 ~ 6 305.86	2 248.31
三叠系夜郎组	T _{1y}	泥灰岩	369.3 ~ 982.2	698.75
		水	9.2 ~ 27.3	16.63

3 工作方法技术

3.1 工作原理

3.1.1 充电法工作原理

充电法是以不同岩性的电性差异为基础,在钻井、槽探、坑道、出水点等人工揭露的或天然露头上接一供电电极(A),另一供电电极“无穷远极”B置于远离充电体的地方(确保供电AB极距大于良导体埋深20倍),然后向供电线路里供电,这时充电体为一等位体或似等位体,电流由充电体流入围岩,形成稳定电流场,该电场的分布特征与充电体的形态、大小和产状等因素有关,利用专业设备在地面、坑道或钻井中沿垂直充电体走向的测线观测充电电场,通过研究其分布特征,从而解决诸如矿体的规模大小、赋存状态、连接关系以及地下水流速、流向、渗漏通道、滑坡位移等地质问题(李黔西,2003)。

本次充电法工作供电电极A位于龙井S24出水口,“无穷远极”B位于研究区东北角,AB极距860 m,大于研究区岩溶管道水埋深20倍以上,观测方式为梯度测量,MN电极位置采用网络RTK定位,设备采用重庆地质仪器厂生产的DZD-8多功能全波形直流电法仪。

3.1.2 高密度电法工作原理

高密度电法属于电法勘查中的电阻率法,基于常规电阻率法勘探原理并利用多路转换器的供

电、测量电极的自动转换,配合常规电阻率的测量方法及电阻率成像(CT)等高新技术来进行高分辩、高效率电法勘探。它是通过程控式多路电极转换器选择不同的电极组合方式和不同的极距间隔,用供电电极(A、B)向地下供直流(或超低频)电流,同时在测量电极(M、N)间观测电势差(ΔU_{MN}),并计算出视电阻率值(ρ_s),各电极同时或不同时沿选定的测线按规定的电距间隔移动(胡勘等,2002;汤良明等,2006;敖怀欢等,2016)。测量前预先铺设好高密度电缆,打好全部电极并连接,经接地电阻测试,启动采集控制程序,仪器自动切换电极,自动记录,快速完成野外数据的采集。

本次高密度电法工作装置为温纳装置,该装置具有抗干扰强、测深分辨率高特点,工作电极距5 m(加密段为1 m),电极位置采用网络RTK定位,采测设备为重庆地质仪器厂生产的DZD-8多功能全波形直流电法仪。

3.2 工作方法及布置

根据龙井(S24)暗河出口的岩溶特征及地面水文地质调查成果,初步判断其岩溶管道大致走向,首先应用充电法,从S24井口由近到远追索岩溶管道在研究区的分布和流向,为了进一步确定岩溶管道的空间分布范围、规模、大小,并针对拟施工可能造成影响的两个钻孔ZK60001、ZK60908孔位的选定问题,再用高密度电法精确确定其位置及地下展布形态,两者结果相互验证(陈松等,

2017),指导拟施工钻孔有效避开岩溶管道,确保勘探过程不对龙井(S24)泉点造成影响。

测线布置为:充电法以龙井暗河出口(S24)为起点,在其北侧垂直水源方向布设6条充电法剖面,其中C0线150 m、C1线200 m、C2线400 m、C3线500 m、609线300 m、600线400 m,采用电位梯度测量方式,点距5 m。针对LS07的0值点,在钻孔位置布置两条加密短剖面,点距

1 m;高密度电法测线布置为勘探线600、609上分别以钻孔ZK60001、ZK60908为中心垂直岩溶管道走向布置高密度电法剖面,600勘探线上布置500 m剖面,609勘探线上布置600 m剖面,600线与604线之间布置300 m剖面(G1测线),点距均5 m。为进一步圈定异常,对600、609两条剖面上的异常进行复核,加密段各120 m,点距1 m(图2)。

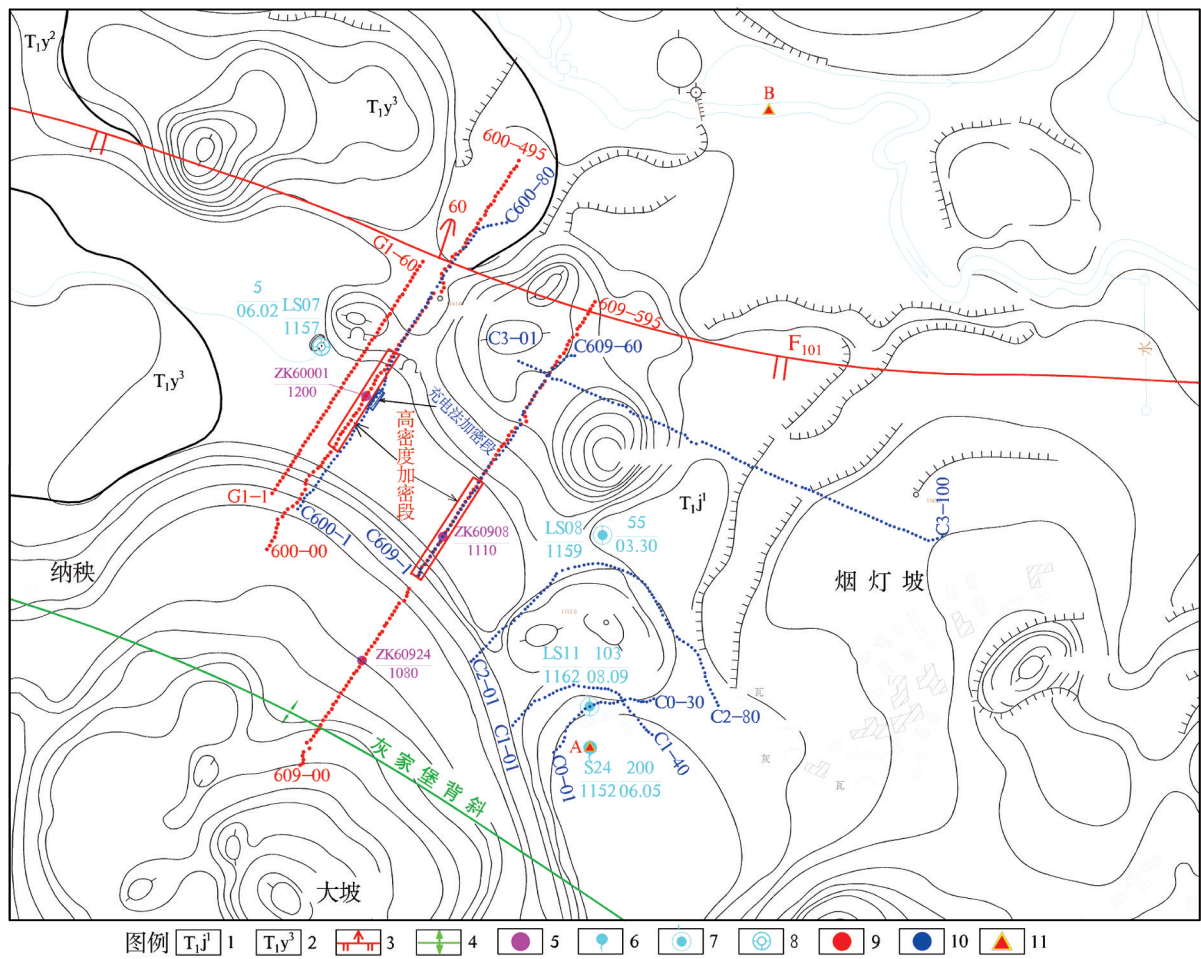


图2 充电法、高密度电法测线分布图

Fig. 2 Line distribution of Mise-a-la-masse method and High-density electrical method

1—三叠系嘉陵江组一段;2—三叠系夜郎组三段;3—断层;4—背斜;5—设计钻孔;6—S24出水口;7—暗河天窗;8—有水落水洞;9—高密度电法测点;10—充电法测点;11—AB源

4 资料分析及解释

4.1 充电法成果分析

根据充电法充电场分布规律特征,与充电点水体相连通的位置电位梯度值为0值点,即可通过寻找电位梯度0值点来推测地下水径流分布情

况。将充电法剖面采集数据绘制电位梯度曲线图(图3),从图3中可看出每条剖面均出现0值(图中红三角处),即说明龙井(S24)暗河出口水源流经每条测线,8条剖面共圈出33个0值点。从各测线电位梯度0值平面分布而言,泉点主要由北面、西北面水源流经汇聚而成,结合地面现场调查,初步推断主径流带5条,见图7。

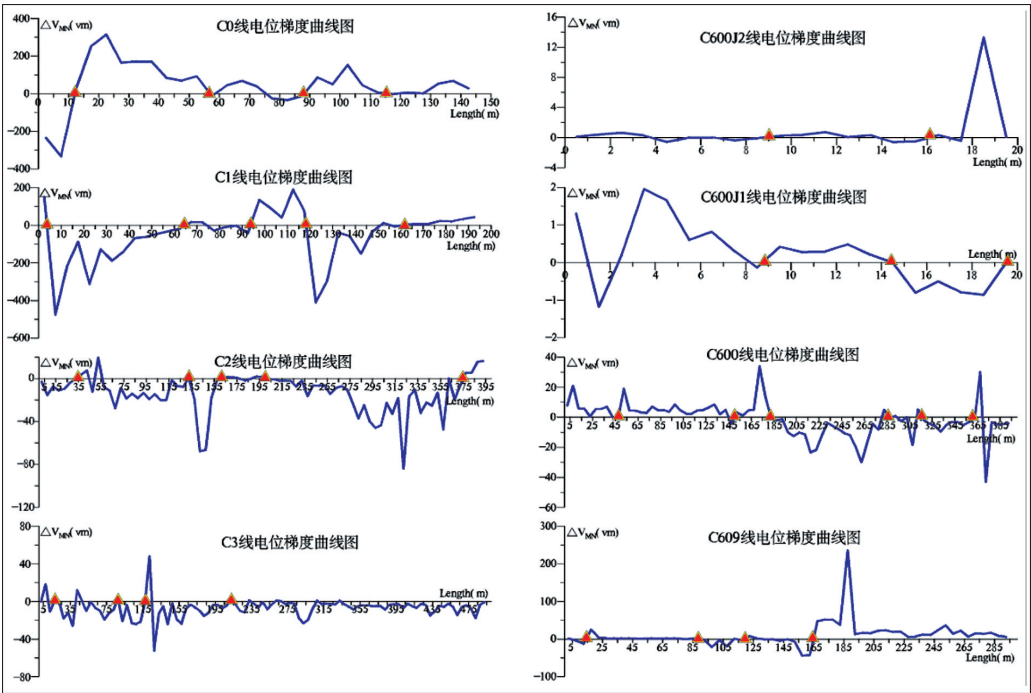


图 3 充电法电位梯度曲线图

Fig. 3 Potential gradient curve of Misa-la-masse method

4.2 高密度电法成果分析

根据充电法成果,研究区刚好有两条岩溶管道经过钻孔 ZK60001、ZK60908 附近,为进一步查清岩溶管道具体位置及埋深,判断钻孔是否处于岩溶管

道上,于是针对两个钻孔布置 3 条高密度电法剖面,通过对三条高密度电法实测原始数据进行处理、反演解算,得到三条剖面电阻率断面综合推断解释图(图 4—图 6),上图为电阻率断面图,中图为加密段的电阻率断面图,下图为地质推断解释图。

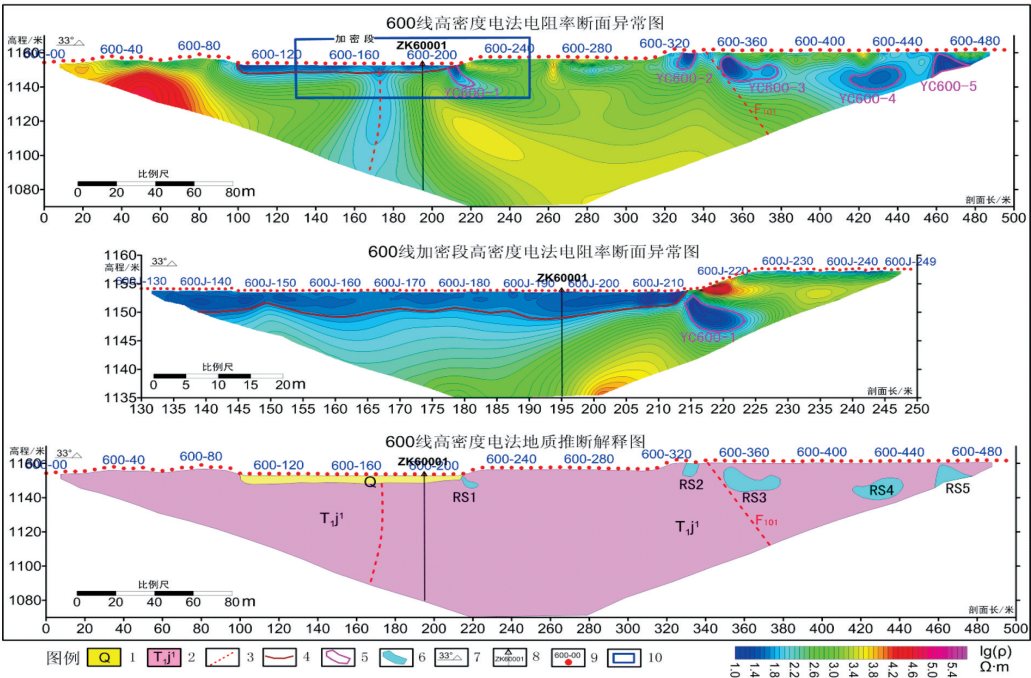


图 4 600 线高密度电法综合推断解释图

Fig. 4 Comprehensive prediction and explanation in line 600 by High-density electrical method

1—第四系;2—嘉陵江组一段;3—物探推测断裂;4—电性层分界线;5—低阻异常;6—推测岩溶;7—剖面方位;8—钻孔编号;9—物探测点编号;10—电阻率加密段观测区

图4为600线电阻率异常综合推断解释图,由图可见:整个断面总体表现为高电阻率异常特征,在浅部局部地区表现为低电阻率异常特征,低阻异常区深度0~5 m不等,根据地质、物性等资料,高电阻率异常区为三叠系嘉陵江组碳酸盐岩层,浅部低阻异常区为第四系覆土地层,浅表局部高阻异常推测为地表裸露的碎石、乱石岗引起。其中在100~215号测点之间为第四系主要覆盖区,研究区为古溶蚀沟槽区;在165~185号测点间断面,存在陡倾斜低阻异常带,推测为陡倾斜的断裂引起;在340号测点下方存在向东北倾的密集梯度带,推测为断裂引起,与地质断裂F101对应;在215、310、360、430、465号测点下方,存在封闭、半封闭的低阻异常(编号YC600-1~YC600-5)。YC600-3、YC600-4、YC600-5之间存在相连趋

势,推测各低阻异常为岩溶-裂隙或溶洞(编号RS1~RS5)引起,其中溶蚀区RS3、RS4、RS5之间可能存在岩溶-管道、裂隙,结合充电法成果,该区域存在0值点,故推测其相互间可能处于连通状态。

图5为609线电阻率异常综合推断解释图,由图可见:整个断面总体表现为高电阻率异常特征,在浅部局部地区表现为低电阻率异常特征,低阻异常区深度0~5 m不等。其中在275~340号测点之间为第四系主要覆盖区,该区为古溶蚀沟槽区。265、345号测点下方,存在封闭、半封闭的低阻异常(编号YC609-1~YC609-2),推测为岩溶-裂隙、溶洞(溶蚀区)(编号RS1、RS2)引起。420号测点下方存在向南西倾的地阻异常带,推测为岩溶-裂隙引起。

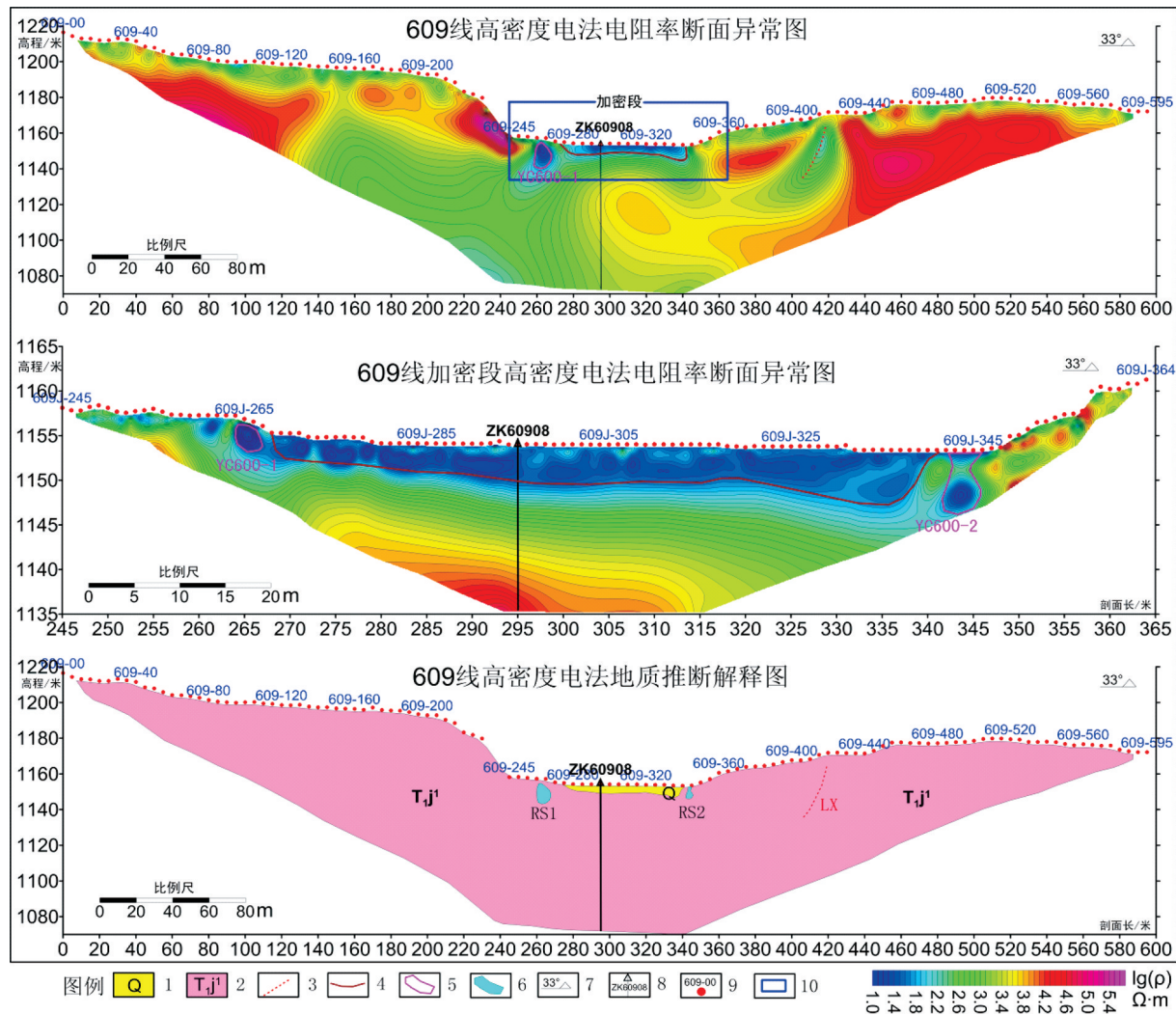


图5 609线高密度电法综合推断解释图

Fig. 5 Comprehensive prediction and explanation in line 609 by High-density electrical method

1—第四系;2—嘉陵江组一段;3—物探推测断裂;4—电性层分界线;5—低阻异常;6—推测岩溶;7—剖面方位;8—钻孔编号;9—物探测点编号;10—电阻率加密段观测区

图 6 为 G1 剖面电阻率异常综合推断解释图,由图可见:整个断面总体表现为中、高电阻率异常特征,在浅部局部地区表现为低电阻率异常特征,低阻异常区深度 0~8 m 不等。推测高电阻率异常区为三叠系嘉陵江组碳酸盐岩层,浅部低阻异

