

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探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。

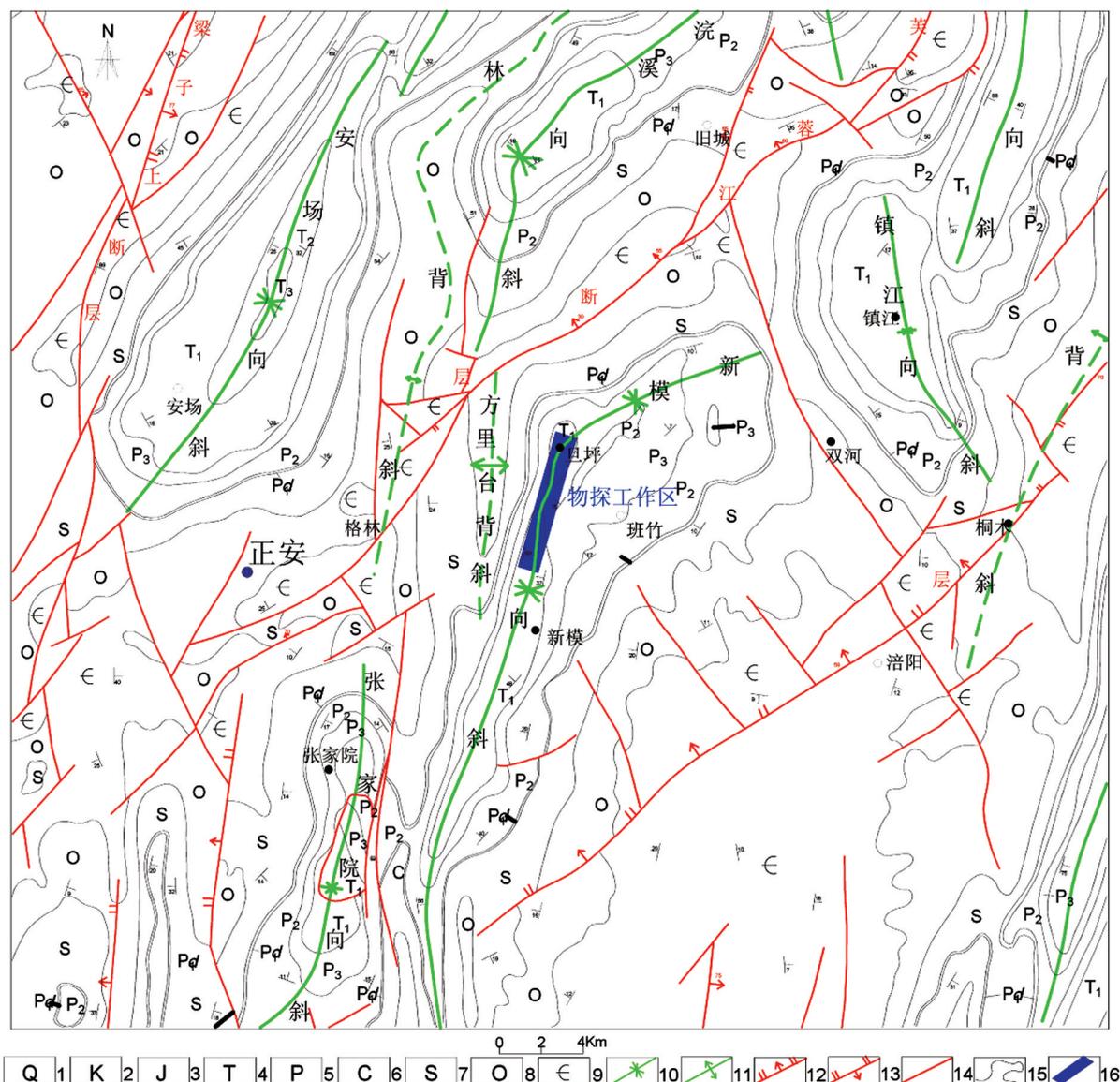


图1 工作区区域地质图

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深层地电结构(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。

