

跨孔超高密度电阻率法在球状风化花岗岩体探测中的应用*

曹 权^{①②} 项 伟^① 贾海梁^① 王凤华^① 李清明^②

(^①中国地质大学(武汉)工程学院 武汉 430074)

(^②深圳市市政设计研究院有限公司 深圳 518029)

摘 要 花岗岩发育地区球状风化体(俗称“孤石”)的分布直接影响城市轨道交通工程的建设,准确探明花岗岩孤石的空间分布具有重要的现实意义。为了探明地铁建设过程中花岗岩孤石的分布情况,结合深圳地铁 11 号线某区间孤石探测试验,采用跨孔超高密度电阻率法研究两孔间孤石分布情况,试验数据能较好反映出土层间电阻异常。试验分析结果与现场验证钻孔的对比表明:该物探方法能在一定程度上揭示孤石的空间分布,为进一步针对地铁工程勘察提供了指导,丰富了花岗岩孤石的探测手段。

关键词 超高密度电阻率法 跨孔 球状风化花岗岩 孤石 探测

中图分类号:P631.3⁺22 文献标识码:A

APPLICATION OF CROSS-HOLE ULTRA-DENSITY RESISTIVITY METHOD TO DETECTION OF SPHERICALLY WEATHERED GRANITE

CAO Quan^{①②} XIANG Wei^① JIA Hailiang^① WANG Fenghua^① LI Qingming^②

(^①Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

(^②Shenzhen Municipal Design and Research Institute Co.,Ltd., Shenzhen 518029)

Abstract Distribution of the spherically weathered granite(commonly known as the “boulder”) has a direct impact on the construction of urban rail transit project. It has important practical significance to detect spatial distribution of boulder accurately. This paper explores the distribution of granite boulders during subway construction. It combines with an instance of geophysical testing for detecting the distribution of granite boulders at the site of Shenzhen Metro Line 11.The distribution of granite boulders between two wells was studied with cross-hole ultra-density resistivity imaging. Test results can distinguish the difference of resistance between boulder and surrounding soil. Test results and field-proven drilling show that the geophysical method is satisfactory in detecting the spatial distribution of granite boulders in a certain degree, which provides guidance for further targeted investigation of the subway project and rich detection means of granite boulders.

Key words Ultra-density resistivity method, Cross-hole, Spherically weathered granite, Boulder, Detection

* 收稿日期: 2013-02-25; 收到修改稿日期: 2013-09-25.

基金项目: 中国博士后科学基金(2012M511706)资助.

第一作者简介: 曹权, 主要从事岩土的原位测试研究. Email: caoquanrang@126.com

1 引言

花岗岩在我国分布面积积极广,约占全国面积的十分之一左右,主要出露在华东、华南地区^[1]。燕山期花岗岩在我国南方沿海地区广泛发育,由于构造、地下水及湿热气候等影响,基岩易沿裂隙面风化。在长期风化过程中,花岗岩岩体因结构和主要矿物成分的不同出现了差异风化,形成风化程度明显区别于周围岩土体而以孤立块体的形式存在的球状风化体,俗称“孤石”。随着花岗岩地区大规模地下空间建设的开始,尤其是城市地铁建设的兴起,花岗岩球状风化问题严重影响了工程建设进度、质量和安全^[2~5],如深圳地铁和广州地铁建设过程中,因花岗岩球状风化体的存在,不仅会卡住盾构机刀盘、对刀具产生较大的磨损、使盾构机偏离掘进轴线,严重时,还会导致盾构机无法掘进,发生地层坍塌甚至楼房倒塌事故。

由于花岗岩球状风化体分布具有的随机性和区域性特点,目前常规的勘查技术手段很难及时地发现孤石的存在,更难做到准确定位^[6~9],因此,探索包括物探方法^[10~12]在内的各种新的探测手段来确定花岗岩孤石的空间分布就显得很重要。本文拟结合深圳地铁 11 号线某区间物探试验探测花岗岩孤石分布的现场试验,说明跨孔超高密度电阻率法在球状风化花岗岩体探测中的可行性。

