

DOI: 10.11779/CJGE201701016

# 油水二相体对油污染土电阻率特性的影响

刘松玉<sup>1, 2</sup>, 边汉亮<sup>1, 2</sup>, 蔡国军<sup>3</sup>, 储 亚<sup>1, 2</sup>

(1. 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; 2. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

**摘要:** 为研究油类污染粉质黏土的电阻率特性, 室内分别拌制了不同含水率、不同含油率的柴油、煤油污染土试样, 采用四电极方法对不同状态下的污染土体电阻率进行了测试。试验结果显示, 两种油污染土有相似的变化规律, 即在相同的含水率下, 均表现为电阻率随着含油率的增加而线性增大; 在相同的含油率下, 随着含水率、水饱和度的增加而呈幂函数关系减小。为了分析油、水二相体对电阻率的影响, 引入了体积含湿率、油水饱和度两个指标, 发现在相同的水饱和度下, 电阻率随体积含湿率的增加而线性增大; 在相同的体积含湿率下, 电阻率随油水饱和度的增加而幂函数关系减小。进一步分析表明, 电阻率与体积含湿率间存在线性相关关系, 与油水饱和度间存在幂函数相关关系, 两种油污染土的电阻率与体积含湿率、油水饱和度间的关系可以用同一公式表达。

**关键词:** 油污染土; 电阻率; 体积含湿率; 油水饱和度

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)01-0170-08

作者简介: 刘松玉(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事原位测试技术、环境岩土等方面的研究。E-mail: liusy@seu.edu.cn。

## Influences of water and oil two-phase on electrical resistivity of oil-contaminated soils

LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>, BIAN Han-liang<sup>1, 2</sup>, CAI Guo-jun<sup>3</sup>, CHU Ya<sup>1, 2</sup>

(1. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering & Environmental Safety (Southeast University), Nanjing 210096, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** In order to study the electrical resistivity of oil-contaminated soils, the diesel-contaminated soils and kerosene-contaminated soils with different water contents, oil contents are mixed in the laboratory by hand. The four electrode method is used to measure the electrical resistivity of these soils. The results show that two types of oil-contaminated soils have following similar trends: under the same water content, the resistivity of both contaminated soils increases linearly with the increase of oil content; while under the same oil content, the resistivity of these soils decreases in power function with the increase of water content and water saturation degree. In addition, two indexes of volume moisture content, water and oil saturation degree are introduced here to study the influences of water and oil two-phase on the resistivity of oil-contaminated soils. Under the same water saturation degree, it is found that the resistivity of contaminated soils increases linearly with the increase of volume moisture content; while under the same volume moisture content, the resistivity of which decreases in power function with the increase of water and oil saturation degree. Furthermore, a linear relationship between the resistivity and the volume moisture content as well as a power function relationship between the resistivity and the water and oil saturation degree of these soils is observed. For both types of oil-contaminated soils, they can be calculated by the same formula.

**Key words:** oil contaminated soil; electrical resistivity; volume moisture content; water and oil saturation degree

## 0 引言

岩土体的电阻率是岩土体的基本物理指标之一, 是表征岩土体电学特性的基本参数。自 1942 年 Archie<sup>[1]</sup>提出砂岩的电阻率公式后, 众多学者对岩土体的电阻率进行了深入研究, 取得了许多有益成果。由于电阻率测试技术尤其是电阻率 CPTu 技术具有快捷、方便、可连续测试等优点, 在岩土工程领域得到

了越来越深入的应用, 电阻率方法已应用于岩土体微观结构<sup>[2]</sup>、物理力学特性<sup>[3-5]</sup>、岩土体污染特性研究<sup>[6-8]</sup>等方面。

起步于砂岩的电阻率研究与应用, 已形成了一套

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330641); 国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAJ01B02)

收稿日期: 2015-10-30

较为成熟的理论体系。有关非饱和黏土体电阻率的研究起步较晚, 主要集中于通过室内试验研究电阻率与其他参数间的关系, 尚存在一些问题待进一步研究。分析前人的研究成果, 岩土体的电阻率公式可分为两类, 一类是在 Archie 电阻率公式基础上进行拓展, 通过试验数据的分析归纳, 扩展出适合不同岩土体的电阻率公式<sup>[9-10]</sup>; 第二类可归纳为在 Waxman<sup>[11]</sup>两元电阻率模型和 Mitchell<sup>[12]</sup>三元电阻率模型的基础上, 结合不同的假设条件, 对不同的岩土体相类进行串联、并联, 按照欧姆定律进行推导得出的<sup>[13-14]</sup>。诸多文献对不同类型的岩土体电阻率模型进行了研究, 但对于污染土的电阻率模型研究较少, 有关有机物污染土特别是油类污染黏土电阻率模型的研究, 需要进一步的深入研究。

