

柴油污染粉质黏土的电阻率特性及影响因素

边汉亮^{1,2}, 刘松玉^{1,2}, 蔡国军^{1,2}, 储亚^{1,2}

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏南京 210096; 2. 东南大学江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏南京 210096)

摘 要: 以南京地区典型的粉质黏土为研究对象, 人工配制了不同含水率、不同含油率的柴油污染土, 采用 Miller Soil Box 对不同状态的污染土体电阻率进行了测试, 建立了土体电阻率与含水率、含油率和饱和度间的相关关系。结果显示, 含油率相同时, 电阻率随含水率、饱和度的增大呈幂函数关系减小; 含水率相同时, 电阻率随含油率的增大而线性增加。引入体积含湿率来分析油水共同作用对电阻率的影响, 发现饱和度相同时, 电阻率随体积含湿率的增加而线性增大。采用正交分析法对电阻率的三种影响因素进行主次分析, 影响大小为饱和度 > 含水率 > 含油率。

关 键 词: 柴油污染土; 电阻率特性; 影响因素; 体积含湿率; 正交分析

中图分类号: TU 47 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)08-1177-06

Electrical Resistivity Characteristic and Influence Factors of Diesel Contaminated Silty Clay

BIAN Han-liang^{1,2}, LIU Song-yu^{1,2}, CAI Guo-jun^{1,2}, CHU Ya^{1,2}

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 210096, China. Corresponding author: LIU Song-yu, E-mail: liusy@seu.edu.cn)

Abstract: Silty clay from Nanjing city was used as parent soil for preparing diesel-contaminated soils with various moisture content and diesel content. The soil resistivity of diesel-contaminated soils was then determined by a Miller Soil Box to estimate the variation of the resistivity with moisture content, diesel content and saturation degree. Results indicate that soil resistivity increases with decreased moisture content and saturation degree for a given diesel content, which can be expressed using a series of power functions. The soil resistivity increases linearly with increased diesel content for a given moisture content. A new characteristic parameter, volume moisture content, is developed to better understand the influence of water- diesel interaction on the soil resistivity. It is found that the soil resistivity increases linearly with an increase in the volume moisture content for a given saturation. Orthogonal analysis was performed to rank the importance of influence factors on the soil resistivity, indicating the following order: degree of saturation > water content > oil content.

Key words: diesel contaminated soil; electrical resistivity characteristic; influence factor; volume moisture content; orthogonal analysis

世界经济发展的同时所带来的环境问题,尤其是土体污染问题,已成为广为关注的热点之一。被称为“工业血液”的石油及其衍生物在开采、生产、运输过程中所产生的污染已经成为常见的污染物,诸多学者对石油污染土进行了广泛研究。

文献[1-4]对石油烃类污染土体的工程性质进行了研究,结果证明土体污染后其物理力学性质会发生改变,因此,场地建设之前的污染评价就十分必要。传统的污染场地评价方法是通过勘察取样、室内分析来对场地污染程度进行评价,该方法

耗时费力、效率较低,不适用于大面积污染场地的评价.如何通过土体参数的变化判断场地是否污染需要进一步探索.

电阻率是土体基本物理参数之一,受到多种因素的影响,如土体孔隙比、饱和度、含水率、孔隙液成分、颗粒组成等^[5-7].石油烃类污染物渗入土体后,与孔隙水互不相溶,孔隙液组成相应改变,土-水相互作用发生变化,从而引起土颗粒双电层的变化,土体电阻率发生相应改变. Atekwana 等学者的研究表明,根据电阻率的变化来判断土体是否发生污染是可行的^[8-10]. Ahn 等^[11]采用小型的电阻率探头对重金属污染土和苯酚、汽油等有机物污染土的电阻率进行了测试,结果显示采用电阻率方法可较好地分辨重金属污染土,对有机物污染土的判断正确率为中等.潘玉英^[12]对石油烃污染砂土的电阻率特性进行了研究,分析了含水饱和度、含油饱和度、孔隙率对污染土电阻率的影响,得出了各因素对电阻率影响大小依次为含水饱和度>含油饱和度>孔隙率的结论.

