

DOI: 10.16285/j.rsm.2018.2293

# 基于高密度电法的天然边坡水分运移规律研究

闫亚景<sup>1</sup>, 闫永帅<sup>1</sup>, 赵贵章<sup>1</sup>, 张泰丽<sup>2</sup>, 孙 强<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 地球科学与工程学院, 河南 郑州 450045;

2. 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 江苏 210016)

**摘 要:** 地下水是滑坡变形与失稳的重要影响因子, 目前关于天然边坡水分运移过程的研究多借助传感器监测或数值模拟, 但尚不能充分满足无扰、快捷的测量要求。针对该类问题, 以天然边坡为研究对象, 利用高密度电法结合时域反射技术, 通过测量边坡土体含水率与电阻率, 构建两者的对应关系, 据此反演并分析边坡介质地下水的分布特征及迁移规律, 验证高密度电法技术在探究天然边坡水分运移规律的有效性。现场试验结果显示: 研究边坡土体含水率与电阻率呈明显对数关系; 该边坡有效入渗或蒸发深度为 2 m, 大于该深度范围内, 边坡土体含水率随深度增加逐渐减小; 中雨强度下埋深为 1.3~2.0 m 范围内土体含水率激增的主要原因在于后缘裂缝的优势流补给; 边坡高含水率(低电阻区)与低含水率(高电阻区)过渡区与后期滑坡滑动面位置高度吻合。

**关 键 词:** 天然边坡; 高密度电法; TDR; 含水率; 电阻率

中图分类号: TU 457

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2019) 07-2807-08

## Study on moisture migration in natural slope using high-density electrical resistivity tomography method

YAN Ya-jing<sup>1</sup>, YAN Yong-shuai<sup>1</sup>, ZHAO Gui-zhang<sup>1</sup>, ZHANG Tai-li<sup>2</sup>, SUN Qiang<sup>2</sup>

(1. School of Earth Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China;

2. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

**Abstract:** Groundwater is an important factor affecting landslide deformation and instability. At present, the research on water transport process of natural slope mostly relies on sensor monitoring or numerical simulation, which can not fully meet the requirements of non-disturbance and fast measurement. In this study, a natural slope is tested using high-density electrical resistivity tomography (ERT) method and time-domain reflectometry (TDR) to obtain the water content in the slope, and the relationship between electrical resistivity of soil and water content is revealed. Furthermore, the distribution and migration characteristics of underground water in slope are inverted and analyzed. Sequentially, the capability of ERT in capturing moisture migration and distribution is verified. Results of in-situ tests show that: water content of soil has obvious logarithmic relation with soil's resistivity. Moreover, the effective infiltration or evaporation depth of this slope is 2 m, and water content gradually decreases when the depth is greater than 2 m. The main reason for the sharp increase of water content between 1.3m-2m depth under moderate rainfall intensity is the preferential flow through a crack at the back edge of slope. It is also found that the transition zone between highest water content (lowest resistance zone) and lowest water content (highest resistance zone) is highly consistent with the position of sliding zone in subsequent failure of slope.

**Keywords:** natural slope; high-density electrical resistivity tomography method; TDR; water content; electrical resistivity

## 1 引 言

降雨诱发型滑坡是自然界最为常见的斜坡破坏形式之一, 而水分场改变是该类边坡失稳的重要

诱发因子<sup>[1-3]</sup>。所以, 掌握降雨环境里不稳定斜坡内水分迁移规律及分布形式被一致认为是分析边坡变形特征与评价其稳定程度的基础性研究。加之地下水常富集在滑动带附近, 进而导致滑带土抗剪强度

收稿日期: 2018-12-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41741019); 华北水利水电大学高层次人才科研启动金(No. 40432); 中国地质调查局地调项目(No. DD20160282)。This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (NFS)(41741019), the Startup Fund for Distinguished Scholars of North China University of Water Resources and Electric Power (40432) and the Geological Disaster Investigation of China Geological Survey (DD20160282).

第一作者简介: 闫亚景, 女, 1986 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土力学与斜坡稳定性的研究工作。E-mail: yajinghappy123@163.com

通讯作者: 赵贵章, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事水分运移与水资源评价方面的研究工作。E-mail: zhaoguizhang@ncwu.edu.cn

剧烈弱化, 因而通过识别边坡介质高含水率范围推断潜在滑动带位置与形态不失为一种判断滑坡演化阶段、设计滑坡治理工程的实用方法。

目前, 国内外针对岩土体内水分迁移规律已开展许多卓有成效的研究, 且多借助数值模拟与现场监测手段, 后者更以其精度高而闻名, 但往往耗时费力且对岩土体存在一定扰动。在此背景下, 应用地球物理方法解决实际工程与灾害问题是近年来逐渐发展形成的前沿研究领域, 其中高密度电阻率法在环境监测、地下结构探测等方面因具有全面、无损、快速等特点而被广泛使用<sup>[4-9]</sup>。

