

何永波, 李德庆, 李清林, 等. 综合物探方法在滑坡地质勘探中的应用研究[J]. CT 理论与应用研究, 2015, 24(1): 11-20. doi:10.15953/j.1004-4140.2015.24.01.02.
He YB, Li DQ, Li QL, et al. The application of integrated geophysical method in the landslide exploration[J]. CT Theory and Applications, 2015, 24(1): 11-20. (in Chinese). doi:10.15953/j.1004-4140.2015.24.01.02.

综合物探方法在滑坡地质勘探中的应用研究

何永波^{1,2✉}, 李德庆², 杨振宇², 李清林², 徐顺强², 赵贵章³

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026
2. 中国地震局地球物理勘探中心, 郑州 450002
3. 华北水利水电大学, 郑州 450002

摘要: 综合物探方法在滑坡等地质灾害的勘探中发挥着重要的技术作用。这里以河南省某地滑坡勘探为例, 利用高密度电阻率法和地质雷达法等综合物探方法, 分析两种物探方法的技术原理、联合解释, 并结合地质钻探、地质调查等资料, 查明该场地滑坡体的分布情况。结果表明, 综合物探方法能有效地减少物探的多解性, 提高成果解释精度, 其综合物探解释成果与地质情况较为吻合, 显示出综合物探方法在滑坡等地质灾害勘探中的重要作用。最后, 对综合物探方法及联合解释进行了简要的总结和展望。

关键词: 综合物探; 高密度电阻率法; 地质雷达; 滑坡; 联合解释

doi:10.15953/j.1004-4140.2015.24.01.02 中图分类号: P 631.3+22 文献标志码: A

滑坡是常见的地质灾害之一, 是指土质体或者岩性体, 受强降雨渗透和冲刷, 地震或施工爆破的诱发, 及人为切坡等因素影响, 在其自身重力的牵引作用下, 打破自身土的平衡力, 沿着一定的软弱面或者软弱带, 整体地或者部分分散地顺坡向下滑动的现象^[1]。滑坡发育的分布规律主要受地形地貌、地层岩性及地质构造等客观因素制约, 同时又受人为活动的诱导因素制约, 因此滑坡的形成和发生过程是一个缓慢的综合物理变化过程。

为了更好地控制、监测和治理滑坡的地质灾害现象, 首先需要查清滑坡中的滑坡面或滑坡带的埋深位置和分布特征。传统采用钻探、地质调查、土工试验等常规的土工及地质方法, 存在所获得的滑坡信息量较少、成本高及工作效率较低等不足之处; 近几年, 运用综合地球物理方法, 如高密度电阻率法、地质雷达法 (Ground Penetrating Radar, GPR)、浅层地震法及钻孔 CT 法等无损探测方法, 查明地质灾害问题成为主流趋势。

以高密度电阻率法和 GPR 为主的综合物探方法, 以其工作效率高、经济效益高、探测精度高及数据信息量大等优点, 在滑坡等地质灾害治理中, 发挥着越来越重要的作用。

1 综合物探方法

物探是以目标介质勘探中的波速度差异、电导性差异、磁性差异、重力密度差异及放射性差异等为原理的勘探方法。单一的物探方法, 往往仅仅了解目标体的某一种物理性差

收稿日期: 2014-07-23。

基金项目: 国家自然科学基金 (41372260); 中国地震局地球物理勘探中心青年基金。

异,具有一定的局限性和多解性^[2-4]。因此,在地球物理中,采用综合物探方法,利用目标体的多种物理性差异,来综合判断,综合解释,有效地减少物探中的多解性问题,提高勘探准确性和精度。

本文以高密度电阻率法和 GPR 两种重要的物探方法为例,对其在滑坡地质灾害勘探中的应用进行阐述。

1.1 高密度电阻率法

常规电阻率法由于其观测方式的限制,不仅测点密度较稀,而且也很难从电极排列的某种组合上研究地电断面的结构与分布。因此,在精细勘探中,为了提高电阻率法的勘探能力,使电阻率法在城市工程与环境地质调查中发挥更大的社会效益,往往采用高密度电阻率法^[5, 7-8, 11]。

