

# 高密度电法在毗卢洞石窟地质病害勘察中的应用

王金海<sup>1</sup>, 才智杰<sup>1</sup>, 苏文俊<sup>2</sup>, 吴锐<sup>3</sup>, 喻忠鸿<sup>1</sup>

(1. 青海省第三地质矿产勘查院, 西宁 810029; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000;

3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

**摘要:** 以毗卢洞石窟保护工程治理工程为背景, 介绍了高密度电法的基本原理和方法。结合石窟场区的工程地质条件, 采用高密度电法对洞窟岩体裂缝及滑坡病害进行了地球物理勘察, 以了解洞窟岩体裂隙的发育程度和滑坡的工程地质、水文地质条件对洞窟及院落地面、建筑变形的影响等, 为工程地质勘察、稳定性评估及防治工程设计提供依据。结果表明: 柳本真十炼窟岩体和千佛洞岩体裂缝比较发育, 在地表水侵蚀风化和植物根系生长劈裂的作用下会进一步发展, 对洞窟岩体的稳定将产生严重的影响; 影响滑坡稳定的主要因素是呈连通状态的地下水, 垂向发育的含水破碎带, 且垂向发育的含水破碎带或不同岩性的含水软弱接触带构成滑坡后缘的依附面, 对坡体的稳定形成不利影响。

**关键词:** 高密度电法; 石窟; 保护工程; 地质勘察; 毗卢洞

中图分类号: P631

文献标志码: A

文章编号: 1001-5485(2015)10-0017-06

## 1 研究背景

我国毗卢洞石窟在开凿至今的漫长年代中, 随着石窟区环境的变迁, 在自然和人为等不利因素的不断影响下, 洞窟、文物所依附的地质和环境载体产生了变化, 石窟存在严重的岩体松弛卸荷、位移、垮塌、石刻造像风化剥落、水流冲刷等多种地质病害, 同时在石窟陡崖前方存在一堆积层滑坡。2007年雨季后坡体有明显滑移, 石窟保护区内房墙体裂缝加大, 院内地面裂缝张开, 这些都严重威胁到石窟造像的安全, 严重威胁着石窟造像的长期存留。因此, 对石窟进行全面的抢救性保护加固, 延长珍贵历史文物的保存期, 已经刻不容缓。

随着我国物探技术的不断发展, 物探技术日趋成熟, 它作为一种经济、快捷、有效的手段, 已广泛地运用在工程地质调查行业中<sup>[1-5]</sup>。但各种物探方法的应用都有一定的应用条件, 不同的地质、地球物理条件和边界特征对探测成果具有不同的影响, 针对某种特殊问题需要采用相应的物探方法。如高密度电法常用于探测场区地层情况等; 雷达探测用于探明场区表层土体密实度及空洞情况等; 面波测试用于场区覆盖层速度分层及不良地质现象判定等。目

前, 高密度电法已广泛应用于各类工程地质勘察中, 雷旭友等<sup>[6]</sup>研究了超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用优缺点, 肖敏等<sup>[7]</sup>采用该方法对北京某煤矿巷道及采空区进行了探测分析, 尚耀军<sup>[8]</sup>成功地利用高密度电法探测分析了某滑坡的特征, 周有禄<sup>[9]</sup>等应用该方法对包西线发生沉降的桥涵过渡段注浆加固前后的密实度和含水情况进行了检测, 同时对没有发生路基沉降的标准段路基进行了检测, 得出高密度电法在路基检测中是一种有效方法。

毗卢洞石窟位于四川省安岳县丘陵区东南的中丘塔子山上, 泥岩地层发育。中丘坡度稍大, 切割加剧, 旱地比重大, 沟田多, 砂岩出露处冲刷相对缓慢, 水土流失较慢, 泥岩出露处冲刷相对急剧, 水土流失较快, 基岩裸露, 以沟侧蚀、淘蚀为主。砂岩、泥岩层较厚、层次多, 近水平状构造发育, 形成多级平台, 呈鸡爪状、串珠状岭系分布, 在山的顶部形成桌状、磨盘状方山丘陵。石窟造像区开凿于遂宁组( $J_3Sn$ )巨厚层块状砂岩的桌状陡崖上。窟顶后缘坡体上伏第四系堆积层, 地势南西低, 北东高, 多为紫红色亚黏土。石窟前缘为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 的自然斜坡, 斜坡上灌木、乔木生长茂盛, 坡体上有台阶状小平台, 前部到达沟谷坝地, 为石窟前部堆积层产生滑坡提供了必