在中国工业化发展的同时, 越来越多的污染也随之产生, 其中因地下储油罐、油气输送管线渗漏、加油站渗漏等所造成的石油烃类污染已成为一种常见的有机物污染。如何对场地污染进行快速评价, 已受到越来越多的关注。电阻率作为土体的一个基本参数, 受土体孔隙比、饱和度、含水率、孔隙液等多种因素的影响<sup>[3]</sup>。土体受到石油烃类污染后, 孔隙液成分改变, 土颗粒双电层发生变化, 其电阻率会发生相应改变。Fukue 等<sup>[15]</sup>、Darayan 等<sup>[16]</sup>、韩立华等<sup>[17]</sup>研究了采用电阻率法来评价污染土的理论与方法, 证明了以电阻率的变化来评价土体是否发生污染是可行的。

本文以南京地区常见的漫滩相粉质黏土为研究对象, 采用#0 柴油和煤油作为污染物, 人工配制了不同含水率和含油率的污染试样, 对不同状态下土体的电阻率进行了测试, 总结了含水率、含油率、土体水饱和度对污染土试样电阻率的影响规律; 引入了体积含湿率、油水饱和度两个指标来分析油水二相体对污染土试样电阻率的影响; 对两个指标及电阻率进行了归一化研究, 提出了污染土电阻率与体积含湿率、油水饱和度间的关系, 为下一步采用电阻率指标评价土体污染程度建立了一定的理论基础。

## 1 污染土的电阻率特性研究

1942 年, Archie<sup>[1]</sup>在不考虑固体颗粒导电性的前提下, 提出了适用于饱和砂岩的电阻率模型:

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

式中,  $\rho$  为实测土电阻率,  $\rho_w$  为孔隙水电阻率,  $n$  为孔隙率,  $a$  为试验参数,  $m$  为胶结系数。

随后, Keller 等<sup>[18]</sup>拓展了 Archie 电阻率模型的适用范围, 使之可用于非饱和纯净砂岩:

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

式中,  $S_r$  为饱和度,  $p$  为饱和度指数。

对于污染土体的电阻率, 在污染前后会发生相应改变, 多位学者对污染土的电阻率特性进行了研究。郭秀军等<sup>[19]</sup>对含油污水对饱和土和不饱和土体电阻率的影响进行了研究, 结果表明含油污水侵入降低了非饱和土的电阻率, 增大了饱和土的电阻率。韩立华等<sup>[17]</sup>对 Fe 和 Al 污染土的电阻率特性进行了研究, 得到了随污染成分含量的增加电阻率呈指数形式降低的结论。Son 等<sup>[20]</sup>研究了在不同频率下柴油污染土的电学特性, 发现在含水率为 5% 时, 土体电阻率随含油率的增加而增大。Liu 等<sup>[21]</sup>研究了柴油污染高龄土在不同龄期时的电阻率特性, 发现土体的电阻率随着含油率的增加而降低。潘玉英等<sup>[22]</sup>研究了土壤类型及组成、石油种类、含水饱和度、含油饱和度和孔隙率对污染土电阻率的影响, 并得出了污染土电阻率与石油污染物含量间的线性关系公式。由此可见, 不同的污染物对不同类型土体电阻率的影响结果不同, 但是针对污染土的电阻率计算尤其是油类污染土电阻率的计算尚未有明确公式, 需进一步研究。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

试验土体取自南京河西地区某排水工程施工场地, 其所在土层在南京地区分布广泛。土体比重为 2.72, 砂粒、粉粒和黏粒含量分别为 12.4%, 70.64% 和 16.92%, 液限和塑限分别为 37.7 和 23.1, 塑性指数为 14.6, 土体属典型的长江漫滩相粉质黏土。X 射线荧光光谱分析测得其主要化学成分为  $\text{SiO}_2$  62.50%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  15.76%、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  6.91%、 $\text{CaO}$  5.92%。

为了模拟不同的常见油类对土体电学特性的影响, 采用柴油和煤油作为典型油类污染物的代表, 人工拌制了不同含水率和含油率的污染土试样。所采用的柴油为国标#0 柴油, 煤油为普通煤油, 其主要指标如表 1 所列。

表 1 试验所用污染油类的基本指标

Table 1 Basic properties of oils used in tests

类别	比重	电导率 /( $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ )	pH	介电常数
柴油	0.83	0.15	7.43	2.1
煤油	0.80	0.21	7.62	2.3

