

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.04.11

# 东南沿海典型浅覆盖区高密度电阻率法 残坡积层测深研究

房浩<sup>1</sup> 李晨<sup>2</sup> 雷晓东<sup>2</sup> 杜显祥<sup>3</sup> 孙杰夫<sup>2</sup> 韩宇达<sup>2</sup>

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 北京市地质勘察技术院, 北京 100120;  
3. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083)

**摘要:** 确定残坡积层厚度对于山区地质灾害防治具有重要意义。因底界埋深、岩性和含水率等因素变化大以及探测目标较浅、分辨力要求高等原因, 浅覆盖区残坡积层厚度探测的难度较大。为精准探测残坡积层覆盖厚度, 并给类似地区开展相关探测工作提供技术参考, 同时为区域内高精度地质灾害调查评价结果准确提供有力保障, 本文选择杭州典型斜坡为对象开展高密度电阻率法残坡积层覆盖厚度测深试验研究, 结果表明, 采用温纳 $\alpha$ 装置、极距0.5~2 m, 能够很好地划分出残坡积层、全风化层、强风化层及完整基岩之间的界面, 定量分辨0.5 m及以上残坡积层厚度, 探测结果得到了钻孔验证。实测中应根据具体地质条件选择不同的装置型式、极距等参数。本研究成果为探索构建第四系浅覆盖区地质灾害调查技术方法体系提供了支持。

**关键词:** 高密度电阻率法; 残坡积层; 全风化花岗岩; 浅覆盖区

中图分类号: P631.3

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)04-0085-09

## Study on thickness measurement of eluvial slope layer by high density resistivity method in typical shallow covered areas of southeast coast

FANG Hao<sup>1</sup>, LI Chen<sup>2</sup>, LEI Xiaodong<sup>2</sup>, DU Xianxiang<sup>3</sup>, SUN Jiefu<sup>2</sup>, HAN Yuda<sup>2</sup>

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China; 2. Beijing Institute of Geo-Exploration Technology, Beijing 100120, China; 3. College of Water Resources and Environment, China University of Geology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Determining the thickness of eluvial slope layer is of great significance to the prevention and control of geological disasters in mountain areas. It is difficult to detect the thickness of eluvial slope layer in shallow coverage area due to the large changes of the buried depth of bottom boundary, lithology, water content and other factors, as well as the shallow detection targets and high resolution requirements. In order to provide methods and techniques for the prevention and control of geological disasters in similar areas, a high density resistivity detection experiment was carried out in a typical mountain area of Hangzhou. The results show that the interface between eluvial layer, fully weathered layer, strongly weathered layer and hard bedrock can be well divided by using Wenner  $\alpha$  device and polar distance of 0.5 to 20 m, the thickness of eluvial slope layer which is above 0.5 m can be quantitatively distinguished. And the detection results have been verified by drilling. In actual measurement, different device types, polar distances and other parameters should be

收稿日期: 2020-02-04; 修订日期: 2020-03-17

基金项目: 中国地质调查局“全国地质灾害数据更新与服务”二级项目(DD201906038)

第一作者: 房浩(1984-), 男, 水工环专业, 博士, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查、风险评价及宏观规划方面的研究工作。E-mail: fangh@cigem.cn

通讯作者: 李晨(1983-), 男, 地球物理专业, 高级工程师, 主要从事工程地球物理勘探与研究。E-mail: lichen6000@163.com

selected according to specific geological conditions. The research results provide support for exploring and constructing the technical and methodological system of geological hazard investigation in Quaternary shallow overburden area.

**Keywords:** high-density electrical method; eluvial slope layer; fully weathered granite; shallow covered areas

## 0 引言

残坡积层是经物理风化和化学风化后形成的一种碎屑物,其分布十分广泛,在我国东南沿海地区如浙江、福建等省份尤为突出,由于其特殊的工程地质特性(受扰动后强度降幅大,遇水软化快等特点)<sup>[1]</sup>,成为这一地区崩塌、滑坡、泥石流等突发性地质灾害孕育与发生的主要影响因素之一。在残坡积层浅覆盖区的不稳定斜坡体上,崩塌、滑坡灾害事故经常发生,经支挡加固后的失事边坡也屡见不鲜,给山区城镇居民的生命财产安全带来巨大损失,其破坏常具有反复性和长期潜在危害性<sup>[2]</sup>。

残坡积层厚度的确定对于山区地质灾害防治意义重大,也是地质灾害治理工程设计成败的关键因素所在。应用地球物理技术解决工程与环境问题是近年来学科交叉发展形成的前沿研究领域,国内外目前确定残坡积层厚度的方法主要有地质调查法、物探法和钻探法。物探法又可主要分为高密度电阻率法、瑞雷面波法、地质雷达法等<sup>[3]</sup>。其中,高密度电阻率法是为满足浅部精细勘查需要所研制的一种集成了传统的电剖面法和电测深法特点为一体的常规直流电法<sup>[4]</sup>,由于其布极和数据采集采用自动化芯片电缆统一完成,避免了人工跑极带来的误差,使其具有工作效率高、劳动强度低、数据信息丰富、分辨率高、成本低等优点<sup>[5]</sup>。

国外学者利用高密度电法探测地层厚度的研究早在20世纪80年代前就相继进行,一些国外的研究者们利用三维高密度电阻率法对地质灾害滑坡隐患部位进行了第四系覆盖层探测,探明了滑坡第四系覆盖层空间分布特征<sup>[6-7]</sup>; Vincenzo Sapia等在越南岷港市 Hoa Khanh 工业园区使用二维电阻层析成像对地层污染物厚度进行成像,有效获取污染层厚度分布情况<sup>[8]</sup>。随后高密度电法引入我国,国内学者利用该法在第四系覆盖层厚度探查和滑坡勘察<sup>[2, 6-10]</sup>、隐伏活动断裂探测、采空区勘查、圈定地下水富水区勘查等方面开展深入研究,并取得了一定的效果。如薛翊国等利用高密度电法等综合物探技术方法有效的对厚层堆积层的滑动面厚度和形态进行了探测<sup>[2]</sup>。李富等通过对20多个滑坡体的高密度电法勘察资料中总结了