常区为第四系覆土地层,浅表局部高阻异常推测为地表裸露的碎石、乱石岗引起。其中在 09-30 号测点之间为第四系主要覆盖区,该区为古溶蚀沟槽区。在 30 号测点下方,存在封闭的长条状低阻异常,推测为岩溶-裂隙、溶洞(溶蚀区)引起。

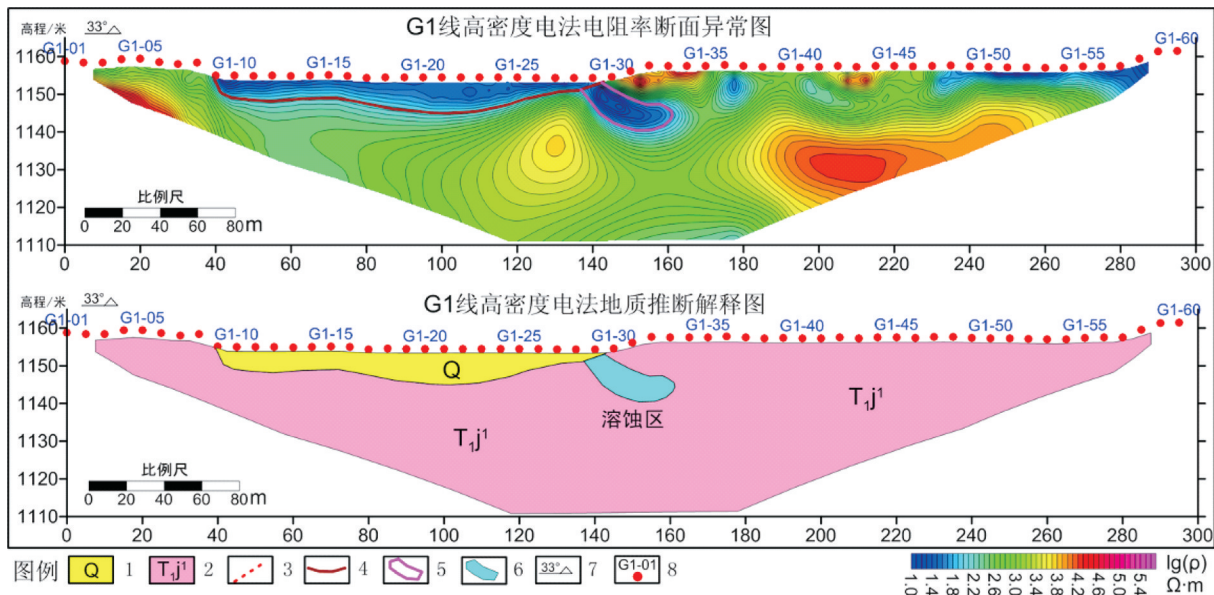


图 6 G1 线高密度电法综合推断解释图

Fig. 6 Comprehensive prediction and explanation in line G1 by High-density electrical method

1—第四系;2—嘉陵江组一段;3—物探推测断裂;4—电性层分界线;5—低阻异常;6—推测岩溶;7—剖面方位;8—物探测点编号

4.3 综合分析

对比分析高密度电法 600 线及充电法 C600 线,在充电法 C600 线上,存在 45、145、185、285、320、365 点等六个“0 值点”。对应高密度电法 600 线分别显示为:45 号点显示为正常岩层,推测应为小型节理裂隙富水,为次要管道之一;145 号点低阻异常,为第四系覆盖层;185 号点低阻异常,为陡倾斜的断裂引起岩溶破碎富水,推测应为次要管道之一;285 号点存在半封闭低阻异常,推测应为岩溶主管道之一;320 号点存在半封闭低阻异常,推测应为岩溶主管道之一;365 号点存在半封闭低阻异常,推测应为岩溶主管道之一。

对比分析高密度电法 609 线及充电法 C609 线,在充电法 C609 线上,存在 15、89、121、165 点等四个“0 值点”。对应高密度电法 609 线分别显示为:15 号对应高密度电法 609 线 260 点存在半封闭低阻异常,推测应为岩溶主管道之一;89 号点对应高密度电法 609 线 345 点附近,存在半封闭低阻异常,推测应为岩溶主管道之一;121 号点

对应高密度电法 609 线 340 号点附近,为陡倾斜的断裂引起岩溶破碎富水,推测应为次要管道之一;165 点对应高密度电法 609 线 385 号点,为陡倾斜的断裂引起岩溶破碎富水,推测应为次要管道。

通过对比分析不同物理方法对比反应同一地点、同一地质现象,综合分析充电法电位梯度曲线成果、高密度电法电阻率断面成果以及现场调查的地表溶坑,结合研究区已有地质、水文资料,将不同地球物理方法解释均为岩溶管道及“0 值点”的相连可得:研究区中部发育五条主岩溶管道(编号 GD1-GD5)横穿测线(图 7)。从图中可看出,岩溶管道 GD1、GD2、GD3 从西北部经 G1、600、609、C2、C1、C0 测线发育至泉点,其中岩溶管道 GD2、GD3 于 C2 测线合为一条,而管道 GD1 经过 C2 线后则发育成 2 条分别穿 C1、C0 线,最后合于泉点;岩溶管道 GD4、GD5 从北部经 C3、C2、C1、C0 测线发育至泉点。对比物探成果及 ZK60001、ZK60908 设计位置,两个钻孔未处于龙井(S24)暗河主岩溶管道上。

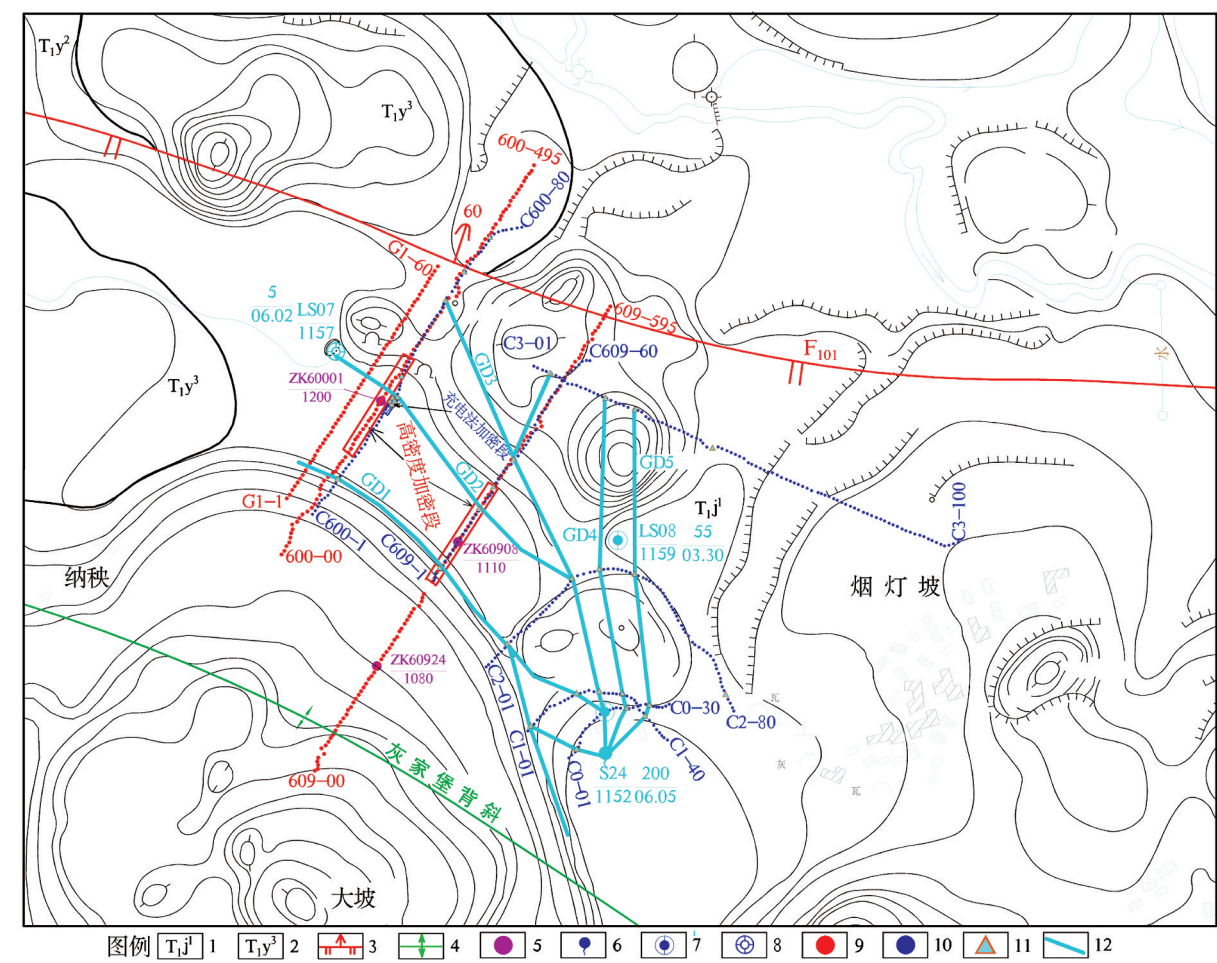


图7 研究区物探综合成果图

Fig.7 Comprehensive physical prospecting results in the studying area

1—三叠系嘉陵江组一段;2—三叠系夜郎组三段;3—断层;4—背斜;5—设计钻孔;6—S24 出水口;7—暗河天窗;8—有水落水洞;9—高密度电法测点;10—充电法测点;11—充电法0值点;12—推测岩溶暗河管道

4.4 钻探工程验证及效果分析

根据物探成果,两钻孔 ZK60001、ZK60908 均未处于 S24 暗河主岩溶管道上,随后两个钻孔相继施工,经钻孔揭露,钻孔 ZK60001、ZK60908 分别于 3.67 m、4.13 m(第四系覆土)进入嘉陵江组一段,分别于 35.55 m、43.43 m 进入夜郎组地层,在嘉陵江段均未揭露到龙井(S24)暗河岩溶管道,与物探推测的结果比较吻合,效果明显,整个勘探过程也均未对该水点造成影响,确保了绿色勘查的有效实施,达到了勘查目的。

性,又清晰的查明了岩溶管道的空间分布形态,并有效的指导了勘探钻孔的施工。ZK60001、ZK60908 两个钻孔的施工均未揭露到龙井(S24)暗河岩溶管道,整个探测和勘探过程也均未对该水点造成影响,确保了绿色勘查的有效实施,达到了勘查目的。

(2)充电法、高密度电法具有经济、高效、环保特点,并成功应用于本次岩溶勘查,两种物探方法组合为碳酸盐岩矿区解决岩溶问题提供范例,以期应用于相似地区解决相似问题。

[参考文献]

5 结论

(1)通过对者相二金矿勘探区的充电法及高密度电法数据进行采集、处理,取得了良好的地质效果,既验证了物探方法的选择的针对性及有效

敖怀欢,张登藩,周波,等. 2016. 高密度电法的地形影响和地形改正讨论[J]. 贵州地质,33(02):132-139.

陈松,陈长敬,李小彬,等. 2017. 充电法和高密度电法在典型岩溶区勘查中的应用分析[J]. 工程地球物理学报,14(01):9-14.

陈清礼,严良俊,胡文宝,等. 2005. 瞬变电磁法探测水库坝基溶洞

- 的效果[J]. 长江大学学报, 2(7): 201-203.
- 固体矿山绿色勘查技术规范 (DB52/T 1433-2019) [S]. 贵州贵阳. 贵州省市场监督管理局.
- 黄启霖, 尹努寻, 杨武, 等. 2020. 一种改进的电法勘探技术在探测隐伏溶洞的应用[J]. 贵州地质, 37(02): 199-208.
- 胡勘, 赵贵明. 2002. 高密度电法 ρ_s 畸变成因浅析及畸变处理方法讨论[J]. 贵州地质, 19(04): 256-259.
- 刘远辉, 廖莉萍. 2015. 黔西南地区 Au、Sb 成矿与找矿方向探讨[J]. 贵州地质, 32(03): 163-170.
- 刘建中, 夏勇, 陶琰, 等. 2014. 贵州西南部 SBT 与金锦矿成矿找矿[J]. 贵州地质, 31(04): 267-271.
- 刘建中, 杨成富, 夏勇, 等. 2010. 贵州西南部台地相去 Sbt 研究及有关问题的思考[J]. 贵州地质, 27(03): 178-184.
- 李黔西. 2003. 充电法探测充水岩溶裂隙的应用效果[J]. 西部探矿工程, 03(82): 9-10.
- 汤良明, 全贵龙, 朱大友, 等. 2006. 多参数物探测量在探测岩溶裂隙上的应用[J]. 贵州地质, 23(02): 124-126.
- 王明章, 陈萍. 2012. 贵州二叠系茅口组古岩溶及其埋藏型地下水系统研究[J]. 贵州地质, 29(04): 283-289.
- 杨成富, 刘建中. 2017. 贵州灰家堡背斜构造蚀变体岩石地球化学特征[J]. 贵州地质, 34(01): 18-25.
- 郑智杰, 敖文龙, 曾洁, 等. 2017. 综合物探法在留着泗角村岩溶塌陷区调查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 44(5): 143-149.
- 张西君, 敖怀欢, 王重阳, 等. 2013. 瞬变电磁在贵州岩溶山区地下水勘查中的应用[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(6): 808-811.
- 张西君, 敖怀欢, 杨胜发, 等. 2015. 瞬变电磁法在复杂条件下勘查地下岩溶水效果分析——以贵州大方县鼠场为例[J]. 工程地球物理学报, 12(02): 151-156.

Application of Mise-a-la-masse Method and High-density Electrical Method in Karst Exploration of Zhexiang No. 2 Gold Deposit in Zhenfeng, Guizhou

YANG Wen¹, ZHANG Xi-jun^{2,3,4}, FENG Juan¹, CHEN Cheng¹, YANG Lei¹

(1. 105 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology Mineral Resources Exploration and Development, Guiyang 550018, Guizhou, China; 2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China; 3. Guizhou Engineering Research Center for Geologic-Geophysical exploration development and application, Guiyang 550081, Guizhou, China; 4. Guizhou Geological Survey, Guiyang 550018, Guizhou, China)

[Abstract] During the drilling work in the karst mining area, because drilling in the developed karst layer made flush fluid circulate in the karst layer, then it will cause circulation loss, water burst and other accident. Meanwhile, exposure and communicate different layer will destroy the primary karst water bearing system. It taken Zhexiang NO. 2 gold deposit in Zhenfeng as the example, in order to avoid the influence of drilling to drinking water source Longjing (S_{24}) in the mining area, it's necessary to find out the distribution of runoff belts in the mining area. In this paper, for the underground karst export of Longjing (S_{24}) in the mining area, hydrogeologic survey are used firstly to judge the development, overlying thickness and structure, then the assemblage of Mise-a-la-masse method and High-density electrical method are used to do deep test and research, the the physical prospecting inversion result are compared, analyzed and explained with hydrological and geological information, the spatial structure and scale of Longjing (S_{24}) karst underground water in the mining area are found out. These work guides the drilling, it's proved it didn't influence the Longjing (S_{24}) by drilling, decrease the influence of exploration to shallow karst water system effectively, realize the green exploration from hydrogeology, physical prospection and drilling in the mining area.

[Key Words] Karst exploration; Karst underground river; Mise-a-la-masse method; High-density electrical method

黔中大湾磷矿区早震旦世“盖帽”白云岩对a矿层的影响及其地质意义

宋普洪, 陆跃荣, 魏世鹏, 刘波, 徐东, 周永康, 白宇

(贵州省地质矿产勘查开发局104地质大队, 贵州都匀 558000)

[摘要]大湾矿区陡山沱组底部为上覆于南华系冰碛岩之上的盖帽白云岩, 主要由微晶白云石组成的泥-微晶结构、薄层状构造灰色细晶白云岩。局部地区, 岩石为铁质侵染, 为褐红色。见方解石及少量石英充填于裂隙中。水平层理发育, 与上覆矿层整合接触。盖帽白云岩在全球各地广泛分布。大湾矿区震旦系陡山沱二段(a矿层产出层位)厚度及其品位受沉积基底(陡山沱一段“盖帽”白云岩)起伏程度的制约, 当盖帽白云岩厚度增大时, 沉积的陡山沱组a矿层厚度减薄, 相应的磷块岩 P_2O_5 含量相对增高, 相反, 沉积的陡山沱组含磷层厚度大, 磷块岩 P_2O_5 含量相对较低。矿区北4-8号勘探线及9-27号勘探线a矿层矿石品位相对较高, a矿层厚度相对减小。指示大湾矿区北东部及南西部a矿层沉积环境海水相深度相对较浅, 水动力环境相对较强。同样, 大湾矿区中部a矿层底板盖帽白云岩很薄或这未发育, 但出现粉砂质泥岩, 矿石品位相对较低, 矿层厚度相对变厚。a矿层沉积环境海水相深度相对较深, 水动力环境相对较弱, 推测大湾矿区中部a矿层沉积底板存在一条东西向凹陷。从盖帽白云岩到陡山沱二段a矿层是持续海侵过程, 地层连续沉积。盖帽白云岩沉积环境为介于潮间带至深水区的缓坡, 指示a矿层同样为潮间带至深水区之间的缓坡沉积。

[关键词]大湾磷矿; 陡山沱组; 盖帽白云岩; 贵州中部

[中图分类号]P619.21⁺3; P534.31; P588.24⁺5 **[文献标识码]**A **[文章编号]**1000-5943(2021)02-0201-07

1 引言

现代磷块岩研究通常基于对“大洋磷循环”系统模式的模拟和解释, 总结沉积型磷块岩成因类型和沉积分布规律, 进而探究海洋中磷块岩的磷质来源、成磷作用及成矿模式。海洋中大规模成磷作用在地质历史时期是事件性的, 巨量磷灰石的沉积一般与大洋磷循环的突变有关(Follmi, 1996; Fillippelli, 2008, 2011)。全球性成磷事件往往与气候突变、大氧化事件及生命演化等存在密切的藕合关系(Pufahl and Hiatt, 2012; Pufahl and Groat, 2017)。新元古代中期出现了几次地球历

史上最严酷的冰期, 被称为新元古代的“雪球地球”, (Hofman et al., 1998)。雪球事件后全球范围内的冰川沉积物顶上覆盖有连续成层的白云岩, 厚度从几米到几十米, 称为盖帽白云岩(Brookfield et al., 1994; Grotzinger et al., 1995; 储雪蕾, 2004)。由于冰期杂砾岩代表寒冷气候条件, 碳酸盐岩则代表温暖气候下的浅海沉积, 它与起伏的冰成沉积岩在岩性上差别非常大, 虽看起来是连续沉积的, 几乎没有再造作用和显著沉积间断的证据(Williams, 1979; Deynoux et al., 1982; Hoffman et al., 1998)。盖帽白云岩是海侵的产物, 它的广泛存在意味着新元古代冰期前后气候发生了突变(Schermerhorn, 1979; Williams, 1979)。

[收稿日期]2021-01-30 **[修回日期]**2021-04-21

[作者简介]宋普洪(1979—), 男, 高级工程师。长期从事区域地质调查、区域矿产调查和矿产勘查工作。Email: 232392787@qq.com。

盖帽白云岩之上,为中至薄层状浅灰色白云岩和灰绿色、浅灰色细砂岩组成的高频沉积韵律层,其上为陡山沱二段 a 矿层,呈层纹状、条带状磷块岩或硅质磷块岩,发育水平层理或斜层理。指示海平面频繁-快速上升的退积层序,也指示出盖帽白云岩发育于冰后期海平面迅速上升期(旷红伟,2019)。从盖帽白云岩到陡山沱二段 a 矿层是持续海侵过程,地层连续沉积。可以认为盖帽白云岩的沉积形态在一定程度上制约了陡山沱组二段 a 矿层的沉积形态。