### 2.2 试验装置

土的电阻率室内测试方法通常分为两电极法和四电极法<sup>[23]</sup>。两电极方法是将一对电极对称布置在土样两个端面上, 同时测得试样的电压和电流, 根据欧姆定律计算试样的电阻值, 按照试样尺寸进一步得出其

电阻率。两电极法具有电路简单、连接方便的特点,但量测过程中电极极化现象突出,所产生的附加电阻会影响测量结果的准确性。四电极法是利用两组电极,分别连接在试样两端和中间;两端的电极用于量测电流,中间的电极用于量测电压,电极间保持一定间距。四电极法中最常用的是将4个电极等间距布置,称为Wenner电极。四电极方法通过分开测量电流和电压,降低了电极的极化效应对电阻率量测的影响。因为电流仅通过外侧电流电极,极化现象只发生在外侧电极上,内侧两个电势差电极附近几乎不存在极化现象<sup>[24]</sup>。

本次试验采用按照Wenner电极布置的Miller Soil Box作为电阻率的测量装置<sup>[25]</sup>。在内径为5 cm、长度为15 cm的圆柱形有机玻璃土样盒两端分别放置与圆柱截面相同的纯铜电极片,作为电流测量电极;两电极片间等间距布置圆孔,插入铜棒作为电势差测量电极,如图1所示。在试样制后,采用导线连接成电路回路,试样两端电流为I,两电极间电势差为V,圆柱柱体截面积为A,  $A = \pi D^2 / 4$ , D为试样直径,电极间的距离为L。试样电阻率为

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} \quad (3)$$

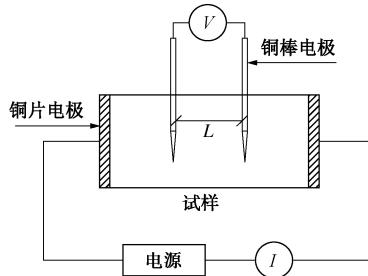


图1 试验所采用的电阻率测量方法原理

Fig. 1 Principle of resistivity measurement

### 2.3 试验方法

参考文献[22, 26, 27]的研究方法,本试验所采用的油类含量分别为0, 2%, 4%, 6%, 8%和10%(所掺加的油类质量与干土质量的比值),试样含水率分别为7%, 10%, 13%, 16%, 20%和25%。具体试验步骤如下:

(1) 土体风干粉碎后,过2 mm筛,加入设计含水率所需质量的去离子水拌合均匀,放入密封袋密封后,放置在标准养护室(温度(20±2)℃,相对湿度≥95%)内养护3 d,以利于土样充分润湿。

(2) 称取设计的土体含油率所需质量的#0柴油或普通煤油,加入步骤(1)所拌制的不同含水率的土样中,拌合均匀后,放入密封袋密封,放置在标准养护室内养护7 d后,测量污染试样的电阻率。根据Meegoda等<sup>[28]</sup>的研究,7 d时间就能够使石油烃类有

机污染物与干土达到平衡。

(3) 采用Miller Soil Box作为电阻率测试容器,按照不同土体含水率、干密度计算出不同状态试样所需的土体质量,采用静压法制样后,分别读取试样的电流与电压值,根据式(3)计算试样的电阻率。所有试样在测量电阻率时,温度均控制在(20±2)℃。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 单相体对污染土电阻率的影响

#### (1) 含油率对污染土电阻率的影响

污染土体在不同含水率时,含油率与电阻率间的关系如图2所示,图2(a)为柴油污染土,图2(b)为煤油污染土。由图可以看出,两种油污染土的电阻率与含油率间的规律相似,即在相同含水率时,试样电阻率随含油率的增加而线性增大。