1.1.1 高密度电阻率法工作原理

高密度电阻率法在现场测量时,只须将全部电极设置在一定间隔的测点上,然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换器,使电极布设一次完成。测量时由程序控制而动作,从而实现电极排列方式、极距和测点的快速转换,准确与快速地采集大量数据。利用系统配套的系列电法二、三维正演、反演处理软件,对采集的数据进行各种处理及结果图示,使解释工作更加方便与直观。由于利用了丰富的信息量和非线性反演,所得结果的分辨率远高于常规电法勘探。它十分便于地质工作的分析与解释,由于视电阻率值与地层的岩性和岩石孔隙中液体的性质密切相关,所以在识别滑坡面、断层、破碎带和含水层等方

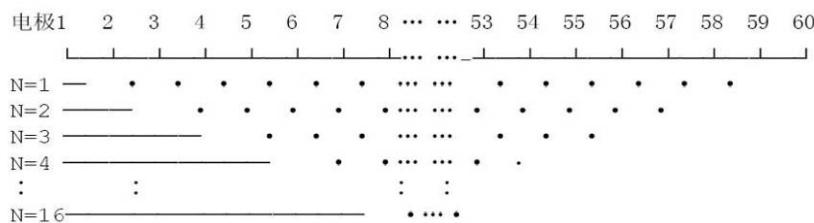


图1 高密度电阻率剖面测点示意图

Fig.1 High-density resistivity imaging of measuring points

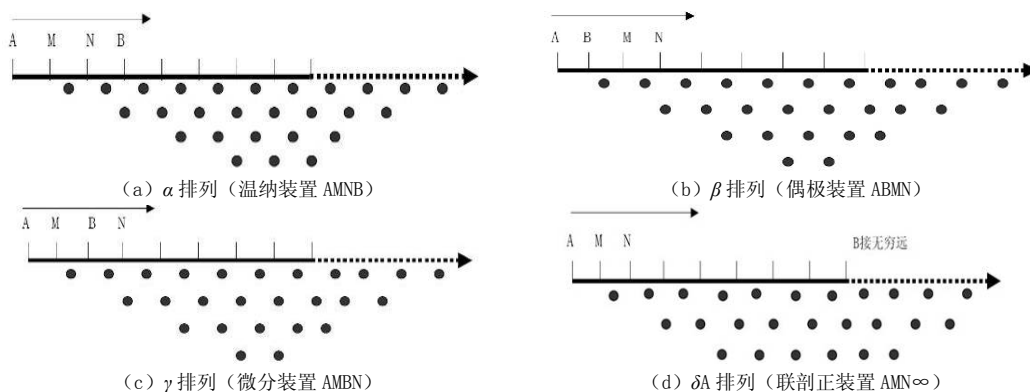


图2 高密度电阻率法不同装置排列方式

Fig.2 Different arrangement of devices of high-density resistivity method

面非常有效^[2, 5-7, 9]。

高密度电阻率法，在采集中最常用的电极装置为 α 排列（温纳装置 AMNB）、 β 排列（偶极装置 ABMN）、 γ 排列（微分装置 AMBN），也可以采用二极、三极装置等。测量时，一次将即可做供电电极又做测量电极的 1~60 根电极按固定点距布设在测线上，通过多芯电缆与多极电路转换器连接，在主机控制下可实现电极排列方式、极距及测点的扫描测量。二维高密度电阻率法的野外工作及装置方式详见图 1 和图 2^[3, 5-8]。

1.1.2 高密度电阻率法的正反演

高密度电阻率法的数据处理过程中，主要涉及到两个重要的问题，即正演和反演问题。而电阻率法探测的目的是建立与地下地质学密切相关的地下电阻率分布成像。

正演定义为根据已知的模型参数的分布、电极排列方式和模型去预测数据的过程。这是一种从模型空间到数据空间的映象。正模拟产生合成（理论）数据集，正模（modeling）也同样被称为正模拟、正问题和正解。