高密度电阻率成像法, 简称高密度电法 (high-density electrical resistivity tomography method, 简称 ERT), 以岩/土导电性差异为基础, 利用阵列勘探方式, 研究人工施加电流场地下传导电流的分布特征, 通过电阻率差异性反映地下介质相关信息。自 20 个世纪 70 年代末, 英国学者最先设计了地电探测系统以来, 高密度电法技术已广泛使用于考古、环境监测、水文地质、工程勘察等领域。前期, 研究者较多进行了岩土体电阻率与其基本物理力学指标相关性方面的研究。储亚<sup>[10]</sup>、刘国华<sup>[11]</sup>、刘松玉<sup>[12]</sup>、韩立华<sup>[13]</sup>等研究了土体电阻率与其土体结构参数的相关性; 付伟等<sup>[14-15]</sup>研究过冻土的单轴抗压强度-变形特性与电阻率的关系; 张少华<sup>[16]</sup>、董小强<sup>[17]</sup>、储亚<sup>[18]</sup>等探究了污染土电阻率与强度特性的对应特征; 林杰<sup>[19]</sup>、陈瑞锋<sup>[20]</sup>等还分别将电阻率法应用于改性黄土、黏性土与膨胀土工程性能评价中。尽管已有研究显示土体电阻率取决于其物质构成、孔隙特征、胶结特征及其环境温度等因素。但查甫生等<sup>[21]</sup>认为当非饱和土颗粒构成、地下水化学成分、外界温度变化不大时, 其电阻率值主要受控于土体含水率的大小。近几年, 已有学者开始逐渐将高密度电法应用到填埋场渗滤液扩散、竖井抽水过程中水分运移相关研究中。刘庭发等<sup>[22]</sup>发现在常规与离心模型试验中, 高密度电阻率三维成像法可以合理反映水分迁移过程。郭秀军等<sup>[23]</sup>发现生活垃圾渗滤液污染土的电阻率异常边界与其污染边界有良好对应关系, 可以反映渗滤液的扩散范围与受污染程度。柯瀚等<sup>[24]</sup>结合高密度电法技术研究了竖井抽水下渗滤液分布及运移规律, 可以有效揭示现场渗流的各向异性 and 优先流特征。考虑到滑带土因蠕动而变形, 且裂隙渗水会湿润滑带土, 吕擎峰等<sup>[25]</sup>结合实例证实滑带位置是明显低阻区。张虎元等<sup>[26]</sup>结合室内与现场试验证实高密度电阻率法可以准确划分浸水范围与测定含水率。显然, 以

岩土体最基本的物性参数——含水率为中介, 测试不同含水状态下岩土体的电阻率值, 构建并标定两者函数关系, 再快速测定路基、堤坝或者边坡介质的电阻率特性, 并最终反演其水分迁移规律与分布特征不失为一种有效办法。遗憾的是, 目前仍少见高密度电阻率成像技术在天然边坡介质降雨入渗规律及水分时空分布特性方面的相关研究成果。

基于此, 本文以温州市文成县富岙村典型不稳定斜坡为对象, 借助人工模拟降雨器, 采用高密度电法及时域反射手段 (time-domain reflectometry, 简称 TDR), 测定斜坡某典型剖面处土体电阻率与纵向含水率, 构建边坡含水率与电阻率数学模型公式, 再结合边坡岩土勘察实际, 分析边坡土体含水率的时空分布并据此分析预测其潜在滑动面位置, 期为不稳定边坡稳定性评价提供新方法、新思路。

## 2 研究边坡与方法

### 2.1 研究边坡

研究不稳定边坡位于浙江省温州市文成县黄坦镇富岙村。该边坡地形属浙东南沿海低山丘陵区, 坡面倾向 272°, 前后缘高差约 9 m, 不稳定体分布范围约 150 m<sup>2</sup>, 体积约 630 m<sup>3</sup>, 整体地形较缓, 平均坡度约为 30°。地表无有效植被, 后缘发育 1 条拉裂缝, 宽约为 10 cm, 深度可达 1 m, 沿边坡坡面走向方向展布, 长约 9 m (见图 1)。边坡岩性以褐黄色土体为主, 未见明显基岩出露。该不稳定边坡在本试验结束一年后, 即 2018 年 7 月发生失稳破坏, 主滑方向约 275°。



图 1 研究边坡现场图

Fig.1 Overview of the study slope

室内常规物性试验所用土样采自该边坡中后部, 取样深度约 1.5 m, 土样呈褐黄色, 质地均匀, 少杂质, 潮湿状态较黏手, 且并无明显孔洞发育。

依照现行《土工试验方法标准》（GB/T50123—1999）<sup>[27]</sup>，测试土样的基本物理性质（见表 1）。数据显示，试样粉粒含量为 69.4%，黏粒含量为

