Research Progress in landslide Monitoring Based on Time-lapse Resistivity Method

Tao Tao[1,2], Peng Han[1,2,*], Kaiyan Hu[3], Shuangling Mo[1,2], Shuangshuang Li[1,2], Wei Gong[1,2], Gexue Bai[4], Ruidong Li[4], Baofeng Wan[4], Ning An[4]

[1]Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055

[2]Guangdong Provincial Key Laboratory of Geophysical High-Resolution Imaging Technology (Southern University of Science and Technology), Shenzhen 518055

[3]School of Geophysics and Geomatics, China University of Geoscience, Wuhan 430074

[4]Gansu Institute of Engineering Geology, Lanzhou 730099

[*]Corresponding author Email: hanp@sustech.edu.cn

ABSTRACT

Landslides in China are numerous, widely distributed, frequent, and cause significant damage. Monitoring and early warning are critical measures for preventing landslide disasters. As a near-surface monitoring technique, the time-lapse resistivity method can capture the spatiotemporal evolution of the landslide's internal electrical structure, providing valuable data for landslide prevention and stability analysis. This paper aims to review and summarize the research on the time-lapse resistivity method in landslide monitoring and early warning, assess the current progress, explore potential future developments, and provide insights for scientific research and engineering practices in landslide disaster prevention and control.

Keywords: *Landslide Disaster Monitoring, Time-lapse Resistivity Method, Electrical Structure*

基于时移电阻率法的滑坡监测研究进展

陶涛[1,2]，韩鹏[1,2,*]，胡开颜[3]，莫双菱[1,2]，李双双[1,2]，龚伟[1,2]，白革学[4]，李瑞冬[4]，万宝峰[4]，安宁[4]

1 南方科技大学地球与空间科学系，深圳 518055

2 广东省地球物理高精度成像技术重点实验室（南方科技大学），深圳 518055

3 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院，武汉 430074

4 甘肃工程地质研究院，兰州 730099

**通讯作者 电子邮箱：hanp@sustech.edu.cn*

摘要

中国滑坡数量众多、分布广泛、发生频繁，且危害严重。监测预警是防范滑坡灾害的重要手段。作为一种浅地表监测方法，时移电阻率法能够获取滑坡内部电性结构的时空演化，为滑坡治理和稳定性分析提供数据支撑。本文旨在梳理和总结时移电阻率法在滑坡监测预警领域的研究成果，评析现有研究进展，探讨未来可能的发展方向，为滑坡灾害防控领域的科学研究和工程实践提供参考。

关键词：*滑坡灾害监测，时移电阻率法，电性结构*

1. 引言

滑坡是指斜坡上的土体或者岩体沿着一定的软弱面向下滑动的自然现象。在我国发生的地质灾害中，滑坡是地灾之首、分布范围广、发生频率高，造成的经济损失严重。坡体抗剪强度的减弱或剪切应力的增加是滑坡发生的根本原因，这些变化可能由人类活动（如森林砍伐、土地利用变化、基础设施建设）或自然因素（如火山喷发、地震、

© The Author(s) 2025

S. Qiao et al. (eds.), *Proceedings of the 11th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC 2024)*, Advances in Economics, Business and Management Research 367,
https://doi.org/10.2991/978-94-6463-946-9_6