反演定义为根据数据和模型确定模型参数的估计值。反演是从数据空间到模型空间的映象过程，它根据测量的电压和电流数据重建地下电阻率分布。反演也称作反模拟和反问题。

电阻率数据处理过程如下^[2-5, 8, 10, 14]：

（1）根据平均视电阻率或者视电阻率分布，用户推测，先验的地下电阻率分布的知识建立一个初始电阻率模型；

（2）对初始模型预计的数据集进行实际测量（正模拟），零次迭代时的初始均方根（RMS）误差可在这一步计算；

（3）根据电流模型和一个模型修正的数据拟合差（ Δm ）去解线性反问题；

（4）用公式 $m_{i+1} = m_i + \Delta m$ 校正电阻率模型，模型参数 m 包括有限差分法或有限元网格中所有模块的电导率，符号 i 是迭代次数；

（5）根据校正过的模型进行正模拟（实际测量），为得到一个修正的预测数据集；

（6）计算预测数据和测量数据间的新 RMS 误差；

（7）如果任何一个反演停止，判据被满足，就停止反演；反之重复（3）到（7）步骤。

本文采用的是基于有限差分的阻尼最小二乘法反演。对于非线性反问题，数据元量 d 是模型参数矢量 m 的非线性函数，即 $d = g(m)$ ，最小二乘反演的目的是使加权数据拟合差最小化：

$$S(m) = (d_{\text{obs}} - g(m))^T W_d (d_{\text{obs}} - g(m)) \quad (1)$$

其中， d_{obs} 是观测数据， $g(m)$ 是计算数据。 W_d 是数据权矩阵。非线性反问题用迭代法求解。每次迭代时通过解下面线性化方程系可得到模型修改矢量 Δm ，

$$(J^T W_d J + \lambda I) \Delta m = J^T W_d (d_{\text{obs}} - g(m)) \quad (2)$$

式中 $J = \frac{\partial g(m)}{\partial m}$ 是雅可比（灵敏性）矩阵， λ 是阻尼因子，它的作用是为了增加反演的稳定性，提高反演的收敛效果。

1.2 地质雷达法

地质雷达的基本原理是：由地面发射电磁波到地下，接收反射波，根据反射波的走时、幅度和波形资料，通过图像处理和分析，确定地下界面和目标体的空间位置或结构，提供近地表介质特性及结构的高分辨率信息^[2, 9-10]。

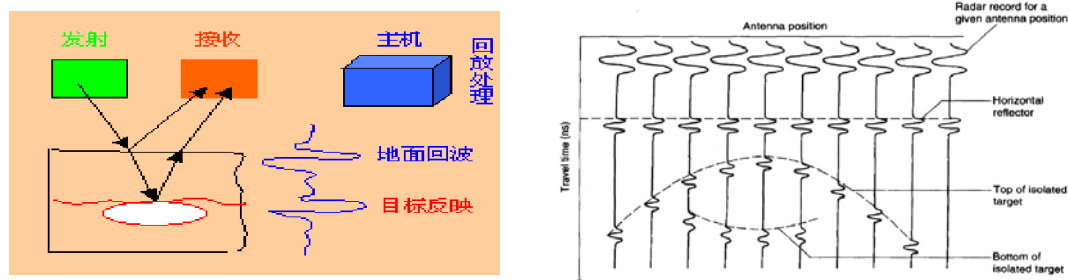


图3 GPR 工作原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of Ground Penetrating Radar (GPR)

GPR 利用主频为 $10^6 \text{ Hz} \sim 10^9 \text{ Hz}$ 波段的电磁波，以宽频带短脉冲的形式，由地面通过发射天线发射器发送至地下，经地下目的体或地层的界面反射后返回地面，被雷达天线接收器所接收并传输到主机，对所接收的雷达信号进行处理和图像解译，达到探测目的。与其他地球物理方法相比，GPR 具有高分辨率（高频天线的分辨率可达厘米级）、高效率、方便操作及抗干扰能力强等优势。因此，被人们从最初的工程检测逐渐引用到工程勘探等领域^[11-15]，其工作原理详见图 3。