收稿日期: 2014-06-11; 修回日期: 2014-07-28

作者简介: 王金海(1984-), 男, 宁夏西吉人, 工程师, 主要从事综合地球物理勘查研究。(电话) 097-16334725 (电子信箱) 190337380@qq.com。

要的地形地貌条件。

毗卢洞岩体病害主要分为滑坡病害和危岩体病害 2 种。为了对毗卢洞现场地质病害进行更深入系统的研究和满足后续治理修复工作的要求,需要进行详细工程地质勘察,以满足对毗卢洞区域范围内边坡坡体和危岩体稳定性评价等方案设计的需要。

为此,结合毗卢洞石窟工程场区工程地质条件,针对特定的勘探任务,对毗卢洞岩体裂缝及滑坡病害进行了地球物理勘察,以了解洞窟岩体裂隙的发育程度和滑坡的工程地质、水文地质条件,以及对毗卢洞洞窟及院落地面、建筑变形的影响等,为工程地质勘察、稳定性评估及防治工程设计提供依据。

## 2 高密度电法基本原理

高密度电阻率法属于直流电阻率法的范畴,集电剖面法和电测深于一体,以岩土体的电性差异为基础,研究在施加电场作用下的地下传导电流的变化分布规律,来探测地下地层结构,了解地下地质构造特征,既可以观测地下一定深度范围内的横向电性变化情况,又可以观测垂向电性的变化特征,信息量大<sup>[5]</sup>。利用程控电极转换器,由微机控制选择供电、测量电极,达到数据的高效率采集,快速采集原始数据。最后把测量结果送入计算机,对数据进行处理并可以给出相关地电断面分布的各种物理解译结果。处理后的数据具有观测精度高、数据采集量大、地质信息丰富、生产效率高等特点。

高密度电法层析成像技术自动化程度高,经数字滤波和人工经验修正后,可消除各种人为的测量误差。其层析成像技术使得所探测的调查对象更加形象直观,数据信息采集量大,数据处理软件对数据的处理程序更加合理,更加符合实际,大大减少了解释的多解性。高密度电法勘探系统示意图见图 1。

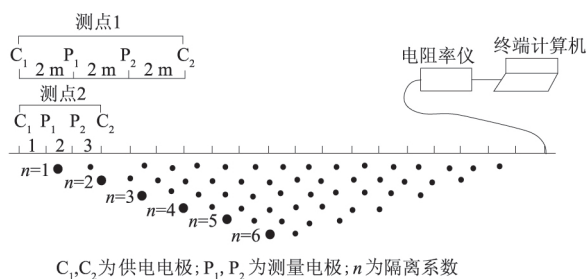


图 1 高密度电法勘探系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high density electrical prospecting system

本次高密度电阻率法的勘探装置形式采用温纳装置、偶极装置及斯隆贝格装置。在工程勘探中,现

场使用条件下一般供电电压有限,为了减小电压、加强有效信号及增大测量电位,一般都采用四极装置。

## 3 测线布置及物性参数值的确定

物探工作根据洞窟岩体裂缝调查要求及滑坡体的勘测范围和目的要求,此次物探调查在柳本真十炼窟和千佛洞岩体裂缝较发育的范围内布置了 8 条高密度层析成像剖面(G-1 至 G-8);在滑坡病害范围内布置了 5 条高密度层析成像横剖面(G-9 至 G-13);4 条高密度层析成像纵剖面(G-14 至 G-17);4 条高密度电法等视电阻率反演纵剖面(S-1 至 S-4)。高密度剖面测量采用温纳观测装置,为获得高质量的数据,在洞窟岩体裂缝调查范围内,根据裂缝的发育程度和高密度电法探测的最佳效果,经试验选取了 0.2m 的密集测深点距。