降雨等）引起。其中，降雨引起的地下水位变化和孔隙水压力升高是诱发滑坡的主要因素[1]。因此，监测降雨诱发型滑坡对研究滑坡发生机理、预防和治理具有重要意义。

目前，降雨型滑坡的监测方法主要包括地表变形监测（如 GNSS，摄影测量，雷达和光学遥感等），深部变形监测（如测斜仪，声发射，位移计等），水文监测（如水位计，渗压计等）等[2]。变形是滑坡监测中关键的参数之一，地表变形监测能够进行大范围、长期的测量，可获取滑坡的地貌特征、规模、地表位移和运动方向等重要信息，对滑坡整体动态变化的评估具有显著优势。然而，地表变形监测无法揭示滑坡体内部的变形信息。相比之下，深部变形监测对坡体内部变形具有更高的敏感性，能够更早捕捉滑坡内部的破裂和剪切滑动力的变化，从而在灾害发生前及时发出预警。然而，深部变形监测的范围通常局限于测点附近，且设备价格昂贵、布置过程复杂，难以实现大范围的高密度监测。水文监测能够获取坡体内部特定位置的地下水位和孔隙水压力等信息，是研究滑坡水文动力学过程的重要手段。然而，其测量范围通常局限于原位点，有限的测量设备难以获取整个滑坡体的水文特征。每种监测技术都有其适用场景和局限性。在滑坡监测中，还需要引入其他手段进行监测，以提高滑坡监测预警的准确性和可靠性。

由于滑坡发生前后，滑坡体内部的物理属性（如电阻率、波速和流速等）会因岩土的破裂、滑移和渗流等过程而发生显著变化。这些变化会引起地球物理场的改变[3, 4]。因此，通过分析地球物理场的特性及其变化，可以间接获取坡体的内部结构、力学状态以及水文特征等关键信息。在众多地球物理方法中，时移电阻率法对地下水动态变化高度灵敏，尤其适用于降雨型滑坡监测。

近年来，国内外已有多篇关于时移电阻率法在滑坡监测中的应用研究，涵盖了数据采集与处理方法、坡体潜在滑面位置的识别、坡体水文动态演化及滑坡风险分析等方面。本文对近年来相关文献进行了系统梳理，总结了时移电阻率法在数据采集与处理技术上的改进及其在滑坡监测中的典型应用，旨在为滑坡灾害监测研究提供参考。

2. 时移电阻率法

电阻率是描述地下介质物性特征的一种重要参数，与岩石的矿物成分、流体含量、孔隙度、含水饱和度以及温度等参数密切相关。直流电阻率法以地下介质的导电性差异为物质基础，通过供电电极向地下供入直流电流，根据接收电极测量的数据来推断浅地表的电阻率结构。作为一种主动源勘探方法，直流电阻率法具有成本低、抗干扰能力强和成像精度高等优点。

时移电阻率法以直流电阻率法的方法原理为基础，在同一个研究区域，不同采集时刻使用相同的观测系统进行数据采集。通过利用不同时刻的监测数据，可以推断地下电阻率的时空变化，从而实现对研究区域的动态监测。

2.1 数据采集方式

时移电阻率法通过在不同时间对研究区域重复探测以获取时移数据，从而推断地下结构的时空演化。数据采集方式主要分为手动重复测量和自动化重复测量。手动重复测量在每次测量前需要临时布置电极，并使用市面上较为成熟的直流电阻率设备进行二维或三维数据采集。然而，由于每次测量都需人工到场操作，手动重复测量不仅成本较高，且时效性较差，难以快速捕捉地下结构的动态变化。相比之下，自动化测量通过永久安装传感器和遥测技术，实现数据采集的自动化与远程控制，显著提高了监测效率和精度，同时有效减少人为干预带来的误差。

野外滑坡监测中，由于市面上自动时移电阻率监测设备较为稀缺，主要用传统仪器进行手动重复测量为主，仅有少量研究采用自动时移电阻率监测技术[5]。目前，市面上较为成熟的自动时移电阻率监测设备是由 Oliver 等人于 2009 年开发 ALERT[6]。自动时移电阻率监测设备由多个关键部分组成，包括测量系统、电极、数据存储器、遥测系统、电源系统、数据管理系统和控制软件，

如图 1 所示。测量系统负责自主调度和存储时移数据，功能与传统的直流电阻率设备相同。电极用于向地下介质施加电流并测量电压，从而获取视电阻率数据。数据存储器负责存储采集到的时移数据，通常具有较大存储容量，可以在数据传输前保存多个命令文件和测量数据。遥测系统允许设备与外部控制软件进行双向通信，支持通过本地网络、移动网络或互联网传输数据，从而实现远程监控和控制数据采集过程。电源系统提供设备所需电力，通常由太阳能或风能对电源充电。数据管理系统用于处理采集到的时移监测数据，确保数据结构化和高效管理，方便后续分析和处理。控制软件提供用户界面，允许设置测量参数、查看实时数据并进行数据分析。各组件的协同工作，使得自动时移电阻率监测系统能够高效、自动化地进行监测，实时提供数据。

