



重金属锌污染砂的交流电阻率特性试验

宋志伟,董晓强,高宜涛,申纪伟,刘晓凤

(太原理工大学 建筑与土木工程学院,太原 030024)

摘要:为研究交流电阻率法检测重金属锌污染的可行性,通过对不同的锌污染砂试样进行电阻率测试,分析了电流频率、含水量、孔隙比、锌污染含量等对砂电阻率的影响,建立了影响锌污染砂交流电阻率的经验公式。结果表明,电阻率随电流频率的增加先急速降低,当电流频率增加到 50 kHz 时,电阻率逐渐趋于稳定;以锌含量 50 mg/kg 为界,锌含量越低,电阻率对电流频率的变化越敏感;电阻率随含水量的增加而减小,含水量越低,电阻率变化越快;电阻率随孔隙比的增加而增大,增幅较缓;电阻率随锌含量的增大而急速减小,当锌含量高于 250 mg/kg 后,电阻率逐渐趋于稳定;砂电阻率与锌污染含量间呈现高度相关的幂函数关系,得出了包含饱和度和孔隙率、锌污染含量的砂交流电阻率关系公式。

关键词:重金属锌;污染砂;交流电阻率;电流频率

中图分类号:TU 411.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)05-0060-06

Experimental analysis of AC resistivity properties of zinc contaminated sand

Song Zhiwei, Dong Xiaoliang, Gao Yitao, Shen Jiwei, Liu Xiaofeng

(College of Architecture & Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

Abstract: In order to explore the feasibility of AC resistivity method for monitoring zinc contaminated soil, the resistivity of zinc contaminated sand was tested, and the influences of current frequency, water content, void ratio and zinc contamination content on sand resistivity were analyzed. Therefore, an AC resistivity empirical formula of zinc contaminated sand was proposed. The results indicated that the resistivity decreased rapidly with the increase of current frequency, whereas gradually stabilized when the current frequency was higher than 50 kHz. When zinc content was lower than 50 mg/kg, the electrical resistivity was more sensitive to the change of current frequency. Then, The electrical resistivity decreased with the increase of water content, and lower the water content was, more quickly the resistivity changed. The resistivity increased slowly with the increase of the void ratio, and decreased rapidly with the increase

收稿日期:2015-02-25

基金项目:新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-1039);山西省回国留学人员科研资助项目(2013-043);山西省留学回国人员科技活动择优资助项目。

作者简介:宋志伟(1983-),男,副教授,博士生导师,主要从事环境岩土研究,(E-mail)geiliyoubao@163.com。

董晓强(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)dongxiaoliang@126.com。

Received:2015-02-25

Foundation item:Supported by Program for New Century Excellent Talents in University (No. 12-1039);Research Project Supported by Shanxi Scholarship Council of China (No. 2013-043);Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province

Author brief: Song Zhiwei (1983-), doctoral candidate, main research interests: environmental geotechnology, (E-mail) geiliyoubao@163.com.

Dong Xiaoliang (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) dongxiaoliang@126.com.

of zinc content. Whereas it gradually stabilized when the zinc content was higher than 250 mg/kg. There was a highly relevant power function relationship between resistivity and zinc content. Based on saturation, void ratio and zinc content, an electrical resistivity empirical formula was proposed.

Key words: heavy metal zinc; contaminated sand; AC resistivity method; current frequency

近年来随着城市化的建设、矿山的开采、交通运输、农田污灌以及农用肥料的施用,大量重金属元素进入水土系统,严重威胁着生态环境和人类健康。水土污染环境的评估、控制及修复已成为中国环保领域的重大需求,利用岩土工程的手段来解决水土环境的污染问题成为最为经济、最符合国情的途径之一^[1-2]。在受重金属污染的土水环境中,Zn 是最为常见的污染元素之一,如汽车轮胎与地面磨损会产生含 Zn、Cd 较高的颗粒物,Zn、Cu 和 Pb 常被作为交通污染源的标识元素^[3]。污灌区、铅锌矿区及有色金属冶炼厂周围地区,土壤中锌含量显著增高,可达 219.9 g·kg^[4]。2010 年第一次中国污染源普查公报显示:在畜禽养殖业及水产养殖业主要水污染物中,锌的排放量均居首位,分别达 4 756.94 t 及 105.63 t^[5]。据调查,近二十年来山西太原地区土壤中重金属 Zn 的超标率达 91%^[6]。