28.6%；液限为 57.4，塑性指数为 22.7。根据《土的工程性质分类标准》（GB/T50145—2007）<sup>[28]</sup>，该土样为高液限粉质黏土。

表 1 试样基本物理性质  
Table 1 Basic physical properties of slope soil

| 干密度<br>/(g/cm <sup>3</sup> ) | 孔隙比<br><i>e</i> | 天然含水率<br>/% | 液限<br>/% | 塑限<br>/% | 颗粒级配/%         |                    |               |
|------------------------------|-----------------|-------------|----------|----------|----------------|--------------------|---------------|
|                              |                 |             |          |          | 砂粒(0.075~2 mm) | 粉粒(0.075~0.005 mm) | 黏粒(<0.005 mm) |
| 1.2                          | 0.68            | 40.2        | 57.4     | 34.7     | 2.0            | 69.4               | 28.6          |

## 2.2 测试方法及原理

本研究利用重庆地质仪器厂高密度电法仪测量边坡介质电阻率值；借助 TDR 测量边坡介质含水率变化特征。

其中，TDR 作为一种土体含水率测试技术，原理在于利用电磁波在介质中传播速度的差异获得介电常数，而含水率与介电常数密切相关，可通过测试介电常数来计算土壤水分含量，该技术最早于 1985 年由加拿大科学家 Topp 等人应用于农田水分测定，此后使用范围逐渐扩展到包气带、边坡水文研究领域。基于前人研究成果，本试验设计的 TDR 平面-剖面布置方案详见图 2。试验中，为了进一步降低 TDR 对高密度电法仪测试结果的干扰，同时兼顾降雨系统的有效影响范围，特设定 TDR 布置位置距电法测线水平距离约 1.5 m，该位置位于边坡后缘裂缝与降雨系统的下方。为了掌握边坡土体降雨入渗的空间变化规律，TDR 埋置深度自表面向下依次为 0.30、0.75、1.25、2.00、3.00 m。此外，本试

验分别监测该位置在降雨前、降雨中、降雨停止后 32 h 时边坡土体含水率的分布情况。

如前所述，高密度电法是以介质导电性差异为基础，通过量测电极布设范围内介质的电阻率以反映介质相关物理性质（如含水率分布特征），并最终图像形式展现。本试验根据试验场地规模、地质条件、TDR 布设位置，确定布设 1 条测线，长为 30 m。测线电极布置均采用 Wenner-Alpha 法，电极间距均为 0.5 m，共设 60 道。本部分试验旨在测试该测线在降雨环境里电阻率的时空变化规律。

具体而言，本研究首先以前述 TDR 布设线为监测对象，测定特定降雨强度（18 mm/h）条件下降雨前、降雨中、降雨 32 h 后 3 个典型时刻的土体含水率变化情况；结合高密度电法测试 1 条测线在 3 个降雨时刻的电阻率值，构建适用于本边坡介质的电阻率与含水率函数关系，掌握边坡介质含水率对其电阻率的响应特征；之后，借助反演软件——Suffer 获得该测线剖面土体体积含水率的分布状态；进而结合实地勘察资料校验，探查边坡含水率时空分布形式及地下水动态迁移特征。

## 3 TDR 与高密度电法现场监测

### 3.1 含水率与电阻率随深度变化特征

TDR 埋设位置土体含水率、测线处电阻率变化规律如图 3 所示，两者随深度增加均呈现明显不均一性。具体来说，雨前、雨中、雨后（32 h）3 个时刻实测位置含水率的空间分布呈相似规律：即随深度增加，含水率在深度小于 2 m 范围内逐渐增大，在 2 m 处分别达到峰值含水率的 38%、39%、45%，之后均逐渐减小。也就是说，本研究边坡在特定降雨强度下，地下水迁移力具有明显非均一性，埋深 2 m 似乎是本次降雨强度下有效入渗的临界深度，这与降雨强度、边坡介质持水特性、裂隙分布等因素密切相关。再者，就实测位置含水率在时间尺度上的分布而言，随着降雨入渗时间的推进，3 个典型时刻的边坡含水率在深度小于 1.3 m 区间差异并不明显；但在深度大于 1.3 m 范围内，边坡土体含