2 试验理论背景

自然界中各种物质之间存在导电性的差异,超高密度电阻率法正是基于这种差异,通过测量和分析研究对象与周围物质因电阻率差异引起的电场变化,以确定异常面或体分布的地球物理勘探方法。花岗岩孤石主要分布在花岗岩残积层和全、强风化层中,而这些地层裂隙发育、赋水丰富,电法勘探中视电阻率值较低;孤石与周围残积土和风化严重的岩石相比,其电阻率较高,这是跨孔超高密度电阻率法探测孤石的理论基础。

2.1 试验方法

采用跨孔超高密度电阻率法探测孤石,首先要先在试验场地布置一定数量的钻孔,并埋设 PVC 套管,利用彼此相互邻近的一对钻孔进行测试。使用这种试验方法不仅可以降低其他物探因素的干扰,

而且人工激发的电流场更接近探测目标。本次试验首先在测试断面上的两个钻孔中,沿孔深均匀布置电极,接通电源,采集电信号,反演分析试验数据,生成电阻率分布剖面图。针对不同电阻率变化范围,判断岩土介质的空间分布,定性描述孤石发育位置,确定探测目标,其工作原理(图 1)。

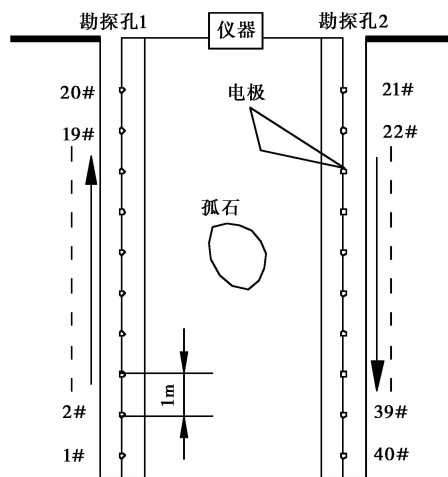


图 1 跨孔超高密度电阻率法系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental work

本次试验采用了由澳大利亚的 ZZ-Resistivity-Imaging 研究团队开发的 FlashRES64 多通道、超高密度直流电法勘探系统,该系统由仪器主机箱、便携式计算机、电缆、电极、数据采集控制软件和数据处理和反演成像系统等 6 部分组成。为了探测两测井间的花岗岩孤石,采用井—井电法透视物探方法,即先在研究区域造孔,然后在孔内布设电极,连接设备,最后进行试验和数据分析。

2.2 数据处理

本次使用的数据处理过程包括:已采集数据预处理、网络划分、正反演分析、测井断面图实时显示和目标体定位,其中正演和反演已成为一种必不可少的地球物理数据处理技术。

2.2.1 2.5 维电法正演基本方程

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla U) = -I\delta(r - r_c) \quad r, r_c \in \Omega \quad (1)$$

解该方程可得到当任意电极处的电场强度分布。式中, σ 为电导率,为电阻率的倒数; I 为测试电场强度; δ 为狄拉克函数; r_c 为反映电极的位置。

2.2.2 反演基本方程

$$\frac{\partial \Phi(m)}{\partial m} = \frac{\partial \Phi_d(m)}{\partial m} + \lambda \frac{\partial \Phi_m(m)}{\partial m} = 0 \quad (2)$$

其中, $\Phi_d(m) = \|W_d(d_0 - d(m))\|^2$, $\Phi_m(m) =$

$\|W_m(m - m_0)\|^2$, m 为电阻率; λ 为平衡因子; $d(m)$ 和 d_0 分别为推算和实测电场数据; m_0 为反演初始模型; W_d 和 W_m 为不同的加权因子, 对模型的修正起调节作用, 其值可根据试验参数的信噪比大小进行调整^[10]。

反演方法是跨孔电磁成像研究的核心内容。超高密度电阻率法数据反演时, 一般先设定一个模拟实际地下电阻率分布情况的理论模型; 然后用该模型进行正演计算, 得到试验场理论电阻率值分布; 再计算分析实测值与计算值间的差; 然后将该差值进行分配计算, 得到一个新的理论推算模型; 用该推算模型再次做正演计算^[10]。连续上述迭代过程, 直至理论计算值和实测电阻率值非常接近时停止, 将此时的理论电阻率计算值作为最终的反演推算值。