锌污染物进入土壤和地下水,会导致环境恶化,农作物减产,严重危及人们的生产生活^[7]。因此,对锌污染场地的检测与修复成了亟待解决的问题,而锌污染场地的探测是对其进行修复的基础。传统的检测方法具有周期长、实时性差,不适合长期检测的缺点^[8],而物理探测方法以其全面性、原位无损、速度快等特点受到了很多相关领域的高度关注。周蜜等^[9]对土壤电阻率准确性受到电极布置以及测试信号类型等的影响进行了相关试验。在环境岩土方面,查甫生等^[10]通过研究总结,探讨了电阻率法用于环境岩土工程研究的方法,表明污染物对土体电阻率的变化有很大影响;蔡国军等^[11]得出电阻率与相对密实度的变化规律。但是,目前国内外对于重金属锌污染砂方面的研究还很少。

为探究交流电阻率法检测重金属锌污染土的可行性,本文以锌污染砂为研究对象,揭示了通过电流频率、含水量、孔隙比、污染物含量等因素对砂电阻率的影响规律,提出一个砂受重金属锌污染的电阻率经验公式,研究成果可为电阻率法用于场地污染范围圈定和快速检测提供参考。

1 试验方案

由于天然土样中含有较多的污染成分,对电阻

率形成显著的干扰,而且离散性较大,故在本次试验中采用标准砂来代替土样,分析时可避免其他因素而集中考虑锌离子含量的影响。首先,将标准砂经蒸馏水充分洗涤烘干,尽量去除砂中其它离子成分。其次,参考《土壤环境质量标准(GB15618—1995)》,使用硝酸锌配置不同含水量($w=3\%、6\%、9\%、12\%$)和锌含量($c=10、25、50、100、250、500、1\ 000、2\ 500、5\ 000$ mg/kg)的污染砂,拌和均匀后静置于密封塑料盒内 3 h,使水气分布均衡。然后,在若干个体积相同的砂筒中,装入不同质量的污染砂,适当压实,制备出不同孔隙比($e=0.68、0.61、0.55、0.49$)的试样。最后,在砂筒上下各放置一个电极片,利用型号为 TH2828A 的 LCR 数字电桥测试污染砂的阻抗值 $|Z|$ ^[12],然后由式 $\rho=|Z|\cdot S/L$ 换算出电阻率值,其中 ρ 为砂电阻率($\Omega\cdot m$), S 为电极片面积(m^2); L 为电极片之间的距离(m)。电桥测试频率设置为 50 Hz~1 MHz。

为减小试验过程中温度变化对砂电阻率的影响,采用式(1)对测试数据进行了温度校正^[13]。

$$\rho_{18} = \rho_T [1 + \alpha(T - 18)] \quad (1)$$

式中: ρ_{18} 、 ρ_T 分别为 18 °C 和 T °C 时砂的电阻率; T 为实测温度,°C; α 为修正系数,取 0.025 °C⁻¹。

2 试验结果与分析

2.1 电流频率对电阻率的影响

相比直流电,采用交流电测试土样电阻率避免了动电现象、电化效应等不利影响,使得试验误差减到最小,而在交流测试中,电流频率对电阻率的影响非常明显^[4],但是对于电流频率的选择,至今也未有统一的规定。