2 工程实例应用分析

2.1 工程实例背景

河南某地高速公路线路，因遇较大强降雨的影响，主线路路基连同斜边坡土体，逐渐下移，一方面拉裂高速公路路面，另一方面受强降雨水浸泡的影响，逐渐形成大位移滑动的滑坡体，向下推滑至斜边坡下方的村庄房屋，严重影响到高速公路的运行及村民的人身财产安全。



图4 物探测线布置图及现场滑坡照片

Fig.4 Pictures about the geophysical lines and landslide

为查清整个区域滑坡体分布范围，我们采用高密度电阻率法和 GPR 等物探方法对该区域进行前期勘探，然后根据物探结果布置钻孔等地质工作，为方便进行综合物探解释工作，我们在同一位置布置重合的高密度电阻率和地质雷达测线，分别采用美国 R8 高密度电阻率成像仪和 SIR 3000 高精度地质雷达成像仪。共完成高密度电阻率法测线 3 条布线，其电极距为 5 m，测线总长 900 m；GPR 测线 3 条，利用低频 50 MHz 天线，采用连续点测量工作方式。同时，在滑坡体区域，布置了相应的地质钻孔和声波测孔工作。

2.2 综合物探方法的技术基础

高密度电阻率法是基于目标体电性差异为基础的勘探方法。在滑坡体中，因滑动面上部地层土中含有大量的水，电阻率值相对较小；而在滑动面的下部，因存在渗水性较差的粉质泥岩和粉质砂岩，其电阻率值又相对较大。这样在滑坡面上下界面处，存在明显的电性差异的滑坡面层，经过现场岩体电性测试，我们标定了不同介质的电阻率范围值，滑动面的电阻率值在（0~35 Ω·m）之间，而滑动面的下部的风化泥质砂岩等稳定岩体的电阻率值在（60~120 Ω·m）以上，因此采用高密度电阻率法区分滑动面在技术上是切实可行的^[6-7, 11-12]。

GPR 是基于目标体中的电磁波（相对介电常数）差异为基础的勘探方法。在滑坡体中，因滑动面上部地层土中含有大量的水，相对介电常数值较大，电磁波衰减较快；而在滑动面的下部，因存在渗水性较差的粉质泥岩、粉质砂岩，其相对介电常数较大，电磁波衰减较慢。这样在滑动面上下界面处，存在明显的电磁波的介电常数值差异，因此采用 GPR 区分滑动面，在技术上也是切实可行的。

经过现场钻孔和声波测孔等地质资料验证，并结合实验标定的参数值及经验值，我们给出该工程场地中不同地层介质的介电常数范围如表 1 所示。

表 1 工区内不同地层的物性参数范围
Table 1 The physical parameters of the working area of each media

场地地层分类	相对介电常数/ ϵ	视电阻率 $R/\Omega \cdot m$	纵波速度 $V_p/(m/s)$	横波速度 $V_s/(m/s)$
杂填土层	8~12	35~55	600~800	110~220
含水滑动面	15~20	0~35	800~1100	180~200
强风化泥质砂岩层	7~8	60~120	1 100~1 500	300~500
中风化泥质砂岩层	5~6	120 以上	1 500~2 500	500 以上

雷达反射波反射系数的大小取决于相应介质的相对介电常数的差异。差异越大反射系数越大，探测效果越好。当雷达的电磁波垂直传播到滑动面的界面时，因为上下两种介电常数差异较大的介质体存在，雷达反射波将形成较强的反射同相轴，同时，多次反射的电磁波，在该位置形成多次叠加后，同向反射轴形成较为连续的界面层。

2.3 综合物探实例成果解释

根据现场探测获得的原始资料，并利用以上各个反演算法等技术手段进行资料处理后，对高密度电阻率法和 GPR 法进行综合物探解释，并结合钻孔资料和声波测孔资料，形成高密度电阻率法和 GPR 的三条重合物探剖面成果图，给出了推断的滑动面的分布情况。