与常规电法相比, 跨孔高密度电阻率法具有如下一些优点: 一次布极, 软件调控, 实现多层次、多角度测试, 丰富了研究对象的测试方式, 加大了数据采集量, 加之更加高效的数据分析软件的运用, 提高了该法的探测精度和工作效率。此外, 跨孔超高密度电阻率法采集系统具有类型多、强度大的特点, 通过对测试数据综合反演, 不但加大了对目标体的测试数量和测试方式, 达到了减少干扰和增强有效信号的目的, 而且通过对试验区精细有限元网格剖分, 也提高了目标体的分辨率。

3 试验方案

根据深圳地铁 11 号线初勘成果, 发现某区间内花岗岩孤石发育, 且空间分布随机性很大, 常规的钻探很难准确定位孤石的分布。为了探索新的探测方法, 拟在该区间采用跨孔超高密度电阻率法进行孤石探测试验, 并对试验结果进行现场钻孔验证, 以对该方法的可行性进行客观评价。本次试验共布置测井 4 眼, 编号为 442-1~442-4, 验证钻孔两眼, 编号为 442、442-5, 完成了 6 个井井剖面测试, 编号为 L1 至 L6 (图 2)。

4 试验结果分析

深圳地区第四系覆盖层和花岗岩全至强风化层电阻率值为 0.1~120Ωm, 下伏中至微风化花岗岩电阻率值为 500~4000Ωm, 孤石的电阻率值应与微风化花岗岩相当。由于孤石主要发育在松散的残积土

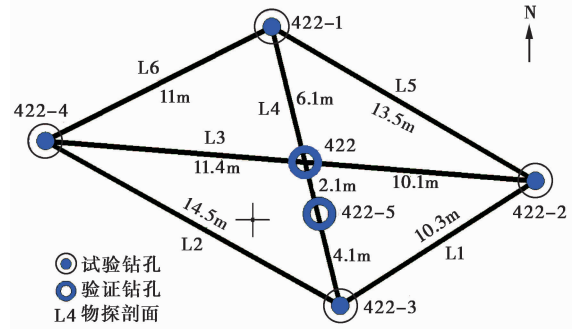


图 2 试验孔布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of location of testing boreholes

和全、强风化层中, 受近电极效应、地下水贫富等的影响, 孤石的反演电阻率值往往很低, 因此寻找孤石的基本思路应是在孤石易发育的低阻区域找相对高阻异常。

对 6 个井测试剖面的试验数据进行反演分析, 结果表明 L3 和 L4 剖面出现明显的异常区域, 初步定为花岗岩孤石。为了验证试验分析的正确性, 在分析结果显示为异常区域的范围布置了编号为 442、442-5 验证钻孔。

4.1 L3 测井剖面分析

L3 测井剖面是在 442-2 号孔和 442-4 号孔之间完成的, 其电法透视反演电阻率分布 (图 3)。由图可以看出在深度约为 0~16m、横向位置 7~14m (以 442-2 号孔为参考零点) 的位置有一相对的高阻异常 (异常 YC), 初步判定由微风化花岗岩孤石引起的。

在与 L3 剖面对应的工程地质验证剖面上 (图 4), 442 孔为验证孔, 与测井 442-4 孔和 442-2 孔分别相距 11.4m 和 10.1m。442 孔在孔深 17.00~19.40m 揭示到竖向厚度 2.40m 的花岗岩孤石, 在水平向与 442-2 孔距 6.20~14.10m, 与上述 L3 测井剖面反演分析结果较为一致。图 5 为 442 孔揭示的孤石岩心照片, 肉红色微风化粗粒花岗岩孤石分布在褐红色全风化花岗岩中。

4.2 L4 测井剖面分析

L4 测井剖面是在 442-3 号孔和 442-1 号孔之间完成的。在电法透视反演电阻率分布图 (图 6) 上看出, 在深度约为 16.5~19m, 横向位置在 1.5~6m (以 442-3 号孔为参考零点) 的位置有一相对的高阻异常 (异常 YD), 初步判定由微风化花岗岩孤石引