为了建立以电阻率作为快速可靠的石油烃类污染场地评价指标,对石油烃类污染土的电阻率研究就非常有必要.基于此,本文以室内采用不同的拌制方法配制的不同含油率、不同含水率的柴油污染土为研究对象,采用 Miller Soil Box 对不同试样的电阻率进行测试,分析了含水率、含油率、饱和度对柴油污染土电阻率的影响规律,并采用“体积含湿率”来分析油水共同作用对土体电阻率的影响.采用正交分析法对含水率、含油率、饱和度的影响主次进行了排序,并对先水后油和先油后水两种配制方法对污染土体电阻率的影响进行分析,所得结论为采用电阻率指标评价柴油污染土提供了一定的理论基础.

1 试验方案

1.1 试验材料

未污染土体属南京地区典型的长江漫滩相淤泥质粉质黏土,土体中含少量有机质,其基本参数如表 1 所列.

表 1 未污染土的基本指标						
Table 1 Basic property of uncontaminated soil						
w/%	$\gamma/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	d_s	pH	$w_{\text{opt}}/\%$	$w_L/\%$	$w_p/\%$
36.7	1.92	2.72	7.95	18.2	37.7	23.1

注:w 为含水率, γ 为重度, d_s 为土粒相对密度, w_{opt} 为最优含水率, w_L 为液限, w_p 为塑限.

污染物为国标 0#柴油,其基本参数如表 2

所列.

表 2 柴油的基本参数				
Table 2 Basic parameters of diesel				
相对密度	动力黏度(40℃)	电导率	pH	介电常数
0.83	110.6 mm ² /s	0.15 μS/cm	7.43	2.1

1.2 试验装置

土体电阻率室内测试方法可分为两电极法和四电极法^[13].两电极法通过在试样两端布置电极片,采用电阻测量仪直接测量其电阻值,根据试样尺寸计算出电阻率值;该方法测量简便,但测量过程中电极容易产生极化现象,影响测量结果的准确性.四电极方法采用两组电极同时测量试样的电压与电流,其中电压测量电极位于试样中间,电流测量电极位于试样两端,电极之间保持一定的间距.当 4 个电极等间距布置时,即为 Wenner 电极.在试验过程中,电压与电流独立测量,减小了电极极化对测量结果准确性的影响^[14].

本文采用自制的 Miller Soil Box 作为测量装置,按照 Wenner 方法布置测量电极^[15]. Miller Soil Box 采用内径 5 cm、长度 15 cm 的圆柱形有机玻璃管制作.管两端的电流测量电极采用纯铜电极片制作,铜片面积与圆柱截面相同.两铜片电极之间每间隔 5 cm 设置一测量孔,插入纯铜棒作为电极来测量试样电压,如图 1 所示.

测量时,连上电源形成回路,铜片电极所测电流为 I ;铜棒电极所测电势差为 V ;圆柱体截面积为 A , $A=\pi D^2/4$, D 为有机玻璃管内径;铜棒电极距离为 L .试样电阻率可由式(1)计算:

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L}.$$

(1)

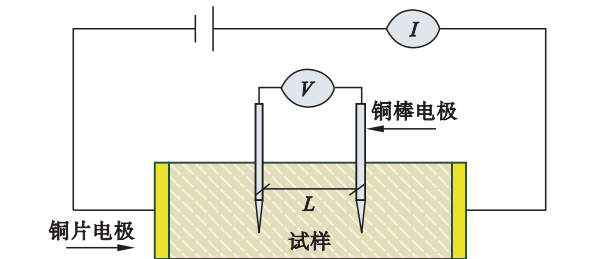


图 1 Wenner 四电极法
Fig. 1 Wenner four electrodes method

1.3 试验方法

1.3.1 污染土试样的配制

将所取的未污染土试样烘干粉碎后过 2 mm 筛,按照水与干土质量比为 10%,13%,16%,20% 和 25% 称取一定质量的去离子水,加入土样拌制均匀.拌制好的试样密封后在标准养护室内