不同类型滑坡体的电阻率特征差异,能够有效的推断覆盖层厚度<sup>[3]</sup>。李波等利用高密度电阻率法有效的查明了不稳定斜坡单元的覆盖层与下伏基岩之间的控滑界面,为后期治理提供了依据<sup>[11]</sup>。

但以往高密度电法测深研究和应用实例多是针对覆盖层相对较厚区域而开展的,其厚度一般超过15 m,而对于具有厚度薄、含水率变化大、岩性复杂等特点<sup>[12-13]</sup>的东南沿海以花岗岩为主要岩性的浅覆盖区域的残坡积层的研究则相对较少。本文以地处东南沿海的浙江省杭州市余杭区鸬鸟镇为研究区,通过野外调查发现,发现区内山坡上覆的残坡积层厚度变化较大,从几十厘米到十几米不等,覆盖层含水率也有较大的差异,且地表起伏较大,植被茂盛,利用传统的坑探、槽探、钻探等方法无法准确探测残坡积层的厚度。为较为有效地利用高密度电法,解决影响东南沿海花岗岩浅覆盖区崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害发育的覆盖层厚度这一重要影响因素的探测问题,本文在研究内选取2处典型斜坡段开展高密度电法残坡积层测深试验,从岩土体电性特征分析、野外探测操作技术要点、厚度解译成果及验证几方面深入研究,总结形成东南沿海花岗岩浅覆盖区适用的、能够高效准确查明残坡积层厚度的高密度电法探测技术方法,为合理评价地质灾害的稳定性,为科学防灾减灾提供科学支撑。

## 1 高密度电阻率法概述

### 1.1 工作原理

高密度电阻率法的工作原理和常规直流电法一样,以岩(矿)石的导电性差异为物质基础,通过观测与研究人工建立的地下稳定电流场的分布规律,以解决地质问题的一组电法勘探方法<sup>[14]</sup>。高密度电阻率法的装置形式根据供电电极和接收电极位置关系的不同,可以分为温纳 $\alpha$ 装置、温纳 $\beta$ 装置、温纳 $\gamma$ 装置、施伦贝格装置等。温纳 $\beta$ 装置的横向分辨率相对较高,适合探测断层等横向电性变化较大的目标体,温纳 $\alpha$ 装置垂向分辨率较高,更适合于探测垂向电性界面分层,温纳 $\gamma$ 装置则能够更加清晰的显示异常体的几何形状<sup>[14-18]</sup>。本文采用温纳 $\alpha$ 装置形式,更有利于划分残坡积层、基岩全风化层、强风化层等各

层界面。

1.2 数据处理方法

高密度电法的数据处理方法多采用马来西亚 M. Loke 博士研发的 Res2Dinv 反演软件和 AGI 公司研发的 Eerth-Imager 2D 反演软件。相比较 Res2Dinv 反演软件更具有通用性,在一定程度上更为便捷,更适合多种的仪器设备的采集文件格式。本文采用 Res2Dinv 反演软件对数据进行预处理、反演,简要步骤为:①启动 Res2Dinv 反演软件,打开数据文件,加入地形高程;②对采集数据进行查看,对不合格数据点进行剔除和平滑滤波;③设定合适的反演参数,利用最小二乘法进行带地形二维数据反演处理,保证 RMS 收敛于 8% 左

右;④显示图像、输出 Surfer 可编辑格式文件、利用 Surfer 软件进行图像编辑出图、保存图像。

2 研究区地质概况

(1) 工程地质岩组

本次研究区主要位于杭州市余杭区鸬鸟镇,为低山浅覆盖区,植被多为竹林,地表大面积出露燕山晚期的花岗岩( $\gamma^5$ ),零星分布一些基性、中性、中酸性及酸偏碱性侵入岩脉,以酸性岩类较为发育。其中分布较多的是石英正长斑岩( $K_2L$ )、凝灰质流纹斑岩( $\lambda\pi K_1$ )、辉绿岩( $\beta\mu$ )、花岗斑岩( $\gamma\pi 5^2$ )、花岗闪长岩( $\gamma\delta$ )等,具体的工程地质岩组及其特性见表 1、图 1。

表 1 研究区相关工程地质岩组一览表

Table 1 Engineering geological rock formations in the study area

序号	岩组代号	时代成因	岩组名称	工程地质特征	分布
1	Qg	$K_1\gamma$ 、 $K_1\gamma\pi$ 、 $K_2\zeta$ 、 $K_2\gamma^a$ 、 $K_2\gamma^b$	以花岗岩为主的酸性岩岩组	岩石坚硬,抗风化能力较强,完整性较好	主要出露大部地区
2	Qd	$K_1\delta$ 、 $K_1\gamma\delta$ 、 $\alpha\mu K_2$ 、 $\zeta\mu K_1$	以闪长岩为主的中性岩岩组	岩石较坚硬,抗风化能力较强,完整性较好	零星分布
3	Hi	$K_1h$	以熔结凝灰岩为主的岩组	岩石较坚硬,抗风化能力较强,完整性较好	主要出露鸬鸟镇西南
4	LT	alQ <sub>4</sub> 、al-plQ <sub>4</sub>	以砾石类土为主的岩组	结构松散,承载力一般。	主要分布于河床及漫滩
5	Tc	$O_1\tau_j$ 、 $Z_2b$ 、 $Z_1d$	以碳酸盐岩、碎屑岩为主的岩组	岩石层理清晰,节理裂隙发育,抗风化能力较弱,完整性一般	主要分布于鸬鸟镇中部
6	NT	al-mQ <sub>4</sub> <sup>3</sup> 、al-lQ <sub>4</sub> <sup>3</sup> 、lhQ <sub>4</sub> <sup>3</sup> 、el-dlQ、dl-plQ <sub>3</sub> 、dl-plQ <sub>2</sub>	以黏性土为主的岩组	东部平原地区以松散高压压缩性软土为主,承载力差;西部坡洪积层以中压压缩性粉土、粉质黏土为主,承载力一般	主要分布于冲积平原、山麓缓坡地带、山体表面