物性参数是地球物理探测资料解释的基础,为对高密度电法层析成像剖面进行准确的定量、定性解释和分析,我们按照地球物理探测规定和要求,通过孔旁电测深、典型剖面对比、同类岩性地层经验参数的统计,并结合该区的地层地质条件的分析对比,确定了该区的物性参数值及其变化范围,见表 1。

表 1 不同岩土的电阻率参数统计表

Table 1 Resistivity parameters of different kinds of rocks and soils

岩土名称	视电阻率/( $\Omega \cdot m$ )		含水率/%
	变化范围	常见值	
人工填土	100 ~ 600	300	< 60
风化泥岩	10 ~ 150	80	< 30
微风化泥岩砂岩互层	100 ~ 300	120	
完整泥岩砂岩互层	200 ~ 1 000	500	
完整砂岩	2 000 ~ 5 000	$\geq 2 000$	

## 4 结果分析

高密度电法层析成像剖面是经过数据采集和数据处理生成预处理文件,采用 Geogiga Rtomo 数据解释软件经数次地形改正、经验修正和反演迭代形成二维层析成像位图文件。高密度电法层析成像剖面宏观和直观地反映了探测范围内山体内部构造、地层岩性的物性特征及山体内部地下水和软弱滑动带的位置与形状。同时,采用高密度电法测深数据并结合普通电测深资料得到滑坡纵断面等值线反演图像,图像采用 2 W 电法数据处理系统进行地形改正和反演,反演图像能提供大量可靠的反映滑坡重要因素的地质信息,可作为较准确的物探定性、定量解释的基础,对滑坡的重要地质信息和稳定状态做出正确判断。

#### 4.1 石窟岩体裂缝调查

##### 4.1.1 柳本真十炼窟岩体裂缝

如图 2(a), 此断面位于“柳本真十炼窟”顶端的后部, 在 6 m 处的低阻带即为 L2 岩石张开裂缝, 基岩裂缝较发育且局部充填含水的低阻物质, 裂缝附近风化较严重。

如图 2(b), 此断面位于“柳本真十炼窟”顶中部, 断面约 4 m 处的低阻带即为 L3 岩石张性裂缝, 表层低阻物质填充, 裂隙延伸到造像区中部, 约 6.5 m 和 10 m 处分别为相对低阻的表面 L2 未张开裂缝和 L1 未张开裂缝, 其中 L2 深约 1.8 m, 下部岩体较完整且呈凹槽状。上部岩体裂隙发育且局部充水呈透镜状, 风化层较厚。

如图 2(c), 此断面位于“柳本真十炼窟”顶端前部, 裂缝反映较明显, 断面约 2 m 为低阻物质充填的岩石裂缝, 2.5 m 处和约 7 m 处的低阻带走向即为岩石裂缝走向, 2 个裂缝在地下相互连通, 中部风化层较厚, 下部基岩较完整且呈凹槽状。

由图 2 综合分析, 位于“柳本真十炼窟”顶部的 2 道裂缝相隔约 5 m, 岩体左侧(L3 裂缝)为张裂缝, 裂缝中生长有 3 棵直径约 0.1 m 的小树, 有腐植土填充, 电性差异明显, 裂缝呈低阻反映, 裂缝的影响深度较大。右侧(L2 和 L1 裂缝)的裂缝地表未见张裂,