2 背景

黔中地区大地构造位置处于扬子地台东南缘,为构造活动相对稳定的扬子克拉通区,克拉通内局部有隆起或台内洼陷,整体接受较为稳定的海相沉积,而碎屑岩沉积主要集中在位于黔中西的康滇隆起周围(王剑等,2012;Zhu et al, 2007;刘静江等,2015),扬子地块东南接扬子东南大陆边缘盆地,自北西至南东逐渐由台地碳酸盐岩相向陆架斜坡碎屑岩相过渡,表现出典型的古被动大陆边缘性质(汪正江等,2011),福泉大湾磷矿其含磷岩系主要由磷块岩、白云岩、硅质岩等组成。矿体一般分为 a、b 两层,陡山沱组第四段(Z_1d^4):为 b 矿层产出层位,以灰、深灰色中厚层致密状磷块岩为主,亦有条带状、砂屑状、团块状、角砾状磷块岩矿石。厚度平均 7.9 m, P_2O_5 含量平均 25.75%。陡山沱组第二段(Z_1d^2):为 a 矿层产出层位,以灰、深灰、灰黑色条纹状、条带状磷块岩为主,炭泥质磷块岩次之,亦见致密状、砂屑状、角砾状及硅质磷块岩。厚度平均 6.9m, P_2O_5 含量平均 24.5%。

陡山沱组底部的盖帽碳酸盐岩在矿区连续分,布产状 $300^\circ \angle 15^\circ$,为灰色、浅肉红色细晶-微晶白云岩,呈致密块状构造,微晶结构,发育水平层理。局部含有硅质条带,带宽 1~7 mm,偶夹灰绿色泥质条带。厚度 0~7.0 m,平均厚度 2.29 m。镜下观察白云石组分大于 95%,方解石 3%,含少量石英颗粒,方解石和石英充填于两组近垂直发育的裂隙中,岩石局部呈红褐色,应为铁质侵染。自上而下岩石特征如下:

(1)浅灰色中厚层细晶白云岩,单层厚度<2 m,呈致密块状,含少量硅质条带,呈现出浅灰-灰

色相间韵律层理,韵律层理宽 5~10 mm。

(2)浅肉红色薄至中厚层微晶白云岩。夹少量灰绿色泥质薄膜,单层厚度<1 m,块状构造。主要矿物为白云石,其含量>95%,含少量方解石、石英颗粒,充填于裂隙中。经铁质侵染后岩石呈红褐色。

盖帽白云岩在全球各地广泛分布。指示的沉积时间只有几千年,是快速沉积的产物,指示了气候环境的快速突变,由极端寒冷转变为极端炎热,在中、下扬子区和江南区(除江南区东南部)均有分布。其广布性和同时性使它成为扬子区和全球对比的标志层。盖帽白云岩认为是海侵初期浅缓坡相潮间亚相沉积,向上由浅水潮下微晶白云岩变为较深水潮下灰绿色泥岩与暗灰色薄层泥晶白云岩互层夹黑色薄层磷块岩,其上变为条纹状球粒磷块岩和硅质磷块岩,显示海水不断加深,海平面上升。球粒磷块岩、硅质磷块岩为最大海泛期凝缩层沉积(杨爱华,2015)。

3 研究方法

大湾矿区震旦系陡山沱二段 a 矿层厚度及其品位受沉积基底(“盖帽”白云岩)起伏程度的制约,当盖帽白云岩厚度增大时,沉积的陡山沱组 a 矿层厚度减薄,相应的磷块岩 P_2O_5 含量相对增高,当“盖帽”白云岩厚度减薄时,沉积的陡山沱组含磷层厚度增大,相应的磷块岩 P_2O_5 含量相对较低。(如图 1-3)

大湾矿区 a 矿层与其底板盖帽白云岩呈整合接触,其沉积地理环境相似,属浅缓坡相沉积。a 矿层矿石主要由胶磷矿、石英、白云石组成,胶磷矿呈层状分布构成叠层构造。胶磷矿以胶状为主,部分重结晶为细小纤维状磷灰石,磷灰石常为梳状、条带状聚集分布。粘土多为细小鳞片状水云母,分布于胶磷矿中。见纤维状粘土聚集为团块分布,团块大小 0.3 mm 左右。亮晶白云石呈半自形-他形粒状,粒度 0.05~0.6 mm,零星分布或聚集为顺层条带分布;半自形粒状微晶级白云石(粒度 0.004~0.03 mm)聚集为条带状顺层分布。石英碎屑以次圆状为主,粒度多在 0.03~0.3 mm 之间,分布于胶磷矿中,或呈半自形、聚集呈团块状分布。黄铁矿呈自形粒状,粒度 0.01~0.6 mm,零星分布。后期充填少量白云石、石英、重晶石呈脉状,多垂直插层分布,脉宽 0.02~0.2 mm。

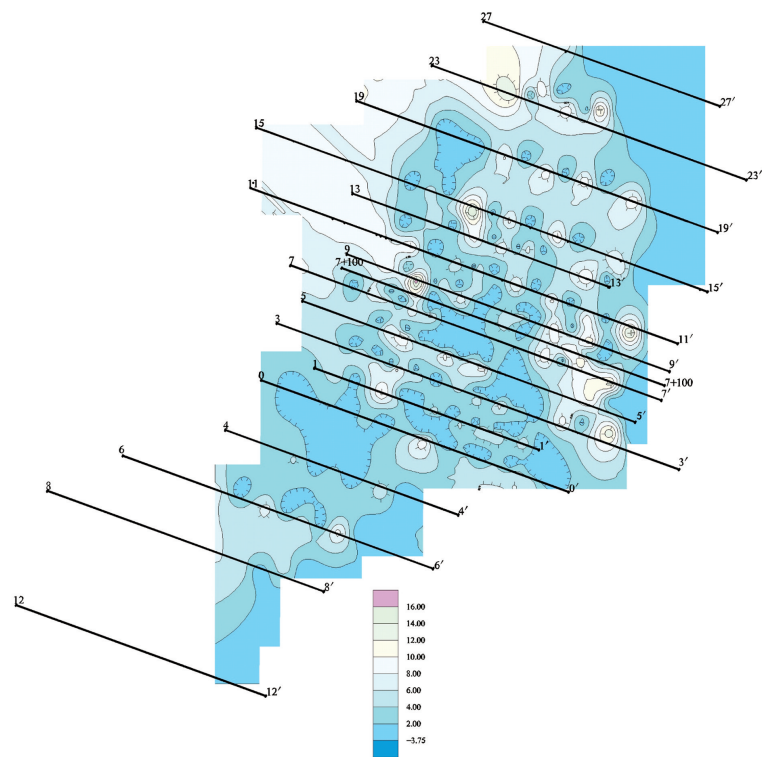


图 1 a 矿层厚度等值线图

Fig. 1 a contour map of ore bed thickness

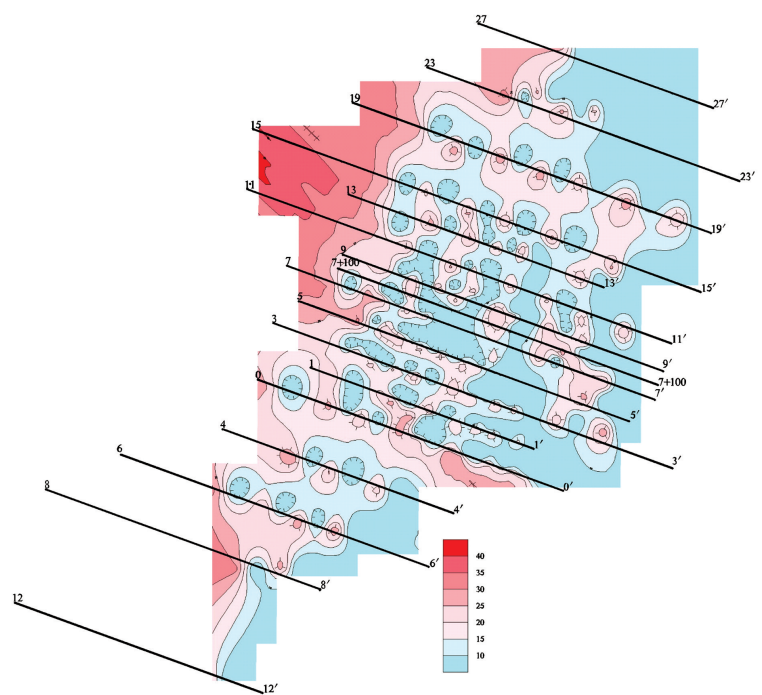


图 2 a 矿层品位值线图

Fig. 2 a value line of ore layer grade

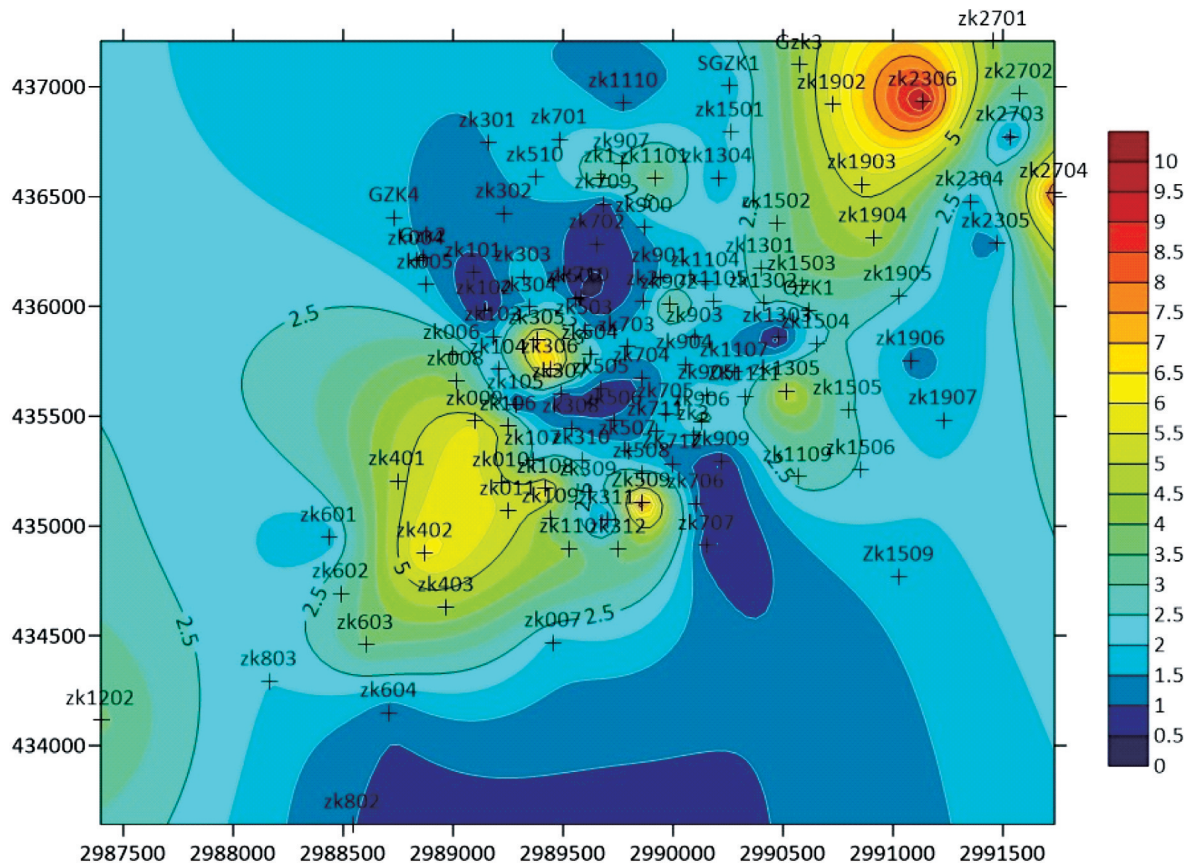


图3 盖帽白云岩厚度等值线图

Fig. 3 Contour map of cap dolomite thickness

陡山沱早期,黔中隆起浅海边缘地区海水动荡,海水机械运动是胶磷矿成矿的重要机制,其成矿过程可分为四个阶段。(1)富磷沉积物沉淀阶段。 $P_4O_3^{3-}$ 以络合物的形式被携带至水岩沉积界面,由于水岩沉积界面处于还原条件, $FeOOH$ 络合物被分解释放出 $P_4O_3^{3-}$, $P_4O_3^{3-}$ 进入沉积物,形成富磷沉积物;(2)磷酸盐化阶段。释放的 $P_4O_3^{3-}$ 与 $F \sim Ca^{2+}$ 等其他成矿物质结合,通过磷酸盐化作用生成磷酸盐;(3)机械破碎和磨圆阶段。未完全固结的磷酸盐在海浪、潮汐等作用下,破碎、剥蚀形成大小不一的砂屑、砾屑颗粒,这些砂屑、砾屑颗粒经过海水搬运到新的环境沉淀下来。在这过程中,破碎的磷酸盐颗粒被磨圆、淘洗,形成球度和磨圆度较好的碎屑颗粒;(4)成岩阶段。孔隙水中的磷酸根与 F/Ca 等元素结合形成磷灰石,在沉淀的胶磷矿表面形成一层亮晶纤维状磷灰石包壳(刘魁梧等,1994),成为第一代胶结物(赵东旭,1985;She et al., 2013)。成岩阶段晚期,形成的胶磷矿颗粒被白云石等矿物胶结,白云石成为第二代胶结物(赵东旭,1985;She et al., 2013),部分砂屑状磷质颗粒可能再次被海水迁

移悬浮于海水中,并随海水搬运至其它地方再次沉淀。

在其成矿过程中,含有机质的凝胶团块分布于盖帽白云岩基底中。其基底“盖帽”白云岩越厚,指示其沉积时间相对较长,海水相深度较大,水动力环境相对较弱。在海水运移含磷陆源碎屑物时运移距离应越远,颗粒分选性越好,含磷物质筛选富集越好,其沉积厚度相对较薄。其基底“盖帽”白云岩越薄,指示其沉积时间相对较短,海水相深度相对较浅,水动力环境相对较强,海水运移含磷陆源碎屑物运移距离相对较近,颗粒分选性较差,含磷物质筛选富集较差,其沉积厚度相对较厚。

磷灰石的密度为 2.88 g/cm^3 左右,而其他陆源碎屑物等密度约为 $1.5 \sim 2.5\text{ g/cm}^3$,磷灰石的比重相比更大,在水动力条件下冲蚀、簸选,可以将比重较轻的陆源碎屑及泥沙等从沉积物中分选出来而保留磷灰石颗粒(Follmi, 1996)。震旦系第一统陡山沱组第二段(a矿层矿石赋存层位)部分地区存在砂屑状磷块岩,结构疏松,其大多数发育在水动力较强的环境。相应的,根据钻探工程揭

露,其下伏盖帽白云岩岩层厚度相对较薄。其他地区出现条带状磷块岩,由下向上依次为纹层状、条带状、斜交、交错层理。指示出由水动力环境较弱的沉积环境向水动力较强的沉积环境转变(如图4)。根据钻探工程揭露,a矿层矿石若出现较厚的水平层理,其下伏盖帽白云岩岩层厚度同样

相对较厚。反映出较深的海水相特征。向上逐渐转变为交错层理或波状层理。指示出其经历过海退过程或由地层的不断沉积,海水相变浅,改变其沉积环境。根据分析结果,在a矿层砂屑状磷块岩 P_2O_5 含量相对据斜交或波状层理状磷块岩 P_2O_5 含量高。

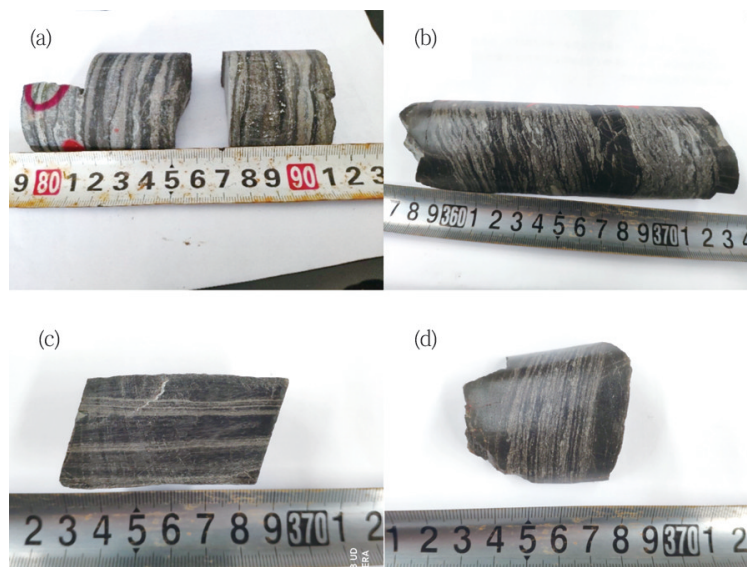


图4 a矿层矿石照片

Fig. 4 a photo of ore bed

a—波状层理;b—斜交层理;c—纹层状结构;d—条带状结构

陡山沱组第一段:为盖帽白云岩产出层位。顶部为浅灰、灰色中厚-厚层细晶白云岩,偶含硅质、磷质团块、条带或透镜体,厚度0~27.08 m,平均厚度2.48 m;中部为灰、深灰、灰绿色中厚层泥质粉砂岩、粉砂质泥岩组成的高频韵律层,局部见灰色中厚层粉砂岩,偶夹紫红色薄层泥质粉砂岩及灰色薄层细晶白云岩,厚度0~16.75 m,平均厚度5.04 m;底部为灰、浅肉红色中厚层细晶-微晶白云岩(盖帽),偶夹灰绿色泥质条带,厚度0~7.0 m,平均厚度2.29 m。该段一般厚3.48~25.45 m。由下至上的岩层序列反映出陡山沱一段是持续海侵的过程,地层连续沉积,上覆岩层的厚薄程度直接受盖帽白云岩岩层沉积厚度、形态的制约。其上覆地层为陡山沱二段,为a矿层产出层位。a矿层的沉积形态受到其底板的制约。

在大湾矿区,a矿层矿石若其含有大量硅质团块或硅质条带,其 P_2O_5 含量相对较低,其下伏盖帽白云岩厚度较大。若硅质含量较少,白云质含量较多,矿石多为砂屑状,其 P_2O_5 含量相对较高,其下伏盖帽白云岩厚度较小。在8号勘探线至4号勘探线,a矿层矿石其硅质含量低,白云质

含量高,砂屑状磷块岩含量多,偶有条带状磷块岩出现。反映出较强的水动力沉积环境,钻探工程揭露下伏盖帽白云岩厚度较薄,且分析结果显示8号勘探线至4号勘探线a矿层 P_2O_5 含量较矿区其它地区较高。

在9号勘探线至27号勘探线,a矿层矿石硅质含量较高,白云质含量较低。其矿石结构多数为斜交或波状层理,少数为砂屑状磷块岩,矿层厚度较8号勘探线至4号勘探线厚, P_2O_5 含量略有下降,下伏盖帽白云岩的厚度相对较厚。反映出较弱的水动力环境。

在0号勘探线至9号勘探线之间,a矿层厚度较左右两侧大, P_2O_5 含量低,矿石主要呈纹层状或水平层理,白云质含量低,硅质含量高。同时,钻探工程揭露下伏岩层不是白云岩,主要岩性为灰色薄层状泥质粉砂岩、细砂岩。局水平层理,局部夹灰色薄层状泥晶白云岩,反映出较为平静的沉积环境,反映海水相较深。

由图1-3看出,黔中大湾矿区钻探工程所揭露矿层及盖帽白云岩对比图,4-8号勘探线比9-27号勘探线 P_2O_5 含量高,4-8号勘探线比9-27

号勘探线 a 矿层层厚薄,4-8 号勘探线比 9-27 号勘探线盖帽白云岩岩层厚度薄。0-9 号勘探线区域, P_2O_5 含量较两侧相对较低, a 矿层层厚大。推测 0-9 号勘探线区域 a 矿层沉积时海水相相较两侧更深。推测 0-9 号勘探线区域存在一条较深的凹陷。

通过研究分析 a 矿层底板“盖帽”白云岩岩层厚度, a 矿层矿层厚度矿石品位的特征, 可以得到以下认识。矿层沉积之前, 福泉大湾磷矿区矿层底板盖帽白云岩对 a 矿层有一定的制约作用。0-9 号勘探线区域存在一条较深的凹陷。这对以后 a 矿层开采具有一定的指导意义。

4 讨论和认识

盖帽白云岩之上, 为中至薄层状浅灰色白云岩和灰绿色、浅灰色细砂岩组成的高频沉积韵律层, 其上为陡山沱二段 a 矿层, 呈层纹状、条带状磷块岩或硅质磷块岩, 发育水平层理或斜层理。指示海平面频繁-快速上升的退积层序, 也指示出盖帽白云岩发育于冰后期海平面迅速上升期(旷红伟, 2019)。从盖帽白云岩到陡山沱二段 a 矿层是持续海侵过程, 地层连续沉积。指示盖帽白云岩的沉积地理环境与 a 矿层条带状、层纹状磷块岩沉积地理环境是相似的。矿层的厚度和矿石的品位与沉积底板密切相关。同时也相应的反映出大湾矿区的成矿背景和成矿模式。

大湾矿区盖帽白云岩岩相单一, 以微晶白云岩为主, 以水平层理和层纹构造为主, 反映出其沉积环境为介于潮间带至深水区的缓坡。与其相似, 对于陡山沱二段 a 矿层, 其沉积环境是否同样位于潮间带至深水区的缓坡? 其位置是否是磷质聚集成矿最理想的位置?