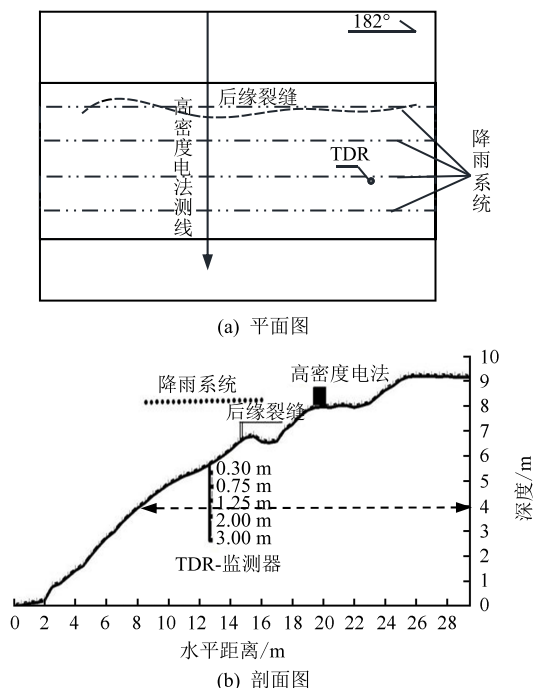


图 2 试验布设示意图

Fig.2 Schematic of in situ experimental tests

水率在降雨过程中的增速更大、量值明显高于雨前及雨后(32 h)。鉴于边坡土体基本性质(孔隙率、粒组)(见表1),推测造成该现象的原因可能在于降雨过程中优势裂隙入渗流快速补给较深区域土体水分含量。

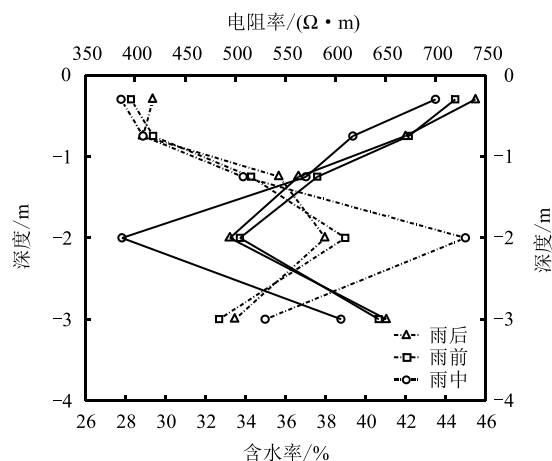


图3 含水率(虚线)与电阻率(实线)随深度变化特征  
Fig.3 Variation of water content and electrical resistivity with depth (Note that the dash line is for volumetric water content, and the solid line is for electrical resistivity)

就边坡电阻率而言,相反于边坡含水率变化特征,随深度增加,3个时刻实测剖面电阻率在深度小于2 m范围内逐渐减小,并在2 m处达到最小值 $387 \Omega \cdot \text{m}$ ,之后逐渐增加;随着降雨入渗时间的推进,降雨过程中边坡监测剖面电阻率最小,均小于降雨前与降雨32 h后;不同时刻电阻率差异量在深度大于1.3 m后逐渐增加,在2 m处最大化,之后逐渐减小。

由图3不难发现,尽管边坡土体含水率在不同深度区间存在转折甚至相反的变化趋势,但整个变化趋势与电阻率存在良好负相关关系,即含水率越高,边坡土体导电性能越好,电阻率越低。显然,作为边坡介质的重要电性指标,电阻率值在外界温度、边坡结构、边坡介质物理性质相同或接近时,可以有效反映边坡水分迁移过程与分布特征。

### 3.2 实测含水率与电阻率函数关系

如前所述,TDR监测线位置边坡介质含水率与电阻率呈明显负相关关系。尽管前人针对岩土体电阻率与其含水率的关系已成果颇丰,但介质电阻率与含水率的定量关系受土体物理性质(密实度、矿物成分、结构)、水溶液化学成分、外界温度等因素影响,工程实际中,需要针对不同介质开展特定试验,获取专属定量关系。由于本项目以小型天然边坡为研究对象(见图1),试验过程为了规避水

溶液化学成分干扰,人工降雨阶段使用了去离子水;试验所用高密度电法仪读数便捷,加之本次电法试验有1条测线,电阻率测试阶段外界温差并不大;再者,试验中边坡表面并无明显变形特征。所以,本研究认为雨水化学成分、外界温度、土体物理性质(干密度、孔隙结构、矿物成分)等因素变化对介质电阻率的影响可以忽略。因此,基于实测数据整理得到本研究边坡土体电阻率与含水率拟合曲线如图4所示,两者函数关系为

$$\theta = -26.1 \ln \Omega + 200.5 \quad (1)$$

式中: $\theta$ 为体积含水率; $\Omega$ 为电阻率。式(1)表明,本研究边坡土体含水率随电阻率增加呈显著对数减低趋势。

为了进一步校验上述公式的有效性,同时考虑到电阻率-含水率关系会因土体类型不同而变化,本研究选取本边坡代表性土样,在实验室同样使用去离子水配置不同含水率的试样块,并测试其电阻率,两者关系如图4所示(星状实心图例),两类数据吻合度较高。再者,对比其他学者成果后发现,尽管不同土体电阻率量值有差别,但其随含水率增加而显著降低的总体趋势十分相似<sup>[21]</sup>。