养护 3 天. 按照柴油与干土质量比为 2%, 4%, 6%, 8% 称取相应质量的柴油, 加入不同含水率的试样拌制均匀, 放入标准养护室内养护 7 天, 以利于试样油水与土颗粒充分接触. 根据 Meegoda 和 Ratanweera^[16] 的研究, 7 天时间就能够使石油烃类有机污染物与干土达到平衡.

为了比较不同制样方法对试样电阻率的影响, 对含水率为 20% 的试样, 先加入干土质量 6%, 8% 的柴油拌制均匀, 标准养护室内养护 7 天后, 再加入干土质量 20% 的蒸馏水拌制均匀, 养护 3 天后测量土体电阻率.

1.3.2 正交试验方案设计

以试样含水率 w 、含油率 w_o 和土体饱和度 S_r 三因素为变量, 均采取 3 水平, 试样电阻率 ρ 作为因变量, 进行正交试验设计. 按照正交试验结果, 对不同状态下的污染土体电阻率进行测试.

1.3.3 电阻率测试

采用 Miller Soil Box 作为测量装置, 根据试验方案所设计的土体含水率和饱和度, 分别计算出填满有机玻璃管所需的土体质量, 采用静压法压至充满有机玻璃管. 采用四电极方法分别测量电流与电压值, 按照式(1)计算出试样电阻率.

2 试验结果分析

2.1 含水率对污染土电阻率的影响

图 2 所示为含油率分别为 2%, 4%, 6% 和 8% 时试样电阻率与含水率之间的关系图.

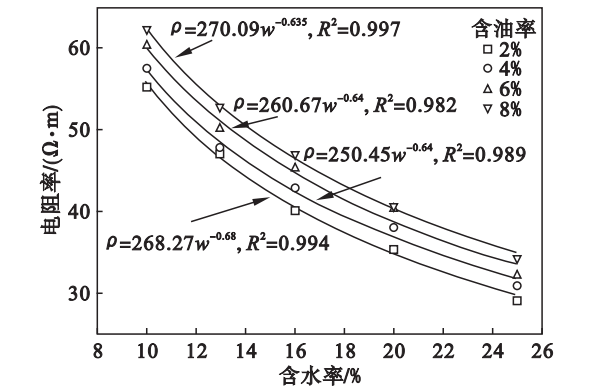


图 2 相同含油率时含水率与电阻率间的关系
Fig. 2 Electrical resistivity versus soil water content with the same oil content

由图 2 可以看出, 相同含油率时, 土体电阻率与含水率之间呈幂函数关系变化, 随着含水率的增加, 电阻率呈幂函数关系减小. 图 2 中实线为幂函数关系拟合得到的趋势线, 可以看出在不同含油率时电阻率变化幅度相似. 在试样含水率相同

时, 土体电阻率随着含油率的增加而变大. 图 2 中同时列出了各对应含油率下电阻率与含水率之间的相关关系表达式, 可以看出各表达式的幂接近, 由相关系数可以看出拟合曲线具有较好的相关性.

土体电阻率的组成主要由土颗粒电阻率、孔隙液电阻率和土中气体的电阻率组成, 土体电阻率与孔隙液电阻率之间存在正相关关系. 含水率增加时, 孔隙液中的水分增加, 水分子导电性比柴油高分子导电性强, 因此土体电阻率降低.

2.2 含油率对污染土电阻率的影响

含油率是污染试样中柴油质量与干土质量的比值. 土体受柴油污染后, 孔隙液成分发生变化, 电阻率发生相应变化. 图 3 所示为不同含水率状态下土体电阻率与含油率之间的关系图.