图 1 为污染砂在各个锌污染含量下的电阻率值随电流频率变化的曲线,各污染砂的物理参数相同($w=6\%、e=0.55$)。总的看来,各锌含量下曲线的变化是基本一致的,电阻率均随电流频率的增大而减小。以锌含量 $c=50$ mg/kg 为界,锌含量越低,电阻率对电流频率的变化越敏感。在 50 Hz~50 kHz 的频率范围内,电阻率随电流频率的升高而快速降低;在 50 kHz~1 MHz 的频率范围内,电流频率对

电阻率值的影响开始变小。以 $c=10 \text{ mg/kg}$ 为例, $\rho(50 \text{ Hz})=161.2 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, $\rho(1 \text{ MHz})=125.4 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$, 电阻率竟然降低了 28.5%。因此,在采用交流电阻率法进行测量和评价时,尤其在锌含量较低时,必须考虑电流频率的影响,选取适当的频率。有关研究表明^[5],低电流频率区土电阻率特征可有效反映土颗粒大小、粒径分布、颗粒定向性、孔隙液电解质的种类和浓度、颗粒表面特征和砂的扰动程度等结构特性特征。目前中国对土电阻率的研究普遍采用 50 Hz 的低频交流电,为了便于对比研究,以下的分析也选取了 50 Hz 的频率来探讨砂的电阻率与有关影响因素的变化规律。

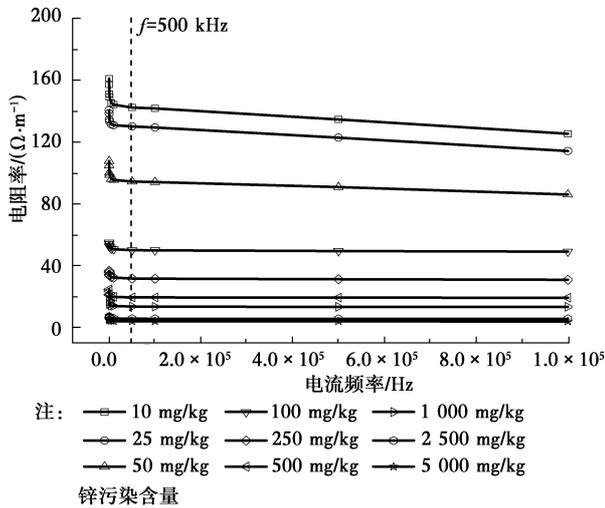


图 1 $w=6\%$, $e=0.55$ 时电阻率与电流频率的关系曲线
Fig. 1 Curves of resistivity and current frequencies under $w=6\%$ and $e=0.55$

2.2 含水量对电阻率的影响

图 2、3 中分别给出了砂中锌污染含量分别为 100 和 5 000 mg/kg 时的电阻率随含水量变化曲线。两图中,电阻率大小不同,但曲线的变化趋势相似。随着含水量的增加,砂的电阻率降低。电阻率随含水量的变化大致以 6% 为分界点,当含水量较小时,砂电阻率随含水量的变化较大;当含水量大于 6% 时,砂电阻率随含水量的变化较小。这是因为砂中砂粒的电阻率很高,导电的主要介质是孔隙水,当含水量低于 3% 时,大部分孔隙水存在于孤立的孔隙中,彼此间联通性很差,随着含水量的增大,孔隙间的水分快速贯通,导电路径急剧增多,故当含水量为 6% 时,电阻率已经大幅降低。当含水量继续增大时,电阻率仍在降低,但是幅度明显趋缓。

