

土遗址墙体含水量与电阻率关系研究

周仲华^{1,2}, 郑 龙^{1,2}, 孙 博^{1,2}

(1. 兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学 土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 多孔介质电阻率的影响因素很多, 对于特定结构的土遗址墙体, 电阻率的变化取决于水分和温度的变化。对交河故城土遗址墙体夯土电阻率模型分析, 结合改进的 Archie 模型, 建立特定结构墙体电阻率模型, 通过室内电阻率与含水量的关系试验, 确定模型公式中的结构参数和土性参数。根据试验建立的墙体电阻率反演含水量关系式, 采用高密度电阻率层析法, 对交河土遗址现场试验墙体进行尝试性测试。测试结果论证了该模型公式的实用性, 为土遗址文物本体水分运移监测中的实际应用奠定基础。

关键词: 土力学; 交河故城; 土遗址; 水分监测; 电阻率模型; 水分运移; 高密度电阻率法

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增 2 - 4054 - 05

RESEARCH ON RELATIONSHIPS BETWEEN WATER CONTENT AND RESISTIVITY OF EARTHEN RUIN WALLS

ZHOU Zhonghua^{1,2}, ZHENG Long^{1,2}, SUN Bo^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China;* 2. *College of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*)

Abstract: Porous media resistivity is affected by a number of factors. In the specific structure of the soil wall sites, changes in resistivity depend on the moisture and temperature changes. By the resistivity model analysis of rammed earth wall in Ruins of Jiaohe, combining with the improved Archie model, a resistivity model for the wall in a specific structure is established by the tests to find out the relation between water content and resistivity, and to determine the structural parameters and soil parameters in the model formula. According to the established formula by the moisture inversion with the resistivity, using high-density resistivity chromatography, the field wall in Ruins of Jiaohe is tested. The results demonstrate the practicality of the model formula in relics sites, which lays foundation for practical application of monitoring water translocation in relics sites.

Key words: soil mechanics; Ruins of Jiaohe; earthen ruin wall; moisture monitoring; resistivity model; water translocation; high-density resistivity method

1 引 言

露天土遗址的主要病害是风蚀、雨蚀、裂隙及坍塌^[1], 影响病害作用的主要内因是遗址本体的劣化作用。土遗址本体的劣化可简化为水致劣化、热

致劣化和化学劣化。文物本体内部及本体与地基土层之间的水分运移与其老化劣化关系密切, 水分的运移还直接影响着文物温度场变化和易溶盐表聚。因此, 研究土遗址本体水分运移对劣化研究及病害防治具有重要意义。

土遗址文物本体水分运移规律研究是以监测其

收稿日期: 2008 - 07 - 13; **修回日期:** 2008 - 09 - 28

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAK30B02)

作者简介: 周仲华(1962 -), 男, 1984年毕业于兰州大学地质工程系水文地质与工程地质专业, 现任高级工程师, 主要从事岩土工程和工程物探方面的研究工作。E-mail: zhouzh@lzu.edu.cn

水分变化为基础的。土类松散介质含水量的现场监测包括直接法和间接法两大类：直接法有放射性中子仪^[2]，时域反射^[3, 4]等方法；间接法是以监测某类地球物理场为基础，如电场、电磁场等，通过对物理场的监测，反演介质含水量的变化，包括电阻率法^[5]、电磁法^[6]等。这些方法基本局限于天然土壤水分监测和研究，对于测试要求严格的土遗址，目前尚无深入研究。鉴于土遗址文物的特殊性，对其水分运移的研究，应采用无损监测方法。实测墙体电阻率反演含水量是无损监测方法之一。

土遗址墙体电阻率反演含水量的关键在于建立电阻率与含水量关系模型。本文通过对特定结构土遗址墙体电阻率模型分析，结合电阻率与含水量关系的室内试验，建立以实测电阻率估算墙体含水量的模型公式，并根据拟合的相关公式进行现场尝试性应用。现场采用高密度电阻率层析法，实测人工模拟土遗址墙体的电阻率，以室内拟合的相关关系反演墙体含水量，为土遗址劣化研究及实际应用到文物本体水分运移监测奠定基础。