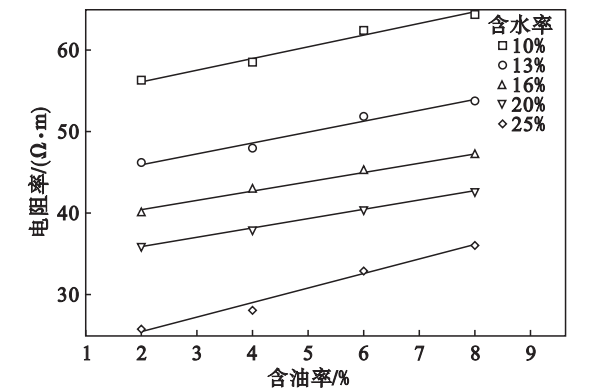


图 3 相同含水率时含油率与电阻率间的关系
Fig. 3 Electrical resistivity versus diesel content with the same water content

图 3 中实线为电阻率与含油率之间关系的拟合线, 可以看出在不同含水率时, 电阻率与含油率间均呈线性相关关系. 表 3 中所列为不同含水率时电阻率与含油率之间相关关系表达式, 由相关系数可以看出各拟合曲线均具有较好的相关性.

表 3 不同含水率时电阻率与含油率间的相关关系
Table 3 Electrical resistivity versus diesel content with different water content

含水率/%	相关关系	相关系数
10	$\rho = 53.286 + 1.416w_o$	$R^2 = 0.974$
13	$\rho = 43.32 + 1.33w_o$	$R^2 = 0.967$
16	$\rho = 38.06 + 1.158w_o$	$R^2 = 0.985$
20	$\rho = 33.533 + 1.137w_o$	$R^2 = 0.994$
25	$\rho = 21.97 + 1.777w_o$	$R^2 = 0.966$

试样含油率增加, 孔隙液中柴油高分子增多, 孔隙液电阻率增大, 因此土体电阻率增大.

2.3 饱和度对污染土电阻率的影响

土的饱和度也是影响土体电阻率的一个重要

因素. 图 4 为不同含水率时试样饱和度与电阻率之间的关系图. 由图 4 可以看出,在相同含油率时,电阻率随试样饱和度的增加呈幂函数关系减小. 图 4 中实线为电阻率与饱和度之间关系的拟合曲线,不同含油率时拟合曲线均为幂函数关系,且变化幅度相似. 图 4 中也列出了拟合曲线的表达式,可以看出不同含油率时,表达式的幂较接近,由相关系数可看出拟合曲线具有较好的相关性.

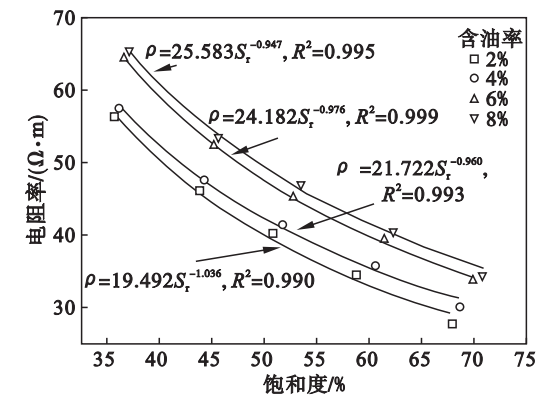


图 4 相同含油率时饱和度与电阻率间的关系
Fig. 4 Electrical resistivity versus saturation degree with the same oil content

2.4 体积含湿率对污染土电阻率的影响

土体体积含水率定义为土体中水的体积与土体体积之比^[17]. 对于柴油污染土,孔隙中的油水互不相溶,油分子与水分子共存. 将土体中水体积 V_w 和油体积 V_o 之和与土颗粒体积 V_s 之比定义为体积 V_s 含湿率 β ^[7], 即 $\beta = (V_w + V_o) / V_s$. 图 5 为不同饱和度时,柴油污染土电阻率与体积含湿率间的关系.