5 结论

(1) 矿区北 4-8 号勘探线及 9-27 号勘探线 a 矿层矿石品位相对较高, a 矿层厚度相对减小。指示大湾矿区东北部及西南部 a 矿层沉积环境海水相深度相对较浅, 水动力环境相对较强。同样, 大湾矿区中部 a 矿层底板盖帽白云岩很薄或这未发育, 但出现粉砂质泥岩, 矿石品位相对较低, 矿层厚度相对变厚。a 矿层沉积环境海水相深度相

对较深, 水动力环境相对较弱, 推测大湾矿区中部 a 矿层沉积底板存在一条东西向凹陷。

(2) 从整体上看, 陡山沱组一段盖帽白云岩岩层厚度与陡山沱二段 a 矿层层厚呈正相关, 与 a 矿层, P_2O_5 含量呈负相关。

(3) 从盖帽白云岩到陡山沱二段 a 矿层是持续海侵过程, 地层连续沉积。盖帽白云岩沉积环境为介于潮间带至深水区的缓坡, 指示 a 矿层同样为潮间带至深水区之间的缓坡沉积。

[参考文献]

- 旷红伟, 柳永清, 耿元生, 等. 2019. 中国中新元古代重要沉积地质事件及其意义[J]. 古地理学报, 21(01): 1-30.
- 刘静江, 李伟, 张宝民, 等. 2015. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. 古地理学报, 17(06): 735-753.
- 刘魁梧, 陈其英. 1994. 磷块岩的胶结作用[J]. 地质科学, 29(1): 62-70.
- 王剑, 段太忠, 谢渊, 等. 2012. 扬子地块东南缘大地构造演化及其油气地质意义[J]. 地质通报, 31(11): 1739-1749.
- 汪正江, 王剑, 卓皆文, 等. 2011. 扬子陆块震旦纪-寒武纪之交的地作用壳伸展作用: 来自沉积序列与沉积地球化学证据[J]. 地质论评, 57(5): 731-742.
- 杨爱华, 朱茂炎, 张俊明, 等. 2015. 扬子板块埃迪卡拉系(震旦系)陡山沱组层序地层划分与对比[J]. 古地理学报, 17(01): 1-20.
- Brookfield M E. 1994. Problems in applying preservation, fades and sequence models to Sinian (Neoproterozoic) glacial sequences in Australia and Asia. Precambrian Res, 7a: 113-43.
- Deynoux M. 1982. Periglacial polygonal structures and sand wedges in the late Precambrian glacial formations of the Taoudeni Basin in Adrar of Mauretania (West Africa). Palaeogeogr. Palaeoclimat. Palaeoecol, 39: 55-70.
- Follmi K B. 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits[J]. Earth Science Reviews, 40(1): 55-124.
- Filippelli G M. 2008. The Global Phosphorus Cycle: Past, Present, and Future[J]. Elements, 4(2): 89-95.
- Filippelli G M. 2011. Phosphate rock formation and marine phosphorus geochemistry: The deep time perspective[J]. Chemosphere, 84(6): 759-766.
- Grotzinger J P and Knoll A H. 1995. Anoznalous carbonate precipitates: is the Precambrian the key to the Permian[J]. Palaios, 10: 578-596.
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P. 1998. Comings and goings of global glaciations on a Neoproterozoic tropical platform in Namibia[J]. GSA Today, 8: 1-9.
- Pufahl P K, Hiatt E E. 2012. Oxygenation of the Earth's atmosphere-ocean system: A review of physical and chemical sedimentologic responses[J]. Marine and Petroleum Geology, 32(1): 1-20.
- Pufahl P K, Groat L A. 2017. Sedimentary and Igneous Phosphate De-

- posits; Formation and Exploration; An Invited Paper [J]. *Economic Geology*, 112(3): 483–516.
- Schenerhorn L J G. 1974. Late Precambrian mixtites: glacial and/ or nonglacial. *Am. J. Sci.*, 274: 673–824.
- She Z B, Strother P, McMahon G, et al. 2013. Terminal Proterozoic cyanobacterial blooms and phosphogenesis documented by the Doushantuo granular phosphorites I: In situ micro-analysis of textures and composition [J]. *Precambrian Research*, 235: 20–35.
- Williams G E. 1979. Sedimentology, capping late Precambrian glacial stable isotope geochemistry and palaeoenvironment of dolostones sequences in Australia [J]. *Geol. Soc. Australia*, 26: 377–386.
- Zhu M Y, Zhang J M, Yang A H. 2007. Integrated Ediacaran (sinian) chronostratigraphy of South China [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeocology*, 254(1–2): 7–61.

Influence and Geological Significance of Cap Dolomite to A Seam of Early Sinian in Dawan Phosphorite Mining Area in Central Guizhou

SONG Pu-hong, LU Yao-rong, WEI Shi-peng, LIU Bo, XU Dong, ZHOU Yong-kang, BAI Yu

(105 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology Mineral Resources Exploration and Development, Duyun 558000, Guizhou China)

[**Abstract**] The base of Doushantuo formation in Grand ~ Baie mining area is cap dolomite overlying Nanhua Moraine, which is mainly composed of microcrystalline dolomite with mud ~ microcrystalline structure and thin ~ layered structure. In some areas, the rocks are iron ~ colored and brownish ~ red. calcite and a small amount of quartz filled in the fracture. Horizontal bedding is developed and contacts with overlying strata. Cap Dolomite is widely distributed all over the world. The thickness and grade of the second member of the Sinian Doushantuo formation in the Grand ~ Baie mining area are controlled by the fluctuation of the sedimentary basement (cap dolomite of the first member of the Doushantuo formation), the thickness of a deposit of the sedimentary doushantuo formation is thinner, and the P_2O_5 content of the corresponding phosphate rock is relatively higher, on the contrary, the thickness of the sedimentary Doushantuo formation is larger, and the P_2O_5 content of the phosphate rock is relatively lower. The ore grade of ore layer a is relatively high and the thickness of ore layer a is relatively small in the north 4 ~ 8 exploration line and 9 ~ 27 exploration line. It indicates that the depth of marine facies is relatively shallow and the hydrodynamic environment is relatively strong in the north ~ east and south ~ west parts of the Grand ~ Baie mining area. Similarly, in the central part of the Grand ~ Baie mining area, the floor cap dolomite is very thin or not developed, but silty mudstone appears, the ore grade is relatively low and the thickness of the ore layer is relatively thick. The sedimentary environment of a deposit is relatively deep in Marine facies and weak in hydrodynamic environment. It is inferred that there is an east ~ west depression in the sedimentary floor of a deposit in the central part of Grand ~ Baie mining area. From Cap Dolomite to a deposit of the second member of doushantuo formation is a continuous transgression process and continuous sedimentary strata. The Cap Dolomite sedimentary environment is a gentle slope between the intertidal zone and the deep water zone, indicating that the a deposit is also a gentle slope between the intertidal zone and the deep water zone.

[**Key Words**] Dawan Phosphorite Ore; Central Guizhou; Doushantuo Formation; Cap Dolomite; Central Guizhou

钻孔简易水文地质编录与测井结合对岩溶含水层含水性划分探讨

——以福泉市大湾磷矿为例

向 刚, 曾牡丹, 王嘉铭, 陈体云, 何永川, 张华湘, 杨子林

(贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队, 贵州 都匀 558000)

[摘 要] 矿区水文地质勘查中, 一般针对整个充水含水层, 往往忽略含水层中分布的弱透水层或相对隔水层, 从而导致涌水量预测结果与实际出入较大。本文以福泉市大湾磷矿区为例, 以首采区范围为试验场, 通过钻孔物探测井和简易水文地质编录相结合的手段, 对灯影组含水段和弱透水段进行详细划分, 确定灯影组实际有效含水段厚度 M 值, 对于矿井涌水量预测及后期矿井开展防治水具有重要的意义。

[关键词] 含水段划分; 水文地质编录; 测井; 大湾磷矿; 福泉市

[中图分类号] P619.21⁺3; P631.2⁺4; P641.134 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2021)02-0208-05

1 引言

贵州省碳酸盐岩(裸露和覆盖型岩溶区)的分布面积广阔, 岩溶极为发育, 富水性中等至强, 对众多矿山开采过程中充水或突水有较大的影响, 而我们在勘查过程中, 往往针对整个充水含水层, 忽略了含水层中分布有弱透水段或相对隔水段, 在涌水量计算时, 含水层厚度 M 值往往带入整个含水层的厚度值, 从而导致预测的矿井涌水量值偏大, 与实际情况不符。本次工作以贵州省白岩背斜区西翼的大湾磷矿为例, 以首采区范围为试验场, 对矿区灯影组含水特征开展研究, 通过钻孔物探测井和简易水文地质编录相结合的手段对灯影组含水段和弱透水段进行详细划分, 从而确定灯影组实际有效厚度 M 值, 对于岩溶区矿井涌水量预测及后期矿井开展防治水具有重要的意义。

2 研究区特征

2.1 矿区概况

福泉大湾超大型磷矿床位于福泉市与瓮安县交界处, 矿区面积为 11.22 km^2 。矿区为溶蚀-侵蚀地貌, 矿区最高点位于矿区南西部的古顶大坡, 海拔 $1\,524 \text{ m}$, 最低点为东北部岩根河河床, 海拔 $1\,050.5 \text{ m}$, 最大高差 473.5 m , 属于低中山地貌。主要水系岩根河从南向北东流过矿区, 岩根河流经矿区标高为 $1\,240 \sim 1\,050.5 \text{ m}$, 矿区最低排泄基准面标高为 $1\,050.5 \text{ m}$ 。

大湾磷矿区磷矿层埋藏较深(垂深大于 500 m), 矿层直接顶板灯影组为含水量中等的含水层, 是矿坑充水的主要水源(李治国等, 1984), 灯影组厚度值为 $176.23 \sim 301.94 \text{ m}$, 平均厚度 229.54 m , 溶孔溶隙较发育, 富水性中等。

[收稿日期] 2021-01-31 [修回日期] 2021-03-22

[基金项目] 贵州省福泉市大湾磷矿勘探(全省重点矿产资源大精查项目)。贵州省地矿局局管地质科研一般科学研究项目(编号: 黔地矿科合[2020]5号)。

[作者简介] 向刚(1983—), 男, 湖北荆门人, 水工环高级工程师, 长期从事矿区水文地质勘查及评价工作。

2.2 地层构造

矿区分布地层由老至新有南华系南沱组($Pt_3^{2c}n$),震旦系陡山沱组(Pt_3^{3y})、灯影组(Pt_3^{3b} $\epsilon_1 dy$),寒武系牛蹄塘组($\epsilon_{1-2}n$)、明心寺组(ϵ_2m)、金顶山组(ϵ_3j)和第四系(Q)。其中灯影组地层隐伏在深部。

区域构造主要为白岩-高坪复背斜以及切错该背斜的小坝断层 F_1 。区域内的断裂构造发育,主要有近南北向、北西向、北东向三组。

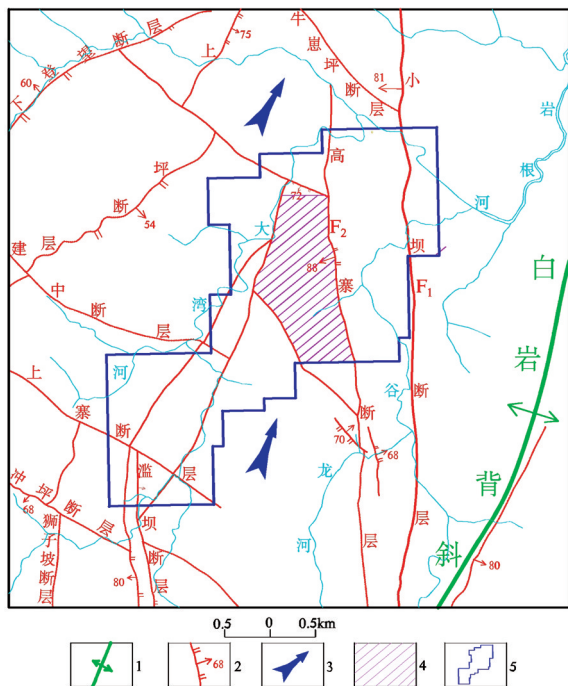


图1 矿区构造纲要图

Fig. 1 Structural Outline Plan of Mining area

1—背斜;2—断层;3—地下水流向;4—首采区范围;5—矿区范围

2.3 矿床水文地质结构

矿区所在水文地质单元南部以拦马坳至扁担山一线为分水岭,分水岭以南地表水和地下水向南径流,汇入乌江水系清水河;分水岭以北地表水、地下水向北径流,汇入乌江水系马颈河。北部边界位于白岩背斜轴部转背岩一带, $\epsilon_{1-2}n+\epsilon_2m$ 组炭质页岩、粉砂岩富水性弱,为地下水隔水边界(宁黎元等,2012)。单元西部以 $\epsilon_{1-2}n+\epsilon_2m$ 组隔水岩层为隔水边界;单元东部有一条南北向的阻水断层小坝断层(F_1)(寇西昌,1987;刘文凯等,1994)。矿区位于白岩背斜西翼,位于水文地质单元径流区。

水文地质单元中,灯影组+陡山沱组岩溶含水

层上覆碎屑岩相对隔水岩层,下伏南沱组、清水江组等隔水层,故灯影组+陡山沱组与上覆地层和下伏地层均无太大水力联系。

3 研究方法

3.1 研究方法

本文拟选择首采区范围内代表性剖面,利用剖面上钻孔岩心编录、简易水文地质编录、水文物探测井数据来开展综合分析研究。

3.2 试验场布置

根据长沙化工设计院提供的预可研报告,大湾矿区设计首采区范围为断层 F_2 以西、断层 F_1 以东、4号勘探线以北、13号勘探线以南区域内标高450~800 m之间矿体。本次补勘针对这部分区域开展了大量的勘查工作。地球物理测井是水文地质勘查中的一种十分有效的测量手段,它在划分岩性、划分含水层、分析含水层间的水力联系、探测岩溶等水文地质勘查工作中发挥着极其重要的作用(王鹏等,2019;冯来泉,2020)。为了查清首采区内灯影组含水段的空间分布特征,在本次勘探工作首采区内及附近设计的15个钻孔中选择9个钻孔,分别在走向上和倾向上开展水文物探测井工作。其中ZK906和ZK909、ZK711和ZK712、ZK601和ZK602等钻孔在倾向上进行控制;ZK1305、ZK1111、ZK909、ZK712则在走向上进行控制(测井钻孔布置见下图2)。

4 数据采集与分析

4.1 数据采集

9个测井钻孔施工过程中保证灯影组采用清水或无固相泥浆钻进,终孔后采用清水循环替换,消除孔内泥浆对灯影组裂隙的影响,保证测井参数的真实准确性,测井参数有自然伽马、自然电位、双收时差、视电阻率及人工盐化曲线。其中自然伽马主要划分岩性,自然电位和声波及视电阻率主要用来划分含水层岩溶裂隙位置,人工盐化主要是确定出水位置(骆森等,2004;王守国,2010;姜永生,2000)。

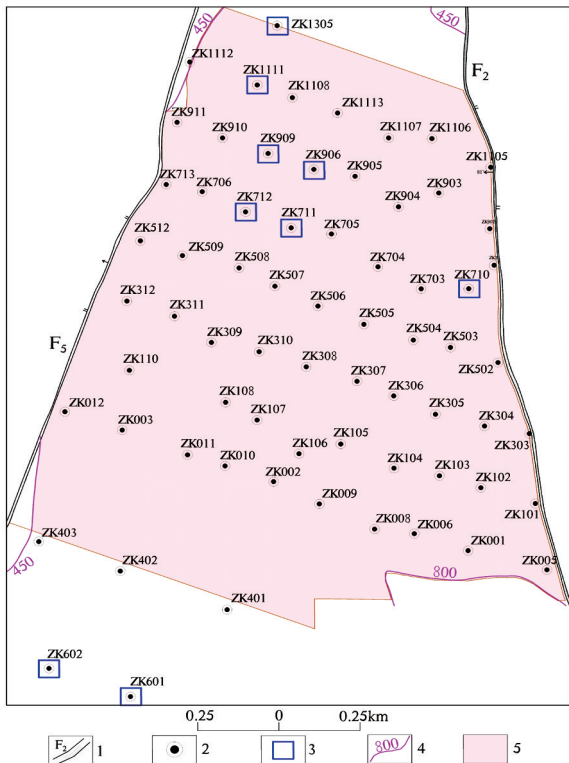


图 2 试验场测井钻孔分布图

Fig. 2 Geophysical Borehole distribution in Mining area

1—断层;2—钻孔;3—测井孔;4—矿体底板等高线及标高;5—首采区

钻孔简易水文地质编录主要是针对灯影组岩性、裂隙进行编录,对施工期间下钻前的水位进行观测,起钻过程保证钻杆提离孔底 10 m 以上,保证起钻后与下钻前的间隔在 20 min 以上,保证钻孔内水位为真实水位。水位观测采用电测绳观测,从而保证采集的数据真实可靠。

4.2 数据分析

我们对测井钻孔的物探曲线进行分析,划分出了灯影组含水段。以 ZK906 孔为例(见图 3),划分出 2 段含水段(I、II),I 段深度在 466.33 ~ 471.19 m,II 段深度在 484.01 ~ 489.41 m,I 段和 II 段自然伽马值均比较低,显示为灯影组白云岩,其次该段电阻率值低,双收时差值大,说明该段裂隙发育并含水。我们再分析钻孔施工在该深度处的动水位资料,I 段处动水位由 20 m 直接跌落至 180 m 左右,II 段处动水位由 180 m 跌落至 220 m 左右,动水位埋深值均有明显的变化,也说明该处裂隙发育,地下水活动强烈。

我们对每个测井钻孔的灯影组测井曲线和动水位曲线同时展示在柱状图上,发现物探测井划

分的含水位置(即裂隙发育,含水性较好),动水位曲线也有明显变化趋势,两者吻合较好。而测井曲线划分出的弱透水段(即岩石裂隙不发育,含水性差),动水位曲线基本呈直线,动水位埋深值基本没有变化。我们从测井钻孔中选择代表性较好的 ZK906 和 ZK1305 的测井曲线和动水位曲线进行结合划分含水段位置,见图 3 和图 4。