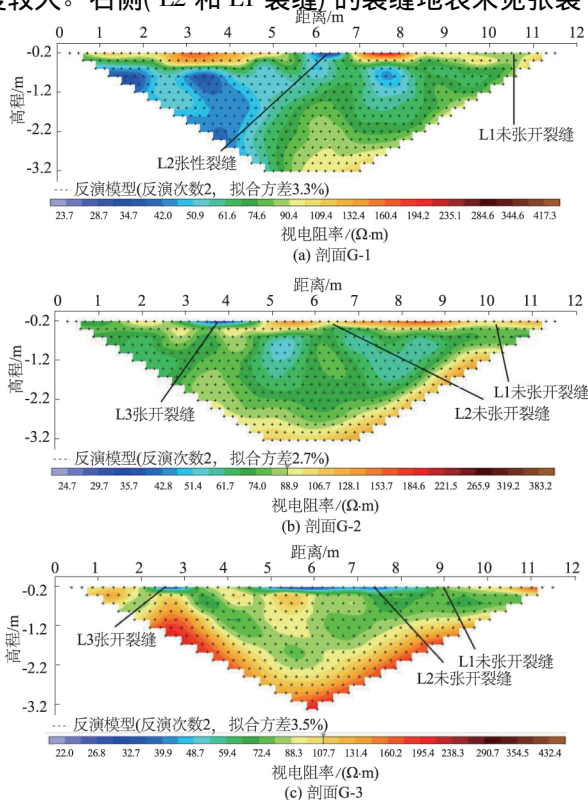


图 2 G-1 至 G-3 剖面高密度电法层析成像图

Fig. 2 Tomographic sectional images (G-1 to G-3) by high density resistivity method

物性差异小, 电性反映不太明显, 但从图像仍可看出裂缝呈相对低阻反映, 影响深度不大。2 道裂缝间的完整岩体呈凹槽状, 深约 1.6 m, 上部岩体风化含水, 视电阻率明显降低。由此推断的裂缝走向如图 3 所示。

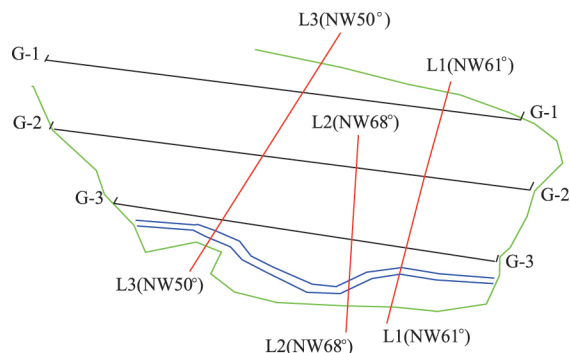


图 3 裂缝走向剖面

Fig. 3 Section of fracture strike

##### 4.1.2 千佛洞岩体裂缝

如图 4(a), 此断面位于“千佛洞”顶端左侧, 岩石裂缝比较发育, 在 1.5、2.5、4 m (表层裂缝) 的低阻带即为张性裂缝, 裂缝上部为含水腐植土填充。在 5.2 m 处的低阻裂缝反映明显, 其表层为混凝土填充, 呈高阻。

如图 4(b), 此断面位于“千佛洞”右壁上端的后部, 基岩完整, 微风化、腐植土覆盖层从左到右逐渐变薄, 右边岩体裸露。在断面 8.5 m 处有一明显的相对低阻的未张开裂缝 L21, 裂缝影响深度较大。

如图 4(c), 此断面位于“千佛洞”右壁上端的前部, 在 5 m 和 6 m 处有 2 道低阻裂缝, 分别为 L23 和 L20。L23、L20 均有腐植土等低阻物质填充, 5 m 处裂缝影响深度较大, 6 m 处的裂缝影响深度在 2 m 范围内, 9 m 处有一隐伏裂缝, 推测影响深度小于 2 m。

如图 4(d), 此断面位于“千佛洞”主洞顶端后部, 在 2.2 m 处存在一道明显低阻裂缝 L24, 岩体风化层较厚, 较完整。腐植土覆盖层从左到右逐渐变厚, 左边岩体裸露。

如图 4(e), 此断面位于“千佛洞”主洞顶端前部, 在 1.2 m 和 4.4 m 处存在 2 道低阻裂缝, 分别为 L24 和 L23。4.4 m 处裂缝影响深度较大, 裂缝中低阻物质充填, 两裂缝间岩体有囊状含水软弱带存在, 断面右侧表层为逐渐加厚的腐植土覆盖。

由高密度层析成像剖面综合分析, 位于“千佛洞”顶主洞壁和左壁连接处的裂缝共有 3 条, 左侧(L25 裂缝), 均已被腐植土填充, 且有上层滞水汇聚, 电性差异明显, 呈低阻反映; 右侧(L26 裂缝) 裂缝由于地表被水泥封闭, 在断面图上地表为高阻反