2 墙体土电阻率模型分析

关于多孔介质电学性质的早期研究始于 G. E. Archie^[7]，他就土电阻率与其结构性的关系，提出了适用于饱和和无黏性土、纯净砂岩的电阻率结构模型，建立了电阻率随孔隙水电阻率的变化关系方程：

$$\rho = a\rho_w n^{-m} \quad (1)$$

式中： ρ 为土的电阻率， ρ_w 为孔隙水电阻率， a 为土性参数， m 为胶结系数， n 为孔隙率。

Archie 模型适用于孔隙水电阻率低、黏性成分含量低的饱和砂土。为扩大 Archie 模型的适应性，许多学者对土电阻率模型进行了进一步的理论分析与试验研究^[8]，提出利用推广的 Archie 模型公式来表示土的电阻率：

$$\rho = a\rho_w n^{-m} S_r^{-b} \quad (2)$$

式中： S_r 为饱和度， b 为土性参数。

M. H. Waxman 和 L. J. M. Smits^[9]将土体颗粒表面导电性参数引入了电阻率模型，A. D. Halvorson 和 J. D. Rhoades^[10]也提出了一个非饱和土电阻率模型，M. Fukue 等^[11]的电阻率试验研究则偏重于对土的微观结构的阐述与解释。刘国华等^[12~14]对土电阻率结构模型及影响因素进行了理论与试验研究。

刘松玉等^[15, 16]的研究表明，多孔介质土体的电

阻率主要取决于一些重要结构参数，如孔隙率、孔隙形状、孔隙结构、饱和度、孔隙水电阻率、温度、固体颗粒成分、颗粒形状、颗粒定向性以及固化状态等。其中，温度影响的是离子的活动性，温度升高可增加离子活动性，从而导致土电阻率下降。G. V. Keller 和 F. C. Frischnecht^[8]研究表明，土的电阻率 ρ 与其 18 °C 时的电阻率有如下关系：

$$\rho = \frac{\rho_{18}}{1 + \alpha(T - 18)} \quad (3)$$

式中： ρ_{18} 为 18 °C 时土的电阻率； T 为温度； α 为试验常数，约为 0.025 °C⁻¹。

对于特定结构的土遗址墙体，采用相同土质、相同施工工艺筑成，其墙体土的结构参数大部分是相同或相近的，如孔隙率、孔隙形状、孔隙结构、孔隙水电阻率、固体颗粒成分、颗粒形状、颗粒定向性等，这些参数在一定的时期内保持不变，对电阻率的影响可认为是常数。因此，特定结构的土遗址墙体，电阻率的变化可取决于饱和度 S_r 和温度 T 的改变。对于结构相同的非饱和松散介质，饱和度可用含水量表征。墙体土温度为 18 °C 时，以改进的 Archie 模型表达土遗址墙体电阻率模型为

$$\rho_{18} = a\rho_w n^{-m} \left(\frac{G_s}{e}\right)^{-b} w^{-b} = Kw^{-b} \quad (4)$$

式中： K 为土的综合结构参数， w 为土的含水量， G_s 为土粒相对密度， e 为孔隙比。

综合式(3)，(4)，可得特定土体结构的土遗址墙体电阻率模型为

$$\rho = \frac{K}{1 + \alpha(T - 18)} w^{-b} \quad (5)$$

3 墙体土电阻率试验

根据土遗址墙体电阻率模型公式，遗址土的综合结构参数 K 和土性参数 b 通过室内试验确定：在 18 °C ± 1 °C 的温度状态下，以含水量 w 为试验变量，温度 T 为试验参变量，通过测定固定温度下遗址土电阻率 ρ 与含水量 w 的关系，建立温度为 18 °C ± 1 °C 状态下的电阻率与含水量相关关系，即可确定综合结构参数 K 和土性参数 b ，得到特定土体结构的电阻率反演含水量的拟合公式。