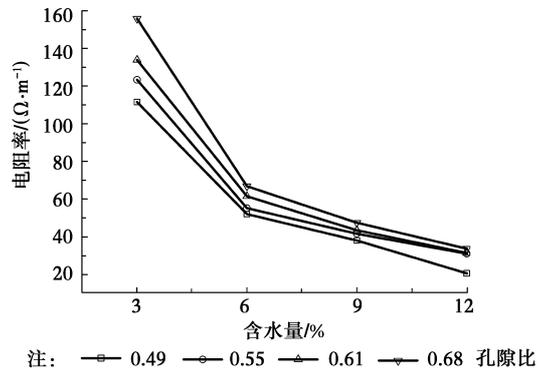


图 2 $c=100 \text{ mg/kg}$ 时电阻率与含水量的关系曲线
Fig. 2 Curves of resistivity and water content under $c=100 \text{ mg/kg}$

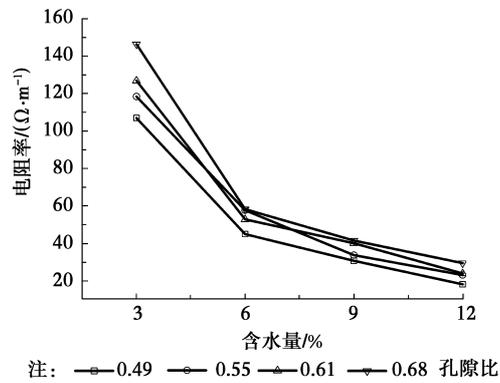


图 3 $c=5\ 000 \text{ mg/kg}$ 电阻率与含水量的关系曲线
Fig. 3 Curves of resistivity and water content under $c=5\ 000 \text{ mg/kg}$

2.3 孔隙比对电阻率的影响

图 4 为锌污染含量 $c=100 \text{ mg/kg}$ 时电阻率随孔隙比的变化曲线。在各个含水量下,电阻率随着孔隙比的增加而增大。当含水量一定时,孔隙比增大,砂变得松散,颗粒间的接触减小,孔隙水的充填

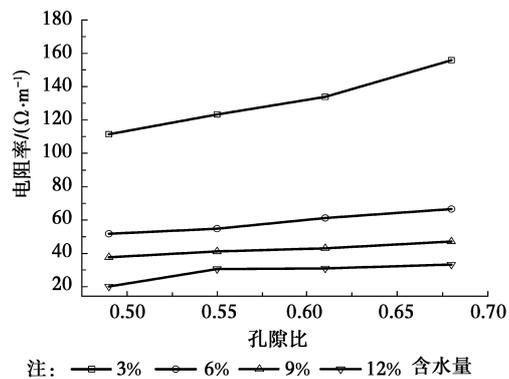


图 4 $c=100 \text{ mg/kg}$ 电阻率与孔隙比的关系曲线
Fig. 4 Curves of resistivity and void ratio under $c=100 \text{ mg/kg}$

度降低,从而孔隙水溶液形成的电流通路减少,使得电阻率增大。在此图中也可以看出,当含水量为3%时,砂电阻率曲线明显高于其它曲线,相比含水量,孔隙比对电阻率的影响较弱。

2.4 锌污染含量对电阻率的影响

图5为孔隙比 $e=0.55$ 时砂电阻率随锌污染含量的变化。在含水量一定的情况下,随着污染物含量的增加,砂电阻率逐渐降低,特别是当污染物含量低于 250 mg/kg 时,砂中锌污染含量的较小变化就能引起电阻率的显著变化;当污染物含量高于 250 mg/kg 时,砂电阻率受污染物含量的影响有所减小,并在较高含量趋于一个较为稳定的值。这是由于砂电阻率主要由孔隙水电阻率决定,而决定孔隙水电阻率的是其中的带电离子数量。污染物含量的增加导致孔隙水中带电离子的数量增加,提高了砂的导电性,从而电阻率降低。当孔隙水中带电离子数量较少时,锌污染含量的增加对孔隙水导电性的影响非常明显;而随着锌污染含量的继续增加,带电离子数仍在增多,但对电阻率的影响逐渐变小,故砂电阻率逐渐趋于稳定。