映 0.2 m 以下裂缝的反映比较明显(图 4(a))。位于“千佛洞”主洞壁顶 4.4 m 处有 1 条影响深度较大的主裂缝(L23 裂缝),1.2 m 处有小规模的裂隙(L24 裂缝),影响深度不大,主洞壁的裂缝沿水平方向向岩体内延伸不到 4 m;位于“千佛洞”右洞壁顶 5.5 m 和 9 m 处有 2 条主裂缝(L23 和 L21 裂缝)呈八字形,右洞壁的裂缝水平向岩体内延伸也不到 6 m(图 4(b),(c))。总体而言,1 号裂缝最宽最长,基本贯穿于整个岩体,是对岩体稳定的主要威胁。推断的裂缝走向如图 5 所示。

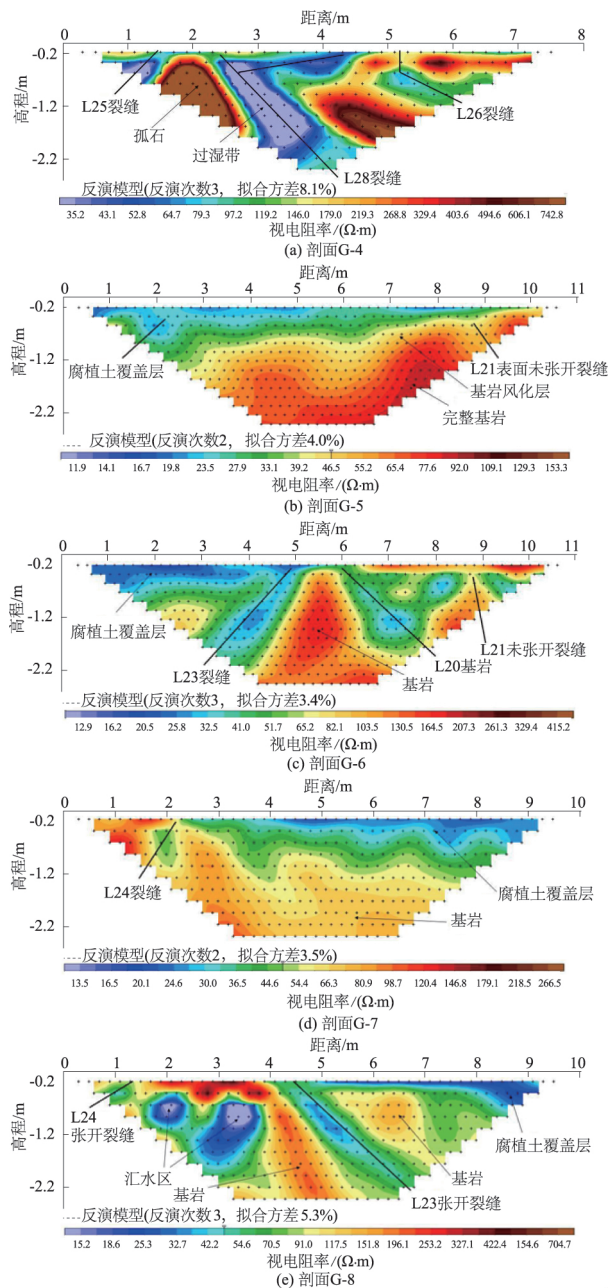


图 4 G-4 至 G-8 剖面高密度电法层析成像图  
Fig. 4 Tomographic sectional images (G-4 to G-8) by high density resistivity method