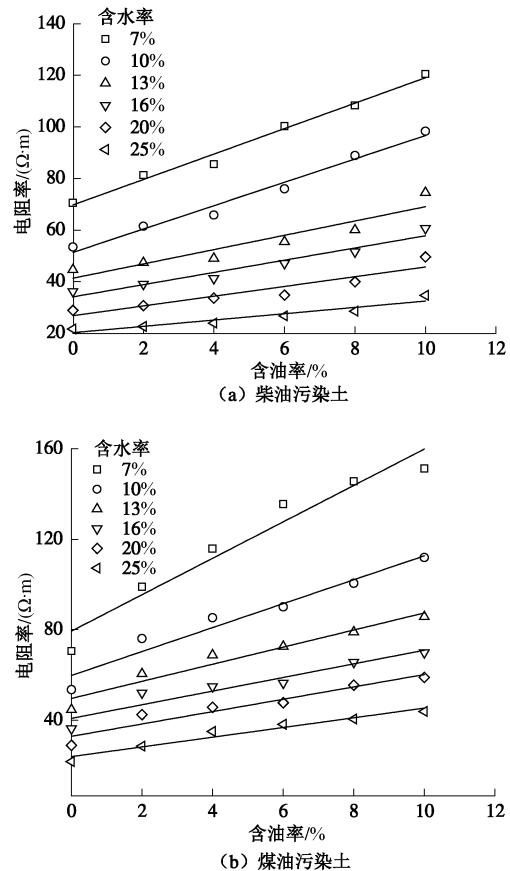


图2 不同含水率时油污染土电阻率与含油率的关系

Fig. 2 Resistivity versus oil content under different water contents

#### (2) 含水率对污染土电阻率的影响

污染土体在不同含油率时,含水率与电阻率间的关系如图3所示,图3(a)为柴油污染土,图3(b)为煤油污染土。由图可以看出,在相同含油率时,两种油污染土的电阻率均随含水率的增加而呈幂函数关系减小。在含水率<20%时,电阻率减小速率较快,含水率≥20%时,电阻率减小速率变慢。据此可推断,在

含水率大于某一特定值后, 电阻率变化速率基本维持不变。

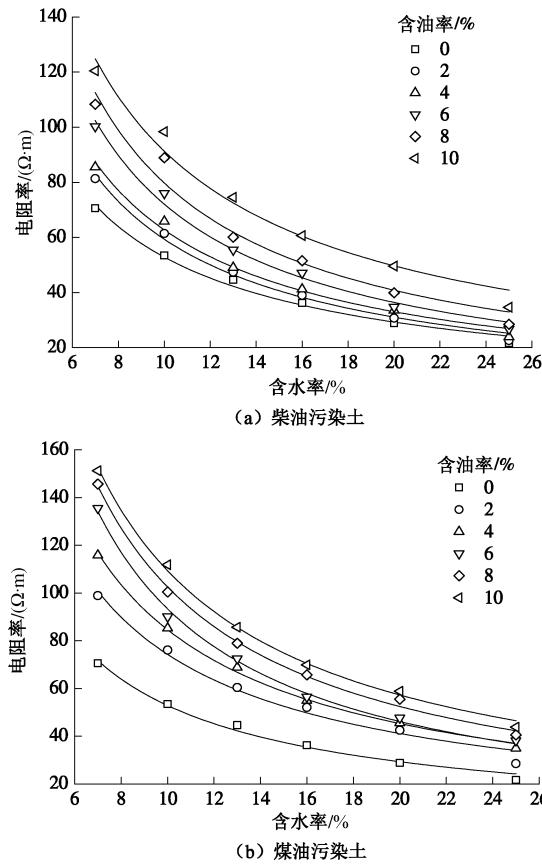


图3 不同含油率的污染土电阻率与含水率的关系

Fig. 3 Resistivity versus water content under different oil contents

### (3) 水饱和度对污染土电阻率的影响

为了分析污染试样电阻率与水饱和度之间的关系, 文中选取含水率为 16% 的试样数据进行分析。不同含油率时油污染土水饱和度与电阻率间的关系如图 4 所示, 图 4 (a) 为柴油污染土, 图 4 (b) 为煤油污染土。由图可以看出, 两种油污染土的电阻率与水饱和度间存在相似的变化规律。随着试样水饱和度的增加, 电阻率呈幂函数关系减小。同时也可看出, 不同含油率的试样, 水饱和度相近时, 污染土的电阻率随含油率的增加而增大。

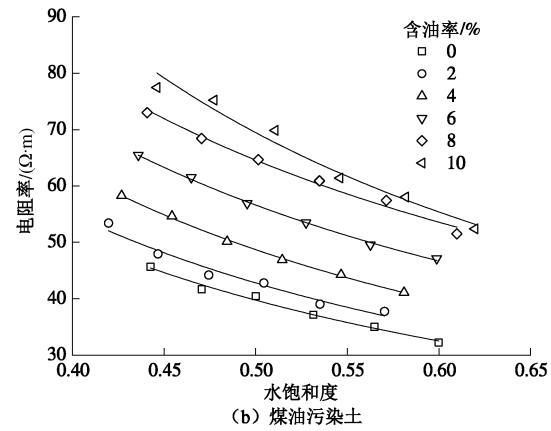
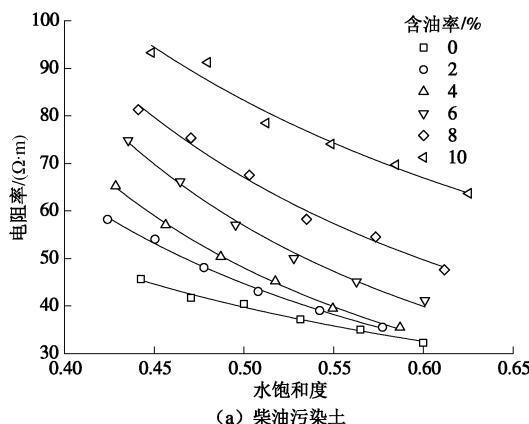