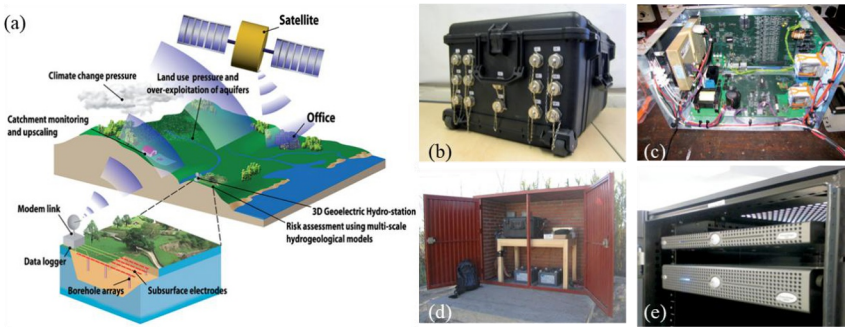

图 1 自动化时移电阻率监测系统（ALERT）[6]。（a）ALERT 监测示意图；（b）ALERT 仪器外部；(c)ALERT 仪器内部视图；(d)ALERT 安全外壳；(e)ALERT 仪器的 Dell PowerEdge 服务器：一个用于数据管理系统，一个用于数值模拟

2.2 数据处理技术

为了提高时移电阻率法监测数据解释的可靠性，学者们一直致力于时移电阻率法的反演研究来获得更准确的电性结构。常用的反演方法包括单独反演，数据归一化反演，级联反演。单独反演对每次采集的数据进行独立反演来重建对应时刻的地下结构，利用反演结果的差分图像研究地下结构的变化[7, 8]。数据归一化反演将后续观测时刻的采集数据除以或减去第一次的采集数据进行归一化，反演后续采集时刻相对于第一次采集时刻地下的电性结构变化[9, 10]。级联反演使用第一次采集数据的反演结果作为后续数据反演的初始和参考模型，增加了后续时刻反演结果与初始时刻反演结果的相似性，在一定程度上有压制假异常的作用[7, 11]。

上述提到的几种时移数据反演方式在一些应用场景中表现出良好的应用效果，但仍存在一些局限性。单独反演产生的新异常可能是地下的电性参数变化所致，也可能是观测数据噪声或反演参数（反演迭代次数、初始模型选择、正则化因子等）设置不同引起，导致反演结果中新异常的解释存在挑战；对于归一化反演，由于每次采集的背景噪声不同，归一化之后的数据可能受更多噪声的影响；对于级联反演，如果初始时刻的反演结果存在假异常，假异常会传递到后续时刻采集数据的反演结果中，另外，当后续时刻地下的电性参数相对于初始时刻发生较大变化时，级联反演可能不收敛或者反演出错。相比之下，时移反演同时对所有时刻观测数据进行反演，为了提高反演结果的精度，在目标函数中加上如下的时移约束：

$$\emptyset_t = \mathbf{M}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{C}\mathbf{M}, \qquad (1)$$

其中 $\emptyset_t$ 表示时移约束，$\mathbf{M} = [\mathbf{m}^1\ \mathbf{m}^2\ \cdots\ \mathbf{m}^{nt}]^{\mathrm{T}}$包含了 nt 个采集时刻对应的反演结果，$\emptyset_t$中$\mathbf{C}$的表示如下:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}^1 & -\mathbf{I}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I}^2 & -\mathbf{I}^3 & 0 & 0 & 0 \\ \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{I}^{nt-1} & -\mathbf{I}^{nt} \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