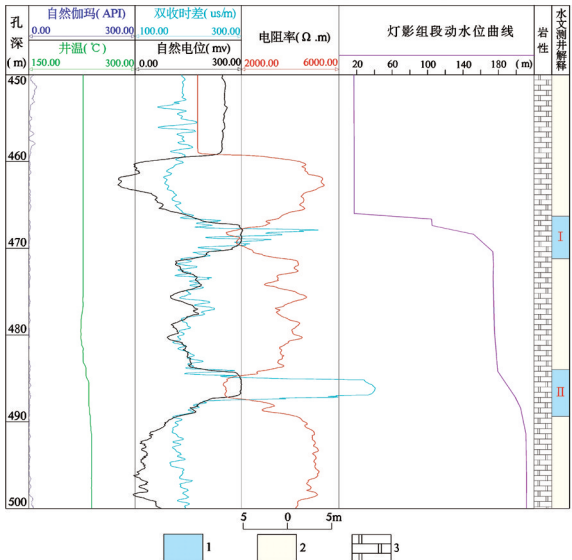


图 3 ZK906 测井曲线与动水位曲线图

Fig. 3 The Chart of Geophysical Log and Groundwater level in 906 Drilling well

1—含水段;2—弱透水段;3—白云岩

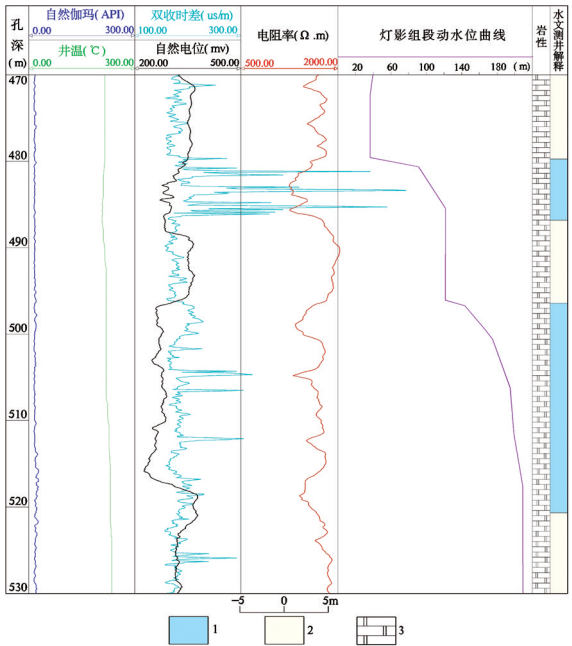


图 4 ZK1305 测井曲线与动水位曲线图

Fig. 4 The Chart of Geophysical Log and Groundwater level in 1305 Drilling well

1—含水段;2—弱透水段;3—白云岩

5 结果与讨论

5.1 灯影组弱透水段划分

根据物探测井曲线与动水位曲线,对灯影组白云岩段含水性划分具有较好的效果。根据现有物探资料和动水位资料,我们对 9 个物探测井孔的灯影组含水性进行了划分。通过细分发现,整个灯影组中下部存在一段裂隙发育差、含水性较差的弱透水层,将灯影组分成上下两段,根据统计,该段弱透水层厚度范围为 39.93 ~ 123.84 m,这段弱透水层的存在,使灯影组有效含水段 M 值变小,并在未来开采过程中一定程度上阻隔灯影组上段的地下水进入矿井。

表 1 灯影组中下部弱透水层统计表
Table 1 Backwater section in the middle of Dengying formation

钻孔编号	弱透水层埋深位置(m)	厚度值(m)	备注
ZK601	542.5 ~ 591.0	48.50	
ZK602	501.76 ~ 625.60	123.84	
ZK710	386.0 ~ 428.68	42.68	
ZK711	533.36 ~ 655.0	121.64	
ZK712	606.89 ~ 665.80	58.91	
ZK906	519.01 ~ 562.00	42.99	
ZK909	524.75 ~ 564.68	39.93	
ZK1111	444.48 ~ 521.50	77.02	
ZK1305	520.69 ~ 620.80	100.11	

5.2 灯影组含水特征

我们根据物探测井及动水位曲线划分出的灯影组含水段在空间上展布,发现灯影组含水主要与

岩石层间裂隙和隐伏发育的构造节理裂隙带有关。

倾向上对 ZK711 和 ZK712 含水段连线,夹角为 15°与岩石倾角基本一致,反映其含水与岩层层间发育的裂隙有关;倾向上对 ZK601 和 ZK602、ZK906 和 ZK909 的含水段进行连线,夹角分别为 29°和 45°,夹角远远大于岩层倾角,显示其含水段与隐伏发育的节理裂隙带有关。走向上对 ZK906、ZK1111 和 ZK1305 的含水段进行连线,基本分布在同一标高位置,说明其节理裂隙在走向上具有一定的延伸性,说明与隐伏发育的节理裂隙带有关。

ZK906 与 ZK909 分布的区域,隐伏节理裂隙带发育,测井人工盐化曲线很快恢复至背景值,说明含水段地下水活动强烈,经过 ZK909 抽水试验该层涌水量较大,进一步说明该区域为地下水集中径流带,为未来矿山开采需要防范的富水区域。

6 结论

(1)由于岩性和地下水对岩石溶蚀的差异,存在含水性分段特征,本文以福泉大湾磷矿床为例,结合测井曲线和钻孔简易水文观测划分灯影组含水段,证明灯影组存在含水性分段特征。

(2)钻孔物探测井和简易水文地质编录相结合的分析方法,对于贵州省内岩溶主要充水含水层厚度大、倾角陡的矿山,确定主要充水含水层的实际有效厚度,以及合理预测矿井涌水量有较大的指导意义。

(3)由于本次勘探过程水文测井数量较少,对于整个首采区灯影组含水性分段的精确划分,可能存在一定的不足。

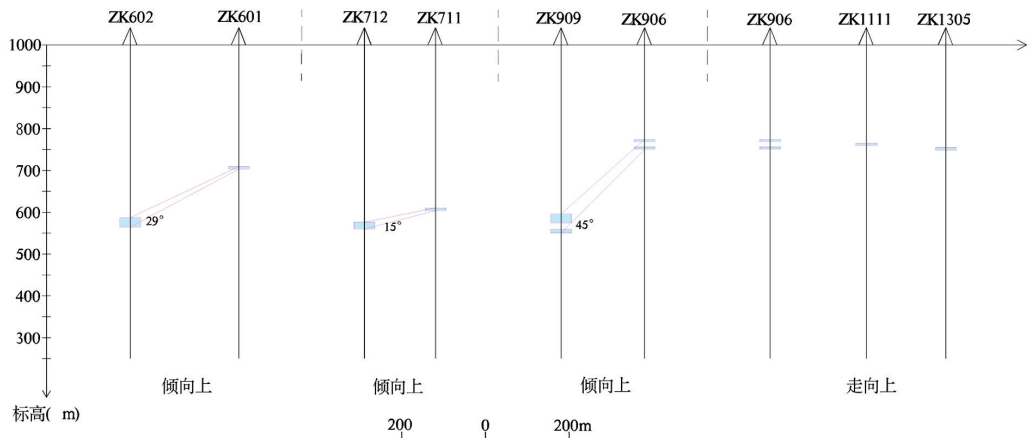


图 5 灯影组含水段对比图
Fig. 5 The contrast chat of water-bearing section in Dengying formation

[参考文献]

- 地质部水文地质工程地质技术方法研究队. 1978. 水文地质手册 [M]. 北京:地质出版社.
- 冯来泉. 2020. 物探测井在地热开发中的应用[J]. 地球学报, 21(2): 212-215.
- 贵州省地质矿产勘查开发局 104 地质大队. 2021. 贵州省福泉市大湾磷矿勘探报告[R].
- 郭崇光, 李振栓, 赵莹, 等. 2006. 水文地球物理测井方法与应用 [M]. 北京:煤炭工业出版社.
- 姜永生. 2000. 碳酸盐岩岩层地质物性特征及水文测井方法[J]. 河北建筑科技学院学报, 17(3): 83-86.
- 寇西昌. 1987. 贵州瓮福磷矿小坝矿段群孔抽水及其实用意义 [J]. 贵州地质, 4(2): 211-223.
- 骆森, 潘和平, 黄东山, 等. 2004. 地球物理测井在水文地质勘察中的应用综述[J]. 工程地球物理学报, 1(2): 136-145.
- 李治国. 1984. 瓮安磷矿磨坊矿段水文地质条件及矿坑涌水量预

- 算新方法的运用[J]. 贵州地质, 1(2): 77-91.
- 刘文凯, 彭国林, 等. 1994. 雪峰运动在瓮安白岩背斜的表现形式 [J]. 贵州地质, 11(1): 44-50.
- 宁黎元. 2012. 数值模拟查明地下水系统隐伏边界位置及其性质方法探讨[J]. 贵州地质, 29(1): 48-51.
- 王明章, 幸绍汉, 王清友, 等. 1991. 贵州省遵义市西北郊高坪水源地供水水文地质初勘报告[R]. 贵州省地质矿产局第二水文地质工程地质大队.
- 王明章. 1993. 贵州寒武系白云岩山间盆地型水源地混合模拟问题探讨[J]. 中国岩溶, 12(1): 33-44.
- 王明章, 张林, 王伟, 等. 2015. 贵州省岩溶区地下水与地质环境 [M]. 北京:地质出版社, 2015: 40-61.
- 王守国. 2010. 自然电位在水文地质测井中的应用研究[J]. 科技创新导报, 109(9): 65-65.
- 王鹏, 何景枝, 张阳, 等. 2019. 测井在水文地质勘察中的应用效果浅析[J]. 安徽地质, 29(4): 293-295.

Division of Water-bearing Property with Combination of Simple Hydrogeological Logging and Borehole Logging

——Take Dawan Phosphate Mine of Fuquan for Example

XIANG Gang, ZENG Mu-dan, WANG Jia-ming, CHEN Ti-yun, HE Yong-chuan,
ZHANG Hua, YANG Zi-lin

(104 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and
Development, Duyun 558000, Guizhou, China)

[Abstract] Based on exploratory boreholes for phosphate deposits in DaWan phosphate mine of Fuquan, Combined with the geophysical well logging data and the simple hydrologic dynamic water level curve of Dengying team, Complete the division of the water-bearing section of Dengying team in the mining area, to explore the hydrogeological water-filled Aquifer Aquifer division method in mining area. Finding out the water-bearing characteristics of dengying team in mining area, providing the hydrogeological technical basis for the prediction of mine water inflow and the prevention of Concentrated Water Inrush area in the future.

[Key Words] Water Cut Division; Moving water level; Geophysical Log; Phosphate mine of Dawan; Fuquan city

贵州六枝平桥萤石矿床与晴隆大厂锑矿床 含矿层特征的对比研究

陈 星^{1,2}, 陈昌阔¹, 黄 庆¹, 王 东^{1,2}, 王 彪¹,
王 均¹, 周丽芳¹, 温雪芹¹, 王士魁¹

(1. 贵州省地矿局 113 地质大队, 贵州 六盘水 553000; 2. 自然资源部基岩区矿产资源
勘查工程技术创新中心, 贵州 贵阳 550081)

[摘 要] 本文以贵州六枝特区平桥萤石(锂)矿重点矿产资源大精查项目为基础, 结合邻区大厂锑矿的硅化蚀变体特征进行对比研究, 对成矿规律进行了探讨和总结。二者在地理空间、大地构造位置、成矿区带均为邻近关系。均位于褶皱隆起区内, 且受层间构造控制影响。据重力解释成果推测二者深部均有中酸性岩浆岩隐伏。其硅化蚀变岩均位于碳酸盐岩/粘土岩界面之间, 与上、下地层均为不整合接触关系。其矿化组合体现与硅化等系列矿化蚀变密切相关的中低温矿物组合特征。在此基础上归纳总结了其“三位一体”成矿规律, 认为二者均以深部隐伏的中酸性岩体为成矿地质体; 以系列的碳酸盐岩/粘土岩界面为成矿结构面, 并形成地球化学、矿物组合等系列的成矿作用特征标志, “三位一体”成矿规律的总结为该区域远成低温热液型矿床的深部勘查提供了有益探索。

[关键词] 萤石; 锑; 硅化蚀变体特征; 矿化蚀变组合特征; 成矿规律; 贵州六枝; 晴隆大厂

[中图分类号] P619.21⁺5; P618.66 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1000-5943(2021)02-0213-07

近年来, 贵州省六枝特区平桥一带开展了大精查项目, 该萤石矿可达中型以上规模。通过工作发现平桥萤石矿体现出与晴隆县大厂锑矿具有相似或相近的成矿特征, 笔者通过对成矿区带、地层及接触关系、构造等成矿背景方面; 含矿层分布与背斜构造的相关性; 含矿层的内部岩性组合与垂向分带性; 矿(化)及近矿围岩蚀变特征等进行对比分析, 探讨该类型成矿结构面对该区低温热液矿床的找矿意义。

1 成矿地质背景对比

平桥萤石(锂)矿区南西约 40 km 为大厂锑、萤石矿区, 二者在地理空间、大地构造位置、成矿区带均为邻近关系。

平桥萤石(锂)矿区位于上扬子地块之威宁隆起区与兴义隆起区、六盘水裂陷槽的相邻部位, 即南盘江-右江成矿区北缘北东侧(戴传固等, 2013)。

大厂锑、萤石矿区位于上扬子地块之兴义隆起区近北缘, 成矿区带位于南盘江-右江成矿区北缘。

2 地层及接触关系对比

平桥及大厂矿区均位于扬子地层区黔南分区, 其硅化蚀变岩均位于岩性界面之间。

平桥区内出露地层及岩性主要为: 石炭-二叠系南丹组(C_{pn})泥晶灰岩; 二叠系龙吟组(P_{ly})炭质钙质粘土岩、泥灰岩; 包磨山组(P_{lb})灰岩、炭质泥岩。其中南丹组泥晶灰岩与龙吟组粘土岩之

[收稿日期] 2021-01-15 **[修回日期]** 2021-05-08

[基金项目] 贵州省财政资金专项资助项目、贵州省六枝特区平桥萤石(锂)矿详(终)查。

[作者简介] 陈星(1984—), 男, 高级工程师, 工程硕士, 长期从事铅、锌、锑、金等热液矿产的勘查研究。



图 3 大厂硅化角砾岩与上覆地层接触关系
Fig. 3 Contact relationship between Dachang silicified breccia and overlying strata

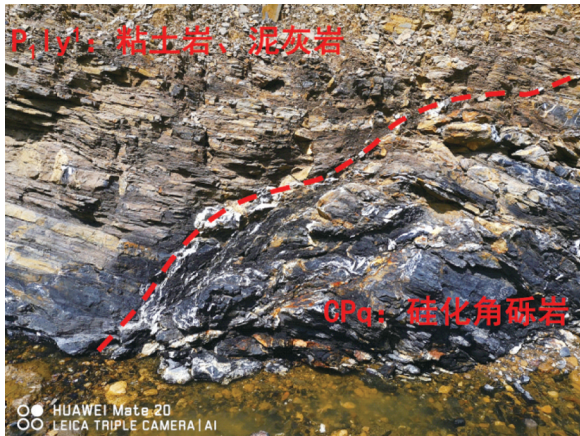


图 4 平桥硅化角砾岩与上覆地层接触关系
Fig. 4 Contact relationship between Pingqiao silicified breccia and overlying strata

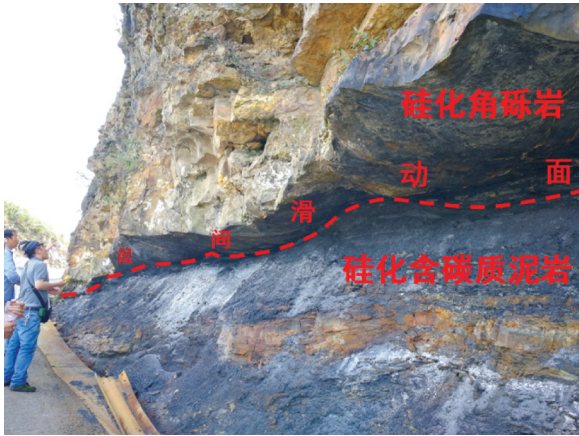


图 5 大厂硅化蚀变体中的层间滑动现象
Fig. 5 Interlaminar slip phenomenon in siliconized altered rock bodies in Dachang

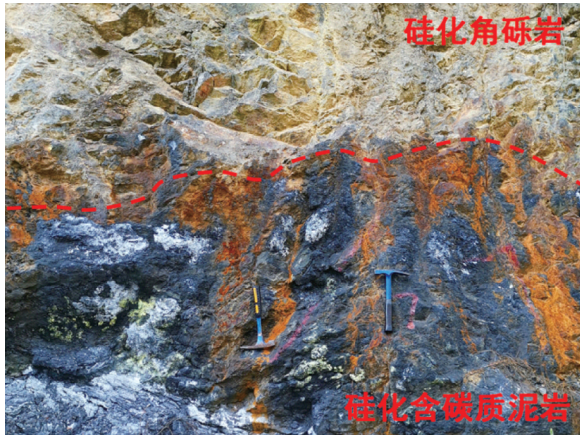


图 6 平桥硅化蚀变体中的硅化现象
Fig. 6 Silicidation in silicidation altered rock bodies in Pingqiao



图 7 大厂硅化角砾岩与下覆地层接触关系
Fig. 7 Contact relationship between Dachang silicified breccia and underlying strata

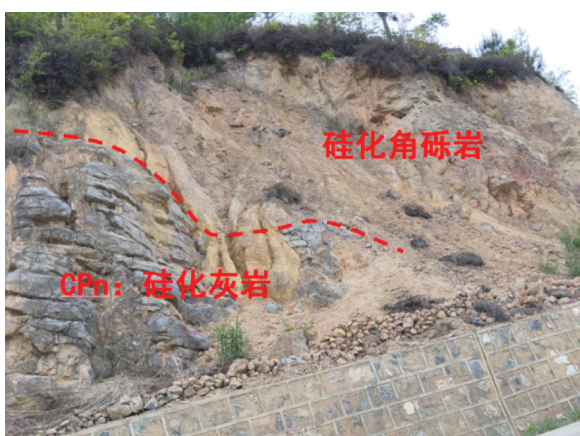


图 8 平桥硅化角砾岩与下覆地层接触关系
Fig. 8 Contact relationship between Pingqiao silicified breccia and underlying strata

大厂区内总体构造形态受大厂穹窿控制,核部地层为茅口组(P_2m),翼部地层为硅化蚀变岩、峨眉山玄武岩组($P_{2-3}em$)和龙潭组(P_3l)等。穹窿长轴近北西向,长宽之比约为 1:0.8,南东翼被青山镇断层所截,核部地层平缓(倾角 $\leq 5^\circ$),穹窿边缘地层倾角为 $15^\circ\sim 25^\circ$ 。大厂穹窿内的北东向花鱼井断层、青山镇断层、马场断层组合为地垒—地堑式构造,上述断层走向 $40^\circ\sim 65^\circ$,倾向南东或北西,倾角 $40^\circ\sim 75^\circ$ 。

4 火成岩特征对比

平桥及大厂矿区均位于峨眉山玄武岩组尖灭部位,据重力解释成果推测其深部均有中酸性岩浆岩隐伏。平桥地区据科研成果推测隐伏有中酸性岩浆岩(S 贵-020)(图 2)。大厂地区亦推测有中酸性岩浆岩隐伏,该侵入酸性岩体深约为 2.1 km,底深约为 8.5 km,平面形态显示,岩体整体呈向西北开口的“V”字型。(屈念念 等,2016)

5 硅化蚀变体特征对比

平桥及大厂的硅化蚀变体顶部均为硅化粘土岩或粘土岩,其对含矿流体的活动具有屏蔽作用。其下灰岩岩层在成矿热液作用下蚀变为硅化、角

砾岩化蚀变体,为含矿流体运移、成矿提供了条件(刘建中 等,2020)。(图 3-8)

通过野外调查,在平桥一带,硅化蚀变体发育于龙吟组底部粘土岩与南丹组泥晶灰岩之间,为一套含萤石、砷、金等元素的碎裂状角砾状强硅化蚀变体(层)(图 9)。近矿围岩蚀变主要为硅化,次有黄铁矿、方解石、地开石等蚀变矿物,局部见雌雄黄和金矿化,萤石以硅化蚀变体中下部强硅化角砾岩最为富集,萤石矿体呈透镜状、似层状产出,矿体产状与地层产状基本一致。以 II-I 号萤石矿体为例,其沿走向延伸约 1 000 m,沿倾向延伸约 430 m。矿体厚度 1.01~6.08 m,平均厚度 2.08 m。 CaF_2 品位 15.20%~51.02%,平均品位 28.35%。黄铁矿多呈星散状产出,少量呈脉状产出。方解石、地开石一般呈细脉状穿层或顺层产出。雌雄黄矿化一般在蚀变体顶部成脉状或团块产出,呈桔红色或黄色,经见雌雄黄部位取样分析,As 含量一般在 1%~2.38%,雌雄黄样品经分析测试 Au 含量一般在 $0.5\times 10^{-6}\sim 6.8\times 10^{-6}$,但分布零星,雌雄黄矿化及金矿化目前暂未发现具有工业意义的矿体。锂绿泥石分布在硅化蚀变体(层)上部的粘土岩和泥灰岩中(初步推测其与沉积作用相关), Li_2O 含量在 0.20%~1.10%,一般在 0.30%左右,因锂绿泥石难选,在当前技术经济条件下开发利用不经济,尚属暂难利的资源。