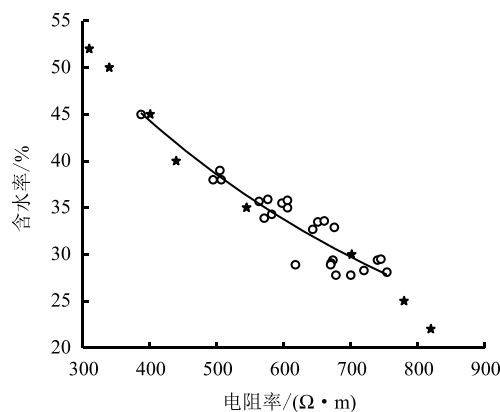


图4 电阻率与含水率的关系曲线(实心图例为标定数据)  
Fig.4 Correlation between electrical resistivity and volumetric water content

### 3.3 测线电阻率变化特征

TDR监测结果表明降雨作用下边坡水分运移具非均一性。为了分析边坡水分运移过程及分布形式,采用高密度电法系统测量测线正下方剖面土体电阻率的时空变化规律(见图5),结果显示该位置电阻率并非均一或成层分布,而是存在明显局部高电阻区(典型如红色-黑虚线)和低电阻区(典型如蓝色-白虚线),相应中心区域电阻分别为 $3150$ 、 $326 \Omega \cdot \text{m}$ 。由于研究边坡岩性相对单一且结构并无

外力扰动、人工降雨溶液化学成分简单、试验进程中外界温度无明显差异，那么前述显著电性差异现象可以反映出边坡土体降雨渗流的非均质性，以及水分迁移通道存在优势流，进而形成图5所示相近区域中电阻率差异明显的低电阻与高电阻区。

对比图5中不同时刻边坡电阻率发现，随着降雨入渗时间的推进，位于边坡后缘裂缝下方的低阻区域面积进一步向深处扩展之后又明显缩小。具体来讲，降雨中研究边坡低电阻率区域面积略大于降雨前相应面积，却显著大于降雨后32 h的相应面积，这与实测剖面所得3个典型时刻土体含水率变化趋势相反，佐证了该边坡含水率与电阻率的负相关性；然而，3个典型时刻红色高阻区（黑虚线框）域面积变化不大，指示该区域可能存在隔水性较强的介质或存在难于入渗的地理条件，以至于该区域降雨入渗量并不大。后经实地勘察发现，该高阻区正上方坡面位置为一小型鼓丘（后设为促滑试验坡顶模拟荷载位置），相邻有一凹地，推测雨水较多汇集到凹地内并沿其底部入渗（见图5）。

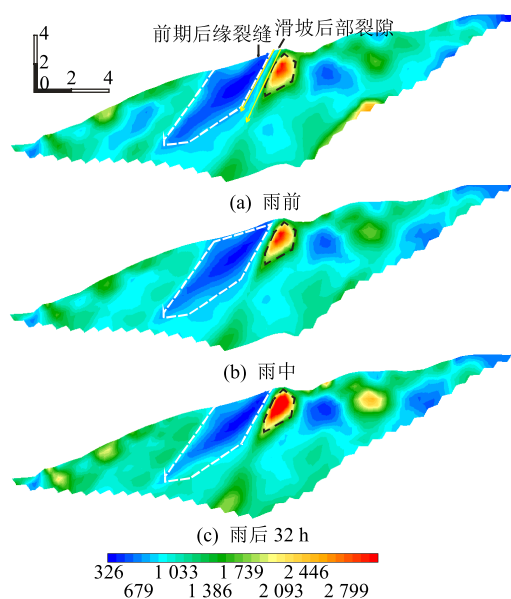


图5 3个典型时刻测线剖面电阻率分布（单位： $\Omega \cdot m$ ）  
Fig.5 Distribution of electrical resistivity at three typical times (unit:  $\Omega \cdot m$ )

### 3.4 反演测线剖面土体含水率变化特征

考虑到水在滑坡形成中的重要作用，同时为了进一步掌握边坡土体水分赋存状态，本研究基于图5所示测线电阻率值与式(1)，反演得到剖面位置含水率时空分布特征（见图6）。对比图6中3个典型时刻土体含水率分布情况发现，随着降雨时间的推进，高、低含水率范围-边界与低、高电阻率范

围-边界基本吻合（见图5）。其中，图6显示本研究边坡后缘裂缝下方出现其最高含水率区域（图2中水平距离为13~15 m，埋深为2~5 m），其中降雨中土体最高含水率达52%，接近土体液限含水率，而降雨前、降雨停止后32 h边坡最高含水率较接近，约为40%；该现象表明相较于雨水通过地表的入渗方式，雨水沿后缘裂隙快速渗入地下才是造成埋深2 m附近出现最高含水区域的主要原因；另一方面指示本研究边坡在降雨停止后32 h雨水入渗基本结束，土体水分赋存状态与降雨前差异并不大。