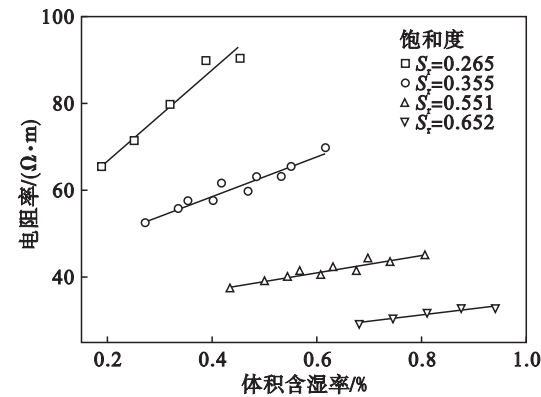


图 5 相同饱和度时电阻率与体积含湿率间的关系
Fig. 5 Electrical resistivity versus volume moisture content with the same saturation degree

由图可见,饱和度相同时,电阻率随着体积含水率的增加而线性增大;体积含湿率相同时,电阻率随着饱和度的增大而减小. 试样饱和度相同时,

体积含湿率的增加是由试样内油体积的增加所引起的,因此电阻率随着体积含湿率的增加而线性增大.

2.5 正交试验分析

为了分析污染土试样的含水率、含油率和饱和度对电阻率的影响程度,采用正交试验对不同影响因素进行分析排序,以确定各影响因素的主次. 本次试验以柴油污染土的电阻率为主要指标,选取试样的含水率、含油率、饱和度 3 个因素,各试验因素均考虑 3 个水平,如表 4 所列,正交试验结果如表 5 所列.

表 4 各参数取值及水平
Table 4 Values of parameters and level

因素水平	含水率/%	含油率/%	饱和度/%	空白值
1	16	4	50	1
2	20	6	65	2
3	25	8	80	3

表 5 正交试验计算结果
Table 5 Results of orthogonal test

试验号	1	2	3	4	5
含水率/%	25	25	20	20	20
含油率/%	6	8	4	8	6
饱和度/%	80	50	80	65	50
空白值	1	2	2	1	3
电阻率/(Ω·m)	29.23	35.26	26.56	40.54	42.56
试验号	6	7	8	9	
含水率/%	16	16	25	16	
含油率/%	8	4	4	6	
饱和度/%	80	50	65	65	
空白值	3	1	3	2	
电阻率/(Ω·m)	21.32	42.97	28.88	32.25	

采用方差分析法来分析正交试验结果. 方差分析法可以区分由因素水平的变化与误差波动所引起的试验结果间的不同,并能给出可靠的数量估计^[18]. 本次试验含水率、含油率和饱和度所对应的方差分别为 0.597, 0.108 和 3.838;显著因子分别为 0.626, 0.902 和 0.207. 因此,含水率、含油率和土体饱和度三个因素对电阻率影响均不显著,但其影响程度的大小不同,这三个因素对电阻率作用的大小依次为:饱和度 > 含水率 > 含油率.

3 拌制方法对污染土电阻率的影响

Fernandez 和 Quigley^[19] 通过扫描电镜等微

观试验,得出了疏水性芳香剂很难渗入到相对亲水的水土双电层中的结论.刘志彬和方伟^[20]对柴油污染高岭土的环境扫描电镜照片进行了分析,将柴油高分子在黏土中的行为概括为三种:一是物理化学作用,二是包裹效应,三是链接效应.土体颗粒加入柴油拌制均匀后,土颗粒与柴油高分子、水分子之间的存在形式会影响黏土颗粒间的连接及黏土颗粒的导电性,引起土体电阻率的变化.

在拌制污染土时,与土体拌合的顺序不同,土体会产生不同的吸附作用. Rahman 等^[21]对油类污染土的微观结构进行了扫描电镜分析,得到了黏土受油类污染后土颗粒的形态,如图 6 所示.可以看出柴油污染的黏土颗粒被油分子包围,加入蒸馏水之后,水分子与土颗粒结合紧密,油膜只存在于凝聚体外围.