其中，$\mathbf{I}^{nt} \in \mathbb{R}^{nm \times nm}$是一个单位矩阵。时移项$\emptyset_t$计算相邻时刻反演结果同一位置的电阻率/电导率的改变量，以确保相邻时刻地下结构的变化是光滑的[12-14]。陶涛等人（2024）的研究结果也表明时移反演可以有效压制相邻采集时刻由噪音引起的假异常[13]。为了进一步减少时移反演中的虚假异常，Loke 等人（2022）在反演目标函数中引入了惩罚函数[15]。为避免时移约束导致过度光滑的反演结果，Loke 等人（2014）使用 L1 范数来计算目标函数[16]，Su 和 Yang（2022）采用了 Lp 范数计算时移约束[17]。此外，Karaoulis 等人（2014）通过引入拉格朗日乘子对时移项进行加权，从而进一步优化了反演效果[18]。

3. 时移电阻率法在滑坡监测中的应用

随着自动数据采集，传输系统的不断完善，以及时移反演算法的发展，时移电阻率法已经广泛用于识别坡体潜在滑面位置和高含水量区域，为滑坡灾害的预警和治理提供科学依据。

3.1 识别潜在滑面位置

在滑坡区域，滑面之上通常由松散沉积物或强风化层组成，孔隙度较高，雨水易于从地表向下渗透；滑面之下多为弱风化层或基岩，渗透率较低，雨水难以进一步渗入。因此，滑面两侧通常存在电阻率差异。基于滑面一般位于高阻层与低阻层分界处的特征，可利用时移反演得到的地下电阻率分布，推测滑面的潜在位置。例如，Xu 等人（2016）2013 年 11 月和 2014 年 8 月期间，利用时移电阻率法对中国西南地区的典型滑坡进行了调查[19]。结合钻孔资料，通过反演的电阻率模型，清晰界定了第四纪沉积物与基岩之间的滑动界面，并揭示了因断裂带和裂缝引起的地表水优先入渗路径。研究结果还表明地表水沿裂缝渗透至滑动体内部，并以裂隙水的形式从破碎基岩中排出，促使弱风化层逐渐软化和侵蚀，最终导致滑坡的发生。

3.2 监测滑坡内部水分变化

介质的电阻率与水分含量密切相关，在滑坡体内，水分的动态变化（如雨水入渗或地下水流动）会影响电阻率，水分含量增加会导致电阻率的降低。Lebourg 等人（2010）在法国 Vence 滑坡进行了现场实验[20]，研究结果表明，降雨量与电阻率之间、孔隙水压力与电阻率平均值之间存在较强的负相关关系。

时移电阻率法通过在不同时刻对坡体进行探测，可以得到不同时刻的坡体电阻率结构。结合水分含量与电阻率的定量关系，能够有效捕捉滑坡体内部水分的动态分布[21, 22]。例如，Hojat 等人（2019 年）利用时移电阻率法进行室内滑坡物理模拟实验，并通过 Archie 公式将坡体的电阻率分布转换为含水饱和度分布，实验结果表明，在不同含水饱和度的交界区域容易产生裂缝[23]。

3.3 分析滑坡风险

滑坡表层水分积聚会导致土体强度降低，尤其在基岩与弱风化层之间（滑面）粘结力减弱时，滑坡体的稳定性会显著降低。基于这一特征，通过建立水分含量与电阻率之间的定量关系，利用时移电阻率技术可用于识别滑坡体潜在失稳区域，为滑坡预警和风险评估提供科学支持。例如，Hojat 等人（2019 年）进行室内物理模拟实验，模拟降雨引发的浅层滑坡。他们使用时移电阻率法监测雨水渗透过程，并通过 Archie 公式将时移电阻率的反演结果转换为含水饱和度[23]。实验结果表明，含水饱和度超过 45%的区域，滑坡体会变得不稳定，并且破裂现象可能发生在不同含水饱和度的交界区域。Boyd 等人（2020）使用时移电阻率法对英国北约克郡的一个活动滑坡进行监测，研究结果表明，在滑坡发生前，由时移电阻率换算的孔隙吸力（以及抗剪强度）出现了明显下降，低抗剪强度区域与现场观察到的滑动具有较好的一致性。

