

程亚平,蒋灵芝,黎柳月,等.综合物探技术探测平果铝厂赤泥堆场岩溶发育特征[J].中国岩溶,2016,35(6):688-698.
DOI:10.11932/karst20160611

综合物探技术探测平果铝厂赤泥堆场岩溶发育特征

程亚平,蒋灵芝,黎柳月,李善民,冯志秦
(桂林理工大学环境科学与工程学院/桂林理工大学广西矿冶与环境科学实验中心,广西 桂林 541004)

摘 要:为了预测和评价赤泥堆场建成后对地下水环境造成的污染,利用等偏移地震反射法、高密度电法为主,自然电场法为辅的综合物探技术来探查堆场地下岩溶的发育特征和管道的分布状况。经上述 3 种物探技术综合探测,确定出堆场各处覆盖层的厚度,确认了 5 个断层破碎带及其走向,圈定了 14 个物探异常区,并初步探明了岩溶管道的分布和地下水的流向。同时综合物探技术与钻探成果揭示了研究区岩溶发育的特点是以浅部垂直型为主,浅层岩溶的发育深度大约在地表下 0~10 m,深部岩溶也有少量发育,其发育深度约在地面下 40~50 m,超过此深度后岩溶发育变弱。
关键词:地下水;赤泥堆场;岩溶;等偏移地震反射法;高密度电法;自然电场电法;平果铝矿
中图分类号:P631.3;P642.25 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-4810(2016)06-0688-11

0 引 言

赤泥中含有大量强碱性化学物质,其高碱度污水渗入地下会使地下水体的 pH 值升高,造成严重的地下水污染^[1-2]。平果铝厂拟建赤泥堆场位于浅覆盖型(局部裸露型)岩溶区,地表为薄层第四系残坡积层,下覆岩溶发育较为强烈的三叠系石灰岩,堆场周围构造断裂发育,地下暗河密布,若堆场发生渗漏,不仅污染岩溶地下水,而且会造成堆场塌陷等地质灾害,危及堆场的运行安全及周边环境生态安全。为了正确评价赤泥堆场区岩溶管道渗漏对地下水的影响,需要利用物探技术来探测赤泥堆场及周边地下岩溶的发育情况和岩溶管道的位置、走向和规模。

由于地下岩溶破碎带或岩溶管道中有充填物(如地下水),充填物与周围岩石相比,其电阻率要低得多,因此可利用电阻率法(高密度电法)来判断地下岩溶破碎带或岩溶管道的分布位置、范围及规模等,如 Tassy^[3]、葛如冰^[4]、刘伟^[5]曾用高密度电法来探测岩溶管道的位置;邓居智^[6]用高密度电法探测坝基渗漏管道,排除隐患。此外,当地下隐伏岩溶是单一岩

体时,在相同参数设置条件下,岩溶发育段在等偏移地震反射法上具有明显的强振幅、低频率反射特征,主要表现为溶洞规模越大,充填物越疏松,等偏移地震反射法资料的强振幅、低频率特征越明显,据此可采用等偏移地震反射法探测地下岩溶发育情况。如覃政教利用等偏移地震折射法查明桂林某饭店地基的岩溶漏斗、陡立的充泥溶蚀裂隙带^[7],以及桂林某花园综合楼地基的岩溶发育状况及基岩表层发育的溶沟^[8]。

在井孔资料缺乏、无法做出地下水等水位线图的地区,利用自然电场来研究地下水流场是十分必要的。如王俊业曾在地下水浅埋的平原区,利用自然电场“8”字图的特征来研究地下水流场,研究发现此方法比传统的利用等水位线图来判定地下水流场的精度更高、更便捷、更快速^[9]。梁竞等利用自然电场法在广西岩溶地区找水,2013~2015 年间,通过对各测点数据采集和处理分析,结合现场地质特征及微地貌条件,准确推断各测点地下水渗流的空间分布特征,完成了区内若干县找水打井 85 眼井任务^[10]。

考虑到各种物探方法的局限性和多解性,采用综

基金项目:广西环境污染控制理论与技术重点实验室项目(桂科能 1401Z003);2014 桂林理工大学大学生创新创业计划区级项目(201410596027);广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目;国家基金项目(41302197)
第一作者简介:程亚平(1978—),男,汉族,博士研究生,讲师,研究方向:水文地质勘察,地下水污染治理与修复。E-mail:chengyaping@glut.edu.cn。
收稿日期:2016-05-09

合物探方法来综合分析场地的地下岩溶管道特征。即在同一剖面、同一测网中用两种以上的物探方法共同工作,对数据资料综合分析、相互印证,有利于排除干扰,提高解译的置信度^[11-12]。梁棋念等^[13]用高密度电法和天然电场选频法寻找岩溶破碎带,成功确定岩溶破碎带的范围;李成香等^[14]采用地质雷达、高密度电法和浅层地震等探测隐伏岩溶漏斗的分布,取得了较好的探测效果;张银松等^[15]利用综合物探方法成功寻找岩溶地下水。

1 研究区概况

1.1 水文地质条件

拟建堆场周边地貌为碳酸盐岩溶蚀准平原,其地面标高在 105~126 m 之间。区内大部分被第四系土层覆盖,局部基岩出露,岩性主要为三叠系下统白云质灰岩,局部为白云岩。研究区属亚热带季风气候,四季分明,雨量充沛,区内地下水补给主要来自于大气降雨。地下水总体上由西向东,由北向南径流,岩溶地下水除了被当地村民利用外(从溶潭内抽水),还有地下转为明流汇入右江或通过岩溶管道、岩溶裂隙等向右江排泄。

1.2 区域构造及岩溶发育特征

堆场污染影响区域位于黔桂地台东南边缘右江复向斜轴部的东南端,区域构造线方向为 NW—SE 向。区内褶皱、断裂构造均很发育。构造控制着岩溶发育的地段,右江控制着岩溶发育的深度。

区内岩溶发育特征表现为:落水洞多,且沿裂隙呈链状成群排列;本区岩溶形态比较单一,以充水天然井、落水洞为主;这些落水洞每逢枯季起消水作用,当雨季时地下水位上升外溢成泉。

2 野外探测及资料整理方法

由于场地内基岩、黏土、被充填溶洞、裂隙等之间存在着明显的某些地球物理性质差异(主要是电阻率、纵波波速、密度差异),根据前人资料^[3-13]分析及结合场地特点,选择以等偏移地震反射法、高密度电法为主,自然电场法为辅的综合物探技术。

2.1 测线布置

堆场范围内共布置 1 282 个钻孔,组成了 NW—SE 向 28 条、NE—SW 向 58 条剖面线(如图 1)。根据钻探剖面线走向,布置了 66 条物探测线,线距 100~200 m 左右。