(2) 第四系地层

第四系地层主要有中更新统上组、上更新统上组、全新统上组。山麓沟谷区为坡洪积、洪积、冲积等陆相沉积。山地丘陵区的沟谷、斜坡上分布有大量的冲积、洪积、残积及残坡积松散堆积层。残积及残坡积层广泛分布于山体顶部、斜坡及坡麓表部,岩性主要为含砾石黏性土及碎石土层等,厚 0.2 ~ 2.5 m。花岗岩残坡积土主要特征为土含有大量(30% ~ 60%)砂粒 ~ 砾石级残留石英粒,使它成为一种特殊的、带有砂

土性质的黏性土—砾质(砂)黏性土。土中往往夹有球形风化残留的孤石(石蛋),分布不均,大小不一,平原区及山麓沟谷区详细的第四纪地层及其特性见表 2、表 3。

3 电性特征分析

杭州浅覆盖区残坡积层主要由耕植土、黏性土和碎、块石组成,加上杭州地区雨季持续时间较长,相对潮湿,使得各地层电性特征在无降雨和雨后有明显的

表 2 研究区平原区第四纪地层简表

Table 2 Summary of quaternary strata in the plain area of the study area

界	系	统	组	成因时代	岩性特征	分布范围
新 第 四 系	全更新统		上组	al-lQ <sub>4</sub> <sup>3</sup>	粉质黏土、粉质黏土 软塑-可塑状	广泛分布于平原区表部
			中组	mQ <sub>4</sub> <sup>2</sup>	淤泥、淤泥质黏土 流塑状	广泛分布于平原区浅部
			下组	mQ <sub>4</sub> <sup>1</sup> /al-mQ <sub>4</sub> <sup>1</sup>	淤泥、淤泥质黏土、砂质粉土 流塑-软塑状	分布于平原区局部地区中深部
	上更新统		上组	al-lQ <sub>3</sub> <sup>2</sup>	粉质黏土、粉土 软塑-可塑、可塑-硬塑状	分布于平原区大部地区中深部
				alQ <sub>3</sub> <sup>2</sup>	粉细砂、砂砾石 稍密-中密状,分选性差	分布于平原区局部地区中深部
			下组	al-lQ <sub>3</sub> <sup>1</sup>	粉质黏土、粉土 软塑-可塑、可塑-硬塑状	分布于平原区大部地区中深部 埋深西浅东深
				alQ <sub>3</sub> <sup>1</sup>	粉细砂、含黏性土砂砾石 中密状,分选性差	分布于平原区大部地区深部 埋深西浅东深
中更新统		上组	plQ <sub>2</sub> <sup>2</sup>	含碎砾石黏性土 硬可塑状	分布于平原区大部地区底部,局部缺失	

表3 研究区山麓沟谷区第四纪地层简表

Table 3 Quaternary strata in the foothills and valleys of the study area

界系	统	成因时代	岩性特征	分布范围	
新 生 界	第四系	全新统	alQ <sub>4</sub>	砂、砾石、卵砾石等 结构松散	分布于北苕溪、中苕溪中游宽阔的河谷地带
		上更新统	al-plQ <sub>3</sub>	粉质黏土、粉土、砂质黏土、卵砾石、含卵砾石黏性土及泥炭	分布于北苕溪及支流上游较宽阔的河谷地带,和闲林镇部分河谷地带
			dl-plQ <sub>3</sub>	粉质黏土、粉土、砂质黏土、含卵砾石黏性土	分布于河流上游沟谷地带、河流阶地及山前缓坡地带
		中更新统	dl-plQ <sub>2</sub>	粉质黏土、含砾石黏土、含碎石黏土,具网纹构造	分布于瓶窑镇、良渚镇北侧及闲林方家山公园一带的缓坡地带

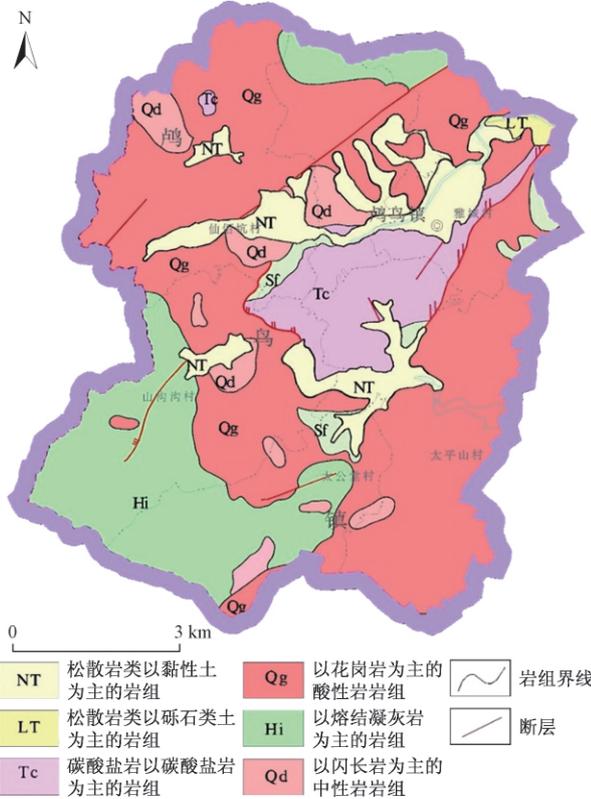


图1 工作区工程地质岩组图

Fig. 1 Engineering geological map of study area

差异,对探测效果也将产生一定的影响。在没有全风化花岗岩的区域,残坡积层平均电阻率与下伏强风化花岗岩及较为完整的中风化或微风化花岗岩在垂向上有明显差异(表4),残坡积层呈高阻特征,强风化花岗岩因构造裂隙发育,富水性较强呈中阻特征,两层电性差异明显,为根据视电阻率测量结果进行残坡积层划分奠定了地球物理基础。