图4 不同含油率的油类污染土电阻率与水饱和度的关系

Fig. 4 Resistivity versus water saturation degree under different oil contents

对于油污染土试样, 电流通道可看作是由土颗粒、孔隙水、油共同组成的。油的电阻率高于水的电阻率, 当含油率增大时, 油体所占孔隙增大, 油体有可能隔断水流导电通道, 因此污染土体电阻率增大。土体含水率、水饱和度与土中水的含量有关, 含水率增大时, 油分子被水分子包围, 油体电流通道被水分子隔断, 土体电阻率减小。

### 3.2 油水二相体对污染土电阻率的影响

前文所分析的含水率、含油率、水饱和度, 均为油污染土单相体因素分析。非饱和的油污染土体, 是由土颗粒、孔隙水、孔隙油、气体共同构成的四相体, 有关水、油所组成的孔隙液对土体电阻率的影响研究较少。为了分析孔隙水、油两相共同作用下土体电阻率的变化规律, 在借鉴前人研究的基础上<sup>[22, 29]</sup>, 本文引入“体积含湿率”和“油水饱和度”两个指标, 对试样电阻率的影响分析如下。

#### (1) 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<sup>[29]</sup>。油不溶于水, 油类污染土中油水共存。借鉴体积含水率的定义, 本文定义土体中水体体积、油体积与土体体积之比为体积含湿率, 即

$$\beta = \frac{V_w + V_o}{V_s} , \quad (4)$$

式中,  $V_w$  为水体积,  $V_o$  为油体积,  $V_s$  为土体体积。

由前文分析可知, 污染土样的电阻率与含水率、含油率之间具有良好的相关关系, 体积含湿率可表征含水率与含油率的变化, 与电阻率之间也存在一定的相关关系。

图 5 给出了不同水饱和度时, 油污染土的体积含湿率与电阻率之间的关系, 图 5 (a) 为柴油污染土, 图 5 (b) 为煤油污染土。由图可以看出, 两种油污染

土在相同水饱和度时, 电阻率与体积含湿率之间存在相似的线性相关关系, 随着体积含湿率的增加, 土体电阻率线性增大。由线性拟合线的斜率可以看出, 随着水饱和度的增加, 电阻率增大的速率逐渐减小。另外, 在相同体积含湿率时, 电阻率随着水饱和度的增大而减小。试样水饱和度相同的情况下, 体积含湿率的增加意味着试样内油体积的增加, 因此土样的电阻率表现出随体积含湿率增加而线性增大的现象。

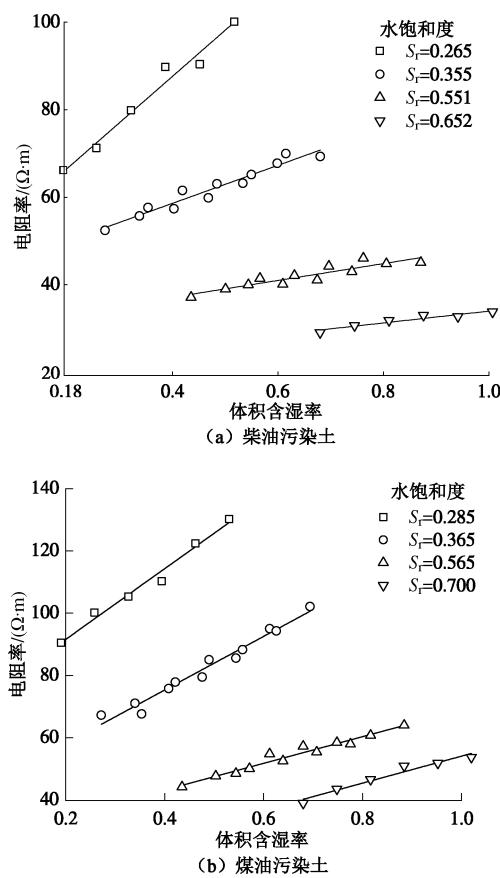


图5 不同水饱和度时体积含湿率与电阻率间的关系

Fig. 5 Resistivity versus volume moisture content under different water saturation degrees