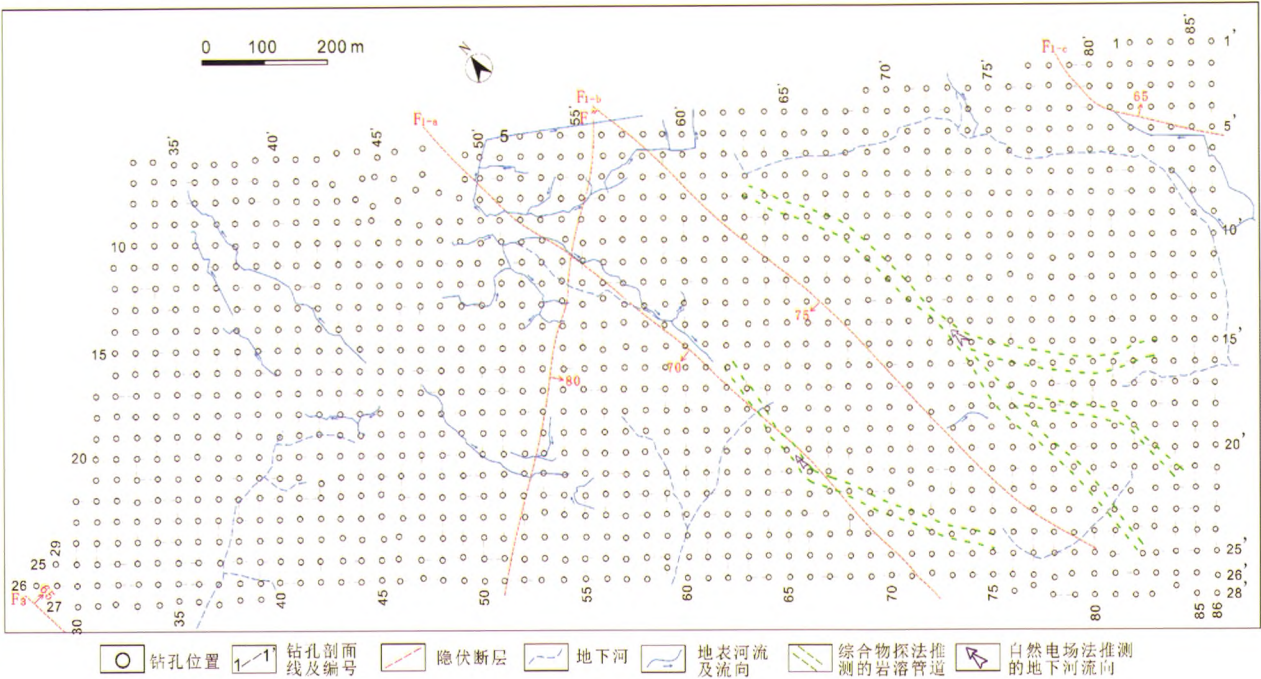


图 1 钻探孔及物探线平面布置图

Fig. 1 A simplified geological map showing boreholes and geophysical survey lines

2.2 野外测试方法、原理及解译方法

2.2.1 高密度电法

(1)原理:高密度电法基本工作原理与常规电阻

率法大体相同,其测量选用的是工程勘察中最常用的温纳装置(见图 2)。测量时,AM=MN=NB=AB/3 为一个电极间距,探测深度为 AB/3, A、B、M、

N 逐点同时向右移动,得到第一层剖面线;接着 AM、MN、NB 增大一个电极间距,A、B、M、N 逐点同时向右移动,得到另一层剖面数据;这样不断扫描测量下去,得到倒梯形断面^[11]。

高密度电法的野外数据采集是通过阵列电极装置形式来实现。野外工作时将数十根电极一次性布设完毕,每根电极既是供电电极,又是测量电极。通过程控多路电极转换开关和电测仪实施数据的自动、快速采集。

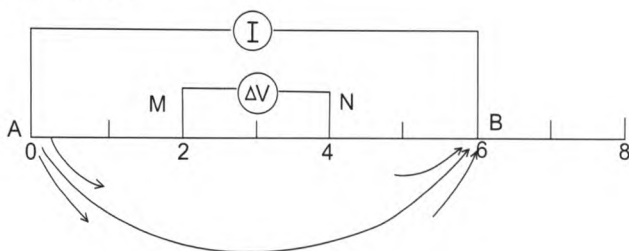


图2 高密度电法工作原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram showing principle of electrical resistivity tomography

(2)设备及参数:仪器为重庆奔腾数控技术研究所以研制的WDJD-1多功能直流激电仪和WDZJ-1多路电极转换器组成的高密度电法测量系统。采用等比偶极 β 排列装置,电极距为3~5 m,隔离系数(即数据测试的层数)为10~16,电极距约为探查深度的 $l/15 \sim l/20$ (根据本地区岩溶发育深度下限约为90~100 m来定)。

测试误差:视电阻率的相对误差3.48%,均方误差2.73%。

(3)测试资料整理方法:根据各剖面测量结果分别进行预处理,包括数据文件的建立、剖面数据编辑、格式化,电极距计算,电极距调整系数计算,视参数分级等,最后绘制视电阻率等值线断面图。根据电性特征,计算探测目标体的有关空间几何参数。

2.2.2 等偏移地震反射法

(1)原理:采用人工激发震源,使震源附近质点产生震动,形成地震波在地下介质中传播,当遇到两种不同弹性介质界面时,便产生反射,通过地面检波器接收信号,再利用计算机获取地震反射时间剖面,分析反射波的强度、频谱、相位等来推断地下的地质问题^[11]。

(2)设备及参数:本次探测采用北京水电物探研究所研制的SWS-1A型多波勘察系统。采用等偏移地震反射波法进行观测。根据场内P波信噪调查资料,设置等偏移距为10 m,采样时间为250 μ s,采样长度2048点/道,先以4 m的点距进行探测。测试误差:仪器各记录道之间的相位差小于0.25 ms;振

幅差不超过6%;检波器固有频率漂移5%,灵敏度变化4%,相位差变化0.25 ms;从激震到接收、记入计算机内,其累计误差在0.25 ms左右。

(3)资料处理方法:按剖面分别进行时域和频域分析。在时间域里,主要处理过程包括:信号录入、格式转换、预处理、数字滤波、剖面形成与显示等内容,其中预处理包括道集重排、振幅平衡、静校正、平滑处理等。根据时间剖面中反射相位同相轴的连续追踪,结合已知地质资料进行解释,最终形成地质剖面。

2.2.3 自然电场法

(1)原理:根据过滤电场产生自然电位,即在地下水流动方向上两测点间的电位差最大,而在垂直流向的方向上,两测点间的电位差最小,甚至为零,在其他方向则为过渡状态。如图3a所示,以测点O为中心,布置夹角为45°的辐射状测网,分别测量等距的 M_1N_1 、 M_2N_2 、 M_3N_3 、 M_4N_4 的电位差 ΔU_{MN} ,然后将所测得的点位差按一定比例尺表示在所测的方向线上,各端点连接起来,成为“8”字形异常图(又称环形图),如图3b所示。显然8字形长轴为地下水流动方向(对于本场地即为岩溶管道的走向)。还可根据电位差的符号来判断地下水流动方向,地下水流出方向为高电位,相反为低电位^[11]。

(2)测试参数 本观测极距 $MN=20$ m,以固定的MN距离为直径,在该圆周上测量4对不同方位(S-N、WS-NE、W-E、ES-NW)的电位差。测试误差:测量电位精度均在 $\pm 2\% \pm 1$ 个字节;电位的相对误差11.3%,均方误差4.80%。