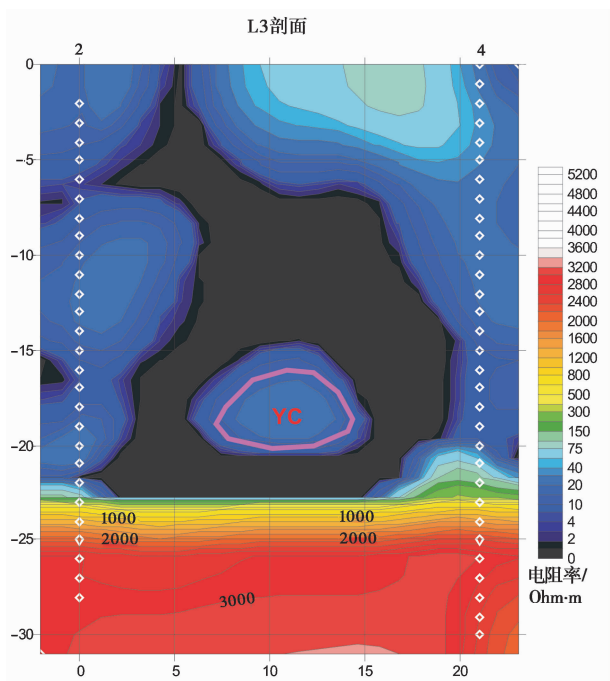


图3 跨孔超高密度电阻率法 2.5 维反演剖面图 L3
Fig. 3 2.5D inversion section in L3 with ultra-density resistivity imaging



图5 442 号验证孔揭示的花岗岩孤石岩心
Fig. 5 Appearance of boulder in a core recovered from borehole 442

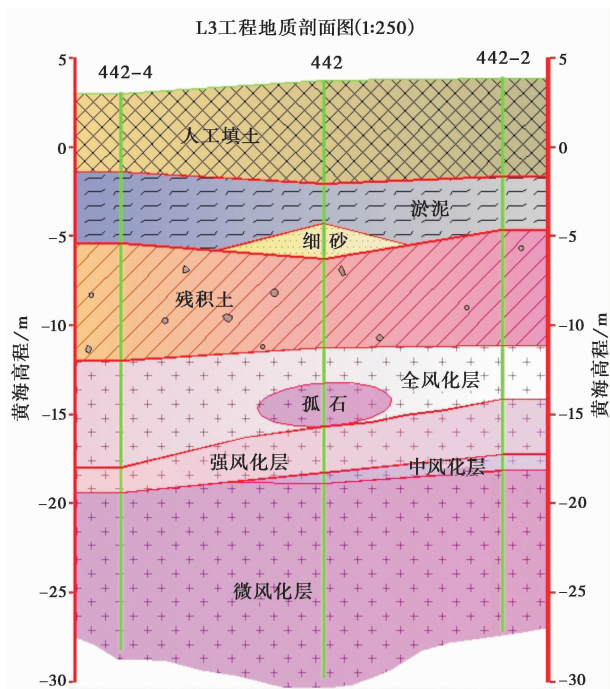


图4 L3 工程地质剖面图
Fig. 4 Engineering geological profile L3

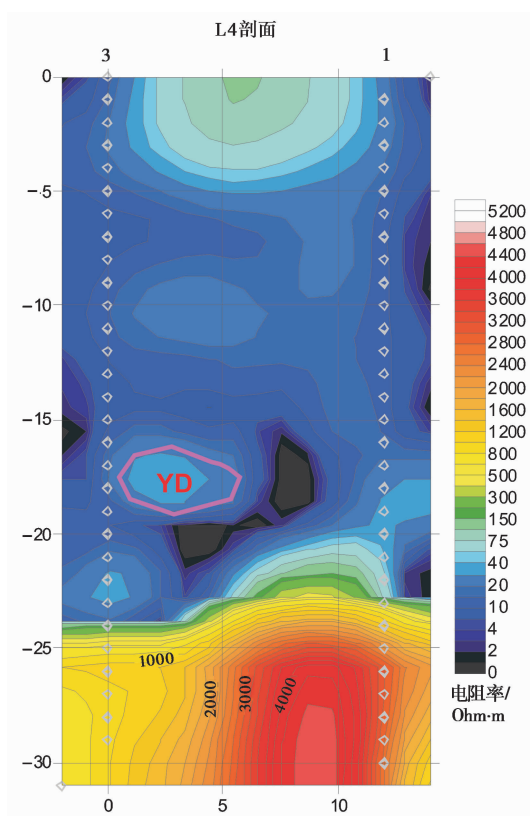


图6 跨孔超高密度电阻率法 2.5 维反演剖面图 L4
Fig. 6 2.5D inversion section in L4 with ultra-density resistivity imaging