在发育全风化花岗岩的区域,残坡积层中夹杂着全风化花岗岩颗粒,整体表现全风化层的低阻特征,在无降水的条件下,与下伏强风化花岗岩有明显垂向电性差异,为含全风化颗粒的残坡积层划分、圈定可能出现的控滑界面提供了地球物理前提。

表4 杭州浅覆盖区残坡积层与下伏花岗岩电性特征

Table 4 Electrical property characteristics of residual slope layer and underlying granite in shallow covered area of Hangzhou

地层	岩石特征	电阻率范围值/(Ω·m)	电阻率平均值/(Ω·m)
残坡积层	黏性土、碎、块石(雨后)	150 ~ 3 000	1 575
	黏性土、碎、块石(干)	400 ~ 6 000	3 200
全风化花岗岩	风化颗粒(雨后)	15 ~ 400	207.5
	风化颗粒(干)	50 ~ 700	375
强风化花岗岩	裂缝较发育的岩体(雨后)	20 ~ 700	360
	裂缝较发育的岩体(干)	500 ~ 2 500	1 500
中风化或微风化	较完整花岗岩体	> 3 000	> 3 000

## 4 野外探测操作技术

### 4.1 测线布置

为探查工作区残坡积层厚度沿坡向变化特征,测线布设应遵循以下三点原则:①研究区内类似的工程地质条件下发生过地质灾害,②斜坡坡脚处有明显露头或在野外地质调查中布设有工程地质钻探,③坡体残坡积层厚度变化较明显。依据上述原则利用高精度GPS在研究区内选取两处不同类型的残坡积层的斜坡单元各布设两条高密度电法剖面,编号分别为GM1、GM2、GM3和GM4。

GM1和GM2测线位于鸬鸟镇山沟沟村工区中部,斜坡坡脚处有明显露头,露头顶为残坡积层,厚度很薄,向下为强风化层,土质很坚硬不含全风化层的斜坡单元;GM3和GM4测线位于鸬鸟镇白沙村区,区内有一处重点地质灾害调查区,且人口密集,周围景区多,人员流动大,是地质灾害调查的重点区域,斜坡从上到下依次为:地表耕植土、砾石夹泥岩层段、全风化与强风化层过度段及下部基岩地层段。

### 4.2 仪器设备选取

本次高密度电法测深研究工作的测量仪器采用吉林大学研发的“E-60DN”高密度电法工作站(自有设备,性能稳定,国内认可度最高)。该设备的系统采用分布式设计,分布式电极开关串最多可以连接65 535

个电极,以满足深大剖面以及三维高密度勘探的需要,具有分档滤波功能,可有效地压制地电干扰,提高信噪比。测试过程中实时显示视电阻率图像、当前数据点供电电极和测量电极的位置、监测供电电流、测量电位曲线,在数据采集过程可随时中断数据采集进程,进行电极的屏蔽、非值剔除以及从新设定数据开始采集的位置。可对单点进行多次测量,并连续对每次测量之后自动计算平均值、信噪比、电压、电流和视电阻率;电阻率值根据用户所选择的装置自动计算。

#### 4.3 参数选取

高密度电阻率法在一条剖面上布置一系列电极时可组合出十多种装置。在装置的选择上,通常要通过现场试验来选择。高密度电阻率法的试验工作一般选择在干扰相对较小、较安静的环境下进行,运用不同的装置形式在同一地点下采集数据,对比分析不同装置各自的优缺点以及相应的限制条件,根据具体场地的地电条件、地形条件等实际问题情况选择合理的装置形式进行。

温纳排列( $\alpha$ )测量时A、M、N、B等间距排列,其中A、B是供电电极,M、N是测量电极,AM=MN=NB为一个电极距,电极间距按隔离系数由小到大的顺序等间隔增加,四个电极之间的间距也均匀拉开。该测量方式为剖面测量方式,所得断面为倒梯形。温纳装置电极移动方式见(图2、图3)。装置系数 $K = \pi n(n+1)a$ ,其中 $a$ 为电极间距, $n$ 为隔离系数, $MN = a$ , $AM = NB = na$ 。

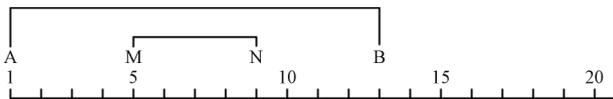


图2 温纳装置 Wenner( $\alpha$ )示意图

Fig. 2 Wenner( $\alpha$ )

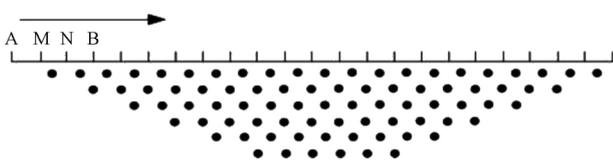


图3 温纳装置测量原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the measurement principle of the Wenner( $\alpha$ ) device