(3)资料整理方法:以钻孔ZK250周围的8字形电位梯度数据曲线图为例(见图4),该测点处岩溶管道的走向为西北-东南向,与区域构造线一致。另外根据电位的高低可判断,该处地下水流动方向为由西南向东北方向流。

3 综合物探对比分析

探测区综合物探法测试点布置如下:高密度电法布设4740点、等偏移地震反射法布设14895点、自然电场法环形测量36点。根据综合物探资料分析,总结如下:

3.1 岩溶发育平面分布特征

经过对各测点、各剖面多种物探结果对比、验证,共圈定了5条物探异常带和14个物探异常区。物探异常带主要与构造断裂发育有关,物探异常区主要与岩溶破碎带发育有关。

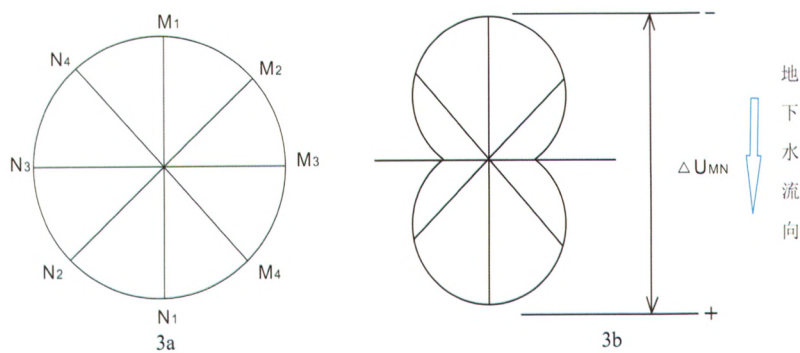


图 3 环形电位梯度法原理示意图

Fig. 3 The principle diagram for the circular potential gradient method

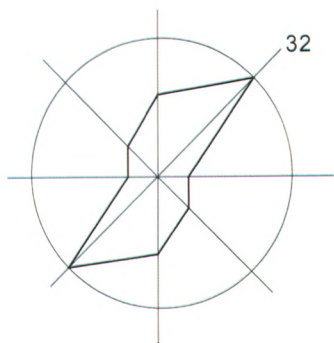


图 4 ZK250 钻孔四周自然电场法“8”字形异常图

Fig. 4 Anomalous map measured around borehole ZK250 by self-potential technique

3. 1. 1 异常带的物探特征及判译

(1) F_3 异常带:位于测区西南角。分布范围小,仅分布在 1—1'~4—4'等测线上的西南段以及 58—58'上的西段,等偏移地震反射法时间剖面图呈现明显的同相轴错动,续至波有振荡拖尾现象(见图 5、图 6)。在高密度电法视电阻率等值线断面图看到:在 2—2'段测线上,有明显的“U”字型低阻异常(见图 7)。根据物探异常特征综合分析认为:该异常带由 F_3 大断裂带所引起,该大断裂带在测区内的走向为 NNW,向 NEE 倾斜,倾角较陡,宽度 5~10 m。

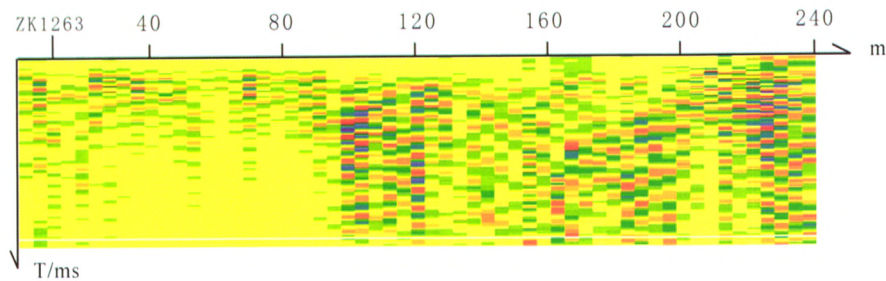


图 5 1—1' (孔位 ZK1263) 等偏移地震反射法时间剖面

Fig. 5 Seismic reflection (COG) time section 1—1' (ZK1263 hole profile)

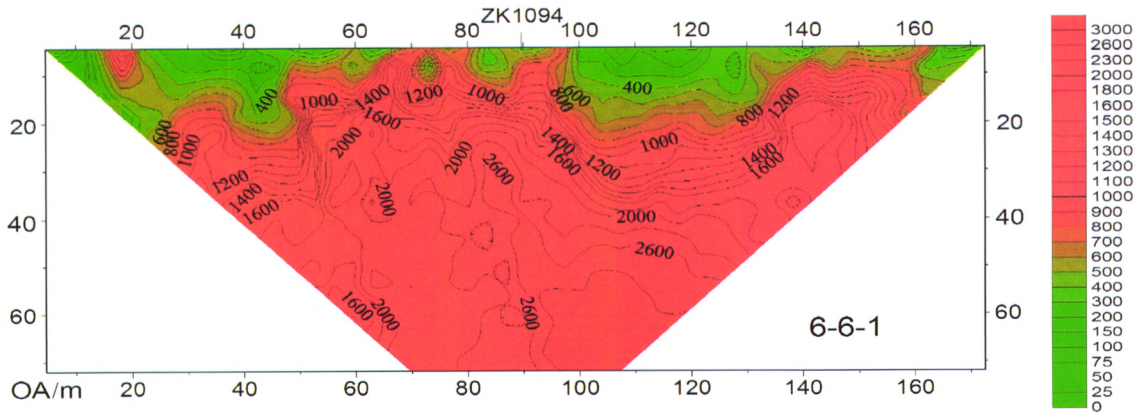


图 6 6—6—1 测线段高密度电法视电阻率等值线断面图 (F_3 断层经过 ZK1094 左侧的 30 m 处)

Fig. 6 Apparent resistivity contours in ERT for section 6—6—1 (F_3 fault passes through 30m left of drilling hole ZK1094)

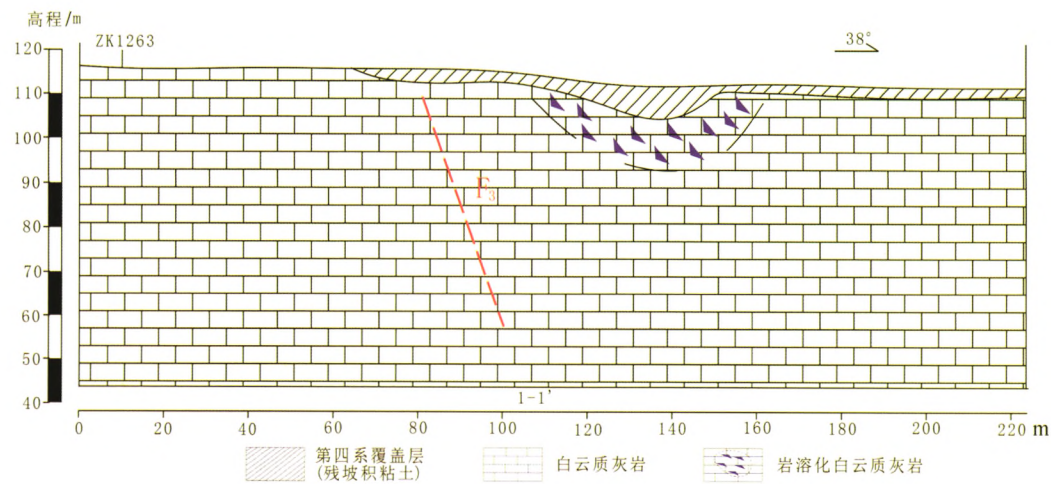


图 7 1-1'剖面(ZK1263 孔)综合解译的地质剖面图

Fig. 7 Interpreted geological section 1-1' based on seismic reflection and ERT data(ZK1263 hole profile)