442-5 两个验证孔, 距 442-3 号测井分别为 4.1m、6.2m。验证孔 442 和 442-5 分别在孔深 17.00 ~ 19.40m、17.00 ~ 18.80m 揭示到竖向厚度 2.40m、1.80m 的花岗岩孤石, 在水平向与 442-3 孔距 3.70 ~ 10.10m, 与上述 L4 测井剖面竖向反演分析结果较为一致, 但水平向反演分析范围与验证孔揭示范围相比偏小, 可能与孤石离 442-1 号测井偏远有关。

起的。

与 L4 剖面对应的工程地质验证剖面如图 7 所示。为了确定孤石在横向分布范围, 布置了 442 和

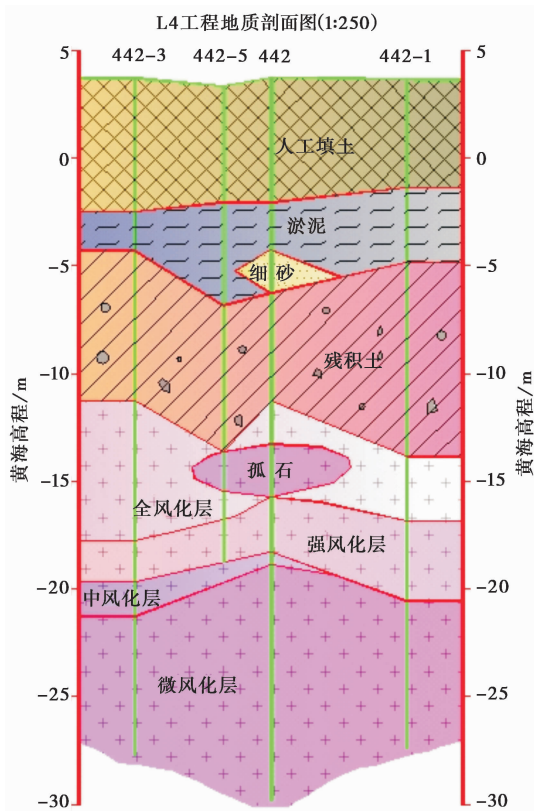


图 7 L4 工程地质剖面图

Fig. 7 Engineering geological profile L4

图 8 为 442-5 孔揭示的孤石岩心照片,肉红色微风化粗粒花岗岩孤石分布在褐红色全风化花岗岩中。



图 8 442-5 号验证孔揭示的花岗岩孤石岩心

Fig. 8 Appearance of boulder in a core recovered from borehole 442-5

从以上 L3、L4 两个测井剖面的分析来看,孔间/孔中物探方法的探测效果受钻孔间距影响,孤石距测井越近,此孤石的高阻在成果图上显示得就越明显,反之如果孤石距钻孔越远,此孤石的高阻在成果图上显示得就越弱。花岗岩孤石与其周围残积

土、全风化或强风化岩的物性差异,是地球物理方法探测孤石的物性前提,利用跨孔超高密度电阻率法探测花岗岩孤石的基本思路是在低阻区域找相对高阻异常,由于残积土、全风化或强风化岩成分的不均一性、结构面的差异性以及地下水发育的贫富不等,造成孤石与周围岩土层的电阻率差异大小不一,从而影响了探测效果和反演的精度。此外,防止测井塌孔埋设的 PVC 管、地铁建设沿线场地条件及多种场源的干扰等,都会影响探测的效果。

2.5 维跨孔超高密度电阻率法只能利用 2 维反演技术,只能在两口井的连线剖面上给出孤石的分布范围,对于不在钻孔连线上的孤石,也可能在连孔剖面上有孤石反映,这样就造成了孤石探测位置的偏移和虚假的高阻异常,这些虚假的高阻异常,使得孤石探测存在精度低、可靠性不高的缺点。要解决这个问题,就必须采用三维跨孔电阻率反演技术。