因研究区残坡积层较薄,通过现场试验对比研究分析,发现温纳( $\alpha$ )装置纵向上分层较为清晰,探测深度相对较深,横向有一定的分辨能力,且与现场试验测线真实地层情况比对后,温纳( $\alpha$ )装置与实际的地层情况更接近。因此装置形式采用温纳 $\alpha$ 装置,GM1测线电极距采用0.3 m,其他测线采用1~2 m,供电时长

1 s,最小隔离系数1,最大隔离系数25,测线长度较长时,选择剖面滚动式测量,末端不收敛,便于多个测段的覆盖式拼接。

#### 4.4 野外数据采集

铁路、地下埋设的金属管线,高压电线、钢筋混凝土建筑物、金属堆积物等人工构造物对高密度电法测量的精度影响很大。由于这些构造物和周围介质相比表现为低阻特征,吸引电流集中流向这里,使测得的地层真实电阻率值变化很大。因此,野外布线时应尽量避免避开这些构造物。

野外设置电极时,应尽量避免避开含砾层和树根多的地方,选在表层土致密和潮湿的地方。如果在干燥的山坡布极,在电极周围尽量多地撒一些水或盐水也能减小接地电阻。条件允许的情况下,电极直接打入地层的湿润部分效果较好。

进行数据采集前,先检测接地电阻,确保各电极接地电阻准确无误后,再进行各种电极排列方式的测量实验,电极间距要准确,电极要垂直入地。供电电极和测量电极一定要接地良好。尽量减小接地电阻,供电电流应大于50 mA。

高密度电法现场数据采集时,要保证周围场地尽量安静,以减小噪声对数据资料的影响,在采集过程中注意数据接收的连续性,避免个别电极出现断路的现象。对每个排列的观测,坏点总数不应超过总测量点数的1%,对意外中断后的复测,进行了不少于2个深度层位的重测值。当地形坡度大于 $15^\circ$ 时,对测点进行高程观测。当采集完毕后,应检查数据的电阻率值,看有无异常数据,也可以通过仪器查看测试断面的示意图,保证数据完整,以便为后期的资料解释和二维高密度数据反演的准确性提供保证。

## 5 成果解释推断与验证

最终探测成果的准确与否,一方面与前述“野外探测操作技术”章节叙述的工作环节有关,另一方面取决于对采集数据的处理和分析。通常,数据的处理分析包括以下几个流程:

- (1) 首先对数据进行异常点剔除、滤波和平滑;
- (2) 分析随机噪声和背景干扰的强度进行网格精细化、阻尼系数、层厚递增系数的选择的调节;
- (3) 建立初始模型,对比正演理论值和实测值的残差值,然后反演计算获得真电阻率的分布;
- (4) 对单个成像剖面进行分析,确定出剖面中电性结构及其异常区,之后应用其他物探方法的综合手

段推断电性结构;

(5) 利用定性解释和定量解释的结论, 结合地质情况, 最终作出地质推断解释。

基于以上流程, 对现场采集的数据进行了分析与处理, 得到不同斜坡单元内残坡积层厚度的解释成果, 并与钻孔数据进行了对比分析。

### 5.1 不含全风化花岗岩的斜坡单元

GM1 与 GM2 测线位于没有全风化花岗岩地层的斜坡单元, 坡体表面为耕植土夹杂块石, 下部为强风化花岗岩, 残坡积层厚度较薄, 结合地质条件和不同岩、土体电性特征, 利用带地形改正精细二维反演技术对探测结果进行解释推断。

GM1 测线反演断面(图 4) 浅部 0 ~ 1.5 m 表现为中高阻圈闭, 反演电阻值在 500 ~ 2 000  $\Omega \cdot m$  变化, 反演电阻率曲线密集带横向展布特征和下部低阻层界限明显, 结合工区地层电性特征, 该斜坡单元残坡积层由耕植土和大量碎块石组成, 孔隙度较大, 通常呈高电阻显示, 推断为浅部高阻位为残坡积层显示, 视厚度在 0.4 ~ 1.2 m 变化, 坡脚处较厚, 坡顶较薄; 以深电极号 11 ~ 36 之间反演电阻率小于 450  $\Omega \cdot m$ , 36 ~ 56 号电极间反演电阻率逐渐变大, 推断该段为花岗岩强风化层显示, 强风化层裂隙发育, 含水率相对较高, 坡脚处受汇水作用, 表现为反演电阻率低值, 向坡顶方向深部反演电阻率增大。

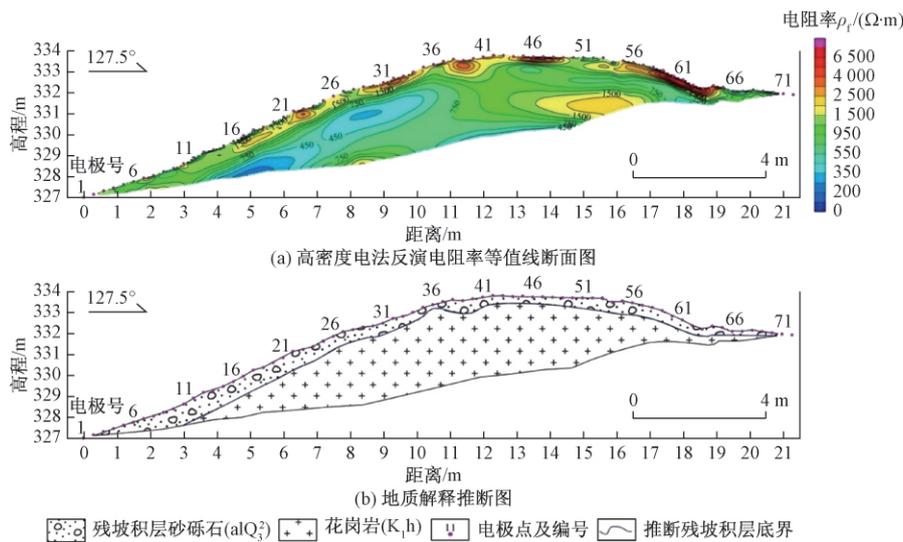


图 4 GM1 测线高密度电法反演电阻率等值线断面图解释推断成果

Fig. 4 The interpretation and inference of inversion resistivity contour section of GM1 by high density resistivity method