### (2) 相同体积含湿时试样电阻率的比较

对于不同含水率、含油率的污染土体, 其体积含湿率有可能相同。为了比较不同含水率下, 相同体积含湿率试样的电阻率, 对不同含水率下, 相同饱和度、相同体积含湿率时试样的电阻率进行了比较分析。

图6所示为试样含水率分别为20%和25%的试样在相同体积含湿率时, 水饱和度与电阻率之间的关系。由图6可以看出, 在相同的体积含湿率时, 含水率为20%的试样电阻率基本都大于含水率25%试样的电阻率。在体积含湿率相同的情况下, 含水率小的试样, 油含量多, 油的电阻率大于水的电阻率, 因此, 含水率低的试样电阻率相对较大。

### (3) 油水饱和度对污染土电阻率的影响

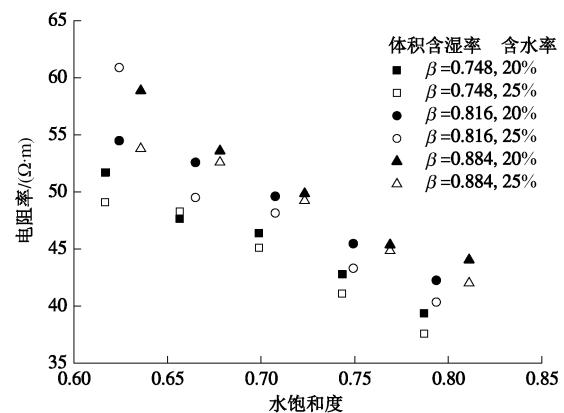


图6 相同体积含湿率下水饱和度与电阻率间的关系

Fig. 6 Resistivity versus water saturation degree under same volume moisture content

土体水饱和度是指土中水体积与土中孔隙体积之比。对于油污染土, 本文定义土中水体积、油体积之和与土中孔隙体积之比为油水饱和度, 采用  $S_{ro}$  表示。对于不同体积含湿率的土样, 可建立油水饱和度与电阻率之间的关系:

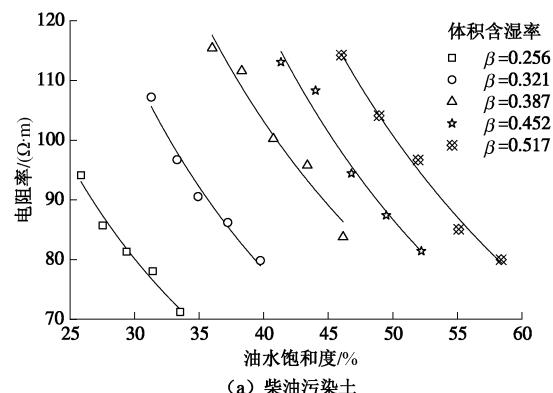
$$S_{ro} = \frac{V_w + V_o}{V_v} \quad , \quad (5)$$

式中,  $V_w$  为水体积,  $V_o$  为油体积,  $V_v$  为土中孔隙体积。

为了分析油污染土电阻率与油水饱和度之间的关系, 本文选取了多组不同体积含湿率中的一组进行分析, 如图7所示, 其中图7(a)为柴油污染土, 图7(b)为煤油污染土。由图可以看出, 两种污染土具有相似的变化规律, 即在相同的体积含湿率时, 随着油水饱和度的增加, 电阻率呈幂函数关系减小。

## 4 二相体参数的归一化分析

为了研究不同体积含湿率与土体电阻率之间的关系, 对两个参数进行归一化, 以建立更适用的相关关系。本文以相同含水率的未污染土的体积含湿率与电阻率为基数, 不同含油率的污染土体参数与未污染土体参数相比, 可建立土体体积含湿率与电阻率间的相关关系。