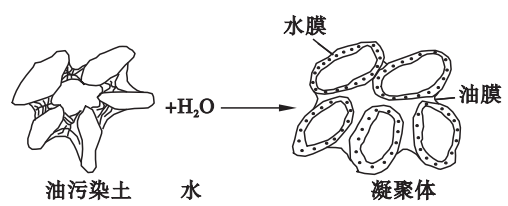


图 6 油类污染黏土颗粒结构示意图

Fig. 6 Particles of oil contaminated clay

为研究先加水拌制 3 天后再加入油(先水后油)拌制和先加入油拌制 1 周后再加水(先油后水)两种拌制方法的不同,对含水率为 20%,含油率分别为 6% 和 8% 的试样进行了试验.

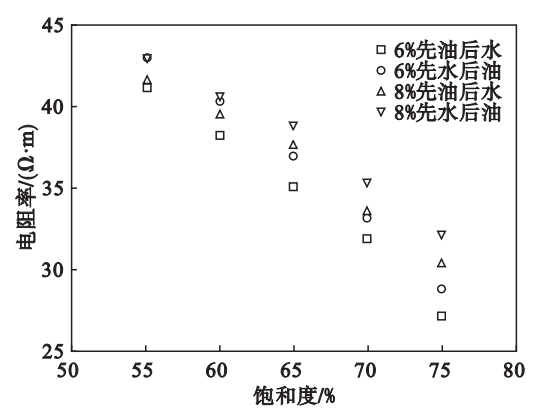


图 7 相同饱和度下不同拌制方法所制试样的电阻率
Fig. 7 Electrical resistivity of samples mixed by different preparation methods under the same saturation degree

图 7 所示为污染土样在不同拌制方式下电阻率与饱和度的关系图.由图 7 可知,先油后水和先水后油两种拌制方法对土体电阻率产生了不同的影响.相同含油率时先水后油的试样电阻率高于先油后水的试样,同时两种方法拌制的试样电阻

率均随饱和度的增加而减小.先水后油方法拌制的试样,土体颗粒与水体结合紧密,土颗粒被水分子包裹,加入柴油后,柴油高分子很难渗入土水双电层,只与部分水分子发生交换,多数柴油高分子存在于孔隙液中;先油后水拌制试样时,柴油高分子与土颗粒紧密结合,土颗粒被柴油高分子所包裹,加入水后,多数水分子存在于孔隙液中.柴油高分子自身电阻率较水分子大,孔隙液的电阻率是试样电阻率的重要组成,因此,先水后油拌制的试样电阻率高于先油后水方法拌制的试样.

4 结 论

1) 柴油污染土体电阻率与含水率、含油率及饱和度之间均具有良好的相关关系.含油率相同时,电阻率随着含水率、饱和度的增大而呈幂函数关系减小;含水率相同时,电阻率随着含油率的增加而线性增大.

2) 引入了体积含湿率来分析油、水共同作用对污染试样电阻率的影响,饱和度相同时,电阻率随体积含湿率的增加而线性增大.

3) 由正交试验可得,土体含水率、含油率和土体饱和度三个因素对电阻率的影响均不显著,对电阻率的影响主次依次为:饱和度 > 含水率 > 含油率.

4) 在含水率、含油率均相同时,不同的制样方法会对土体电阻率产生影响,先拌水后拌油所制试样的电阻率高于先拌油后拌水的试样电阻率,且两种方法拌制试样的电阻率均随饱和度的增加而减小.

参考文献:

[1] Khamehchiyan M, Charkhabi A H, Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils [J]. *Engineering Geology*, 2007, 89 (3/4): 220 - 229.

[2] Rahman Z A, Hamzah U, Ahmad N B. Engineering geological properties of oil-contaminated granitic and metasedimentary soils [J]. *Sains Malaysia*, 2011, 40 (4): 293 - 300.