GM1 测线是工区内的典型露头剖面, 露头顶部分为残坡积层, 厚度较薄, 下部为花岗岩强风化层, 裂隙发育, 内部坚硬, 残坡积层与强风化层界限清晰, 高密度电法反演成果划分的残坡积层界限及其变化特征与出露剖面基本吻合, 说明小极距的高密度电法在浅覆盖区探测厚度极薄的残坡层效果较为明显。

GM2 测线为切坡布设, 电极距 2 m。GM2 测线反演成果(图 5) 中反演电阻率纵向变化特征为高-低-高表现, 浅部高阻异常特征明显, 反演电阻率为 800 ~ 2 500  $\Omega \cdot m$ , 主要由残坡积层中的碎、块石引起, 与中部低阻层分层界限明显, 推断为残坡积层显示; 中部低阻层反演电阻率为 0 ~ 400  $\Omega \cdot m$ , 推断为花岗岩强风化层显示, 裂隙发育, 富水性较好; 以深反演电阻率值增大, 超过 3 000  $\Omega \cdot m$ , 推断为较为致密、含水率较低完

整花岗岩, 分层界面较为清晰。

### 5.2 含全风化花岗岩的斜坡单元

GM3 和 GM4 测线位于含有全风化花岗岩层位的斜坡单元, 全风化层较为松散, 颗粒较细, 含水率较高, 与浅地表的残坡积碎、块石组合成厚度相对较厚的残坡积层, 覆盖于完整花岗岩体之上。

GM3 测线电极距采用 1 m, 测线长度 96 m。从 GM3 反演结果(图 6) 看, 横向上, 电阻率等值线连续性较好, 在 80 号电极处有高阻异常显示, 与剖面上基岩出露相对应, 露头对反演结果起到了很好的标定作用。浅部高阻推断为地表碎、块石, 厚度极薄, 下部反演电阻率降低, 反演电阻率值为 0 ~ 500  $\Omega \cdot m$ , 结合工区地层电性特征, 全风化层为松散颗粒, 有一定孔隙度, 含水率较高, 表现为低阻特征。以深反演电阻呈高阻特征, 反演电阻率值达 1 000 ~ 2 000  $\Omega \cdot m$  左右, 推

断为完整基岩显示,分层界面明显,含全风化花岗岩的残坡积层厚度在 3 ~ 13 m 变化。

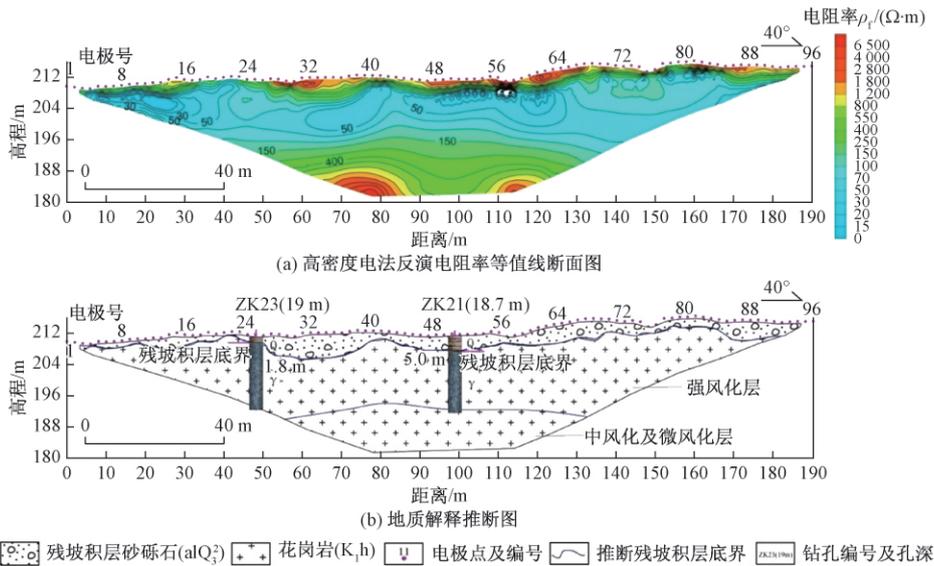


图 5 GM2 测线高密度电法反演电阻率等值线断面图解释推断成果

Fig. 5 The interpretation and inference of inversion resistivity contour section of GM2 by high density resistivity method