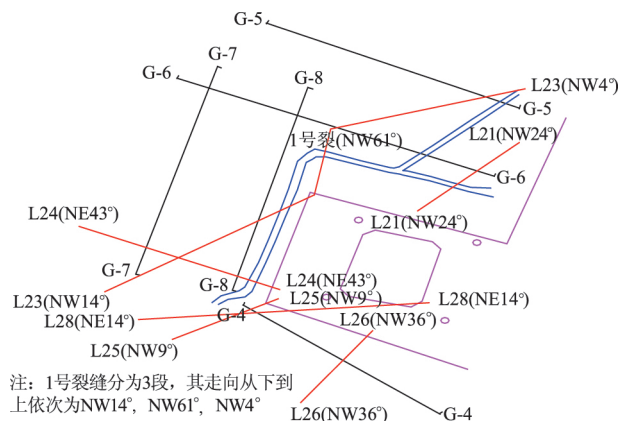


图 5 裂缝走向推断剖面  
Fig. 5 Section of concluded fracture strike

## 4.2 滑坡病害

### 4.2.1 滑坡地质特征分析

滑坡坡体的主要岩层为泥岩和砂岩互层,毗卢洞院落基础为人工填土,视电阻率在  $100 \sim 600 \Omega \cdot m$ ,在形成含水过湿带时,视电阻率降至  $60 \Omega \cdot m$  以下。坡体表层大部为耕植土,部分为植被覆盖,局部有大块石或裸露基岩。风化泥岩和强风化泥岩、砂岩互层的视电阻率变化较大,视完整程度、风化程度和含水程度的不同,在  $10 \sim 150 \Omega \cdot m$  范围内变化。坡体中微风化泥岩、砂岩互层的视电阻率大于  $200 \Omega \cdot m$ ,但由于上层潜水和基岩裂隙水影响,很难形成连续的层面反映。较完整的砂岩最高可达  $2000 \Omega \cdot m$  以上,基岩裂隙比较发育。从图 6 可以明显看出,坡体的下部地层相对比较完整,坡体内不存在明显的影响滑坡发展的大的断裂构造。

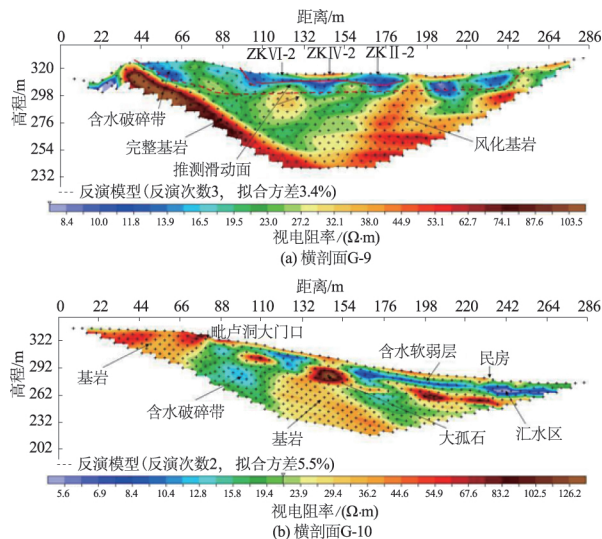


图 6 G-9 和 G-10 剖面高密度电法层析成像图  
Fig. 6 Tomographic sectional images (G-9 and G-10) by high density resistivity method

#### 4.2.2 滑坡区地下水条件分析

由图 6 综合分析,滑坡区的地下水较发育,以上层潜水为主,且连通性较好,同时由于基岩裂隙发育,地下水补给来源丰富,致使坡体内存在多处基岩裂隙水汇聚带和含水破碎带,其多以过湿带的形式存在,局部以透镜状汇水和窝状水的形式存在风化岩体中,且岩体中部存在一条连通的地下水通道,含水过湿带的视电阻率一般低于  $20 \Omega \cdot \text{m}$ 。部分含水破碎带的垂向影响深度达到较完整的基岩,是滑坡进一步发展的主要影响因素之一。

#### 4.2.3 滑坡趋势性滑动面(带)分析

通过滑坡高密度电法视电阻率等值线图(图 7)分析,电性分层和定性研判推断的趋势性滑动面(带)分 2 级,滑坡滑动面(带)沿上层滞水面发育。S-3 和 S-4 断面显示的滑坡后缘位于院墙附近, S-1 和 S-2 断面的一级后缘应在院内地面裂缝附近(由于软件处理程序限制,该段地形失真),或沿填土底界的低阻物性层位发展至洞窟岩体附近,二级后缘位于滑坡中部第三排钻孔附近。物探所推断的一级滑动面的出口位于坡体中部陡坡附近,处于风化砂岩和较完整泥岩的接触带的软弱部位;二级滑动面的出口位于坡体底部民房附近。