3.1 试验装置

室内电阻率模型试验采用标准 Miller Soil Box 和四电极电阻率测试装置(见图 1)进行, Miller Soil Box 尺寸为 22.2 cm×3.2 cm×4 cm, 供电电极距 $\overline{AB} = 22.2$ cm、测量电极距 $\overline{MN} = 12.8$ cm。按此装置参数测试时, 实际测试的是 M, N 间土样的电阻率, 其电阻率计算公式为

$$\rho = \frac{S}{MN} \frac{\Delta U}{I} = \frac{4 \times 3.2 \times 10^{-4}}{12.8 \times 10^{-2}} \frac{\Delta U}{I} = \frac{\Delta U}{I} \times 10^{-2} \quad (6)$$

式中: S 为土样合断面面积(m^2); $\Delta U, I$ 分别为实测 M, N 间的电位差和电流。

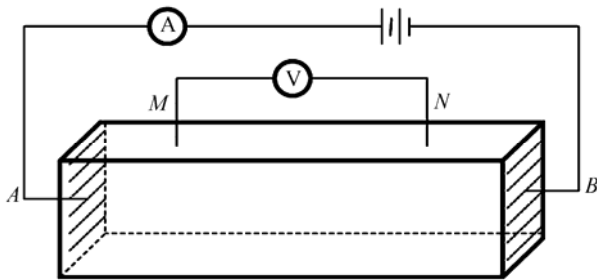


图 1 Miller Soil Box 装置图
Fig.1 Device of Miller Soil Box

3.2 试样制备与测试

电阻率试验土样为新疆吐鲁番交河故城土遗址区现场采取的夯土, 取样深度为夯土墙体表面 0~10 cm, 高度为 0~100 cm, 土质为粉土和粉质黏土, 夯土的物理性质指标见表 1。土样试验前先烘干, 然后加水制成。每组土样以不同的含水量制备, 装入 Miller Soil Box 后测试电阻率。为了对比所填加水对电阻率的影响, 采用两种不同类型的水分别试验, 即饮用自来水和去离子水。

表 1 夯土物理性质指标

Table 1 Physical parameters of rammed earth

土类	含水量 /%	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度	孔隙率	孔隙率比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性指数
粉土	1.76	1.63	1.6	2.70	0.69	40.74	6.9	27.5	18.42	9.08
粉质黏土	1.60~2.41	1.55~1.71	1.53~1.68	2.71~2.72	0.62~0.77	38.25~43.54	5.6~9.3	28.3~29.7	16.00~18.06	10.25~13.15

试验的电路原理连线见图 1, 观测仪器采用重庆地质仪器厂生产的直流电法仪。数据观测时土样及环境温度保持在 $18^\circ C \pm 1^\circ C$ 的状态下。

3.3 试验结果分析

在 $18^\circ C \pm 1^\circ C$ 的温度条件下, 添加自来水和去离子水的土样电阻率与含水量关系测试结果分别见图 2, 3。

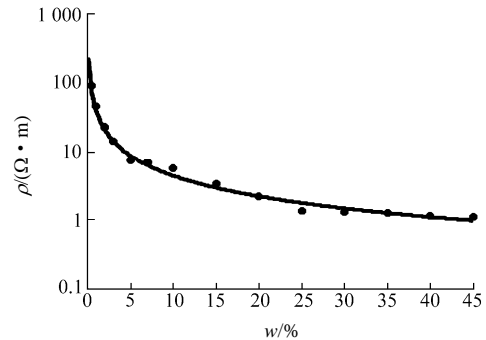


图 2 添加自来水时电阻率与含水量的关系

Fig.2 Relationship between resistivity and water content by adding tap water

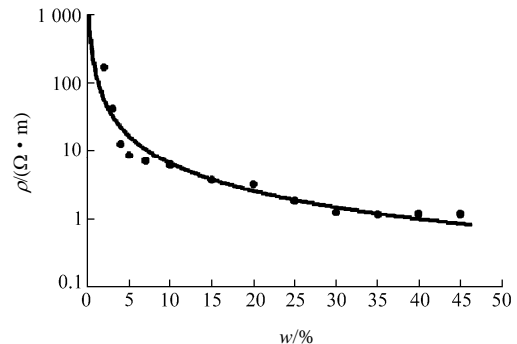


图 3 添加去离子水时电阻率与含水量的关系

Fig.3 Relationship between resistivity and water content by adding deionized water