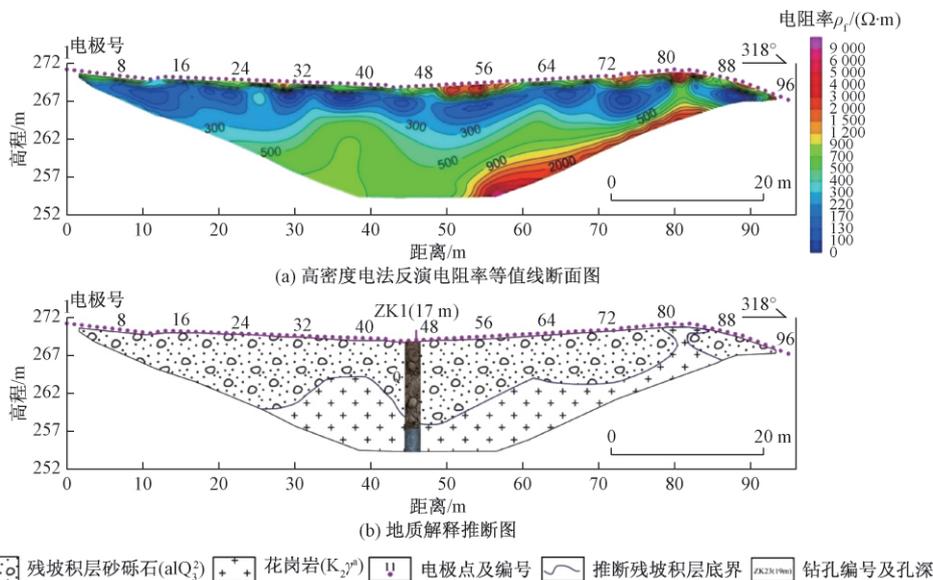


图 6 GM3 测线高密度电法反演电阻率等值线断面图解释推断成果

Fig. 6 The interpretation and inference of inversion resistivity contour section of GM3 by high density resistivity method

GM4 测线电极距 2 m,长度 144 m。GM4 线反演成果(图 7)中纵向反演电阻率纵向变化特征为低-高表现,上中低阻异常特征明显,反演电阻率为 0 ~ 1 000  $\Omega \cdot m$ 。浅部由于植被较少,全风化花岗岩颗粒直接出露地表,含水率较高,为低阻异常特征,推断为含全风化花岗岩残坡积层显示,深部反演电阻率值超过 2 000  $\Omega \cdot m$ ,推断为完整花岗岩显示。残坡积层厚度在 17 ~ 25 m 变化,中部较厚,含全风化花岗岩残坡积层界面也可认为斜坡单元可能发生滑坡的

滑动面。

### 5.3 钻孔验证

为了验证高密度电法在浅覆盖区探测残坡积层的效果,共布设了 10 个地质钻孔,其中在 GM2、GM3 和 GM4 线上有 4 个,解释推断成果经与钻探结果对比,验证结果显示,高密度电阻率法能够较为准确的推断残坡积层厚度,残坡积层厚度与钻探揭露基本吻合,推断解释较为可靠,误差均较小为 10% 左右(表 5)。由此说明上述高密度电法测线布设方法及参数选取用来

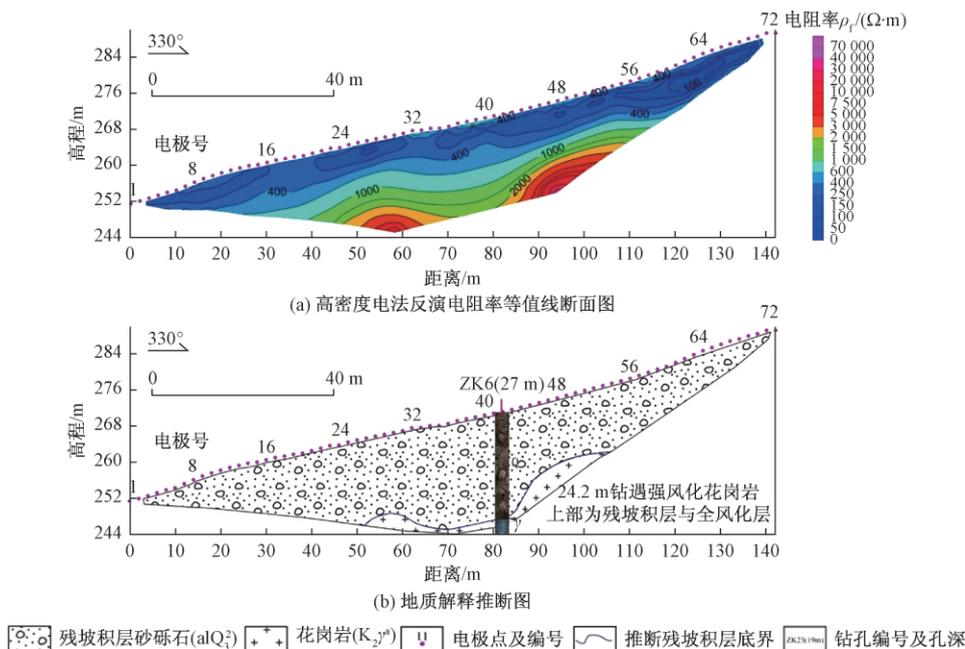


图7 GM4测线高密度电法反演电阻率等值线断面图解释推断成果

Fig.7 The interpretation and inference of inversion resistivity contour section of GM4 by high density resistivity method

测量浅覆盖区残坡积层厚度是有效的。

表5 钻探揭露情况与物探推断解释对比

Table 5 The comparison of geophysical interpretation and drilling results

测线编号	电极号	钻孔编号	推断残坡积层厚度/m	钻孔揭露残坡积层厚度/m
GM2	25	ZK23	2.0	1.8
GM2	50	ZK21	5.0	5.0
GM3	47	ZK1	12.0	13.9
GM4	42	ZK6	23.0	24.2

### 6 结论与建议

(1) 岩层特征及其电性分析结果表明,对于无全风化花岗岩层的斜坡其电性在垂向上与有全风化花岗岩层的斜坡比较更明显,且地层电性随外界环境改变而改变呈现电性的不同,这为高密度电阻率法能够成功有效探测残坡积层厚度提供有力支持。

(2) “E-60DN”高密度电法仪在东南沿海的花岗岩覆盖区进行高密度电阻率法探测残坡积层厚度取得了较好的探测效果,并且能够定量分辨出0.3 m及以上厚度的残坡积层;参数选取方面,且温纳α装置具有最好的分辨率和抗干扰能力。

(3) 结合地质钻孔验证高密度电阻率法探测效果,对比分析可得利用带地形改正精细二维反演技术能够有效的提高典型浅覆盖区残坡积层高密度电法资料的准确性,探测结果误差在10%左右。