(2) F'' 异常带:位于测区中部。从等偏移地震反射时间剖面看到;在 22-22'~26-26'、58-58'~63-63'等测线上,该处测线段上的同相轴反射波频率较低,续至波有振荡拖尾现象,局部反射波同相轴有明显错动(见图 8、图 9)。在高密度电法视电阻率等值线断面图上:在 25-25'、26-26-2、59-59-2、60-60-3、61-61-3、62-62-3、63-63-3 测线段,有明显的“U”字型低阻异常(见图 10)。根据

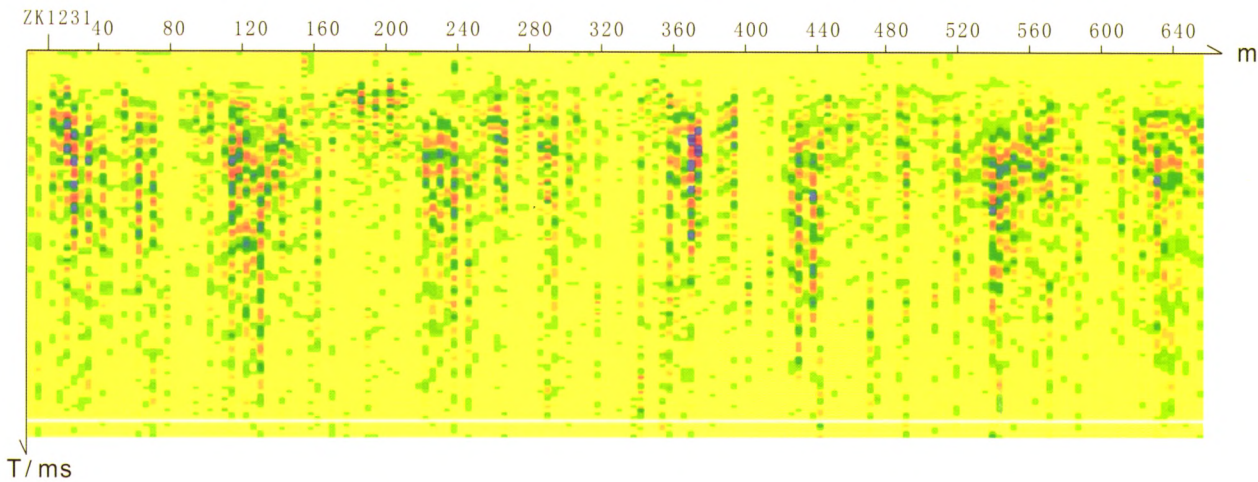


图 8 26-26' (ZK1231-ZK887-ZK553-ZK279-ZK63)等偏移地震反射法时间剖面

Fig. 8 Seismic reflection (COG) time section 26-26' (ZK1231-ZK887-ZK553-ZK279-ZK63 profile)

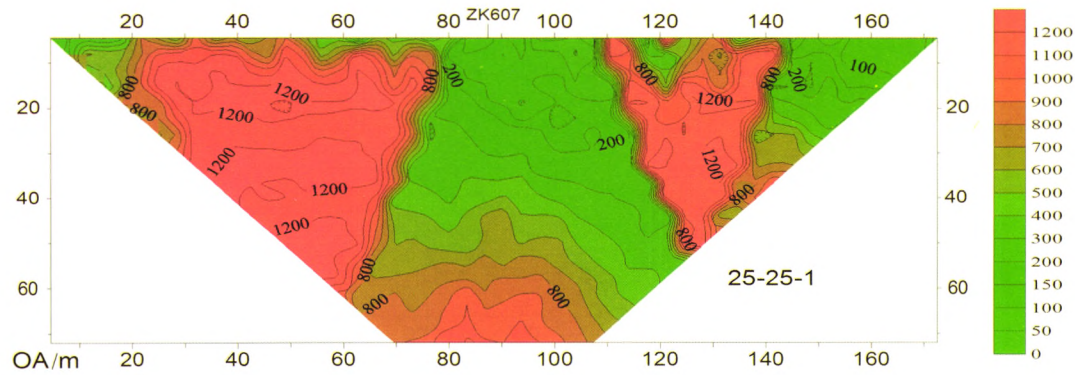


图 9 25-25-1 测线段高密度电法视电阻率等值线断面图 (F'' 断层经过 ZK607)

Fig. 9 Apparent resistivity contours in ERT for section 25-25-1 (fault passes through drilling hole ZK607)

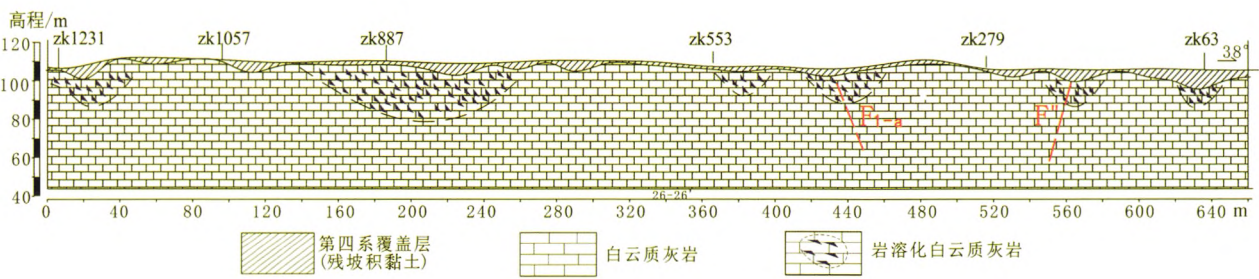


图 10 26-26'剖面(ZK1231-ZK887-ZK553-ZK279-ZK63)综合解译的地质剖面图
Fig. 10 Interpreted geological section 26-26' based on seismic reflection and ERT data
(ZK1231- ZK887-ZK553-ZK279-ZK63 profile)

物探异常特征综合分析认为:该异常带是由断层破碎带 F' 所引起。此断层破碎带走向 NE,向 ES 倾斜,倾角较陡,宽度 8m 左右,在 26-26'、62-62'中部附近,错断 F_{1-a} 破碎带,在其 NE 段与 F_{1-b} 破碎带相交。

(3) F_{1-a} 异常带:位于测区中部。从等偏移地震反射时间剖面图中可以看到:在 20-20'~ 43-43'、58-58'~63-63'等测线上,对应的反射波同相轴频

率较低,反射波同相轴有明显错动,续至波有振荡拖尾现象(见图 11、图 12)。而在高密度电法视电阻率等值线断面图可以看到,在 23-23-1、26-26-2、30-30-2、34-34-1、59-59-3、60-60-4、61-61-3、62-62-3 等测线段上,有明显的“U”字型低阻异常(见图 13)。根据物探异常特征综合分析认为:该异常带是由 F_{1-a} 断层破碎带所引起,走向近 SN,