将时移电阻率获得的数据与滑坡危险

性分析模型（如概率风险分析或极限平衡法）结合，构建滑坡的风险模型可以为滑坡预警提供科学依据。例如，Bai 等人（2022）提出了一种定量且直接评估降雨期间滑坡安全系数（FOS）演变的框架[24]。该框架首先使用基于多重约束的不精确高斯-牛顿法反演时移数据，以获得真实的电阻率分布。随后，利用 Archie 方程计算饱和度分布，最后通过有限元强度折减法计算滑坡的 FOS。试验结果表明，该框架在不同电极阵列和视电阻率噪声水平下均表现出良好的有效性和可靠性。

4. 时移电阻率法在滑坡监测中的发展趋势

在滑坡监测中，时移电阻率法通常需要在坡体上长期布置电极。然而，坡体的移动或其他外部干扰可能导致电极位置发生变化，从而改变测点的装置系数。如果无法准确获取电极的具体位置，后续的数据处理结果可能会受到影响，进而导致错误地解释电阻率分布。为了避免坡体移动引起的电极位置变化对时移电阻率法测量结果的影响，Bièvre 等人（2021 年）在坡体之外布置电极进行滑坡监测[25]。研究表明，虽然位于滑坡体外部的电极能够检测到数据变化，但却无法准确定位滑坡体内部发生变化的区域。因此，电极必须布置在滑坡体范围内，才能精确探测滑坡体结构的变化。然而，在每次测量前，通过人工方式确定电极的精确位置费时且成本高昂。随着传感器技术的进步，小型 GPS 设备已能实现高精度定位。在时移电阻率法的滑坡监测中，可以为每个电极配备 GPS 设备，定期更新电极位置。这样，既可以监测滑坡的地表变形，又能根据电极的实时坐标对观测数据进行校正，从而有效避免因电极位置误差而导致的反演结果偏差。

温度是影响介质电阻率的重要因素。在滑坡的长期监测中，由于不同季节的温度差异较大，温度变化可能引起电阻率的变化，从而掩盖地下结构的真实变化，进而影响滑坡风险分析的准确性。Gance 等人（2016 年）在法国 Super-Sauze 粘土滑坡的研究中指出，温度对时移电阻率测量结果有显著影响，尤其是地下水、包气带水和雨水之间的热交换作用，这种热交换可能掩盖土壤含水量变化对电阻率的影响[26]。因此，在滑坡监测中，可以布置少量温度传感器监测滑坡体内部温度，同时利用现场采集的土壤样本，结合室内岩石物理实验，建立温度与电阻率之间的关系，从而对时移电阻率法获取的滑坡体电阻率分布进行校正。

随着监测数据的日益增多，数据处理和反演技术将继续是时移电阻率法发展的关键。对于四维反演（时移三维反演），反演参数较多。传统时移三维反演方法存在内存消耗高、计算时间长、时效性低等问题。相比之下，宽度学习训练和预测速度快，映射和泛化能力强[27]。对于监测数据，宽度学习可以快速得到多个时刻对应的地下电阻率结构，时效性高，在灾害预警研究中具有速度优势。为了进一步提高多次监测数据预测结果的准确性，可在损失函数中添加类似于传统时移反演方法中的时移约束，以抑制相邻时刻预测结果的虚假异常，从而提高监测数据反演的精度。

滑坡潜在风险的评估对滑坡防治与灾害管理具有重要意义，可有效减少滑坡灾害造成的损失。目前，滑坡危险性分析的方法主要包括定性分析法、定量分析法和概率风险分析法等。定性分析法通过研究历史滑坡案例、地形地貌特征、地质条件及降雨量等因素，对滑坡潜在危险性进行评估。定量分析法则通过计算滑坡体的安全因子来评估其稳定性，常用的计算方法包括极限平衡法和有限元法。概率风险分析法基于概率统计理论，评估滑坡发生的概率，并量化其不确定性。常用技术包括蒙特卡洛模拟和逻辑回归分析。此外，可将遥感技术、地质勘探和地球物理监测等多学科手段引入滑坡危险评估，构建复合风险评估模型，从而提升滑坡早期预警能力。