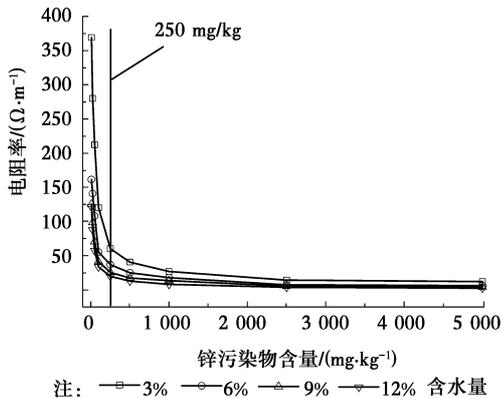


图5 $e=0.55$ 时电阻率与锌污染含量的关系曲线
Fig. 5 Curves of resistivity and zinc contaminant content under $e=0.55$

3 锌污染砂的电阻率经验公式

3.1 污染因子和结构因子

图6、7是含水量分别为3%、9%时的砂电阻率随锌污染含量的变化图。

总的来说,各个锌含量下,孔隙比对电阻率的影

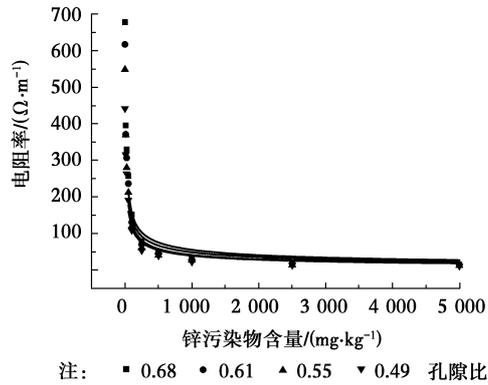


图6 $W=3\%$ 时电阻率与锌污染含量的关系曲线
Fig. 6 Fitting curves of resistivity and zinc contaminant content under $W=3\%$

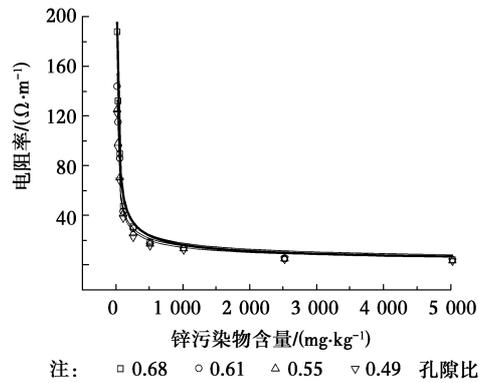


图7 $W=9\%$ 时电阻率与锌污染含量的关系曲线
Fig. 7 Fitting curves of resistivity and zinc contaminant content under $W=9\%$

响较小。从图6、7中看出,电阻率与锌污染含量间有较好的幂函数关系:

$$\rho_0 = dc^b \quad (2)$$

式中: ρ_0 为砂电阻率($\Omega \cdot \text{m}$); c 为锌污染含量(mg/kg); b 、 d 为参数。

对不同含水量、孔隙比下的砂电阻率与锌污染含量数据进行了拟合,得到的有关参数值如表1所示。可以看出,拟合结果的相关性较好。 b 随含水量和孔隙比的变化幅度很小,基本分布在 $-0.58 \sim -0.66$ 之间,可取平均值为 -0.614 ,可见 b 与砂样的结构特性关系不大,而与锌离子的污染类别相关,可将其称为污染因子; d 随含水量的增大而降低,随孔隙比的减小而减小,和电阻率随含水量及孔隙比的变化规律具有较好的一致性,可见 d 与砂样的结构特性相关,故称之为结构因子。