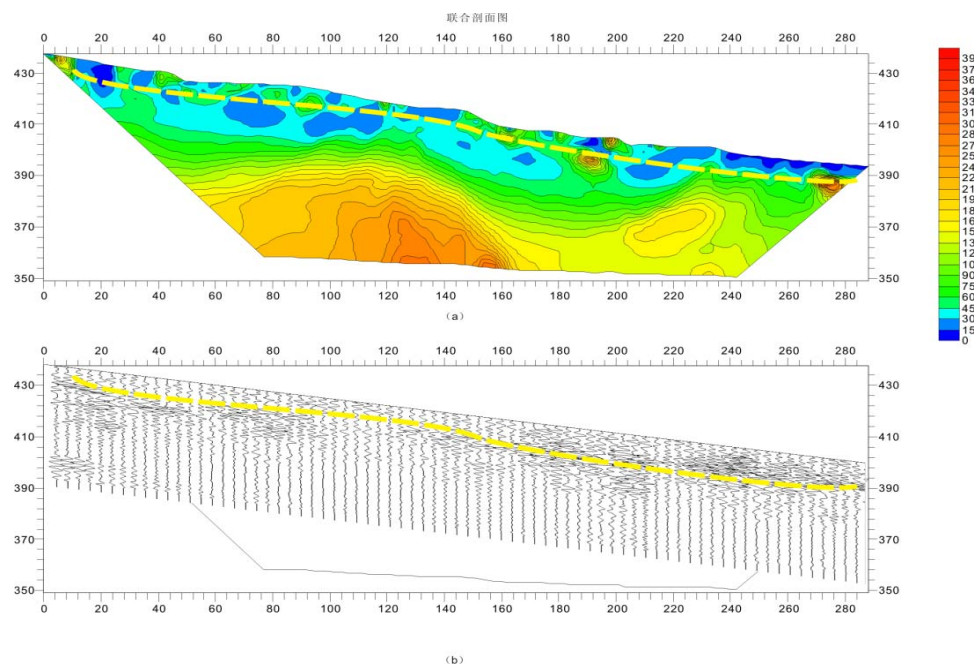


图5 综合物探剖面成果图 (I-I')

Fig.5 Profile drawing of integrated geophysical method (I-I')

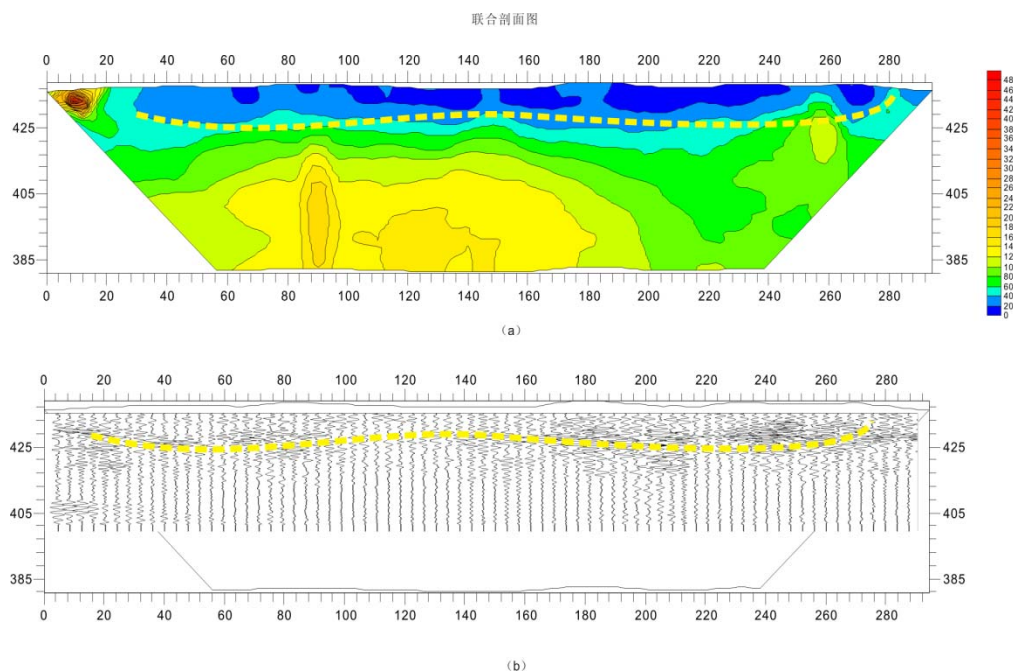


图6 综合物探剖面成果图 (II-II')