图 2, 3 表明, 随着含水量的增大, 电阻率呈幂函数关系减小。当 $w > 25\%$, 电流几乎都通过孔隙水传导, 土的电阻率趋于稳定, 约等于孔隙水的电阻率。不同的是, 在非饱和状态下, 加自来水土样的电阻率明显小于加去离子水土样, 这主要因为自来水中所含离子增加了土样的导电性。

对于添加自来水和去离子水土样, 试验结果均按式(4)拟合, 分别得到如下关系:

$$\rho_{18} = 45.078w^{-1.004} \quad (R^2 = 0.992) \quad (7)$$

$$\rho_{18} = 152.94w^{-1.367} \quad (R^2 = 0.915) \quad (8)$$

试样制备采用先烘干土样, 土样中原有易溶盐的成分不变, 因此, 实际应用去离子水的拟合关系比较合理。根据式(8), 确定交河故城土遗址区夯土综合结构参数 $K = 152.94$ 、土性参数 $b = 1.367$ 。将综合结构参数和土性参数代入土遗址墙体电阻率模型式(5), 可得交河故城遗址夯土墙体的电阻率与含水量关系:

$$\rho = \frac{152.94}{1 + 0.025(T - 18)} w^{-1.367} \quad (9)$$

4 应用实例

4.1 试验墙体电阻率测试

交河故城建于公元前 3 世纪以前, 土遗址位于新疆吐鲁番市西 10 km 的雅尔乃孜沟村, 独特的自然地理环境和气候条件, 使得土遗址的病害情况非常严重。为进行土遗址墙体的劣化机制研究, 在故城按古代建筑工艺分别人工模拟了夯土墙和版筑泥墙。根据对遗址土电阻率模型的研究结果, 对其中的夯土墙进行了电阻率反演含水量的尝试性应用测试。现场墙体电阻率测试方法采用高密度电阻率层析法, 由于 Wenner 装置类型抗干扰能力较强^[17], 实测时采用 Wenner 装置。电极在墙顶排列, 极距 0.2 m, 现场布置见图 4。为得到不同日期墙体含水量的变化情况, 分别与 2007 年 11 月 15 日和 2008 年 3 月 24 日进行了两次测试, 对应的墙体平均温度分别为 5.3 °C 和 21.9 °C。

4.2 测试结果分析

根据实测数据, 采用 RES2DINV(Semi Demo) 2D 反演软件进行墙体电阻率反演计算, 反演的电

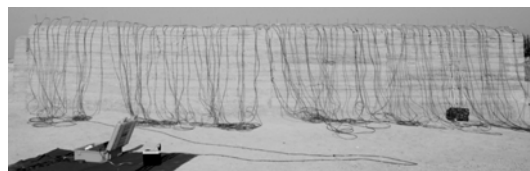


图 4 高密度电法测试现场布置图

Fig.4 Field arrangement plan of high-density resistivity method

阻率剖面见图 5, 6。

电阻率剖面图表明, 墙体不同部位的电阻率值变化非常大(墙顶 0.2 m 深度内的电阻率受人工浇水导致电极接地电阻减少的影响), 表明墙体含水率非常不均匀。墙体剖面 2.8~3.0, 4.4~4.8, 6.8~7.1 m 处存在裂缝, 电阻率剖面图清楚地反映了裂缝影响范围内的高阻异常(含水量极低)。不同日期的测试结果清楚地显示了墙体含水量的变化, 结合遗址土电阻率模型关系式(式(9)), 即可定量计算出墙体不同部位的含水率。