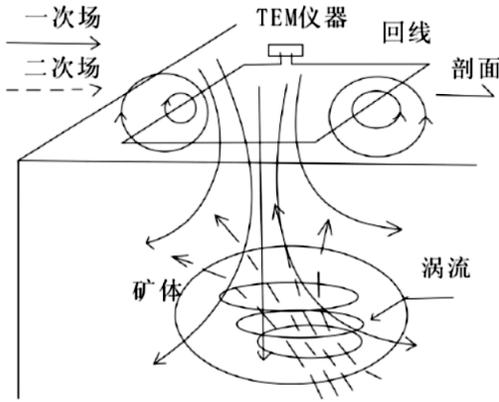


图2 TEM法工作原理图(蒋邦远,1998)

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 $1300A$ 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。

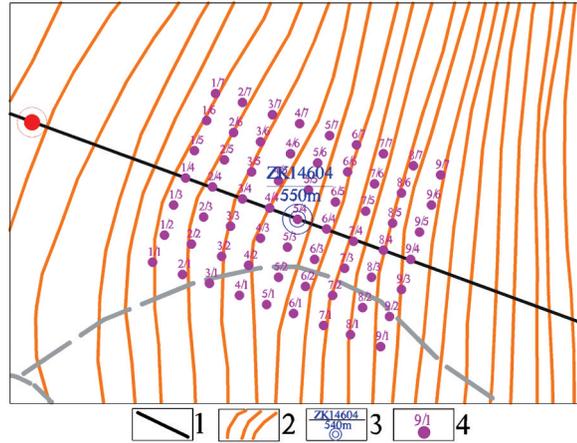


图3 ZK14604瞬变电磁测网布设图

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:

$$\text{视电阻率公式: } \rho_1 = 6.32 \times 10^{-3} b^{8/3} \left(\frac{\epsilon}{I} \right)^{-2/3} t^{-5/3};$$

$$\text{深度公式: } h_t = -28.08 \sqrt{\rho_1}$$

其中: ρ_1 —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_t —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。