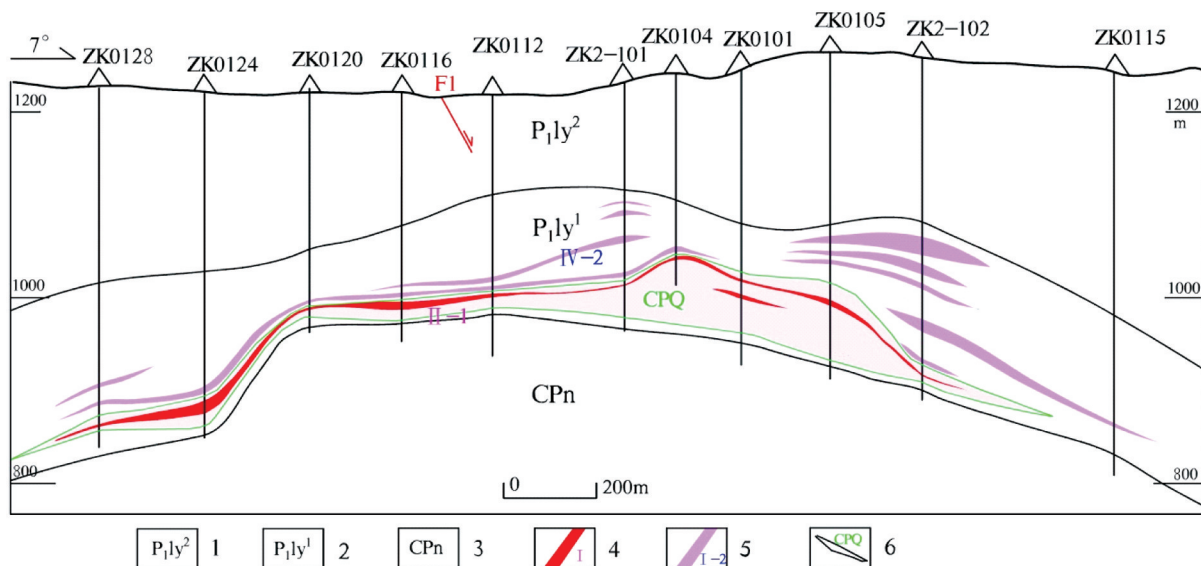


图 9 平桥 L01 勘探线矿体形态示意图

Fig. 9 Schematic diagram of ore body shape of Pingqiao L01 exploration line

1—龙吟组二段;2—龙吟组一段;3—南丹组;4—萤石矿体及编号;5—锂矿化体及编号;6—硅化蚀变带

在大厂一带,硅化蚀变体发育于峨眉山玄武岩底部的强硅化粘土岩与茅口灰岩之间,为一套含锑、萤石、金等元素的碎裂状角砾状强硅化蚀变体(层)。(刘建中 等,2010)近矿围岩蚀变主要为辉锑矿化、硅化、萤石化、黄铁矿化、高岭石化,此外还有方解石化、绿泥石化、金矿化等,其均与硅质蚀变岩密切相关。锑矿体呈似层状、透镜状产出,产状与地层产状基本一致,最大单矿体长达300~760 m,宽155~300 m,厚0.86~3.80 m,Sb品位0.68%~5.28%,平均品位3.02%(胡思琴 等,2016)。萤石

矿体呈透镜状、似层状产出,矿体产状与地层产状基本一致。矿体一般长80~965 m,宽65~180 m,厚0.5~3.41 m,CaF₂品位25.92%~41.35%。(甘朝勋,1996)金矿化蚀变体一般产于硅化蚀变体顶部的强硅化粘土岩中,矿体呈透镜体产出,产状与地层产状基本一致。(王均 等,2016)金矿化蚀变体长150~800 m,厚0.35~2.1 m,宽80~300 m,含金1.00~1.98 g/t。黄铁矿一般呈脉状、星散状产出,方解石、地开石一般呈脉状穿层或顺层产出(刘建中 等,2017)。

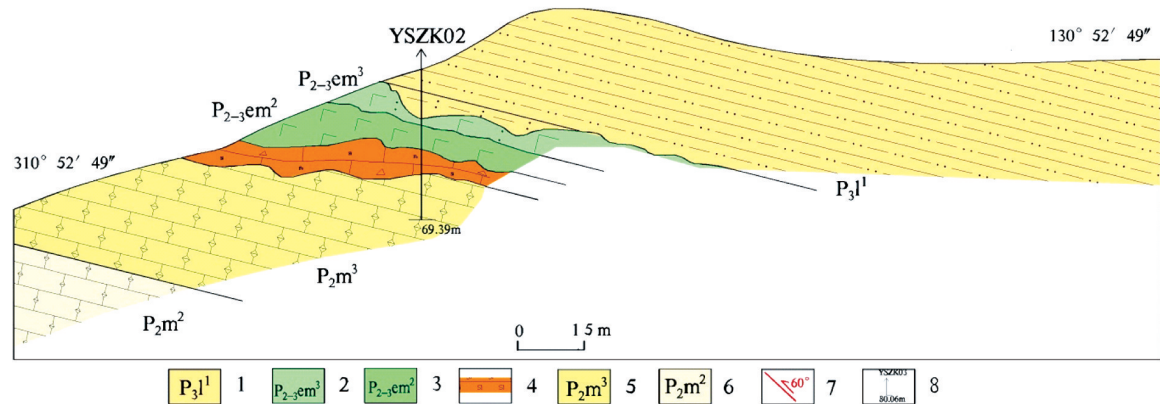


图 10 晴隆大厂 3-3剖面线矿体形态示意图

Fig. 10 Schematic diagram of ore body shape of Qinglongdachang 3-3 ~ exploration line

1—龙潭组一段;2—峨眉山玄武岩三段;3—峨眉山玄武岩二段;4—硅化蚀变带;5—茅口组三段;6—茅口组二段;7—逆断层;8—钻孔及编号

6 矿化蚀变垂向组合特征对比

平桥萤石矿与大厂锑、萤石矿的矿化组合极其相似,体现与硅化等系列矿化蚀变密切相关的中低温矿物组合特征(见图 11)。其特征如下:

岩 性		矿 化 蚀 变	
		平 桥	大 厂
粘土岩		锂绿泥石化	黄铁矿化
硅化粘土岩		弱黄铁矿化	金矿化 绿泥石化 地开石化
硅化角砾岩		萤石矿化	辉锑矿化
		方解石化	萤石矿化
		白云石化	黄铁矿化
		地开石化	方解石化
		黄铁矿化	地开石化
硅化灰岩		弱雄、雌黄矿化	石膏矿化
		弱金矿化	弱辰砂矿化
		弱黄铁矿化	弱雄、雌黄矿化
灰岩			弱辉锑矿化
泥晶灰岩			

图 11 平桥与大厂岩性及矿化组合对照简图

Fig. 11 Comparison diagram of lithology and mineralization combination between Pingqiao and Dachang

硅化蚀变体顶部(粘土岩):
平桥一带硅化蚀变体顶部粘土岩硅化不强烈,锂绿泥石化较强,见少量星散状、浸染状黄铁矿发育。

大厂一带硅化蚀变体顶部粘土岩硅化、绿泥石化强烈发育,含大量星散状、脉状黄铁矿,在廖基、沙子岭等地可见金矿化(张永志 等,2004)。

硅化蚀变体(硅化角砾岩):
平桥一带硅化蚀变体中见强烈的萤石矿化,见黄铁矿呈星散状、细脉状发育,镜下可见大量白云石化,方解石、地开石呈细脉状、团块状发育。有弱雄、雌黄矿化、弱金矿化。

大厂一带硅化蚀变体中见强烈的辉锑矿化、萤石矿化、黄铁矿化。可见方解石、地开石呈细脉状、团块状发育,可见石膏矿化。有弱石膏矿化、弱辰砂矿化、弱毒砂矿化、弱雄、雌黄矿化(苏成鹏 等,2019)。

硅化蚀变体底部(硅化灰岩):
平桥一带硅化蚀变体底部见弱黄铁矿化。
大厂一带硅化蚀变体底部见弱辉锑矿化、弱黄铁矿化。

7 “三位一体”成矿规律对比浅析

平桥及大厂地区在区域上属于南盘江-右江成矿区北缘,该区域分布一系列远成低温热液矿床,笔者初步认为六枝平桥萤石(锂)矿亦为该类型矿床。

7.1 成矿地质体

六枝平桥萤石矿:据区域重力推断分布有酸性岩体(S贵-020),目前发现的萤石矿化蚀变位于酸性岩体分布范围内。

大厂锑、萤石矿:据最新1:10万重力数据解译,其深部存在呈向西北开口的“V”字型中酸性岩体,推测深部隐伏的中酸性岩体为大厂锑(萤石)矿的成矿地质体。

7.2 成矿结构面

六枝平桥萤石矿:萤石矿产于硅质蚀变体内,其成矿结构面主要位于石炭系南丹组与二叠系地层龙吟组之间,沿九层山背斜核部呈透镜状分布。主要由弱硅化粘土岩、硅化角砾岩和硅化灰岩组成。

大厂锑(萤石)矿:锑矿及萤石、硫铁矿等矿产产于硅质蚀变体内,其成矿结构面主要位于茅口组灰岩顶部至峨眉山玄武岩组之间,沿大厂穹隆呈似层状分布。主要由硅化粘土岩、硅化角砾岩和硅化灰岩组成(谭华,2019)。

7.3 成矿作用特征标志

①矿体的宏观特征

二者矿体均为似层状、透镜状,产出形态与地层产状基本一致,矿体规模大小不一。

②矿物组合特征

六枝平桥萤石矿:萤石矿化、黄铁矿化、白云石化、方解石化、地开石化、雌雄黄矿化、金矿化。

大厂锑(萤石)矿:辉锑矿化、萤石矿化、黄铁矿化、方解石化、地开石化、石膏矿化、辰砂矿化、毒砂矿化、雌雄黄矿化、金矿化(宋正刚,2021)。

③地球化学特征标志

大厂锑(萤石)矿:以Sb-F-Hg-Au-As等元素异常为地球化学标志(王永健,2020)。

六枝平桥萤石矿:以F-Li-As-Sb-Tl-Ba等

元素异常为地球化学标志。

8 结论

六枝平桥萤石(锂)矿与大厂锑(萤石)矿在地理空间、大地构造位置、成矿区带均为邻近关系。均位于褶皱隆起区内,且受层间构造控制影响。据重力解释成果推测二者深部均有中酸性岩浆岩隐伏。其硅化蚀变岩均位于碳酸盐岩/粘土岩界面之间,与上、下地层均为不整合接触关系。其矿化组合体现与硅化等系列矿化蚀变密切相关的中低温矿物组合特征。在此基础上归纳总结了其“三位一体”成矿规律,认为二者均以深部隐伏的中酸性岩体为成矿地质体;以系列的碳酸盐岩/粘土岩界面为成矿结构面,并形成地球化学、矿物组合等系列的成矿作用特征标志,“三位一体”成矿规律的总结为该区域远成低温热液型矿床的深部勘查提供了有益探索。

[参考文献]

- 戴传固,陈建书,王敏,等. 2013. 试论贵州构造单元的划分[A]. 青岛地质学会. 中国东部和海地地质特征及资源环境学术研讨会[C]. 青岛:青岛地质学会,63-54.
- 甘朝勋. 1996. 贵州的萤石资源及其远景评述[J]. 贵州地质, 1996(01):76-85.
- 胡思琴,胡元举. 2016. 贵州省晴隆锑矿成矿规律探讨[J]. 企业技术开发,35(09):176-178.
- 刘建中,杨成富,夏勇,等. 2010. 贵州西南部台地相区Sbt研究及有关问题的思考[J]. 贵州地质,27(03):178-184.
- 刘建中,夏勇,陶琰,等. 2014. 贵州西南部SBT与金、锑矿成矿找矿[J]. 贵州地质,31(4):267-272.
- 刘建中,李建威,周宗桂,等. 2017. 贵州贞丰—普安金矿整装勘查区找矿与研究新进展[J]. 贵州地质,34(04):244-254.
- 刘建中,王泽鹏,杨成富,等. 2020. 中国南方卡林型金矿多层次构造滑脱成矿系统[J]. 中国科技成果,7(472):49-51.
- 刘增铁,刘远辉,周琦,等. 2015. 中国重要成矿区带成矿特征、资源潜力和选区部署-南盘江-右江成矿区[M]. 北京:中国原子能出版社.
- 李明道. 2008. 贵州晴隆大厂晚二叠世初期河流相沉积特征——兼论与上下地层接触关系[J]. 贵州地质,2008(03):166-170.
- 屈念念,姚炼,朱大友,等. 2016. 贵州中东部中酸性侵入岩体圈定及三维空间形态研究[J]. 贵州地质,33(2):267-272.
- 苏成鹏,刘建中,宋威方,等. 2019. 贵州晴隆大厂锑矿构造蚀变体元素地球化学特征[J]. 矿产勘查,10(02):217-223.
- 宋正刚. 2021. 贵州晴隆栗山萤石矿的矿床地质特征及其找矿标志[J]. 西部资源,2021(02):52-53+56.
- 谭华. 2019. 贵州省晴隆县后坡南锑矿地质特征及控矿因素[J].

- 世界有色金属,2019(10):218-220.
王均,薛洪富,张振兵,等.2016.晴隆大厂锑矿区地质工作新方向探讨[J].资源信息与工程,31(05):33-34.
王永健.2020.黔西南晴隆山金矿床地质及找矿标志[J].西部探矿工程,32(06):175-177.
张永志,郑懋荣.2004.贵州省晴隆县金矿成矿特征及找矿方向[J].贵州地质,2004(02):99-105.

Comparative Study of the Characteristics of Ore-bearing Strata in Pingqiao Fluorite Deposit in Liuzhi and Dachang Antimony Deposit in Qinglong of Guizhou

CHEN Xing^{1,2}, CHEN Chang-kuo¹, HUANG Qing¹, WANG Dong^{1,2}, WANG Biao¹, WANG Jun¹,
ZHOU Li-fang¹, WEN Xue-qin¹, WANG Shi-kui¹

(1. 113 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology & Mineral Exploration and Development, Liupanshui 553000, Guizhou, China; 2. Engineering Technology Innovation Center of Mineral Resources Explorations in Bedrock Zones, Ministry of Natural Resources, Guiyang 550081, Guizhou, China)

[Abstract] In this paper, based on the project of the exact survey on the key mineral resources of the Pingqiao fluorite(lithium) deposit in Liuzhi Special Zone, Guizhou, combined with the characteristics of the silicified and altered variants of the Dachang antimony deposit in the neighboring area, a comparative study is carried out to explore and summarize the metallogenic regularity. The two are adjacent in terms of geographic space, tectonic location, and metallogenic zone; their silicified and altered rocks are located between the carbonate/claystone interface, and are in unconformity contact with the upper and lower strata; both of them are located in the fold-uplift area, controlled and affected by the interlayer structure; both have intermediate-acid magmatic rocks concealed in the deep part according to the results of gravity interpretation; the mineralization combinations of the two are very similar, which shows the medium and low temperature mineral assemblage characteristics that are closely related to the series of mineralization and alteration such as silicification; on this basis, the "trinity" metallogenic regularity of the two is summarized, and it is believed that the deeply concealed intermediate-acid rock mass is the metallogenic geological body; based on the series of carbonate rock/clay-rock interface is a metallogenic structure surface, and a series of metallogenesis characteristic indications such as geochemistry and mineral assemblage are formed. The summary of the "trinity" metallogenic regularity provides a useful exploration for the deep exploration of telethermal low-temperature deposits in this area.

[Key Words] Fluorite; Antimony; Characteristics of the Silicified and Altered Variants; Characteristics of the Mineralized and Altered Combinations; Metallogenic Regularity; Liuzhi; Guizhou; Qinglong Dachang

贵州天柱寨脚重晶石成矿地质特征及成矿模式

罗邦良, 刘 灵, 石庆鹏, 夏 瑞, 周宗赞, 杨贵龙, 林泽渊

(贵州省地矿局 101 地质大队, 贵州 凯里 556000)

[摘 要] 通过天柱寨脚重晶石矿大精查, 在寨脚-甲木冲一带老堡组顶部发现顺层产出的火山凝灰岩夹碳酸盐岩(灰岩)透镜, 为重晶石海底喷流成因提供新的证据。通过钻孔岩心和露头沉积学特征观察, 在重晶石矿床中见到丰富的滑塌构造、碎屑流构造和浊流构造, 表明重晶石在喷流口初步堆积后, 受到同沉积地质营力如地震、风暴作用形成震积岩, 沿着斜坡向沉积盆地中心迁移并最终堆积成矿, 形成大型、超大型的重晶石矿床。因此, 重晶石矿床成因类型为海底喷流沉积矿床, 建立斜坡水下重力流扇成矿模式。

[关键词] 重晶石; 地质特征; 沉积盆地; 成矿模式; 天柱寨脚

[中图分类号] P619.25⁺1 [文献标识码] A [文章编号] 1000-5943(2021)02-0220-09

1 引言

天柱寨脚重晶石矿位于大河边重超大型晶石矿床北缘, 为其矿床的延伸部分。对于天柱大河边重晶石矿床受地学界广泛关注, 长期以来研究主要是对矿床成因、成矿物质来源、地球化学特征及成矿背景等进行较多研究, 研究者有: 涂光炽, 1987; 余洪云, 1988; 李文炎 等, 1990; 彭军 等, 1999; 吴朝东 等, 1999; 方维萱 等, 2002; 吴卫芳 等, 2009; 夏菲 等, 2004, 2005; 孙学通 等, 2005; 杨瑞东 等, 2007; 魏怀瑞 等, 2009; 杨义录, 2010; 陈建书 等, 2011; 侯东壮 等, 2014, 2015; 韩善楚 等, 2014; 刘灵 等, 2015, 2017; 孙泽航 等, 2015; 王富良 等, 2020。尽管前人研究成果较多, 但是对矿床地质特征、成矿作用与矿床模式的认识不够。

本文在前人研究的基础上, 以贵州省天柱县寨脚重晶石矿大精查为依托, 通过收集天柱寨脚重晶石矿床的含矿岩系特征、沉积学特征, 进行含矿岩系厚度和矿体厚度统计, 分析控矿因素, 建立

矿床模式。

2 矿床地质特征

矿床位于扬子陆块东南缘, 江南造山带西侧。区域构造位于坪地-贡溪复式向斜南东翼, 受其影向发育冲坑向斜和麻栗背斜两条次级褶皱, 以及北东向、北北东向和断裂构造。区内出露地层主要为南华系南沱组、震旦系陡山沱组 and 老堡组、寒武系九门冲组、变马冲组、杷榔组、乌训组、敖溪组和车夫组(图 1)。

2.1 赋矿地层及含矿岩系

区内重晶石矿赋存于震旦-寒武系老堡组(Z_2 $\epsilon_1 l$)。含矿岩系为黑色硅质岩、炭质页岩夹灰色重晶石岩及碳酸盐岩。其上部为黑色薄层硅质岩夹黑色炭质(有机质)页岩夹灰岩透镜体, 其顶为含重晶石、磷质、硅质结核炭质页岩, 称“上结核层”; 中部为灰色条纹状重晶石夹花斑状、块状重晶石及含钙重晶石、炭质泥岩和灰岩透镜体; 下部为黑色薄至中层硅质岩夹少量炭质页岩, 局部见重