(4) 浅覆盖区高密度电阻率法探测残坡积层厚度,针对覆盖厚度薄、地层岩性复杂、地表起伏大等特点地区,通过区域地层电性分析、野外测线原则控制、试验参数合理选择、厚度解译及成果验证等完整探测方法体系,可精准高效探测其残坡积层厚度,并为东南沿海地区开展类似探测工作提供技术参考与借鉴。

(5) 在实际工作中,高密度电法易受静态效应和体积效应影响,杭州地区降水时段密集,雨量充沛,地表土体含水量接近饱和,静态效应明显,给高密度电法探测带来极大的影响,因此雨季开展高密度电法残坡积层测深如何获得准确的资料建议做进一步研究和讨论。

### 参考文献:

[1] 刘俊龙. 残积土工程特性的试验分析[J]. 工程勘察, 2005, 33(1): 40-42. [LIU J L. Experimental analysis on engineering characteristics of residual soil [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005, 33(1): 40-42. (in Chinese)]

[2] 薛翊国, 李术才, 苏茂鑫, 等. 厚层堆积层滑坡滑面的综合探测技术及其应用[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 43-53. [XUE Y G, LI S C, SU M X, et al. Comprehensive detection technologies and their implementation on slip plane in thick colluvium landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 43-53. (in Chinese)]

- [3] 李富,周洪福,葛华. 不同类型滑坡体的高密度电阻率法勘察电性特征[J]. 物探与化探,2019,43(1):215-221. [LI F, ZHOU H F, GE H. Electrical characteristics of different types of landslide bodies investigated by high-density electrical method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019,43(1):215-221. (in Chinese) ]
- [4] 严加永,孟贵祥,吕庆田,等. 高密度电法的进展与展望[J]. 物探与化探,2012,36(4):576-584. [YAN J Y, MENG G X, LYU Q T, et al. The progress and prospect of the electrical resistivity imaging survey [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012,36(4):576-584. (in Chinese) ]
- [5] 董浩斌,王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘,2003,10(1):171-176. [DONG H B, WANG C L. Development and application of 2 d resistivity imaging surveys [J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(1):171-176. (in Chinese) ]
- [6] PETRICK W R, SILL W R, WARD S H. Three-dimensional resistivity inversion using alpha centers [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1979.
- [7] SASAKI YUTAKA. 3-D resistivity inversion using the finite-element method [J]. Geophysics, 2012, 59(12):1839-1848.
- [8] 周锡明,陈超,王佩业. 高密度电法在山区浅表层结构调查中的应用[J]. 物探与化探,2012,36(2):198-201. [ZHOU X M, CHEN C, WANG P Y. The application of the high density resistivity method to the investigation of shallow layer structure in the mountain area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2012,36(2):198-201. (in Chinese) ]
- [9] SAPIA V, VIEZZOLI A, JORGENSEN F, et al. The impact on geological and hydrogeological mapping results of moving from ground to airborne TEM [J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2014,19(1):53-66.
- [10] 李富,周洪福,宋志,等. 基于高密度电阻率法综合反演研究——以摩岗岭滑坡体勘察为例[J]. 水文地质工程地质,2017,44(2):110-116. [LI F, ZHOU H F, SONG Z, et al. Based on the high density resistivity method comprehensive inversion research: take the case of the investigation of the landslide in Mogangling [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2017,44(2):110-116. (in Chinese) ]
- [11] 李波,屈利军,易安,等. 高密度电法在不稳定斜坡勘察治理中的应用[J]. 工程勘察,2018,46(8):66-73. [LI B, QU L J, YI A, et al. Application of high density apparent resistivity method in surveying and harnessing of unstable slope [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018,46(8):66-73. (in Chinese) ]
- [12] 王闯,董金玉,王明龙,等. 含水率对残坡积土强度特性的影响[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(5):88-92. [WANG C, DONG J Y, WANG M L, et al. Influence of water content on residual soil strength property [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2016,37(5):88-92. (in Chinese) ]
- [13] 吕擎峰,卜思敏,王生新,等. 综合物探法在滑坡稳定性评价中的应用研究[J]. 岩土工程学报,2015,37(增刊1):142-147. [LYU Q F, BU S M, WANG S X, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in stability evaluation of landslide [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015,37(S1):142-147. (in Chinese) ]
- [14] 杨进. 环境与工程地球地理[M]. 北京:地质出版社,2011. [YANG J. Environmental and engineering geophysics [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese) ]
- [15] 柳建新,曹创华,郭荣文,等. 不同装置下的高密度电法测深试验研究[J]. 工程勘察,2013,41(4):85-89. [LIU J X, CAO C H, GUO R W, et al. Experimental study on the sounding with high-density resistivity method by using different devices [J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2013,41(4):85-89. (in Chinese) ]
- [16] 冯德山,杨炳坤,戴前伟,等. 超高密度电法全四极装置正反演[J]. 地球物理学进展,2014,29(2):718-724. [FENG D S, YANG B K, DAI Q W, et al. The simulation and inversion for the full-four-pole array of Ultra-High density resistivity method [J]. Progress in Geophysics, 2014,29(2):718-724. (in Chinese) ]
- [17] 陈益杰. 对高密度电阻率法探测技术的一些改进[J]. 物探与化探,2009,33(6):707-709. [CHEN Y J. Some improvements in high density resistivity detection technique [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2009,33(6):707-709. (in Chinese) ]
- [18] 向阳,李玉冰,易利,等. 排列方式及电极距对高密度电法异常响应的影响分析[J]. 工程地球物理学报,2011,8(4):426-432. [XIANG Y, LI Y B, YI L, et al. The effect of array and electrode spacing on abnormal response of high density resistivity method [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011,8(4):426-432. (in Chinese) ]