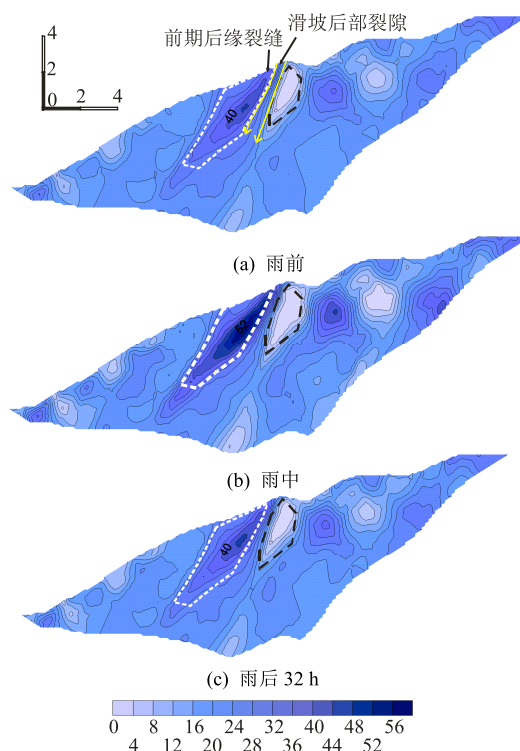


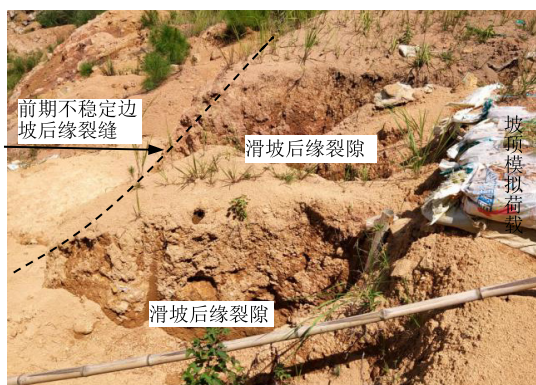
图6 3个典型时刻反演边坡含水率分布（单位：%）  
Fig.6 Distribution of volumetric water content at three typical times (unit: %)

基于前述分析，图中相邻的高电阻、低电阻之间区域作为含水率极低、极高的过渡区间（图5、6黄色箭头之间区域）可能成为该边坡潜在软弱带，易形成滑动带，推测依据主要在于该区间土体含水率的分布特征。仔细对比失稳前后边坡表面形态（见图1、7）不难发现，滑坡后部（前期不稳定边坡后缘裂缝附近）新发育多条裂隙且局部出现坍塌，究其原因可能源于该区域土体在长期降雨-蒸发交替作用下物理力学性质发生了显著改变。如前提及，该边坡表层土体主要由高液限粉质黏土构成，随着雨水沿边坡后缘裂隙快速渗入地下而出现局部高含水率区域，水头驱使下土体内部水分持续运移但在图5所示高电阻率位置被阻隔滞留。由于降雨环境

里边坡土体最高含水率接近液限且大于塑限,此时高含水率与水分滞留区间土体中富含孔隙水、结合水、重力水,综合造成低-高电阻率过渡区土体被浸泡软化,粒间物化胶结减弱,力学性质劣化,发生变形出现裂隙;而裂隙的生成又加剧雨水在该区间的入渗强度,进一步强化了水-土间的物理化学作用;如此反复,该区域边坡土体在增减湿过程中变形量持续增加,直至破碎带贯通、边坡失稳破坏。



(a) 滑坡全景



(b) 滑坡后缘变形

图 7 滑坡现场图

Fig.7 Overview of the landslide site

鉴于后期该不稳定边坡的滑动失稳实例,对比现场勘查资料发现,边坡实际滑动带的地表出露位置与高密度电阻率法所识别的潜在滑动面位置高度吻合(见图 7)。显然,利用高密度电法掌握地下水迁移特征、获取含水率分布规律,并据此识别不稳定边坡软弱面是行之有效的。

为了更加直观显示裂隙作为优先流通道显著影响边坡土体水分赋存情况,基于图 6 测线剖面土体反演含水率数据,提取高密度电法测线位置正下方且高程 4 m 位置(见图 2 虚线处)处边坡土体含水率与水平距离统计关系如图 8 所示。很显然,不同降雨时刻边坡土体含水率峰值均出现在水平距离约