随着物联网技术、电子技术和传感器的不断发展，时移电阻率法有望成为一种更加普及且经济高效的监测手段。与此同时，结

合机器学习对监测数据进行自动化分析，时移电阻率法将向实时监测和智能化系统方向发展。这将为偏远地区和滑坡高危区域的监测提供更具前景的解决方案。

5. 结论

滑坡是主要的地质灾害之一，也是防灾减灾工作的重要对象。传统的变形和水文监测存在价格昂贵，坡体内部空间分辨率低等问题。相比之下，基于时移电阻率法的滑坡监测方法具有成本低、能够捕获坡体内部高精度电性结构及其时空演化等优点。通过分析地下电阻率结构，可以识别潜在的滑面位置；结合介质水分含量与电阻率的定量关系，还可以计算坡体内部水分含量的动态变化，从而为滑坡灾害的风险分析与治理提供关键数据支撑。本文针对时移电阻率法在滑坡监测中的研究进行了调研，旨在为滑坡灾害监测研究提供借鉴。

致谢

感谢国家自然科学基金（42222405），深圳市科技项目（JCYJ20240813094903006），广东省地球物理高精度成像技术重点实验室（2022B1212010002），甘肃省联合科研基金重点项目（24JRRA803）对本研究的资

参考文献

[1] IVANOV V, AROSIO D, TRESOLDI G, et al. Investigation on the role of water for the stability of shallow landslides—Insights from experimental tests [J]. Water, 2020, 12(4): 1203.

[2] 邓李政, 袁宏永, 张鸣之, et al. 滑坡变形监测预警技术研究进展 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2023, 63(6): 849-64.

[3] 胡开颜, 莫淳淯, 张益华, et al. 基于自然电位法的滑坡监测实验研究 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(12): 4582-93.

[4] HU K, HUANG Q, TANG M, et al. Self-potential variations associated with the slip of Huangnibazi Landslide [J]. Journal of Applied Geophysics, 2024, 220: 105275.

[5] BOYD J P, CHAMBERS J, WILKINSON P, et al. Linking field electrical resistivity measurements to pore suction and shear strength, for improved understanding of long term landslide stability; proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2021, F, 2021 [C]. Society of Exploration Geophysicists and Environment and Engineering ….

[6] KURAS O, PRITCHARD J D, MELDRUM P I, et al. Monitoring hydraulic processes with automated time-lapse electrical resistivity tomography (ALERT) [J]. Comptes Rendus Geoscience, 2009, 341(10-11): 868-85.

[7] HAYLEY K, PIDLISECKY A, BENTLEY L R. Simultaneous time-lapse electrical resistivity inversion [J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, 75(2): 401-11.

[8] INIM I J, UDOSEN N I, TIJANI M N, et al. Time-lapse electrical resistivity investigation of seawater intrusion in coastal aquifer of Ibeno, Southeastern Nigeria [J]. Applied Water Science, 2020, 10(11): 1-12.

[9] LIU B, LIU Z, LI S, et al. An improved Time-Lapse resistivity tomography to monitor and estimate the impact on the groundwater system induced by tunnel excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 107-20.

[10] 马欢, 张洪洋, 郭越, 等,时移电阻率法归一化数据反演分辨电阻率结构微小变化 [J]. 物探与化探, 2019, 43(6): 1320-5.
Ma H，Zhang H Y，Guo Y，et al．The normalized data inversion of time-lapse resistivity method for resolving small resistivity changes［J］．Geophysical and Geochemical Exploration，2019，43(6) : 1320－1325．http: / /doi．org /10．11720 /wtyht．2019．0008

[11] OLDENBORGER G A, KNOLL M D, ROUTH P S, et al. Time-lapse ERT monitoring of an injection/withdrawal

experiment in a shallow unconfined aquifer [J]. Geophysics, 2007, 72(4): F177-F87.