[收稿日期] 2021-01-23 [修回日期] 2021-04-28

[基金项目] “贵州省重要矿产大精查资助—贵州省天柱县寨脚重晶石矿详查(项目序号: 2020-7)”和“贵州天柱坪地向斜重晶石矿层找矿模式与深部三维预测研究”。

[作者简介] 罗邦良(1988—), 男, 地质工程师, 主要从事矿产勘查。

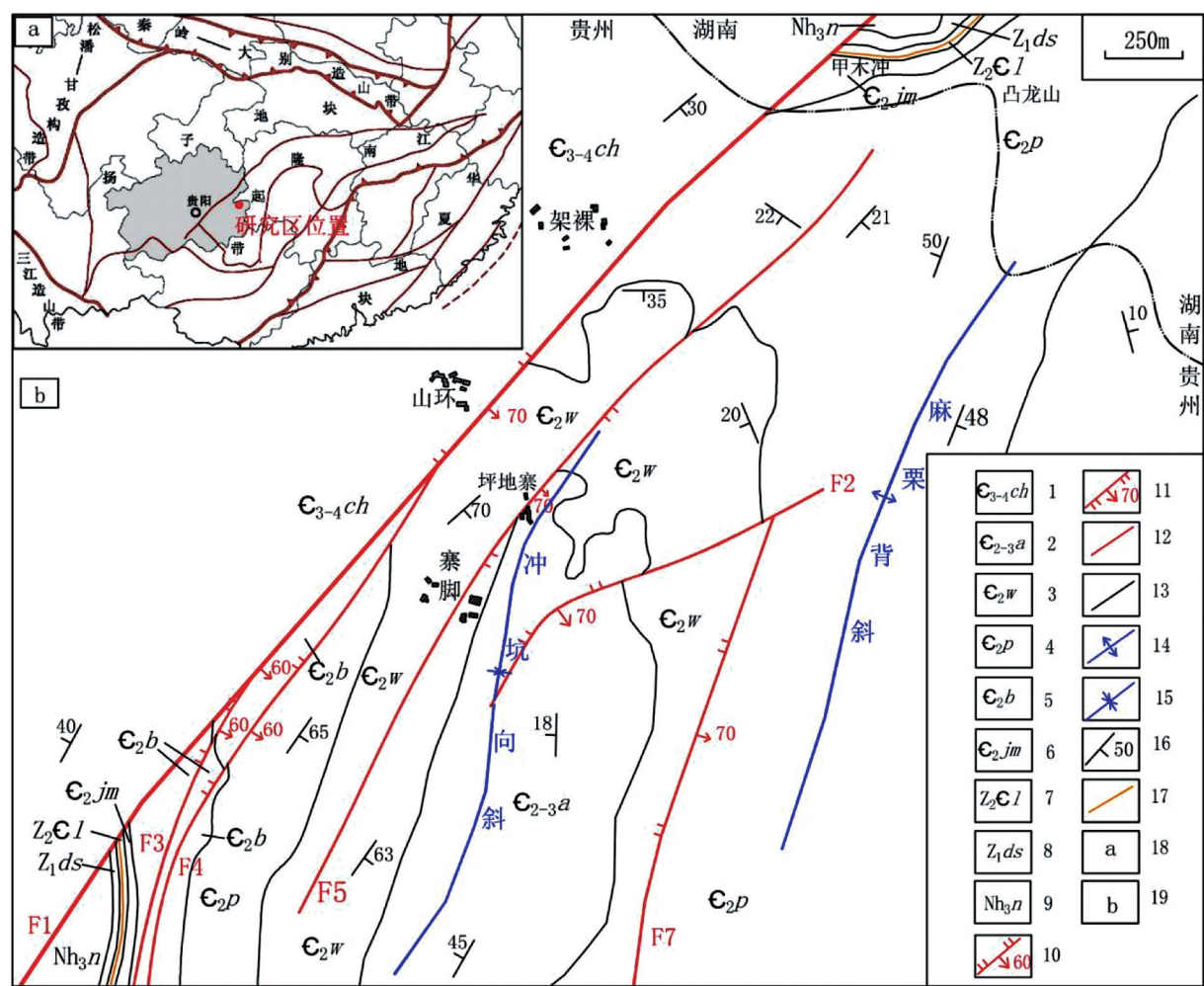


图1 天柱寨脚重晶石矿床地质略图

Fig. 1 Geological map of Zhaijiao barite deposit in Tianzhu

1—夫组,2—敖溪组,3—乌训组,4—杷榔组,5—变马冲组,6—九门冲组,7—老堡组,8—震旦系下统陡山沱组,9—南沱组,10—逆断层,11—正断层,12—性质不明断层,13—地质界线,14—背斜,15—向斜,16—岩层产状,17—重晶石矿层露头,18—大地构造位置图,19—研究区地质图

晶石结核,即“下结核层”不稳定。综合区内勘探钻孔资料,含矿岩系剖面自上而下为:

上覆地层:寒武系下统九门冲组(E_{2jm})灰黑色含钙粉砂质泥岩。

-----整合接触-----

老堡组($Z\epsilon l$)(厚度 1.60~12.66 m)。

⑥黑色、灰黑色含重晶石结核薄层硅质岩夹炭质页岩,习称“上结核层”。厚度 0.30~1.4 m。

⑤灰色、深灰色纹层状重晶石矿夹块状重晶石矿,为区内主要重晶石矿

层,其中块状重晶石含较多方解石团块而呈“花斑状”构造。个别钻孔重晶石矿层夹炭质页岩及含重晶石细晶灰岩。厚度 0.38~4.62 m。

④黑色、灰黑色薄层含重晶石结核硅质岩夹炭质页岩,习称“下结核层”。厚度 0.00~1.0 m。

③黑色薄-中层硅质岩夹炭质页岩,顶部为薄层硅质

岩与炭质页岩互层,为主要钒矿层位。厚度 2.4~13.64 m。

②黑色炭质泥岩夹少量薄层硅质岩。厚度 0.50~1.90 m。

①灰黑色薄层含纹层状浸染状黄铁矿粉砂质泥岩夹角砾状硅质岩。厚度 0.00~0.21 m。

-----整合接触-----

下伏地层:震旦系陡山沱组(Z_1ds)灰色中厚层泥质白云岩。

2.2 矿体规模、形态及产状

重晶石矿体分布于冲坑向斜的两翼,矿体走向总体北东 45°(图 2)。南东翼的矿体倾向北西,倾角一般 10°~30°,平均 20°,矿体走向长 1 200 m,倾向延伸宽 540 m。最大厚度 4.62 m,最小厚度 0.84 m,平均厚 2.80 m,以 F_2 断层为矿体边界;北

西翼矿体倾向南东,倾角一般 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$,平均 12° ,矿体走向长 1 600 m,倾向延伸宽 400 m,最大厚度

3.45 m,最小厚度 1.27 m,平均厚度 2.38 m,以 F₁断层为矿体边界。

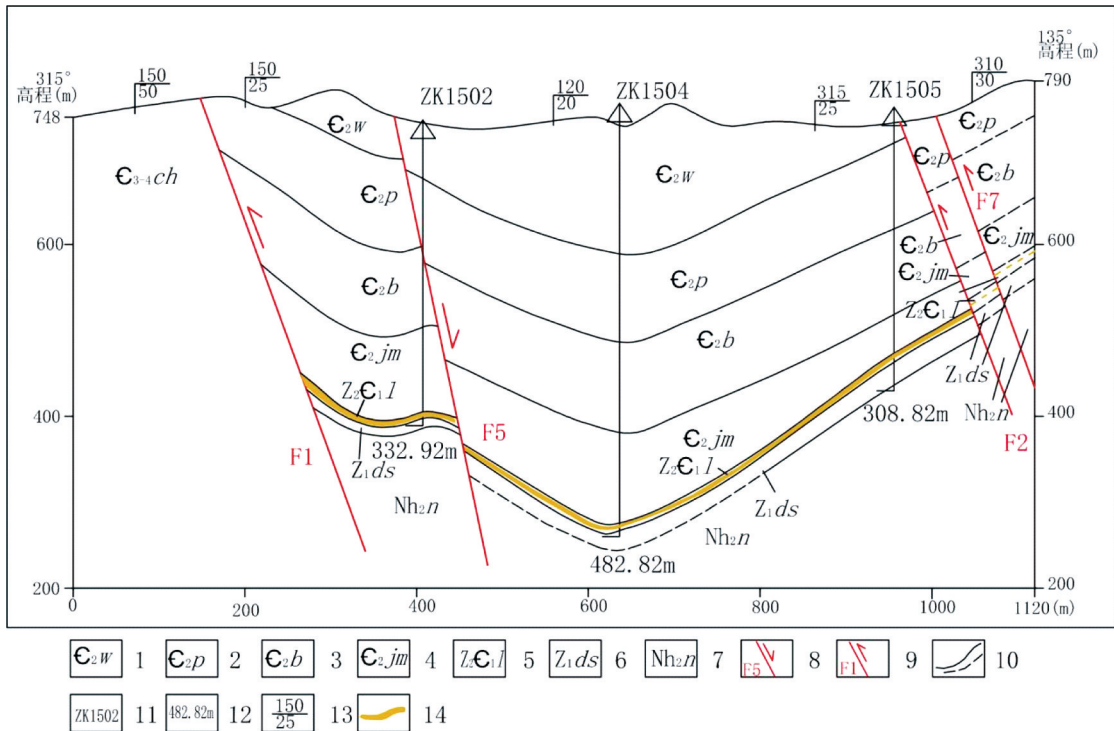


图 2 天柱寨脚重晶石矿床勘查 15'~15'号勘探线剖面图

Fig. 2 Profile of No. 15'-15' Exploration Line in Zhaijiao Barite Deposit Exploration in Tianzhu

1—乌训组;2—耙郎组;3—变马冲组;4—九门冲组;5—老堡组;6—陡山沱组;7—南沱组;8—正断层及编号;9—逆断层及编号;10—实测及推测地层界线;11—钻孔编号;12—钻孔深度;13—地层产状;14—矿体

2.3 矿石特征

矿石矿物主要为重晶石,脉石矿物主要为方解石、白云石、黄铁矿、炭质-粘土质和微量石英-玉髓。主要矿物重晶石呈它形-半自形粒状结构,在矿石中主要以基底和裂隙两种形式赋存,其中基底赋存约占 85%,裂隙充填式占 2%;据岩矿观察,常有两期结晶的重晶石矿物的生成顺序,即早期为结晶粒度细的重晶石颗粒;晚期为结晶粒度较粗的重晶石矿(图 3a),可能为后期热液蚀变重结晶产物。方解石和白云石以内碎屑、孔隙、填隙和裂隙四种形式赋存,矿物含量因矿石类型不同有差异;黄铁矿和有机质主要以基底式赋存,含量 1%~2%。

矿石主要组分为 BaSO₄,单工程品位为 32.06%~98.06%,平均品位为 85.58%;工程平均品位为 48.53%~96.55%,平均品位 85.56%;块段平均品位 78.64%~87.17%,平均品位 84.97%。矿石有害组分有含 SiO₂: 0.46%~11.22%,Al₂O₃: 0.15%~3.18%,Fe₂O₃: 0.41%~3.69%,CaO: 0.39%~2.94%,MgO: 0.20%~

2.20%,水溶盐:0.46%~0.75%。当矿石中 CaO、SiO₂ 含量增高,BaSO₄ 品位则相对降低。

矿石结构有粒状结构、粉-细晶结构、藻砂屑结构、碎裂结构及交代熔蚀结构等。粒状结构主要由不同粒度重晶石呈层偏集分布(图 3b);粉-细晶结构由重晶石、方解石矿物均匀分布,具重结晶现象(图 3c);藻砂屑结构由内碎屑和填隙物两部分组成(图 3d;碎裂结构由碎块及填隙物两部分组成。

矿石构造有条纹状、滑塌变形、块状、花斑状和结核状等。条纹状构造由重晶石的深灰色条纹与灰黑色炭质有机质条纹互层(图 3e),条纹宽 1~2 mm。少数 4~5 mm,多数层纹发生变形;滑塌变形层理受重力滑塌作用,使原来纹层产生塑性流动形成的一种构造特征(图 3f);块状构造由重晶石晶粒组成致密块状构造;花斑状构造由块状重晶石碳酸盐化后被方解石、白云石充填或交代的构造,矿石中的浅色斑块为重晶石的残余物;结核状构造由饼状、透镜状重晶石赋于炭质页岩中形成一种构造。

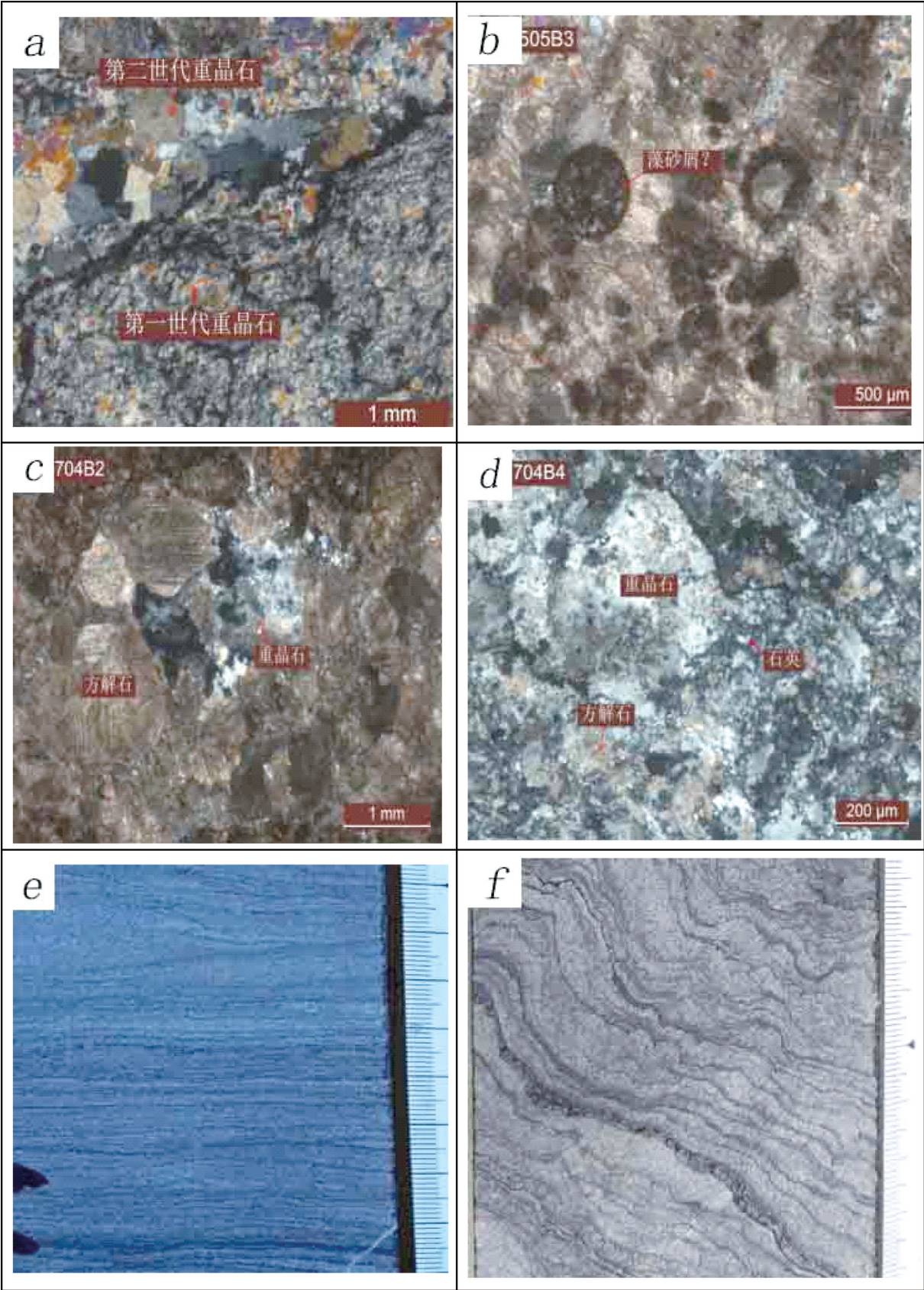


图 3 天柱寨脚重晶石矿床矿石典型结、构造特征

Fig. 3 Characteristics of Typical Nodules and Structures of Barite Deposit in Zhaijiao of Tianzhu
a—两期结晶的重晶石;b—藻砂屑结构;c—花斑状结构;d—半自形粒状结构;e—纹层(条纹)层理构造;f—滑塌褶皱变形层理

矿石类型主要有条纹状、块状、花斑状和结核状。条纹矿石一般出现在矿层下部和上部,以它形-半自形粒状结构为主,具层纹、条纹构造;块状矿石主要赋存于矿层中部,以碎裂状、砂屑结构为主,局部见于矿层下部;花斑状矿石位于矿层中部,以交代溶蚀结构为主,具孔隙、溶隙构造;结核状矿石主要位于矿层顶板或底板,以它形-半自形粒状结构和条柱状结构。

后期围岩蚀变主要见碳酸盐化、重结晶及泥炭化等。碳酸盐化:主要表现为方解石和白云石,在矿石中常见方解石、白云石呈细脉、网脉充填。矿石以花斑状矿石为主,氧化呈溶孔状及斑状构造。重结晶:矿石重结晶表现为重晶石晶粒变大,

主要呈板状及放射状晶体。泥炭化:在矿石中常见黑色有机质、炭质包裹体和泥质条带,矿石以条带状矿石为主,导致矿石品位普遍偏低。

3 沉积盆地特征

3.1 含矿岩系厚度变化规律

根据寨脚矿区及其临近矿区含矿岩系分布情况。区内含矿岩系厚度最厚 11.76 m, 最薄 1.6 m, 形成一个近东西向瘤状块体(图 4), 中间厚边缘薄, 可能在含矿岩系沉积成岩阶段该区域有一个东西向的盆地。盆地中心位于寨脚-高吊之间。

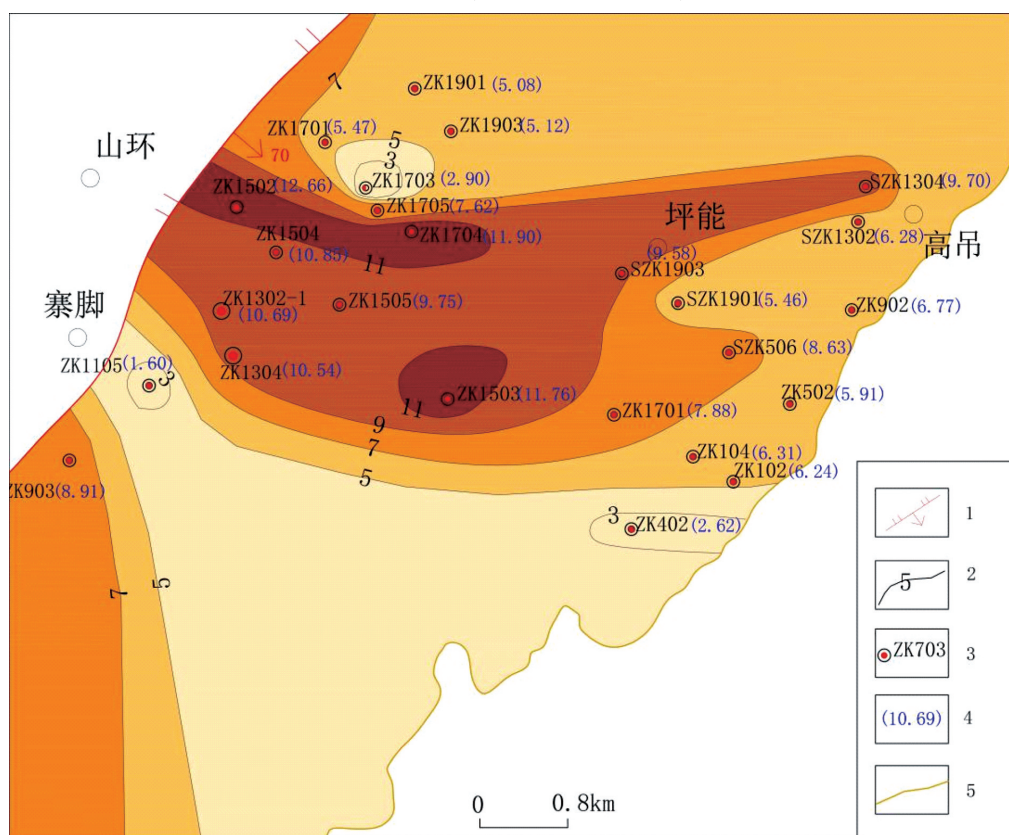


图 4 寨脚重晶石矿床含矿岩系厚度等值线图

Fig. 4 The straight line of the thickness of ore-bearing rock series in Zhaijiao barite deposit

1—逆断层;2—含矿岩系厚度等值线;3—见矿钻孔及编号;4—含矿岩系厚度(m);5—矿体路头线

区内含矿岩系厚度及岩性特征变化规律表现为,即矿区中部厚度较大,岩性组合齐全,其下部为黑色薄层硅质岩夹炭质页岩,中部为层纹状、块状、花斑状重晶石,一般块状矿石厚度较多;上部为黑色炭质页岩夹重晶石、磷质、硅质结核;在矿区南西部厚度 1.60~8.91 m,岩性组合下部为黑色硅质岩夹少量炭质页岩;中部层纹状重晶石夹花斑状重晶石,一般纹层状矿石较多;上部为黑