13.3 m(后缘裂隙位置)附近,且降雨过程中边坡含水率高达 52%,而降雨前和降雨停止后 32 h 时刻下边坡含水率差异并不明显,佐证了该边坡后缘裂隙是造成雨中边坡土体含水率激增的主要原因。

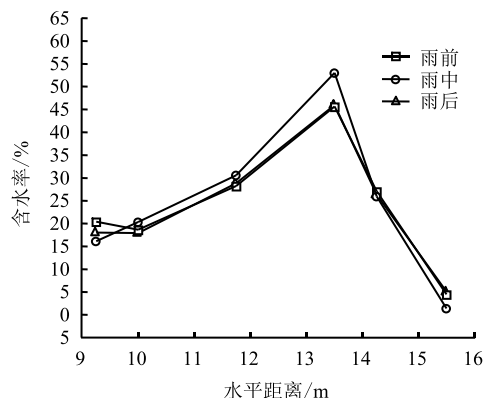


图 8 反演含水率-测线水平距离统计关系

Fig.8 Correlation between inversion volumetric water content and horizontal distance of measuring line

## 4 结 论

(1) 实测边坡土体含水率随深度增加呈先增大后减小变化趋势,在埋深 2 m 附近出现峰值;边坡电阻率随深度增加呈先减小后增加变化趋势,在埋深 2 m 附近出现最低值;两者呈明显对数统计关系。

(2) 反演所得测线剖面高含水率区域位于后缘裂隙下方,且随着降雨时间的推进,降雨过程中边坡含水率明显高于降雨前、降雨停止后 32 h;说明降雨所造成的边坡含水率激增主要源于后缘裂隙的入渗。

(3) 3 个典型降雨时刻边坡均存在一处显著高含水率与低含水率分布区,两者中间过渡区域易形成不稳定边坡的潜在软弱面,其与后期实际滑动带位置高度吻合。

显然,对于岩性相对单一或者地质结构不清晰的边坡而言,利用高密度电法获得边坡含水率或者电阻率变化特征,进而识别不稳定斜坡的潜在滑动面是可行的。然而,在不同边坡物理特性、外界降雨强度、裂隙特征等条件下,高密度电法成果的解译度与可行性仍需要进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] FRANKS C A M. Characteristics of some rain fall-induced landslides on natural slopes, Lantau Island, Hong Kong[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 1999(32): 247—259.

- [2] DAI F C, LEE C F, WANG S J, et al. Stress-strain behavior of a loosely compacted volcanic-derived soil and its significance to rainfall-induced fill slope failures[J]. **Engineering Geology**, 1999, 53: 359—370.
- [3] 张明, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 降雨型滑坡研究的发展现状与展望[J]. 工程勘察, 2009, 37(3): 11—17.  
ZHANG Ming, HU Rui-lin, TAN Ru-jiao, et al. State-of-the-art study on landslides due to rainfall and the prospect[J]. **Geotechnical Investigation & Surveying**, 2009, 37(3): 11—17.
- [4] 郭秀军, 孟庆生, 王基成, 等. 地球物理方法在含油工业污水管道渗漏探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 279—282.  
GUO Xiu-jun, MENG Qing-sheng, WANG Ji-cheng, et al. Leakage detection of underground pressureless industrial waste water pipeline using GPR electrical and SP method[J]. **Progress in Geophysics**, 2007, 22 (1): 279—282.
- [5] 郭秀军, 贾永刚, 黄潇雨, 等. 利用高密度电阻率法确定滑坡面研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1662—1669.  
GUO Xiu-jun, JIA Yong-gang, HUANG Xiao-yu, et al. Application of multielectrodes electrical method to detection of slide-face position[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23 (10): 662—1669.
- [6] 郭秀军, 王兴泰. 利用高密度电阻率法进行断层破碎带探查的数值模拟方法[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(5): 755—761.  
GUO Xiu-jun, WANG Xing-tai. Numerical simulation method in the exploration of faultage with high density resistivity[J]. **Journal of Ocean University of Qingdao**, 2001, 31(5): 755—761.
- [7] 许宏发, 钱七虎, 王发军, 等. 电阻率法在深部巷道分区破裂探测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 111—119.  
XU Hong-fa, QIAN Qi-hu, WANG Fa-jun, et al. Application of electric resistivity method to zonal disintegration exploration of deep roadway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(1): 111—119.
- [8] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 电阻率层析成像法监测系统在矿井突水模型试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 297—307.  
LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Application of electrical resistivity tomography monitoring system to mine water inrush model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 297—307.
- [9] 姜振蛟, 卞建民, 查恩爽, 等. 高密度电阻率成像法在水文地质领域中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 21—26.  
JIANG Zhen-jiao, BIAN Jian-min, ZHA En-shuang, et al. The application of the electrical resistivity tomography in hydrology: an overview[J]. **Hydrogeology & Engineering Geology**, 2010, 37(2): 21—26.
- [10] 储亚, 查甫生, 刘松玉, 等. 基于电阻率法的膨胀土膨胀性评价研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 157—164.  
CHU Ya, ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, et al. Evaluation of expansibility of expansive soil using resistivity method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(1): 157—164.
- [11] 刘国华, 王振宇, 黄建平. 土的电阻率特性及其工程应用研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 83—87.  
LIU Guo-hua, WANG Zhen-yu, HUANG Jian-ping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 83—87.
- [12] 刘松玉, 韩立华, 杜延军. 水泥土的电阻率特性与应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1921—1926.  
LIU Song-yu, HAN Li-hua, DU Yan-jun. Experimental study on electrical resistivity of soil-cement[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(11): 1921—1926.
- [13] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 温度对污染土电阻率影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1151—1155.  
HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Experiment study on effect of temperature on electrical resistivity of contaminated soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(6): 1151—1155.
- [14] 付伟, 汪稔, 胡明鉴, 等. 不同温度下冻土单轴抗压强度与电阻率关系研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 73—78.  
FU Wei, WANG Ren, HU Ming-jian, et al. Study of relationship between uniaxial compressive strength and electrical resistivity of frozen soil under different temperatures[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 73—78.
- [15] 付伟, 汪稔. 饱和粉质黏土反复冻融电阻率及变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 769—774.