Fig.6 Profile drawing of integrated geophysical method (II-II')

其中,在综合物探剖面成果,即图5 (I-I')和图6 (II-II')中,高密度电阻率法的剖面 and GPR 的剖面中,滑动面分别出现在视电阻率值相对较低 ($0 \sim 35 \Omega \cdot m$) 的部分和介

电常数较大（15~20）同相轴不连续、强反射明显的位置及声波测孔的 V_p 、 V_s 值变化的位置上单一的高密度电阻率法，仅能反演出滑动面以上地层的含水性等特征，受上层低阻介质影。响而不能准确划分出滑动面位置；单一的 GPR，仅能根据穿过电磁波的介质速度差异，利用反射波的反射形态和介电常数划分出滑动面位置，而对滑动面以上及以下地层的分布情况不明显。高密度电阻率及 GPR，两种物探方法各自的优势，并结合钻孔地质情况，能准确划分滑动面位置及地层的分布情况。

本文中高密度电阻率和 GPR 勘探剖面中，相应的滑动面位置存在较低的电阻率值分界面和较强的地质雷达电磁波反射界面，据此可以解释出滑动面位置，见图 5 和图 6 所示（虚线），利用综合物探方法，可以推断出滑动面在 6~8 m 的深度范围。

在综合物探剖面成果图 7（III-III'）中，综合高密度电阻率剖面 and 地质雷达剖面，均未出现较低电阻率值界面和较强电磁波反射界面等异常现象，同时综合物探结果与地质钻孔资料对应性较一致，可判断该区域不存在滑动面。同时，采用的综合物探方法所得到的滑坡面信息与地质钻孔揭露的情况相比较，其推断结果也较为吻合。总之，利用综合物探方法，既可提高勘探精度，减少多解性，又能节约不必要的外业钻探工作。