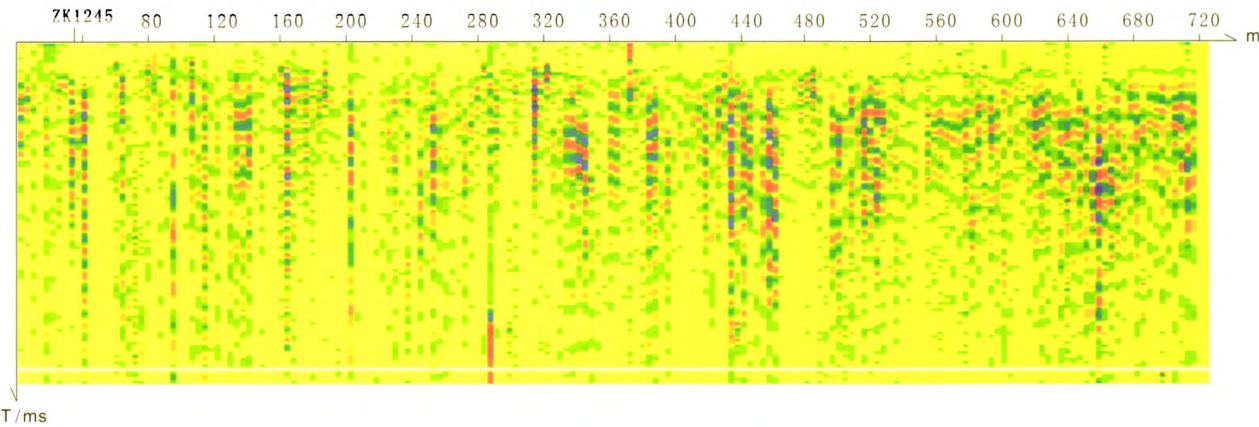


图 11 40-40'(ZK1245-ZK677)等偏移地震反射法时间剖面
Fig. 11 Seismic reflection (COG) time section 40-40' (ZK1245-ZK677 profile)

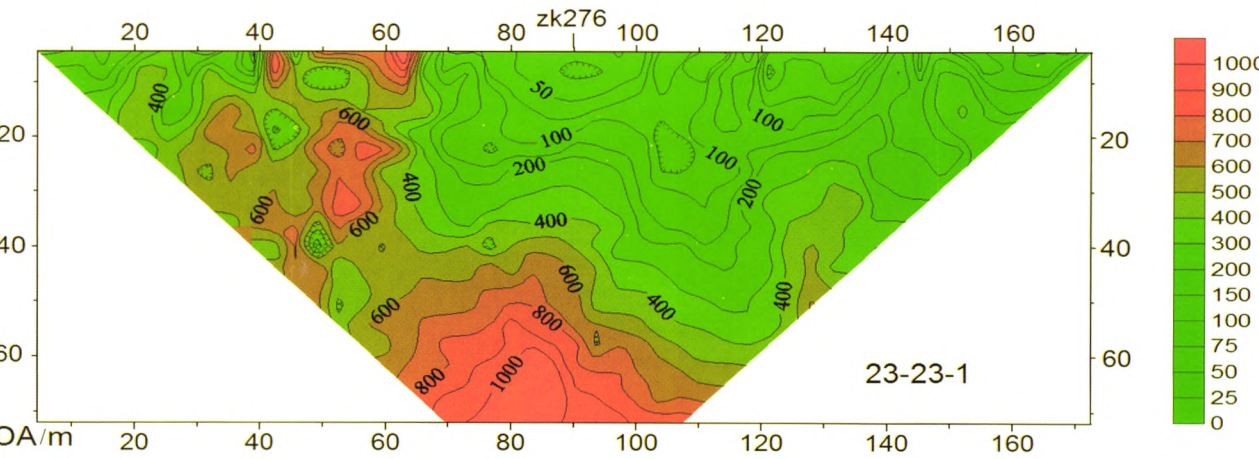


图 12 23-23-1 测线段高密度电法视电阻率等值线断面图 (F_{1-a} 断层经过 ZK276)
Fig. 12 Apparent resistivity contours in ERT for section 23-23-1 (F_{1-a} fault passes through drilling hole ZK276)

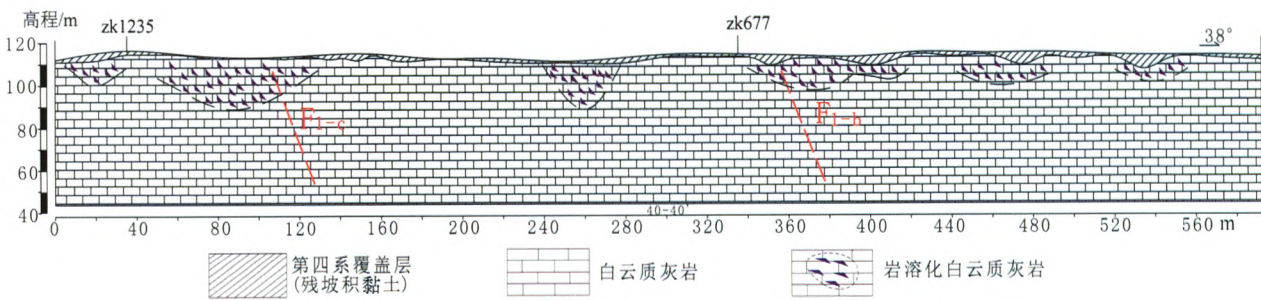


图 13 40—40'剖面(ZK1245—ZK677)综合解译的地质剖面图

Fig. 13 Interpreted geological section 40—40' based on seismic reflection and ERT data(ZK1245—ZK677profile)

向 WS 倾斜,倾角较陡,宽度在 3~5 m。在 26—26'、62—62'中部附近,被 F'' 破碎带错断。此破碎带附近的岩体较破碎,节理裂隙、溶蚀裂隙较发育。

(4) F_{1-b} 异常带:位于测区东南中部。根据等偏移地震反射法时间剖面图:在 28—28'~56—56'、58—58'~63—63'等测线上,反射波同相轴频率较低,反射波同相轴有明显错动,续至波有振荡拖尾现象(见图 14、图 15)。在高密度电法视电阻率等值线断

面图上,可以看到:在 30—30-4、34—34-5、38—38-2、42—42-1、46—46-1、54—54-1、59—59-5、60—60-5、61—61-5、62—62-4、63—63-2 测线段上,有明显的“U”字型低阻异常(见图 16)。根据物探异常特征合分析认为:该异常带是由 F_{1-b} 断层破碎带所引起。此断层破碎带走向近 SN,向 WS 倾斜,倾角较陡,宽度在 3~5m。此破碎带附近的岩体较破碎,节理裂隙、溶蚀裂隙较发育。