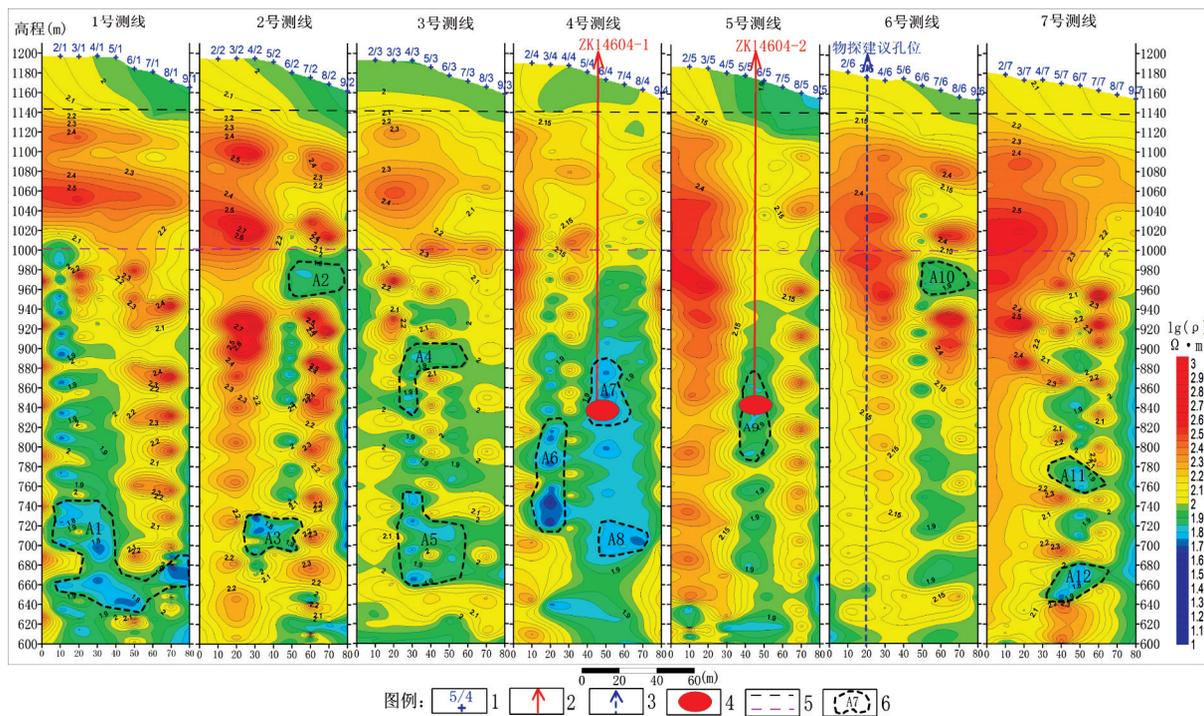


图 5 ZK14604 钻孔 TEM 视电阻率断面图

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。

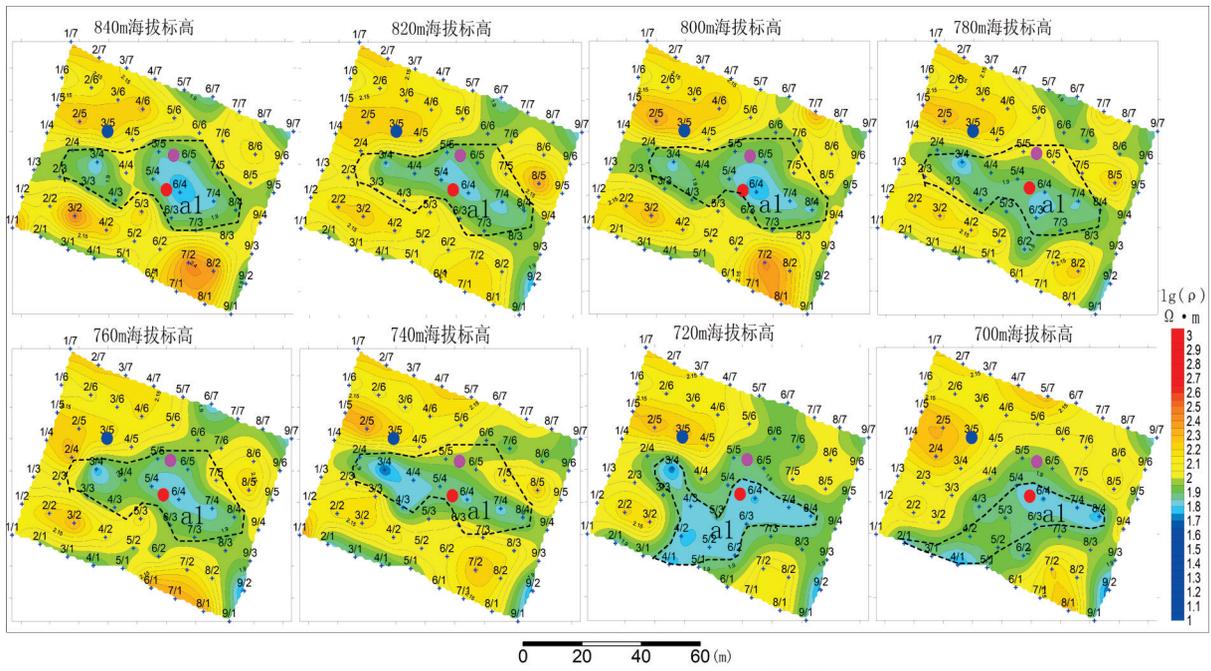


图 6 ZK14604 钻孔 TEM 视电阻率平面切图

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矿岩溶勘查中的应用[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