5 结 论

(1) 本次现场试验和钻孔验证结果表明:跨孔超高密度电阻率法在花岗岩孤石探测中效果明显,能给出孤石在横向和纵向的分布范围,丰富了花岗岩孤石的探测手段。

(2) 由于跨孔超高密度电阻率法在花岗岩孤石探测中的工程实践不多,对诸如井深、井距对测试效果的影响尚研究不多,加之数据处理采用的是 2.5 维反演技术,而非 3 维的空间定位分析方法,以及孤石周围岩土体的不均一性和试验场地的复杂性,从而限制了该方法准确定位孤石方位的效果,今后须加强这方面工程经验的积累和反演技术的改进。

(3) 目前勘察技术水平下,尚没有一种勘察手段单独有效地探测花岗岩孤石的空间分布,因此探索钻探与各种物探方法结合的综合勘察技术定位孤石是非常必要的。

参 考 文 献

- [1] 崔久之, 杨建强, 陈艺鑫. 中国花岗岩地貌的类型特征与演化 [J]. 地理学报, 2007, 62(7): 675~690.
Cui Jiuzhi, Yang Jianqiang, Chen Yixin. The type and evolution of the granite landforms in China. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(7): 675~690.
- [2] Bruce D, Shirlaw J N. Grouting of completely weathered granite, with special reference to the construction of the Hong Kong mass transit railway [C]. Proceedings of the 4th International

- Symposium on Tunnelling, Brighton, U K, 1985, 253~264.
- [3] Shirlaw J N, Hencher S R, Zhao J. Design and construction issues for excavation and tunneling in some tropically weathered rocks and soils [C]. In Proceedings of GeoEng 2000, Melbourne, Australia, 2000, 1~44.
- [4] Babendererde S, Hoek E, Marinos P, et al. Characterization of granite and underground construction in Metro do Porto, Portugal. Proc [C]. International Conference on Site Characterization, Porto, Portugal, 2004, 1~8.
- [5] Babendererde S, Hoek E, Marinos P, et al. Geological risk in the use of TBMS in heterogeneous rock masses - The case of "Metro do Porto" and the measures adopted [C]. Conference in Aveiro, Portugal, 2004, 1~16.
- [6] 吴宏伟, 尚彦军, 曲永新, 等. 香港花岗岩风化分级化学指标体系与风化壳分带[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 125~134.
Wu Hongwei, Shang Yanjun, Qu Yongxin, et al. Chemical weathering indices, classification, and zoning of weathered granitic rock in Hong Kong. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(2): 125~134.
- [7] 李建强. 武广客运专线韶关至花都段球状风化花岗岩综合勘查方法及勘探技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
Li Jianqiang. Research on Composite Reconnaissance Means and Technology about Spheroidal Weathering Granite in Shaoguan-Huadu Section of Wuhan-Guangzhou Special Passenger Transport Railway. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [8] 冯涛. 武广客运专线韶花段球状风化花岗岩工程特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
Feng Tao. Research on Engineering Properties of Spheroidal Weathering Granite in Shaoguan-Huadu Section of the Wuhan-Guangzhou High-Speed Railway. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [9] 王浩, 刘成禹, 陈志波. 闽东南花岗岩球状风化不良地质发育特征及其工程地质问题[J]. 工程地质学报, 2011, 19(4): 564~569.
Wang Hao, Liu Chengyu, Chen Zhibo. Granite spherical weathering features and related engineering geological problems in the southeast area of Fujian province. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 564~569.
- [10] 李红立, 张华, 汪传斌. 跨孔超高密度电阻率在花岗岩球状风化体勘探中的试验研究[J]. 工程勘察, 2010, 38(8): 88~92.
Li Hongli, Zhang Hua, Wang Chuanbin. Experimental study on the cross-hole ultra-density resistivity method used in the exploration for the spheric lightly-weathered granite. Geotechnical Investigation & Surveying, 2010, 38(8): 88~92.
- [11] 刘宏岳. 地震反射波 CDP 叠加技术对海域花岗岩孤石探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(6): 714~718.
Liu Hongyue. Marine seismic reflection for the detection of the weathering residues in the granite. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(6): 714~718.
- [12] 徐佩芬, 侍文, 凌苏群, 等. 二维微动剖面探测孤石: 以深圳地铁 7 号线为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2120~2128.
Xu Peifen, Shi Wen, Ling Suqun, et al. Mapping spherically weathered "boulders" using 2D microtremor profiling method: A case study along subway line 7 in Shenzhen. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2120~2128.