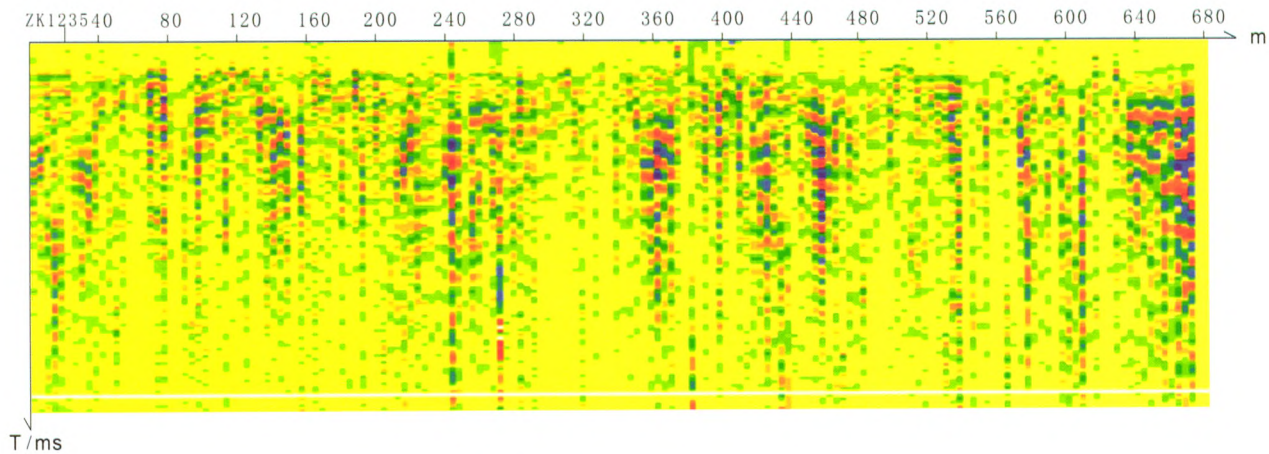


图 14 30—30'(ZK667—ZK283)等偏移地震反射法时间剖面

Fig. 14 Seismic reflection (COG) time section 30—30'(ZK667—ZK283 profile)

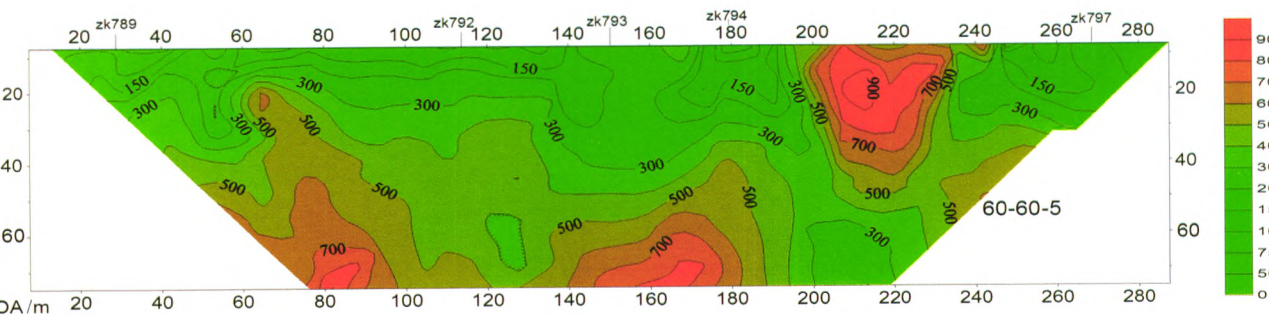


图 15 60—60-5 测线段高密度电法视电阻率等值线断面图(F_{1-b} 在 ZK792 左侧)

Fig. 15 Apparent resistivity contours in ERT for section 60—60-5(F_{1-b} fault passes through left of drilling hole ZK792)

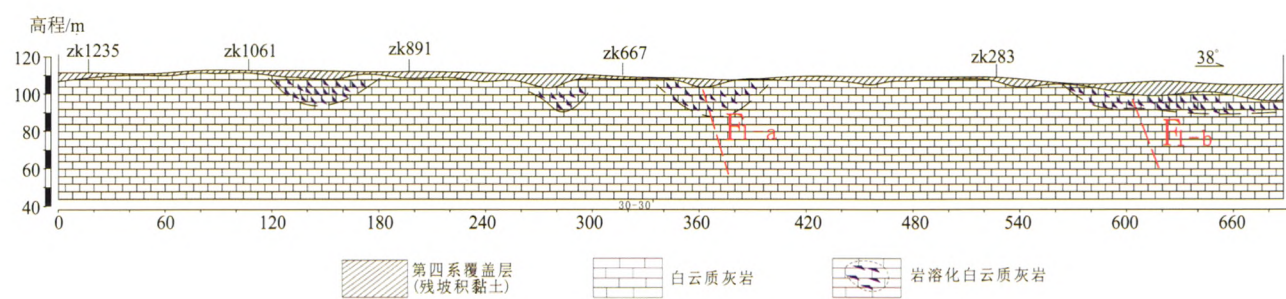


图 16 30—30′(ZK667—ZK283)综合解译的地质剖面图

Fig. 16 Interpreted geological section 30—30′ based on seismic reflection and ERT data(ZK667—ZK283 profile)

(5)F_{1-c}异常带:位于测区东南角。根据地震反射波时间剖面图:在 50—50′~57—57′、64—64′等测线上,反射波同相轴频率较低,反射波同相轴有明显错动,续至波有振荡的拖尾现象(见图 17、图 18)。在高密度电法视电阻率等值线断面图上,可以看到:在 54—

54—2、64—64—2 测线段上,有明显的“U”字型低阻异常(见图 19)。根据物探异常特征综合分析认为:该异常带是由断层破碎带所引起。此断层破碎走向近 SN,向 NEE 倾斜,倾角较陡,宽度在 4~8 m。此破碎带附近的岩体较破碎,节理裂隙、溶蚀裂隙较发育。

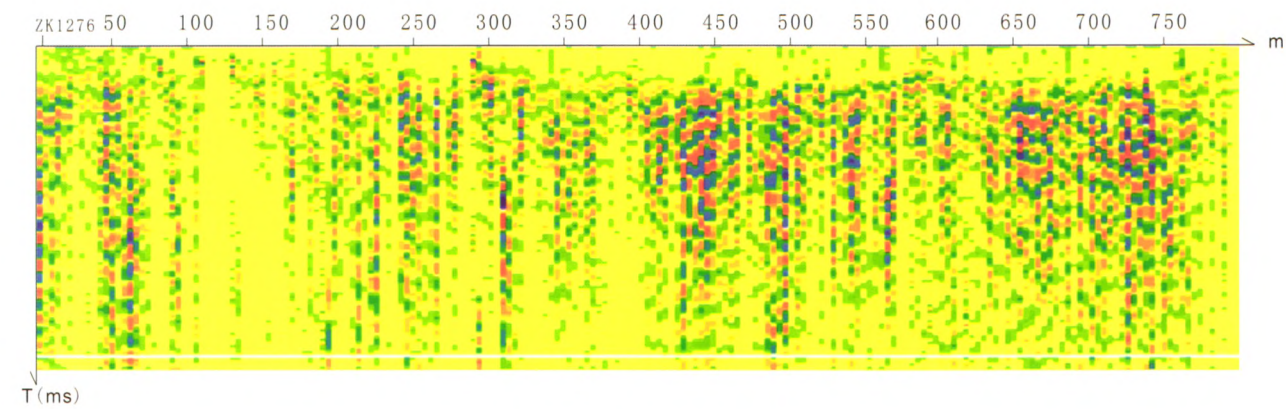


图 17 50—50′(ZK1276)等偏移地震反射法时间剖面图

Fig. 17 Seismic reflection (COG) time section 50—50′(ZK1276 profile)