[12] KIM B, JOUNG I, CHO A, et al. Monitoring the perturbation zone near a foundation excavation with electrical resistivity tomography: Comparison between time-lapse 3D and 2D inversions in single-profile study [J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 205.

[13] 陶涛, 韩鹏, 马欢, 等 l. 时移电阻率法三维反演研究 [J]. 地球物理学报, 2024, 67(10): 3973-88.
TaoT,HanP,MaH,etal.2024.3D Time-lapseresistivityinversion.ChineseJ.Geophys.(inChinese),67(10):3973-3988,doi:10.6038/cjg2023R0297.

[14] LOKE M H, DAHLIN T, LEROUX V. Constrained Time-lapse Inversion of 3-D Resistivity Surveys Data [Z]. Near Surface 2011 - 17th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics. 2011.10.3997/2214-4609.20144428

[15] LOKE M, WILKINSON P, CHAMBERS J, et al. The use of asymmetric time constraints in 4-D ERT inversion [J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 197: 104536.

[16] LOKE M H, DAHLIN T, RUCKER D F. Smoothness‐constrained time‐lapse inversion of data from 3D resistivity surveys [J]. Near Surface Geophysics, 2014, 12(1): 5-24.

[17] SU P, YANG J. Time-lapse adaptive inversion on resistivity monitoring data with Lp norm regularization and cross-time weight [J]. Journal of Applied Geophysics, 2022, 204: 104672.

[18] KARAOULIS M, REVIL A, TSOURLOS P, et al. IP4DI: A software for time-lapse 2D/3D DC-resistivity and induced polarization tomography [J]. Computers & Geosciences, 2013, 54: 164-70.

[19] XU D, HU X-Y, SHAN C-L, et al. Landslide monitoring in southwestern China via time-lapse electrical resistivity tomography [J]. Applied Geophysics, 2016, 13(1): 1-12.

[20] LEBOURG T, HERNANDEZ M, ZERATHE S, et al. Landslides triggered factors analysed by time lapse electrical survey and multidimensional statistical approach [J]. Engineering Geology, 2010, 114(3-4): 238-50.

[21] BIèVRE G, JONGMANS D, WINIARSKI T, et al. Application of geophysical measurements for assessing the role of fissures in water infiltration within a clay landslide (Trièves area, French Alps) [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(14): 2128-42.

[22] TRAVELLETTI J, SAILHAC P, MALET J P, et al. Hydrological response of weathered clay-shale slopes: water infiltration monitoring with time-lapse electrical resistivity tomography [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(14): 2106-19.

[23] HOJAT A, AROSIO D, IVANOV V I, et al. Geoelectrical characterization and monitoring of slopes on a rainfall-triggered landslide simulator [J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 170: 103844.

[24] BAI D, LU G, ZHU Z, et al. Using electrical resistivity tomography to monitor the evolution of landslides' safety factors under rainfall: A feasibility study based on numerical simulation [J]. Remote Sensing, 2022, 14(15): 3592.

[25] BIèVRE G, JONGMANS D, LEBOURG T, et al. Electrical resistivity monitoring of an earthslide with electrodes located outside the unstable zone (Pont‐Bourquin landslide, Swiss Alps) [J]. Near Surface Geophysics, 2021, 19(2): 225-39.

[26] GANCE J, MALET J-P, SUPPER R, et al. Permanent electrical resistivity measurements for monitoring water circulation in clayey landslides [J]. Journal of applied geophysics, 2016, 126: 98-115.

[27] TAO T, HAN P, YANG X-H, et al. Fast

Initial Model Design for Electrical Resistivity Inversion by Using Broad Learning Framework [J]. Minerals, 2024, 14(2): 184.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.