- FU Wei, WANG Ren. Experimental study of electrical resistivity and deformation characteristics of saturated silty clay during repeated freeze-thaw cycles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 769—774.
- [16] 张少华, 李熠, 寇晓辉, 等. 水泥固化锌污染土电阻率与强度特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2899—2906.
- ZHANG Shao-hua, LI Yi, KOU Xiao-hui, et al. Study of electrical resistivity and strength characteristics of zinc contaminated soil solidified by cement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2899—2906.
- [17] 董晓强, 苏楠楠, 黄新恩, 等. 污染浸泡对水泥强度和电阻率特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1855—1862.
- DONG Xiao-qiang, SU Nan-nan, HUANG Xin-en, et al. Effect of sewage on electrical resistivity and strength of cemented soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(7): 1855—1862.
- [18] 储亚, 刘松玉, 蔡国军, 等. 锌污染土物理与电学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2862—2867.
- CHU Ya, LIU Song-yu, CAI Guo-jun, et al. An experimental study of physical and electrical characteristics of zinc contaminated silty clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(10): 2862—2867.
- [19] 林杰. 基于电阻率法的黏性土场地工程性质[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 685—689.
- LIN JIE. Evaluation of cohesive soil ground engineering properties based on resistivity method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 685—689.
- [20] 陈瑞锋, 林杰, 储亚. 赤泥改性黄土的基本工程性质研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 89—97.
- CHEN Rui-feng, LIN Jie, CHU Ya, et al. Study of basic engineering properties of loess modified by red mud[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(10): 89—97.
- [21] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 非饱和土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1671—1676.
- ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey Soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1671—1676.
- [22] 刘庭发, 聂艳侠, 胡黎明, 等. 基于高密度电阻率法的水分迁移模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 761—768.
- LIU Ting-fa, NIE Yan-xia, HU Li-ming, et al. Model tests on moisture migration based on high-density electrical resistivity tomography method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 761—768.
- [23] 郭秀军, 吴水娟, 马媛媛. 生活垃圾渗滤液污染砂土电阻率法量化检测研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 2066—2071.
- GUO Xiu-jun, WU Shui-juan, MA Yuan-yuan. Quantitative investigation of landfill-leachate contaminated sand soil with electrical resistivity method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2012, 34(11): 2066—2071.
- [24] 柯瀚, 胡杰, 吴小雯, 等. 竖井抽水垃圾填埋场渗滤液运移规律研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(5): 786—793.
- KE Han, HU Jie, WU Xiao-wen, et al. Investigation into leachate transport in MSW landfills under pumping of vertical wells[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(5): 786—793.
- [25] 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.
- LÜ Qing-feng, BU Si-min, WANG Sheng-xin, et al. Application of comprehensive geophysical prospecting method in stability evaluation of landslide[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(Suppl.1): 142—147.
- [26] 张虎元, 王少一, 赵天宇, 等. 利用高密度电阻率法进行盐渍土含水率的测定[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 95—101.
- ZHANG Hu-yuan, WANG Shao-yi, ZHAO Tian-yu, et al. Determination of water content of saline soil with multi-electrode resistivity method[J]. **Hydrogeology Engineering Geology**, 2012, 39(1): 95—101.
- [27] 中华人民共和国水利部. GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Ministry of Water Resources of China. GB/T 50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [28] 中华人民共和国水利部. GB/T50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- Ministry of Water Resources of China. GB/T50145—2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planing Press, 2008.