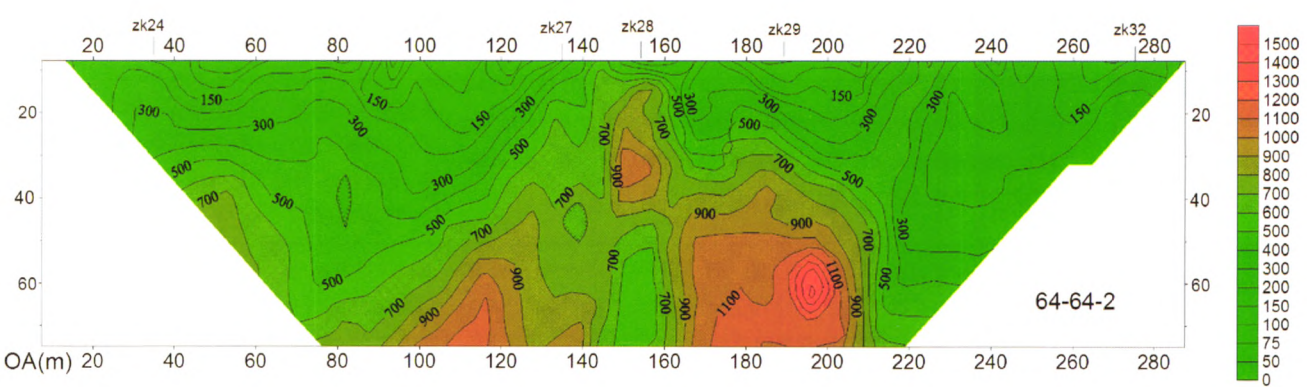


图 18 64—64—2 测线段上高密度电法视电阻率等值线断面图(F_{1-c}断层经过 ZK27 左侧 95 m 处)

Fig. 18 Apparent resistivity contours in ERT for section 64—64—2

(F_{1-c} fault passes through 95 m left of drilling hole ZK27)

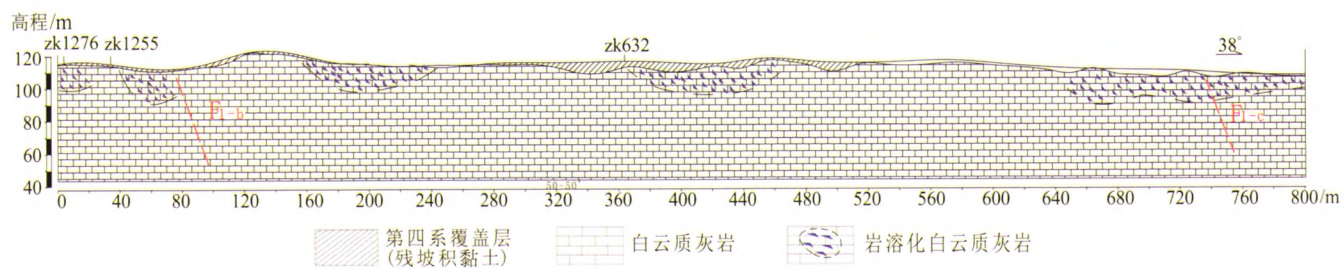


图 19 50—50′(ZK1276—ZK1255—ZK632)综合解译的地质剖面图

Fig. 19 Interpreted geological section 50—50' based on seismic reflection and ERT data(ZK1276—ZK1255—ZK632 profile)

3.1.2 异常区的物探特征及判译

根据物探结果,全区共圈定 14 个物探异常区。其中 5 个代表性异常区特征及判译结果见表 1。

3.2 深部岩溶发育特征

根据钻探、地面地质调查资料,本场地采用等偏移地震反射法、高密度电法探测深度可到地下 70~80 m 深度。在异常带内岩体较破碎,节理裂隙、溶蚀裂隙均较发育。各异常带岩溶发育深度稍有差异,具体如下:①F3 异常带:向下延深 80 m 左右;②F'' 异常带:向下延深在 70 m 左右;③F_{1-a}异常带:向下延

深 65 m 左右;④F_{1-b}异常带:向下延深在 65 m 左右。⑤F_{1-c}异常带:向下延深 70 m 左右。各异常区岩溶发育深度见表 1。

3.3 地下水流方向

根据测区 36 个环形自然电场法电位梯度观测曲线特征,确定出每个观测点的地下水流向,结果认为:场地内的地下水总体向北流,W—Ⅱ、W—V 岩溶槽谷为测区内地下水的主要排水通道,断层破碎带 F₃、F''、F_{1-a}、F_{1-b}、F_{1-c} 为测区内地下水的次级排水通道。

表 1 物探异常区特征及性质一览表
Table 1 Characteristics and properties for geophysical anomaly zones

编号	位置	物探异常特征	解译
W—I	测区西部	异常不完整,呈 NNE 向展布。反射波同相轴呈凹弧形,振幅大、频率较低,有明显“眼”状特征,局部有明显错动,续至波有振荡的拖尾现象,视电阻率较低,有明显的“V”或“U”字型低阻异常。	该区节理裂隙、溶蚀裂隙发育,发育深度一般在 1~15 m 之间。覆盖层厚度在 1~9 m 之间,局部达 13 m。
W—Ⅲ	测区中部	该区呈 NW 向展布。反射波同相轴有明显错动,续至波有振荡的拖尾现象,同相轴反射波呈凹弧形,有明显“眼”状特征,且反射波振幅大、频率较低;视电阻率较低,有明显的“V”字型、椭圆形低阻异常。	节理裂隙、溶蚀裂隙发育,发育深度一般在 2~15 m 之间。覆盖层厚度一般在 2~7 m 之间,局部达 10 m。
W—Ⅳ	测区中部	呈 SN 向展布。反射波同相轴有些呈凹弧形;有些有明显的“眼”状特征;有些同相轴反射波振幅大、频率较低。测线上多处有明显的“V”或“U”字型、椭圆形低阻异常。	岩溶漏斗。该区的覆盖层厚度一般在 2~9 m 之间,局部达 12 m。受破碎带影响,岩体较破碎,节理裂隙、溶蚀裂隙发育,发育深度一般在 5~25 m 之间。
W—Ⅴ	测区东南部南侧	异常不完整,呈 NW 向展布。反射波同相轴有明显错动,续至波有振荡拖尾现象,反射波同相轴呈凹弧形,同相轴反射波振幅大、频率较低;有明显的“眼”状特征;视电阻率较低,有明显的“V”或“U”字型、椭圆形低阻异常。	受破碎带影响,岩体较破碎,节理裂隙、溶蚀裂隙发育,发育深度一般在 1~25 m 之间,并有溶洞存在。覆盖层厚度一般在 2~14 m 之间,局部达 18 m。
W—ⅤⅢ	测区的东部	呈 NW 向展布。反射波同相轴呈凹弧形,振幅大、频率较低;有明显的“眼”状特征;局部反射波同相轴有错动,续至波有振荡拖尾现象;视电阻率较低,有明显的“V”或“U”字型、椭圆形低阻异常。	节理裂隙、溶蚀裂隙发育,发育深度一般在 1~20 m 之间,并有溶洞存在。覆盖层厚度一般在 2~15 m 之间,局部达 20 m。