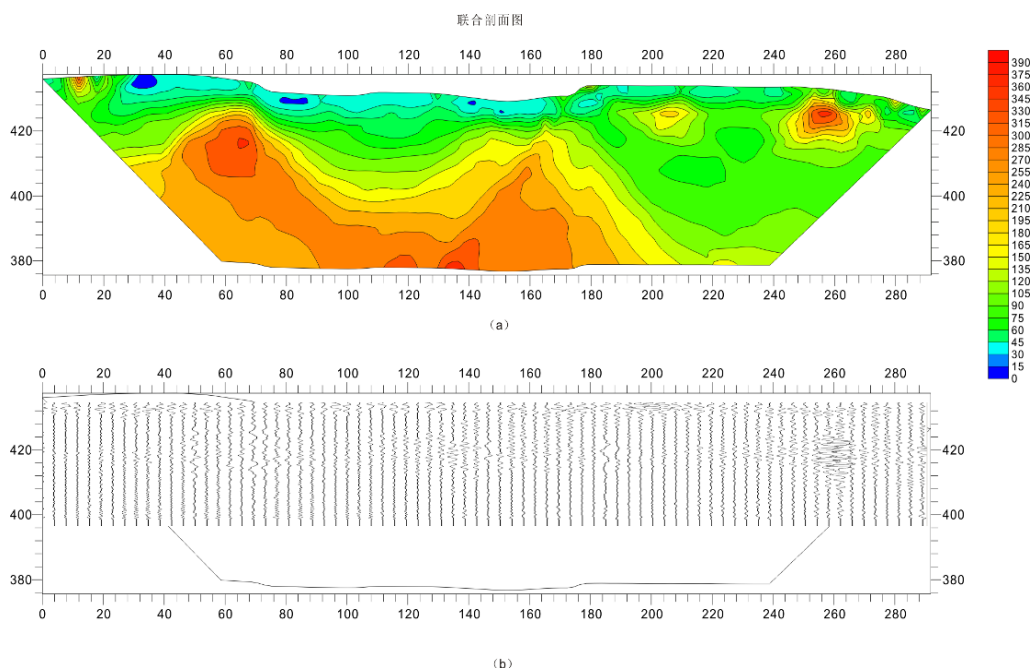


图 7 综合物探剖面成果图（III-III'）

Fig.7 Profile drawing of integrated geophysical method (III-III')

3 结论及展望

通过分析此次综合物探工作所取得的成果，在结合地质资料工作的基础上，利用高密度电阻率法及 GPR 的综合物探方法，有效查明了探测工区内滑坡体的分布特征，并查明了滑动面的深度范围，为该工区的后期地质灾害治理和设计提供了合理的技术依据，较好地指导了后期的施工治理。

对此次综合物探工作有以下几个方面的认识:

(1) 在地质灾害勘探中, 应合理安排地调、物探和钻探等方法。除了在工程场地上布置一定的钻孔勘探外, 应合理布置一定的物探勘查。同时, 工程场地勘查中, 应坚持地质先行, 先为地质灾害做一个大体的定性, 然后采用合理的物探方法, 对地质灾害体进行整体性的调查, 圈定重点区域, 指导合理布置钻探, 减少钻探工作量, 加速工程勘查速度, 降低勘探成本; 然后钻探验证物探工作, 指导物探解释, 以提高工程勘查的质量。

(2) 在物探勘查过程中, 要有综合物探勘查方法和联合物探解释的思想。基于各种物理性质差异的重、磁、电、震的物探方法, 在实际勘探过程中, 总要受到一定的客观条件及地球物理条件的限制, 综合物探勘探方法, 可以互相利用各种方法的特点, 在联合解释中, 应充分利用各个物探方法的成果, 互相约束和支持, 尽可能减少物探异常的多解性, 提供准确的技术参数。

(3) 在综合物探方法应用中, 要合理分析现场勘查目标体的各项技术指标, 合理选取不同物探方法的综合 (如以上工程实例研究中的高密度电法和 GPR), 既要解决工程项目的实际问题, 又要兼顾到经济效益。同时, 还要在同一种方法的不同装置方式的综合上下功夫 (如对高密度电法的多种排列的选择和组合)。总之, 综合物探方法的使用原则就是用最佳的方法和组合手段, 提高勘探的精度和准确性。

参考文献

- [1] 郑书彦, 李占斌. 滑坡侵蚀研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.
Zheng SY, Li ZB. Landslide erosion[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2005. (in Chinese).
- [2] 雷宛, 肖宏跃. 工程与环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Lei W, Xiao HY. Engineering and environmental geophysical exploration[M]. Beijing: Geology Press, 2006. (in Chinese).
- [3] 李清林, 秦建增, 谢汝一, 等. 地电成像及其在地学领域中的应用研究[M]. 北京: 地震出版社, 2010.
Li QL, Qin JZ, Xie RY, et al. Geoelectric imaging and its application in the field of geological research[M]. Beijing: The Earthquake Press, 2010. (in Chinese).
- [4] 刘天佑. 应用地球物理数据采集与处理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2004.
Liu TY. Application of geophysical data acquisition and processing[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2004. (in Chinese).
- [5] 孙方宇, 徐顺强, 李清林, 等. 电阻率成像技术在沁河大堤隐患探测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2011, 20(4): 495-503.
Sun FY, Xu SQ, Li QL, et al. The application to qinhe dam hidden trouble exploration with high density resistivity tomography technology[J]. CT Theory and Applications, 2011, 20(4): 495-503. (in Chinese).
- [6] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展和应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171.
Dong HB, Wang CL. Development and application of 2D resistivity imaging surveys[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 171. (in Chinese).
- [7] 王爱国, 马巍, 王大雁. 高密度电法不同电极排列方式的探测效果对比[J]. 工程勘察, 2007, (1): 72.
Wang AG, Ma W, Wang DY. Interpretation on survey results from high-density resistivity