根据(式(9)及 2007 年 11 月 15 日测试的电阻率剖面(见图 5), 验算墙体下部(1.2~1.7 m)含水量为 1.80%~2.38%, 而 11 月 17 日采用 TDR 测试的墙体下部(1.21~1.68 m)含水量为 2.00%~2.41%。其结果非常接近, 论证了该模型公式的实用性。

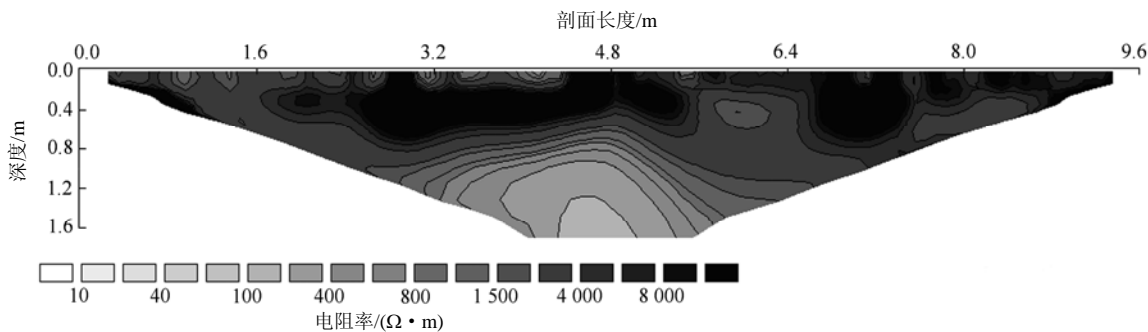


图 5 夯土墙电阻率剖面图(2007 年 11 月 15 日)

Fig.5 Resistivity section plan of rammed earth wall(on November 15, 2007)

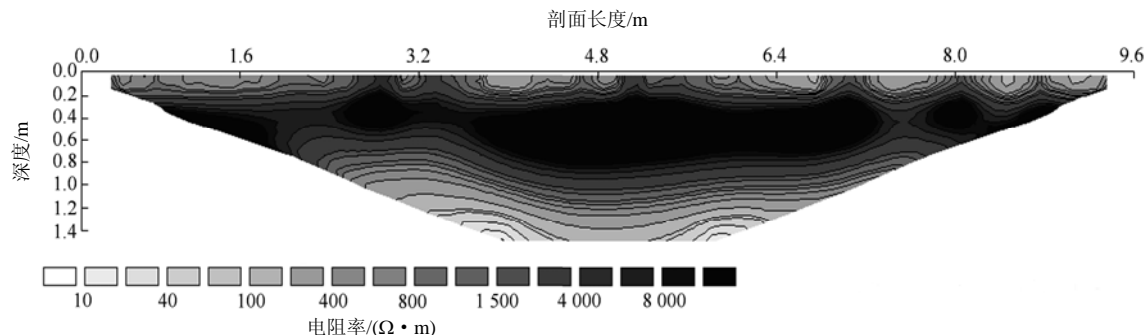


图 6 夯土墙电阻率剖面图(2008 年 3 月 24 日)

Fig.6 Resistivity section plan of rammed earth wall(on March 24, 2008)

5 结 论

非饱和土电阻率的影响因素很多,但对于特定土体结构的土遗址墙体,由于土质、建筑工艺及所处环境一定,其结构参数大部分是相同或相近,电阻率的变化取决于含水量和温度的变化。

交河故城土遗址墙体夯土的电阻率与含水量关系试验表明,在一定温度下,随着含水量的增大,电阻率呈幂函数关系减小,当土接近饱和时,土的电阻率趋于稳定,约等于孔隙水的电阻率。

根据室内试验结果和改进的 Archie 模型建立了交河故城遗址墙体夯土电阻率模型公式,并进行了实际应用测试。需要注意的是,对于不同土体结构或不同建筑工艺筑成的墙体,需进行综合结构参数和土性参数的试验确定。