色炭质页岩夹重晶石、磷质及硅质结核,结核顺层分布;矿区北东部厚度 2.9~5.47 m,岩性组合下部为黑色硅质岩夹白云岩透镜体;中部为纹层状重晶石夹硅质岩及碳酸盐岩;上部为黑色炭质页岩夹重晶石、磷质、硅质结核,结核顺层分布。

3.2 矿体厚度变化规律

根据矿区及邻区钻孔统计矿体厚度在 0.38

~4.62 m 之间,绘制矿体等值线图,其等值线形成一个近东西瘤状块体(图 5),矿体中间厚边缘薄,中心位于寨脚-高吊之间,与含矿岩系厚度分布规律接近吻合,重晶石矿沉积厚度与沉积盆地古地貌地形关系密切,可能为近东西向接近沉积盆中心的矿体厚度变大。

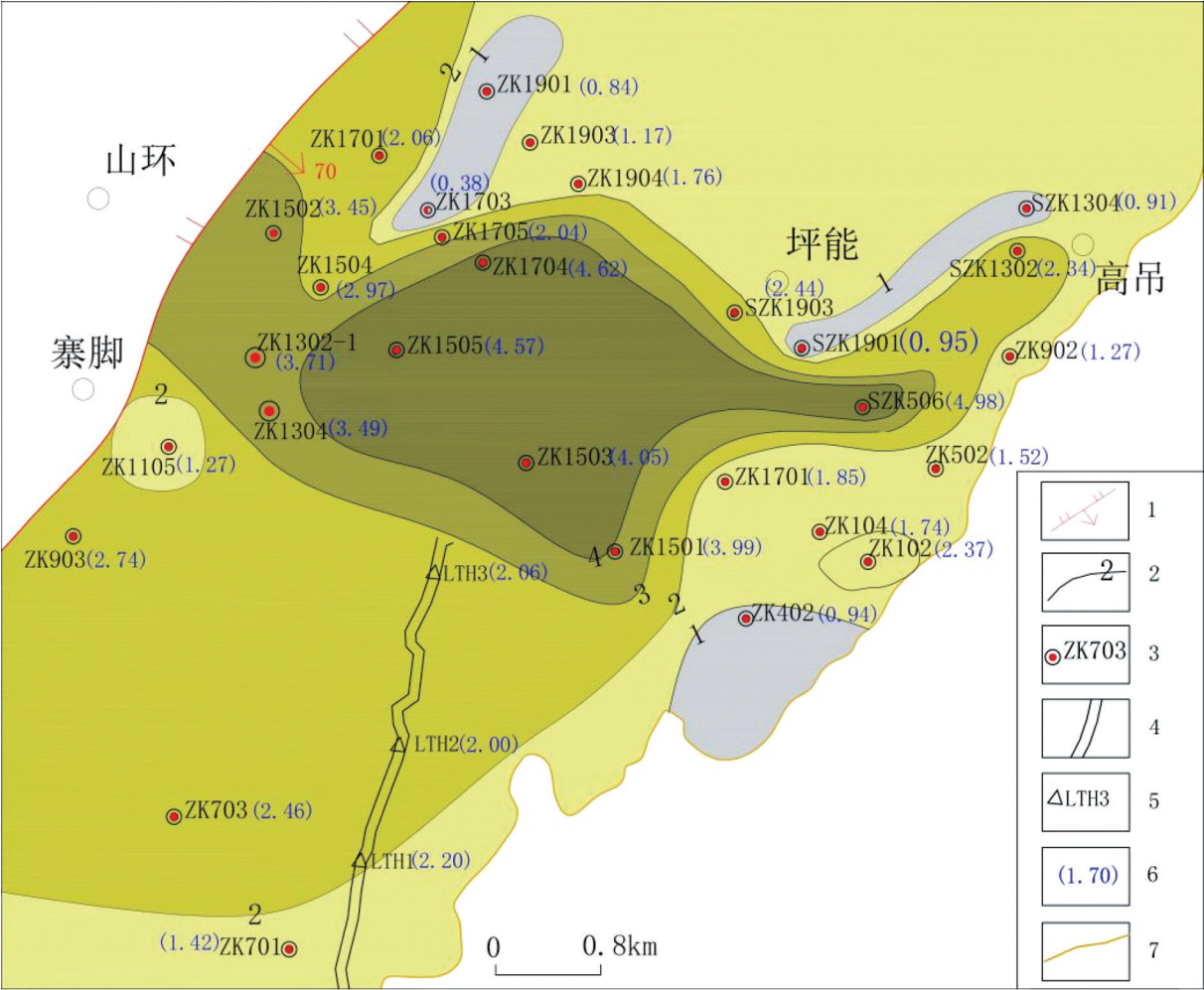


图 5 寨脚重晶石矿床矿体厚度等值线图

Fig. 5 The straight line of the thickness of Zhaijiao barite deposit

1—逆断层;2—矿体厚度等值线;3—见矿钻孔及编号;4—坑道;5—采样点;6—矿体厚度(m);7—矿体露头线

3.3 矿石类型及品位变化规律

根据矿石结构构造,矿石自然类型可划分为条带(纹)状、块状、花斑状、结核状重晶石矿等。其中矿区主要为条带(纹)状重晶石,钻孔中大部分均有分布;次为花斑状,分布相对较少;再次为块状,结核状最少。

条带状重晶石, BaSO₄ 含量最低为 47.78%, 最高为 93.70%, 一般 70%~90%左右矿, 矿石密度 2.94~4.38 g/cm³。块状重晶石矿, BaSO₄ 含量一般 76.10%~88.18%之间, 重晶石矿密度一般 4.2~4.3 g/cm³。花斑状重晶石矿, BaSO₄ 含量一般 33.70%~80.40%之间, 为灰色块状重晶石矿因后期充填有白色方解石细脉或小团块而

成, 矿石密度相对较小。结核状重晶石矿, BaSO₄ 含量一般 32.80%~49.84%之间, 有两种结核产出形式, 一种是矿体内夹有硅质结核, 色较深, 密度相对小, 但硬度较大, 品位较低; 另一种是主矿体之上、下且紧贴主矿体的结核状重晶石矿, 多为粘土质包围, 矿石密度相对小。

根据各类型重晶石中 BaSO₄ 含量分析, 条带状及块状重晶石品位较好且稳定, 花斑状重晶石因混合有 CaCO₃ 而品位不稳定, 结核状重晶石因混合有 SiO₂ 以及其他粘土矿物而品位低。

4 矿床成因分析

目前, 越来越多的研究资料认为, 天柱大河边

重晶石矿床属海底喷流成因(杨瑞东 等,2007)。

2020 年在新晃县贡溪镇上田村甲木冲一带的老堡组含矿岩系上部发现喷流成因的灰岩沉积,灰岩呈透镜状、结核状产于层状硅质岩中(图 6)。岩屑灰岩透镜由碎屑、填隙物和少量石英、铁质组成,碎屑成分复杂,以凝灰质为主(含量 20%),岩屑灰岩角砾具硅化、碳酸盐化,呈棱角、次棱角状,填隙物为方解石(含量 77%),岩石具羽状喷流构造和硅质岩碎块(图 7a)、碎屑结构和角砾状构造(图 7b),可能为海底火山喷流形成的产物。与邻区贡溪碧林一带老堡组发现火山凝灰岩层特征(彭军 等,1999)相似,反映了区内重晶石形成与海底喷发作用有关,从而为重晶石喷发(液)成矿提供新证据。

5 成矿模式

在震旦-寒武世时期,天柱县寨脚地区处于斜坡环境,同时海水中存在大量微生物作用形成的SO4⁻²(硫主要来源于海水或海底硫化物烟囱),此时在斜坡带上发生同沉积断裂,深部含钡流体(热液)沿着同生断裂喷发至盆地,与盆地中的大量SO4⁻²结合形成重晶石颗粒(成矿环境为封闭半封闭系统,钡在氧化还原界面附近与丰富的硫酸根化合形成硫酸钡)。在重力作用下重晶石颗粒在喷流口附近沉积形成厚矿体,并且在远端低凹处仍然形成较厚的矿体(图 7)。

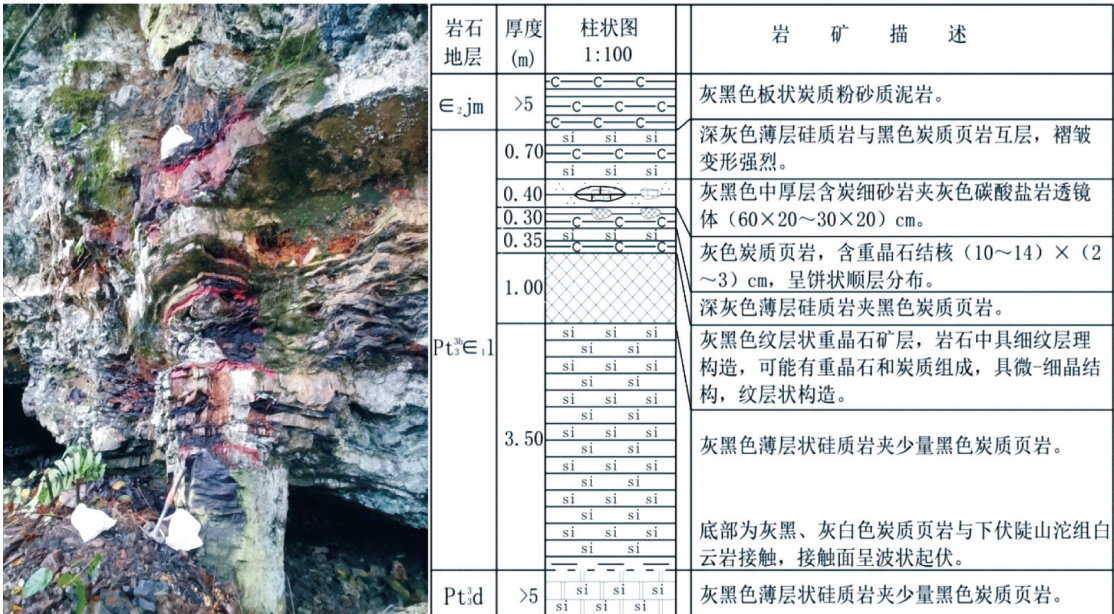


图 6 贡溪镇甲木冲露头地质及灰岩喷流沉积特征

Fig. 6 Geology and Limestone Ejection Sedimentary Characteristics of Jiamuchong, Gongxi Town

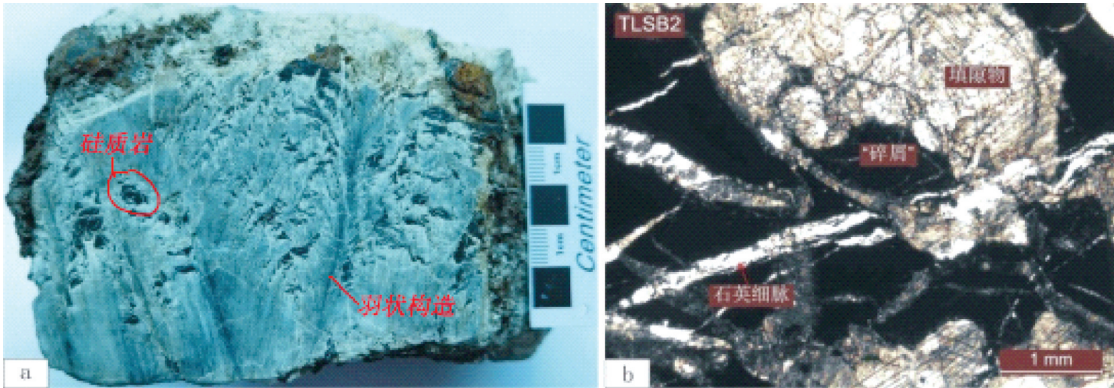


图 7 喷流成因灰岩的宏观与微观特征

Fig. 7 The Macroscopic and Microscopic Characteristics of Limestone of Jet Formation

a—羽状构造;b—碎屑结构和角砾状构造

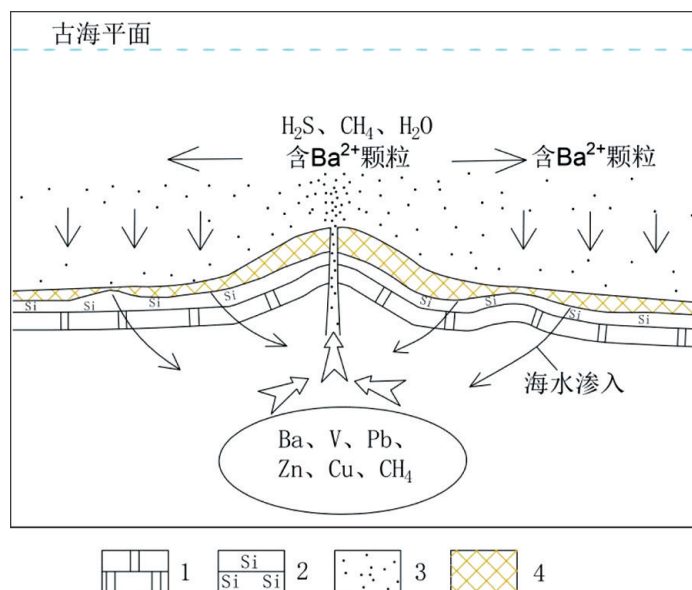


图8 寨脚重晶石矿床成矿模式

Fig. 8 Metallogenic model of barite deposits in Zhaijiao

1—白云岩;2—硅质岩;3—含Ba²⁺颗粒;4—重晶石矿体

6 结论

(1)通过天柱大河边重晶石矿床调查研究,在天柱大河边重晶石矿床北段寨脚-甲木冲一带老堡组顶部发现顺层产出的火山凝灰岩夹岩屑灰岩透镜的沉积组合,凝灰岩具火山结构,岩屑灰岩透镜具碎屑结构和角砾状构造,可能为海底火山喷发(气)形成的产物,为重晶石矿床的喷流成因提供新证据。

(2)在重晶石矿床中见到丰富的滑塌构造、碎屑流构造和浊流构造,表明重晶石在喷流口初步堆积后,受某种同沉积地质营力如地震作用形成震积岩,沿着斜坡向沉积盆地中心迁移并最终堆积定位,形成超大规模的重晶石矿床。重晶石矿的成因类型属于海底喷流沉积矿床,区内重晶石形成可能经历过水下重力流的改造、运移和二次堆积的成矿作用过程。

(3)天柱重晶石矿同赋存于震旦-寒武系老堡组中上部,含矿岩系由黑色硅质岩、炭质页岩及重晶石组成。矿石类型有块状、花斑状、层纹状和结核状等。通过调查发现重晶石矿层中的韵律层理、冲刷构造、变形层理、滑塌褶皱、书斜构造和震裂角砾岩等沉积构造非常发育。初步分析认为重晶石成矿地质环境属于斜坡环境。钡颗粒原始沉积层的移动-堆积作用过程与当时水下重力流扇相有关。

(4)寨脚地区含矿岩系及矿体厚度等值线表明,震旦-寒武系时期区内存在一东西向盆地,其与加里东期断层呈60度夹角。

[参考文献]

- 陈建书,蒲元强,石磊,等. 2011. 贵州大河边一带重晶石成矿地质背景及找矿潜力[J]. 贵州地质, (02): 86-91.
- 方维萱,胡瑞忠,苏文超,等. 2002. 大河边-新晃超大型重晶石矿床地球化学特征及形成的地质背景[J]. 岩石学报, 18(2): 247-256.
- 韩善楚,胡凯,曹剑. 2014. 贵州天柱早寒武世黑色岩系重晶石矿床有机地球化学研究[J]. 地球化学, 43(04): 386-398.
- 侯东壮,吴湘滨,李贞,等. 2015. 贵州省天柱大河边重晶石矿床成矿物质来源[J]. 中国有色金属学报, 25(04): 1039-1048.
- 侯东壮,吴湘滨,朱怡欢. 2014. 天柱大河边重晶石矿床有机地球化学特征及意义[J]. 中国有色金属学报, 24(12): 3095-3107.
- 李文炎,余洪云. 1991. 中国重晶石矿床[M]. 北京:地质出版社, 1-105.
- 刘灵,石庆鹏,文星桥,等. 2015. 贵州天柱重晶石矿床成矿条件及找矿潜力分析[J]. 贵州地质, 32(4): 262-266.
- 刘灵,石庆鹏,杨仪锦,等. 2017. 贵州天柱云洞地区铅锌矿的发现及其找矿意义[J]. 贵州地质, 34(1): 26-31.
- 彭军,夏文杰,伊海生. 1999. 湖南新晃贡溪重晶石矿床地质地球化学特征及成因分析[J]. 成都理工大学学报, 26(1): 92-96.
- 孙学通,姚慧. 2005. 湖南应溪重晶石矿床地球化学特征及矿床成因[J]. 新疆地质, 23(001): 50-54.
- 孙泽航,胡凯,韩善楚,等. 2015. 湘黔新晃-天柱重晶石矿床微量稀土元素和硫同位素研究[J]. 高校地质学报, 21(04): 701-710.

- 涂光炽. 1987. 中国层控矿床地球化学(第二卷)[M]. 北京:科学出版社, 157-196.
- 王富良, 黄艺, 付勇, 等. 2020. 黔东早寒武世早期重晶石富集机制研究--来自硫同位素的约束[J]. 地球学报, 41(05): 686-698.
- 魏怀瑞, 杨瑞东, 高军波. 2009. 贵州天柱重晶石矿热水喷流沉积特征研究[J]. 矿物学报, 29(S1): 378-379.
- 吴朝东, 杨承运, 陈其英. 1999. 新晃贡溪-天柱大河边重晶石矿床热水沉积成因探讨[J]. 北京大学学报(自然科学版), (06): 3-5.
- 吴卫芳, 潘家永, 夏菲, 等. 2009. 贵州天柱大河边重晶石矿床硫同位素研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 32(03): 205-208.
- 夏菲, 马东升, 潘家永, 等. 2005. 天柱大河边-新晃重晶石矿床矿物组成特征电子探针研究[J]. 矿物学报, (03): 289-294.
- 夏菲, 马东升, 潘家永, 等. 2004. 贵州天柱大河边和玉屏重晶石矿床热水沉积成因的锶同位素证据[J]. 科学通报, (24): 2592-2595.
- 杨瑞东, 魏怀瑞, 鲍森, 等. 2007. 贵州天柱上公塘一大河边寒武纪重晶石矿床海底热水喷流沉积结构、构造特征[J]. 地质论评, 53(5): 675-680, 725-726.
- 杨义录. 2010. 湘黔边境重晶石矿成矿地质背景及成矿模式浅析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 27(001): 43-48.
- 余洪云. 1988. 贵州天柱大河边重晶石矿床地质特征及找矿方向[J]. 贵州地质, (01): 109-117.

Geological characteristics and metallogenic model of barite mineralization in Zhaijiao, Tianzhu, Guizhou

Luo Bang-liang, Liu Ling, Shi Qing-peng, Xia Rui, Zhou Zongzan, Yang Gui-long, Lin Ze-yuan

(101 Geological Party, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Kaili 556000, Guizhou, China)

[**Abstract**] Through the exploration of Zhaijiao barite ore in Tianzhu, a bedding-produced volcanic tuff intercalated with carbonate(limestone) lens was found on the top of the Laobao Formation in the Zhaijiao-Jiamuchong area, which is the origin of the barite submarine jet Provide new evidence. Observation of the sedimentary characteristics of borehole cores and outcrops shows that abundant slumping structures, elastic flow structures and turbidity current structures are seen in the barite deposits, indicating that the barites are subjected to syn-sedimentary geology after the initial accumulation of the vents. Seismites formed by the forces of earthquakes and storms migrated along the slope to the center of the sedimentary basin and eventually accumulated and formed large-scale and super-large barite deposits. Therefore, the genetic type of barite deposits is a submarine jet sedimentary deposit, and a slope underwater gravity flow fan mineralization model is established.

[**Key Words**] Barite; geological characteristics; sedimentary basin; metallogenic model; Tianzhuzhaijiao