4 勘探结果验证

综合物探资料得到了地面地质调查和钻探资料的验证。堆场范围内按 30×30 m 网格布置钻孔,共

布置 1 282 个钻孔。孔深要求为:覆盖区孔深要求钻入完整基岩 5 m,裸露地区则为 10 m 左右,控制性验证孔深为 50 m。堆场区内地下岩溶发育情况统计如表 2 所示。

表 2 拟建赤泥堆场范围内钻孔所揭露的岩溶发育深度统计表
Table 2 Karst features revealed by drilling data in the study area

岩溶发育深度/m (从基岩顶面起算)	出现岩溶形态 的钻孔数/个	占总孔数的 百分比/%	溶蚀裂隙		溶洞、孤石	
			数量	所占百分比/%	数量/个	所占百分比/%
0~2	89	29.8	89	31.8	0	0
2~4	118	39.5	118	42.0	10	55.6
4~6	57	19.0	53	18.9	4	22.2
6~8	20	6.7	17	6.0	3	16.7
8~10	4	1.3	1	0.4	3	16.7
10~15	5	1.7	2	0.7	3	16.6
15~20	0	0	0	0	0	0
20~25	0	0	0	0	0	0
>25	6	2.0	1	0.4	5	27.8

由表 2 可以看出:
(1)浅表隐伏岩溶形态主要为溶蚀竖向裂隙(占 94.0%),其次为溶洞(占 6%)。浅表岩溶发育深度主要在基岩面以下 0~10 m。此结果与物探结果(表 1 解译)基本一致。
(2)据钻探揭露,在岩溶槽谷深部发育有溶洞,为场地内地下水集中渗流的通道,其发育深度主要在基岩面以下 25~45 m,再往下岩溶发育程度变弱,钻探揭露的深部岩溶与物探解译的异常带深度接近^[16-17]。

5 结 语

(1)利用综合物探技术可有效探测岩溶管道的分布特征,多种物探方法研究成果综合分析、相互印证有利于排除干扰,提高解译的置信度。
(2)本次通过等偏移地震反射法、高密度电法和自然电场法的勘探数据综合分析,确定了各处覆盖层的厚度,确认了 5 个断层破碎带的走向,圈定了 14 个物探异常区和岩溶发育的位置、规模,初步探明了岩

溶管道的分布和确定了管道内地下水的流向。
(3)根据物探结果判定本区岩溶管道的发育特点是:浅部以垂直型溶隙为主,其发育深度一般在地面下 0~10 m。深部岩溶管道走向近 SN 向,主要发育深度约为地面下 40~50 m。超过此深度,岩溶发育程度逐渐减弱。
(4)物探和钻探结果均证实,场地浅部以垂直岩溶形态(如落水洞、垂直发育的溶蚀裂隙)发育为主,深部岩溶主要沿断裂带或岩溶破碎带发育,以地下河形式出现。

参考文献

[1] 曹小虎. 山西铝厂赤泥堆场对地下水环境影响分析[J]. 地下水, 2006,28(1):53-54,81.
[2] 尹国勋,姜雪,袁宵梅. 焦作市某赤泥堆放场周围地下水水质评价[J]. 环境科学与管理,2007,32(4):163-165.
[3] Tassy A, Maxwell M, Borgomano J, et al. Electrical resistivity tomography (ERT) of a coastal carbonate aquifer (Port-Mi-ou, SE France)[J]. Environmental Earth Sciences,2014,71(2): 601-608.
[4] 葛如冰. 高密度电阻率法在广东省工程勘察中的应用实例[J]. 物探与化探,1997,21(3):377-381.
[5] 刘伟,甘伏平,赵伟,等. 高密度电法与微动技术组合在岩溶塌陷分区中的应用分析:以广西来宾吉利塌陷为例[J]. 中国岩溶,

2014,33(1):118-122.

[6] 邓居智,刘庆成,莫罕. 高密度电法在水坝隐患探测中的应用[J]. 工程勘察,2002,30(6):62-64.

[7] 覃政教,陈滋康,卢呈杰,等. 用浅地震方法探测隐伏岩溶[J]. 中国岩溶,1987,6(3):213-223.

[8] 覃政教. 地面物探在岩溶地基工程勘察中的应用:以桂林某花园综合楼为例[J]. 中国岩溶,2005,24(4):338-343.

[9] 王俊业. 应用自然电场法研究地下水流场[J]. 物探与化探,2002,26(2):140-141.

[10] 梁竞,韦启锋,洪卷,等. 自然电场法在岩溶地区找水打井中的应用. 工程勘察,2016,44(2):68-78.

[11] 陈仲候. 工程与环境物探教程[M]. 北京:地质出版社,2013.

[12] 蓝俊康,郭纯青. 水文地质勘察[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[13] 梁棋念. 综合物探技术在探测岩溶破碎带中的应用[J]. 西部探矿工程,2014,(3):130-132.

[14] 李成香,王建军,唐诗群,等. 应用综合物探方法探测隐伏岩溶漏斗[J]. 工程勘察,2008,36(3):49-52.

[15] 张银松,张家刘,李斌,等. 综合物探法在岩溶石山找水中的应用[J]. 工程勘察,2014, 42(8):89-92.

[16] 陈新华,彭振斌. 广西平果铝厂平南赤泥堆场的岩溶渗漏研究与治理[J]. 矿产与地质,2006,20(1):73-76.

[17] 孔令新,陈建湘,龙国凤. 广西平果铝厂岩溶勘察研究与分析[J]. 城市勘测,2003,(2):53-56.

The application of integrated geophysical method to karst pipeline distribution

CHENG Yaping ,JIANG Lingzhi, LI Liuyue, LI Shanmin, FENG Zhiqin

(College of Environmental Science and Engineering/ Guangxi Scientific Experiment Center of Mining , Metallurgy and Environment, Guilin University of Technology,Guilin,Guangxi 541004,China)

Abstract To predict and evaluate the impact of the Red Mud Stack Yard on groundwater system after the mud dump was completed, the integrated geophysical techniques, which primarily consist of common offset seismic reflection and electrical resistivity tomography and is assisted by the natural electric field method, were used to investigate the characteristics of karst underground and pipeline distribution at the site. As a result, the cover layer thickness of the entire dump yard was determined; five fracture zones and their strikes were confirmed respectively; fourteen geophysical prospecting anomalous zones were delineated; and the karst pipeline distribution features and groundwater flow direction were preliminarily identified. By combining the integrated geophysical techniques with the drilling results, it was found that the karst development in the study area is characterized by the shallow vertical type. The shallow karst is well developed at the depth of about 0—10 m below the surface. Besides, there is also some deep karstic features were identified at the depth of about 40—50 m below the surface, beyond this depth karst development becomes rare and weak.

Key words underground water, the Red Mud Stack Yard, karst, common offset seismic reflection, electrical resistivity tomography, natural electric field method, Pingguo aluminium mine

(编辑 张玲)