[3] Kermani M, Ebadi T. The effect of oil contamination on the geotechnical properties of fine-grained soils [J]. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 2012, 21 (5): 655 - 671.

[4] Khosravi E, Ghasemzadeh H, Sabour M R, et al. Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite [J]. *Engineering Geology*, 2013, 166: 11 - 16.

[5] Friedman S P. Soil properties influencing apparent electrical

- conductivity; a review [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2005, 46(1): 45–70.
- [6] 蔡国军, 张涛, 刘松玉, 等. 江苏海相黏土电阻率与岩土特性参数间相关性研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(8): 1470–1477.
(Cai Guo-jun, Zhang Tao, Liu Song-yu, et al. Relationship between electrical resistivity and geotechnical characteristic parameters for Jiangsu marine clay [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1470–1477.)
- [7] 刘松玉, 边汉亮, 蔡国军, 等. 油水二相体对油污染土电阻率特性的影响[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(1): 170–177.
(Liu Song-yu, Bian Han-liang, Cai Guo-jun. Influence of water and oil two-phase on the electrical resistivity of oil contaminated soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1): 170–177.)
- [8] Atekwana Estella A, Atekwana Eliot A. Geophysical signatures of microbial activity at hydrocarbon contaminated sites; a review [J]. *Surveys in Geophysics*, 2010, 31(2): 247–283.
- [9] Fukue M, Minato T, Matsumoto M, et al. Use of a resistivity cone for detecting contaminated soil layers [J]. *Engineering Geology*, 2001, 60(1): 361–369.
- [10] Darayan S, Liu C, Shen L C, et al. Measurement of electrical properties of contaminated soil [J]. *Geophysical Prospecting*, 1998, 46(5): 477–488.
- [11] Ahn T, Allouche E N, Yanful E K. Detection of heavy metal and hydrocarbon contamination using a miniature resistivity probe [J]. *Environmental Technology*, 2007, 28(6): 701–711.
- [12] 潘玉英. NAPLs 地下运移控制因素及监测技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
(Pan Yu-ying. Study on controlling factors and monitoring technology of NAPLs underground migration [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013.)
- [13] 刘志彬, 许翀. 土电阻率测试中的几个基本问题[J]. *公路*, 2010(9): 187–192.
(Liu Zhi-bin, Xu Chong. Several basic problems in electrical resistivity measurement of soils [J]. *Highway*, 2010(9): 187–192.)
- [14] Campanella R G, Weemeees I. Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, 27(5): 557–567.
- [15] Standard test method for field measurement of soil resistivity using the Wenner four-electrode method: ASTM G57-06 [S]. West Conshohocken, PA: ASTM, 2012.
- [16] Meegoda N J, Ratnaweera P. Compressibility of contaminated fine-grained soils [J]. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17(1): 101–112.
- [17] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 1996: 23.
(Qian Jia-huan, Yin Zong-ze. Geotechnical principle and calculation [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996, 23.)
- [18] 邓振伟, 于萍, 陈玲. SPSS 软件在正交试验设计、结果分析中的应用 [J]. *电脑学习*, 2009(5): 15–17.
(Deng Zhen-wei, Yu Ping, Chen Ling. Application of SPSS software in orthogonal design and result analysis [J]. *Computer Study*, 2009(5): 15–17.)
- [19] Fernandez F, Quigley R M. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, 22(2): 205–214.
- [20] 刘志彬, 方伟. 柴油污染高岭土柴油作用机制及孔隙特征微观结构分析 [J]. *中国科技论文在线精品论文*, 2014, 7(21): 2142–2147.
(Liu Zhi-bin, Fang Wei. Microstructural research of the influence mechanism of diesel oil and pore structure characteristics in contaminated kaolinite [J]. *Highlights of Science Paper Online*, 2014, 7(21): 2142–2147.)
- [21] Ahmed H R, Abduljawwad S N, Akram T. Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils [J]. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 12: 1–12.