表 1 污染因子和结构因子

Table 1 Pollution factor and structure factor

含水量 $\omega/\%$	孔隙比 e	污染因子 b	结构因子 d	相关系数 R^2
3	0.68	-0.581	1 967.886	0.985
	0.61	-0.594	1 879.317	0.986
	0.55	-0.606	1 819.701	0.988
	0.49	-0.603	1 614.359	0.984
6	0.68	-0.605	1 093.956	0.984
	0.61	-0.596	968.278	0.977
	0.55	-0.579	824.138	0.977
	0.49	-0.598	822.243	0.977
9	0.68	-0.646	988.553	0.988
	0.61	-0.609	760.326	0.981
	0.55	-0.599	642.688	0.981
	0.49	-0.609	632.412	0.983
12	0.68	-0.651	785.236	0.986
	0.61	-0.649	721.107	0.985
	0.55	-0.663	696.627	0.993
	0.49	-0.641	516.416	0.976

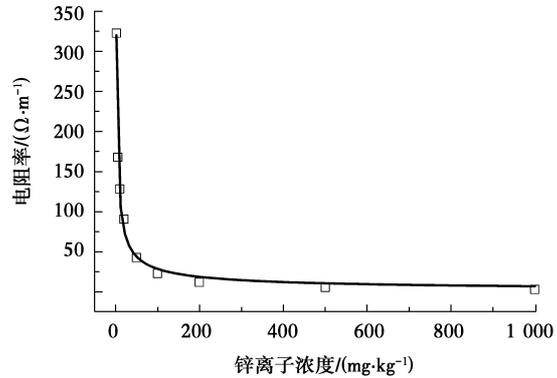


图 8 硝酸锌溶液电阻率与浓度的关系

Fig. 8 Relationship between solution resistivity and concentration

根据式(7)将表 1 中的孔隙比 e 及含水量 ω 转化为相应的孔隙率 n 与饱和度 S_r , 再结合 G 值。经线性平面拟合分析可得:

$$G = 589.97n^{0.382} S_r^{-0.730} \quad (8)$$

将式(8)代入式(5), 得到了基于孔隙率、饱和度、锌污染含量的砂电阻率经验公式

$$\rho_0 = 589.97n^{0.382} S_r^{-0.730} c^{-0.617} \quad (9)$$

3.2 电阻率经验公式

借鉴 Keller 等^[13]提出的非饱和砂电阻率公式

$$\rho_0 = a\rho_w n^{-m} S_r^{-p} \quad (3)$$

式中: ρ_0 为砂电阻率($\Omega \cdot m$); ρ_w 为砂孔隙水电阻率($\Omega \cdot m$), 由锌离子的含量及温度等因素决定, 对土电阻率起着决定作用; n 为砂孔隙率; S_r 为饱和度; a 、 m 、 p 为参数。

式(3)没有考虑孔隙水的污染情况, 而本文中的孔隙水为硝酸锌溶液。图 8 表示了硝酸锌溶液电阻率 ρ_w 与其浓度 c 的关系, 二者具有很好的幂函数关系:

$$\rho_w = 491.2c^{-0.617}, R^2 = 0.99 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$\rho_0 = 491.2an^{-m} S_r^{-p} c^{-0.617} \quad (5)$$

对比式(2)和式(5), $b = -0.617$ 与表 1 中的污染因子 -0.614 非常接近, 可见试验精度较高。当孔隙比、含水量、砂颗粒等因素一定时, 可以认为式(5)中 $492.1an^{-m} S_r^{-p}$ 为定值, 令

$$G = 492.1an^{-m} S_r^{-p} \quad (6)$$

进一步转化得

$$\ln G = \ln(492.1a) - m \ln n - p \ln S_r \quad (7)$$

4 结 论

1) 电阻率随着电流频率的增加先急速降低, 当电流频率增加到 50 kHz 时, 电阻率逐渐趋于稳定; 在锌污染含量较低时 ($c \leq 50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 这种影响更加明显。