## 5 结 论

根据物探资料的全面分析和研判,对洞窟岩体裂缝得出如下的结论:

柳本真+炼窟岩体和千佛洞岩体裂缝比较发育,以千佛洞岩体裂缝为甚,且靠近临空面的岩体裂缝较集中。裂缝垂直影响深度较大( $>4 \text{ m}$ )的张开裂缝在地表水侵蚀风化和植物、树木根系生长的作用下会进一步的发展,扩宽裂缝,加大影响深度,对洞窟岩体的稳定将产生严重的影响。垂直影响深度在  $2 \text{ m}$  左右,或未张开裂缝往往加快上部岩体的风化,加大加深较完整岩体顶面风化凹槽的程度,对洞窟文物的保护是潜在的威胁。

经对高密度层析成像横剖面 and 电测深纵断面等值线反演图像的综合分析,认为滑坡主要的影响因素是地下水和垂向发育的含水破碎带。由于上层潜水和地下水大多呈连通状态,且垂向发育的含水破碎带或不同岩性的含水软弱接触带构成滑坡后缘的依附面,对坡体的稳定形成不利影响,趋势性滑动面(带)沿上层滞水面发育,深度  $6 \sim 10 \text{ m}$ ,滑坡一级后缘在院墙附近,出口都在坡体中部第 3 排钻孔附近,二级出口均在滑坡体下方的民房附近。推测出可能沿人工

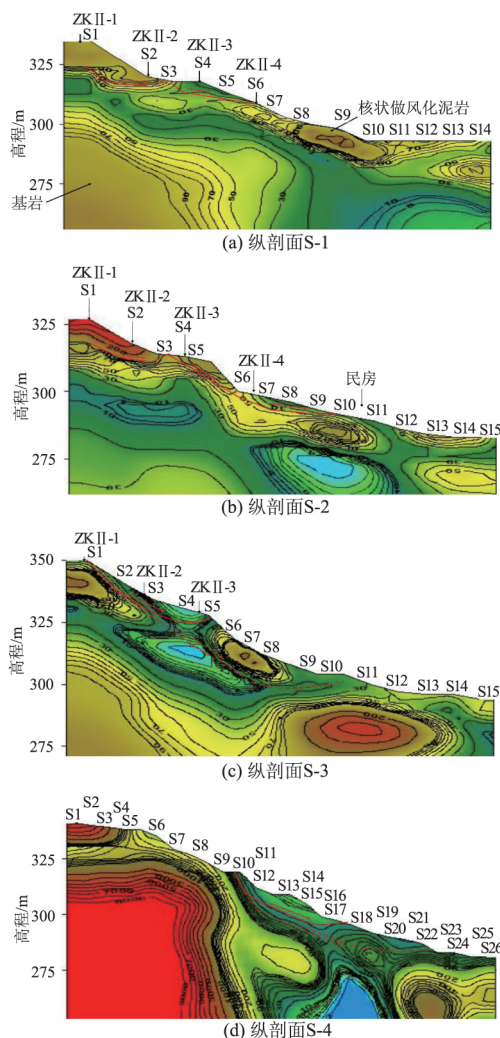


图 7 S-1 至 S-4 剖面高密度电法视电阻率等值线

Fig. 7 Resistivity contours (S-1 to S-4) by high density resistivity method

填土底面发育的趋势性滑动面(带)亦应引起重视。

#### 参考文献:

- [1] 林金鑫,田钢,王帮兵等.良渚遗址古水系调查中的综合地球物理方法[J].浙江大学学报(工学版),2011,(5):954-960. (LIN Jin-xin, TIAN Gang, WANG Bang-bing, et al. Integrated Geophysical Survey for Palaeo-drainage System at Liangzhu Sites[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, (5): 954 - 960. (in Chinese))
- [2] 戴前伟,张彬,冯德山等.水库渗漏通道的伪随机流场法与双频激电法综合探查[J].地球物理学进展,2010,25(4):1453-1458. (DAI Qian-wei, ZHANG Bin, FENG De-shan, et al. Integrated Detection of Leakage Paths in Reservoirs by the Pseudorandom Flow-field Method and Dual Frequency Induced Polarization Method[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(4): 1453 - 1458. (in Chinese))
- [3] 陈培德.地质雷达检测技术在梧村隧道衬砌质量检测中