在确定了土遗址墙体电阻率与含水量关系的基础上,应用高密度电阻率层析法可实现对墙体含水量快速、连续监测。

参考文献(References):

- [1] 孙满利,王旭东,李最雄,等. 交河故城的裂隙特征研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 612 - 617.(SUN Manli, WANG Xudong, LI Zuixiong, et al. Study on cranny characteristics of the ruins of Jiaohe[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 612 - 617.(in Chinese))
- [2] 陈洪松,邵明安. 中子仪的标定及其在坡地土壤水分测量中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21(2): 68 - 71, 76.(CHEN Hongsong, SHAO Ming'an. Field calibration of neutron probe and its application to measuring soil water content on sloping land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2003, 21(2): 68 - 71, 76.(in Chinese))
- [3] 伍永秋,刘宝元, VAN DEN ELSEN E, 等. 黄土高原土壤水分的自动监测——TDR 系统及其应用[J]. 水土保持学报, 2001, 15(2): 108 - 111.(WU Yongqiu, LIU Baoyuan, VAN DEN ELSEN E, et al. Automatic measurement for soil water content on Loess Plateau—TDR system and its application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(2): 108 - 111.(in Chinese))
- [4] FERRE P A, REDMAN J D, RUDOLPH D L, et al. The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand[J]. Water Resources Research, 1998, 34(5): 1 207 - 1 213.
- [5] ZHU J J, KANG H Z, GONDA Y. Application of Wenner configuration to estimate soil water content in pine plantations on sandy land[J]. Pedosphere, 2007, 17(6): 801 - 812.
- [6] SHEETS K R, HENDRICKX J M H. Non-invasive soil water content measurements using electromagnetic induction[J]. Water Resources Research, 1995, 31(10): 2 401 - 2 409.
- [7] ARCHIE G E. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1942, 146: 54 - 61.
- [8] KELLER G V, FRISCHKNECHT F C. Electrical methods in geophysical prospecting[M]. New York: Pergamon Press, 1966.
- [9] WAXMAN M H, SMITS L J M. Electrical conductivity in oil-bearing shaly sand[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1968, 8: 107 - 122.
- [10] HALVORSON A D, RHOADES J D. Field mapping soil conductivity to delineate dryland saline seeps with four-electrode technique[J]. Soil Science Society of American Journal, 1976, 40: 571 - 574.
- [11] FUKUE M, MINATO T, HORIBE H, et al. The micro-structures of clay given by resistivity measurements[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1/2): 43 - 53.
- [12] 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 Guohua, WANG Zhenyu, HUANG Jianping. Research on electrical resistivity feature of soil and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 83 - 87.(in Chinese))
- [13] 查甫生,刘松玉,杜延军,等. 非饱和黏性土的电阻率特性及其试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1 671 - 1 676.(ZHA Fusheng, LIU Songyu, DU Yanjun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(8): 1 671 - 1 676.(in Chinese))
- [14] 缪林昌,严明良,崔颖. 重塑膨胀土的电阻率特性测试研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1 413 - 1 417.(MIAO Linchang, YAN Mingliang, CUI Ying. Studies on electrical resistivity of remold expansive soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9): 1 413 - 1 417.(in Chinese))
- [15] 刘松玉,查甫生,于小军. 土的电阻率室内测试技术研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 216 - 222.(LIU Songyu, ZHA Fusheng, YU Xiaojun. Laboratory measurement techniques of the electrical resistivity of soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(2): 216 - 222.(in Chinese))
- [16] 郭秀军,刘涛,贾永刚,等. 土的工程力学性质与其电阻率关系实验研究[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1): 151 - 155.(GUO Xiujun, LIU Tao, JIA Yonggang, et al. The study of the relationship between engineering mechanical properties and resistivity of soils[J]. Progress in Geophysics, 2003, 18(1): 151 - 155.(in Chinese))
- [17] 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): 1 662 - 1 669.(GUO Xiujun, JIA Yonggang, HUANG Xiaoyu, 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): 1 662 - 1 669.(in Chinese))