- electricity methods with different electrode arrays[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2007(1): 72. (in Chinese).
- [8] 吕玉增, 阮百尧. 高密度电法工作中的几个问题研究[J]. *工程地球物理学报*, 2006, 2(4): 264.
Lv YZ, Ruan BY. Discuss several problems about high density resistivity[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2006, 2(4): 264. (in Chinese).
- [9] 李大新. 地质雷达方法及应用[M]. 北京: 地震出版社, 1994.
Li DX. Ground penetrating radar method and application[M]. Beijing: The Earthquake Press, 1994. (in Chinese).
- [10] 邓世坤, 祁明松. 地质雷达在滑坡和溶岩地区探测中的应用[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 1993, 18(3): 329.
Deng SK, Qi MS. Application of gpr to slide survey and image feature analyses of gpr data obtained from karst regions[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1993, 18(3): 329. (in Chinese).
- [11] 胡承林, 雷宛, 李红梅, 等. 高密度电法在新疆某矿区滑坡勘察中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 33(4): 430.
Hu CL, Lei W, Li HM, et al. Application of the high-density resistivity method to landslide investigation in a mine of Xinjiang[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 33(4): 430. (in Chinese).
- [12] 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*, 2004, 23(10): 1664-1669.
Guo XJ, Jia YG, Huang XY, et al. Application of multi-electrodes electrical method to detection of slide-face position[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(10): 1664-1669. (in Chinese).
- [13] 王俊, 雷宛, 李星, 等. 综合物探方法在工程基础勘探中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2013, 35(2): 216.
Wang J, Lei W, Li X, et al. The application of integrated geophysical prospecting in the engineering foundation exploration[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2013, 35(2): 216. (in Chinese).
- [14] 杨德龙, 葛宝, 黄凡, 等. 高密度电法在高速公路病害边坡中的应用[J]. *物探化探计算技术*, 2011, 35(2): 592.
Yang DL, Ge B, Huang F, et al. Application of high-density resistivity survey to highway disease slope[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(2): 592. (in Chinese).
- [15] 石明, 冯德山, 戴前伟. 综合物探方法在堤防质量检测中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(4), 132.
Shi M, Feng DS, Dai QW. Application of integrated geophysical method in quality detection of dikes[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(4): 132. (in Chinese).

The Application of Integrated Geophysical Method in the Landslide Exploration

HE Yong-bo^{1,2✉}, LI De-qing², YANG Zhen-yu²,
LI Qing-lin², XU Shun-qiang², ZHAO Gui-zhang³

1.University of science and technology of China, school of Earth and space
sciences, Hefei 230026, China

2.Geophysical Exploration Center, China Earthquake Administration,
Zhengzhou 450002, China

3.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou
450002, China

Abstract: Integrated geophysical prospecting method plays an important role in the exploration of geological hazards, i.e. landslides. In this study, we apply an integrated geophysical exploration scheme to a landslide in one city, Henan province. We demonstrate the distribution of the ground landslide by combined using data from geological drilling and survey along with an integrated exploration scheme of high-density resistivity method and GPR. And the results indicate that the integrated geophysical prospecting method can effectively reduce the uncertainty of geophysical exploration, and improve the interpretation accuracy. The integrated interpretation is more closely associated with the information from geological surveys, which reveals the significance of the integrated geophysical exploration methods in the research of geologic hazard such as landslide. Finally, we summarize and provide a prospect of the integrated geophysical method, interpretation.

Key words: integrated geophysics; high-density resistivity method; ground penetrating radar (GPR); landslide; integrated interpretation



作者简介: 何永波[✉] (1979—), 男, 博士研究生, 主要从事综合地球物理勘探方法及理论方面的研究, Tel: 13838399509, E-mail: ybhe@163.com。