- 的应用[J]. 公路工程, 2010, (1): 134 - 137. (CHEN Pei-de. Application of Geological Radar Detection Technology in the Inspection of Wucun Tunnel Lining Quality [J]. Highway Engineering, 2010, (1): 134 - 137. (in Chinese))
- [4] 王书增, 谭春, 陈刚等. 面波法在堤坝隐患勘察中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 262 - 266. (WANG Shu-zeng, TANG Chun, CHEN Gang, et al. The application of Rayleigh Wave Exploration on Detecting Hidden Dam Troubles [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 262 - 266. (in Chinese))
- [5] 倪亮, 陈大红, 徐华文等. 水域电法在江湖穿越工程中应用[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(6): 2710 - 2715. (NI Liang, CHEN Da-hong, XU Hua-wen, et al. Electrical Exploration on Water Region Used in the Geophysical Prospecting Cross the River and Lake [J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(6): 2710 - 2715. (in Chinese))
- [6] 雷旭友, 李正文, 折京平. 超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(1): 340 - 347. (LEI Xu-you, LI Zheng-wen, ZHE Jing-ping. Applications and Research of the High Resolution Resistivity Method in Exploration of Caves, Mined Regions and Karst Region [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(1): 340 - 347. (in Chinese))
- [7] 肖敏, 陈昌彦, 白朝旭等. 北京地区浅层采空区高密度电法探测应用分析[J]. 工程地球物理学报, 2014, (1): 29 - 35. (XIAO Min, CHEN Chang-yan, BAI Chao-xu, et al. Analysis and Applications of Shallow Underground Goaf Detection Using High-density Electrical Method in Beijing [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, (1): 29 - 35. (in Chinese))
- [8] 尚耀军. 高密度电法在贵州金沙某滑坡勘察中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, (6): 771 - 776. (SHANG Yao-jun. Application of High Density Resistivity Method in Landslide Investigation of Jinsha, Guizhou [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, (6): 771 - 776. (in Chinese))
- [9] 周有禄, 王起才, 张戎令. 高密度电法在铁路桥涵过渡段路基病害检测中的应用[J]. 铁道建筑, 2013, (10): 67 - 69. (ZHOU You-lu, WANG Qi-cai, ZHANG Rong-ling. Application of High Density Resistivity Method in Railway Bridge Transition Section Roadbed Diseases Detection [J]. Railway Engineering, 2013, (10): 67 - 69. (in Chinese))

(编辑: 曾小汉)

## Application of High-density Electrical Methods to the Survey of Geo-hazards in Pilu Cave

WANG Jin-hai<sup>1</sup>, CAI Zhi-jie<sup>1</sup>, SU Wen-jun<sup>2</sup>, WU Rui<sup>3</sup>, YU Zhong-hong<sup>1</sup>

(1. The Third Institute of Geology and Mineral Resources Exploration of Qinghai Province, Xining 810029, China; 2. Northwest Research institute Co. Ltd. of C. R. E. C, Lanzhou 730000, China; 3. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Wuhan 430063, China)

**Abstract:** To provide basis for the stability assessment and protection work design of Pilu Cave, high density electrical technique was applied to the geophysical prospecting of rock fracture and landslide disaster in the grotto. The effects of fracture development, engineering and hydrologic and geologic conditions on the deformation of grotto and ground surface were explored. Results indicated that rock fractures in the Liubenzhen Sculptures Grotto and Thousand Buddha Cave are well developed and will develop further under the action of surface water erosion and plant's root growth, posing severe adverse impact on the stability of the cave. Connected groundwater and vertically-developed water-bearing fracture zone are main factors affecting the stability of landslide, and the water-bearing fracture zone together with the weak contact zone of different rocks forms the attachment surface of the landslide's back edge, which is unfavorable for the slope stability.

**Key words:** high-density electrical method; grotto; conservation work; geological survey

本刊投稿网址: <http://ckyyb.crsri.cn>