2) 电阻率随含水量的增加而减小。当含水量较低时, 砂电阻率随含水量的变化较快; 含水量较高时, 砂电阻率随含水量的变化较慢。

3) 电阻率随孔隙比的增加而增大。当含水量较低时, 砂电阻率随孔隙比的变化较快; 含水量较高时, 砂电阻率随孔隙比的变化较慢。

4) 电阻率随锌含量的增大而急速减小, 特别是当锌含量低于 250 mg/kg 时, 电阻率对锌含量的变化极为敏感; 当污染物含量高于 250 mg/kg 时, 砂电阻率受污染物含量的影响则有所减小, 并在较高含量趋于稳定。

5) 砂电阻率与锌污染含量间呈现高度相关的幂函数关系, 定义了污染因子和结构因子, 建立了包含饱和度、孔隙率、锌污染含量的砂交流电阻率的经验公式。

参考文献:

- [1] 陈云敏, 施建勇, 朱伟, 等. 环境岩土工程研究综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 165-182.
Chen Y M, Shi J Y, Zhu W, et al. A review of geoenvironmental engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45 (4): 165-182. (in Chinese)
- [2] 陈日高, 马福荣, 庞迎波. 重金属污染土强度特性试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2014, 36(6): 94-98.
Chen R G, Ma F R, Pang Y B. Experimental analysis of the strength properties of the heavy metal contaminated soil [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2014, 36(6): 94-98. (in Chinese)
- [3] Friedlander S. Chemical element balances and identification of air pollution sources [J]. Environmental Science & Technology, 1973, 7(3): 235-240.
- [4] 陈玉真, 王峰, 王果, 等. 土壤锌污染及其修复技术研究进展[J]. 福建农业学报, 2012, 27(8): 901-908.
Chen Y Z, Wang F, Wang G, et al. Research Advances on Zinc Pollution and Remediation of Soil System[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2012, 27(8): 901-908. (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国环境保护部, 国家统计局, 农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 2010.
- [6] 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1285-1293.
Liu Y, Yue L L, Li J C. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1285-1293. (in Chinese)
- [7] Du Y J, Jiang N J, Liu S Y, et al. Engineering properties and microstructural characteristics of cement stabilized zinc-contaminated kaolin [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(3): 289-302
- [8] Mark L K. Complex NAPL site characterization using fluorescence Part1: selection of excitation wave length based on NAPL composition [J]. Soil and Sediment Contamination, 2004, 3: 103-118.
- [9] 周蜜, 王建国, 黄松波, 等. 土壤电阻率测量影响因素的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3269-3275.
Zhou M, Wang J G, Huang S B, et al. Experimental investigation on influencing factor in soil resistivity measurement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 (11): 3269-3275. (in Chinese)
- [10] 查甫生, 刘松玉, 杜延军, 等. 基于电阻率的非饱和土基质吸力预测 [J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 1003-1008.
Zha F S, Liu S Y, Du Y J, et al. Prediction of matric suction of unsaturated soil based on electrical resistivity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 1003-1008. (in Chinese)
- [11] 蔡国军, 邹海峰, 刘松玉. 电阻率 CPTU 在某农药厂污染场地评价中的应用[J]. 工程地质学报, 2012, 20(5): 821-826.
Cai G J, Zou H F, Liu S Y. Application of resistivity CPTU in evaluation of contamination site for pesticide factory [J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20 (5): 821-826. (in Chinese)
- [12] Dong X Q, Woo H, Park H, et al. Application of a newly developed column test device to analyze seawater transport in sandy soils [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(5): 2397-2404.
- [13] Keller G, Frischknecht F. Electrical methods in geophysical prospecting [M]. New York: Pergamom Press, 1966.
- [14] 章定文, 曹智国, 张涛, 等. 碳化对水泥固化铅污染土的电阻率特性影响规律[J]. 岩土力学与工程学报, 2014, 33(12): 2563-2572.
Zhang D W, Cao Z G, Zhang T, et al. Effect of carbonation on electrical resistivity of cement solidified lead-contaminated solis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2563-2572. (in Chinese)

(编辑 胡玲)