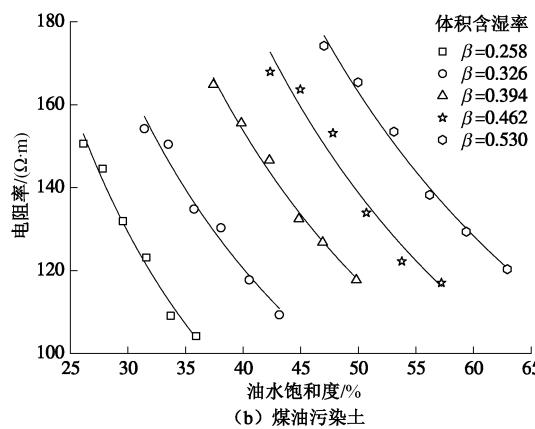
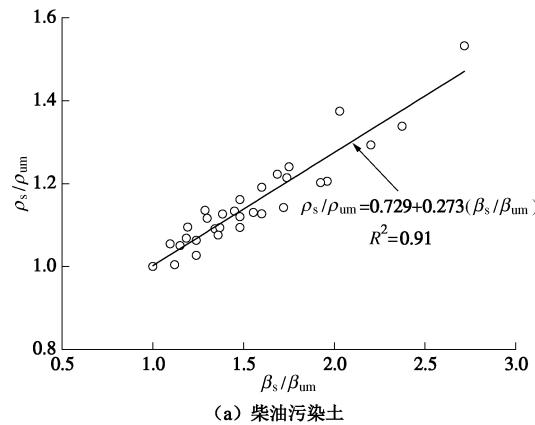
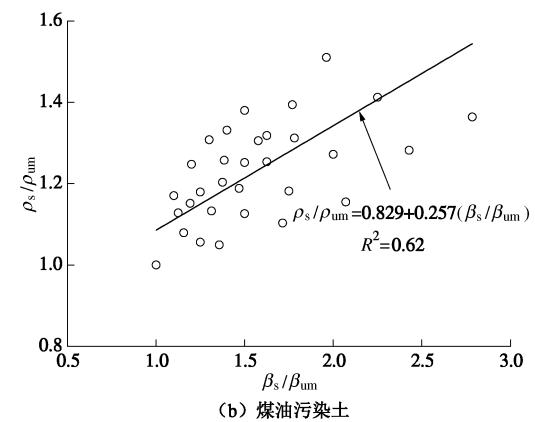


图 7 不同体积含湿率下油水饱和度与电阻率间的关系

Fig. 7 Resistivity versus water and oil saturation degree under different volume moisture contents



(a) 柴油污染土



(b) 煤油污染土

图 8 归一化后体积含湿率与电阻率间的关系

Fig. 8 Resistivity versus volume moisture content after normalization

图 8 所示为归一化之后的油污染土电阻率与体积含湿率之间的关系, 图 8 (a) 为柴油污染土, 图 8 (b) 为煤油污染土。由图可以看出, 归一化之后的土体体积含湿率与电阻率之间存在线性相关关系, 归一化的电阻率随着归一化后体积含湿率的增加而线性增大。两种污染土体相关关系表达式如下:

柴油污染土:

$$\rho_s/\rho_{un} = 0.729 + 0.273(\beta_s/\beta_{un}) \quad , \quad (6)$$

煤油污染土:

$$\rho_s/\rho_{un} = 0.829 + 0.257(\beta_s/\beta_{un}) \quad , \quad (7)$$

式中,  $\rho_s$  为不同含油率土体的电阻率,  $\rho_{un}$  为未污染土 (含油率为 0) 的电阻率,  $\beta_s$  为不同含油率土体的体积含湿率,  $\beta_{un}$  为未污染土 (含油率为 0) 的体积含湿率。

由式 (6)、(7) 可以得出, 油类污染土电阻率与体积含湿率的关系可统一表示如下:

$$\rho_s = [a + b \cdot (\beta_s/\beta_{un})] \cdot \rho_{un} \quad , \quad (8)$$

式中,  $a$  取值范围为 0.729~0.829,  $b$  取值范围为 0.257~0.273。

同时, 本文以相同含水率的未污染土的油水饱和度与电阻率为基数, 不同含油率的污染土体参数与未污染土体参数相比, 可建立土体油水饱和度与电阻率间的关系。图 9 所示为归一化之后的油污染土电阻率与油水饱和度之间的关系, 图 9 (a) 为柴油污染土, 图 9 (b) 为煤油污染土。由图可以看出, 归一化之后的土体油水饱和度与电阻率之间存在幂函数相关关系, 归一化的电阻率随着归一化后油水饱和度的增加而呈幂函数关系增大。两种污染土体相关关系表达式如下:

柴油污染土

$$\rho_s/\rho_{un} = 1.01 \times (S_{ros}/S_{roun})^{0.457} \quad , \quad (9)$$

煤油污染土

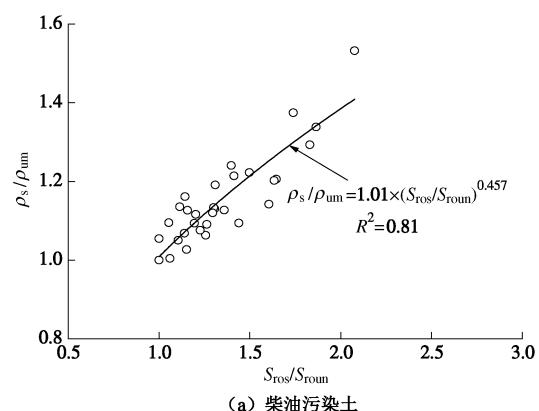
$$\rho_s/\rho_{un} = 1.06 \times (S_{ros}/S_{roun})^{0.525} \quad , \quad (10)$$

式中,  $\rho_s$ ,  $\rho_{un}$  与前文相同,  $S_{ros}$  为不同含油率土体的油水饱和度,  $S_{roun}$  为未污染土 (含油率为 0) 的油水饱和度。

由式 (9)、(10) 可以得出, 油类污染土电阻率与油水饱和度的关系可统一表示如下:

$$\rho_s = [c(S_{ros}/S_{roun})^d] \cdot \rho_{un} \quad , \quad (11)$$

式中,  $c$  取值范围为 1.01~1.06,  $d$  取值范围为 0.457~0.525。



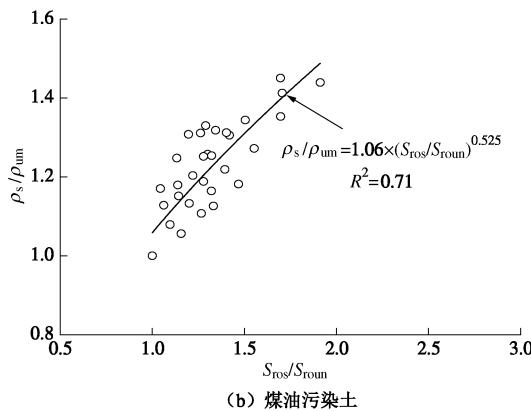


图9 归一化后油水饱和度与电阻率间的关系

Fig. 9 Resistivity versus water and oil saturation degree after normalization

在未污染土的电阻率、污染土的含水率、含油率已知的情况下,可根据式(8)或式(11)计算出污染土的电阻率范围。

## 5 结 论

通过室内拌制不同油类、不同含水率、不同含油率的污染土,研究了不同状态的污染土体参数与电阻率间的关系,为采用电阻率指标进行污染土的评价研究提供了理论基础。得到如下结论:

(1) 柴油和煤油污染对粉质黏土的电阻率特性会产生相似的影响效果。对单相参数,在相同含水率时,电阻率随含油率的增加而线性增大;在相同含油率时,电阻率随含水率、水饱和度的增加而呈幂函数关系减小。

(2) 引入了体积含湿率、油水饱和度两个指标来分析油、水二相体对试样电阻率的影响。在水饱和度相同时,电阻率随体积含湿率的增加而线性增大;在体积含湿率相同时,电阻率随油水饱和度的增大而呈幂函数关系减小。不同含水率、不同含油率但体积含湿率相同时,含水率低的试样电阻率大。

(3) 以相同含水率的未污染土的电阻率、体积含湿率、油水饱和度为基数,对不同污染试样的电阻率、体积含湿率、油水饱和度进行了归一化分析。归一化后,电阻率与体积含湿率间关系为  $\rho_s = [a + b \cdot (\beta_s / \beta_{un})] \cdot \rho_{un}$ , 电阻率与油水饱和度间关系为  $\rho_s = [c(S_{ros} / S_{roun})^d] \cdot \rho_{un}$ 。

## 参考文献:

- [1] ARCHIE G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Petroleum Transactions of AIME, 1942, 146(1): 54 - 62.
- [2] FUKUE M, MINATO T, HORIBE H et al. The

micro-structures of clay given by resistivity measurements[J]. Engineering Geology, 1999, 54: 43 - 53.

- [3] ABU-HASSANEIN Z S, BENSON C H, BLOTZ L R. Electrical resistivity of compacted clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 397 - 406.
- [4] FALLAH-SAFARI M, HAFIZI M K, GHALANDARZADEH A. The relationship between clay geotechnical data and clay electrical resistivity[J]. Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, 2013, 54(1): 23 - 38.
- [5] 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(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(8): 1470 - 1477. (in Chinese))
- [6] KIM Y S, OH M H, PARK J. Analysis of resistivity data obtained from cone penetrometer in contaminated soil layers[J]. Environmental Geology, 2009, 58(6): 1309 - 1317.
- [7] LIU S Y, CAI G J, DU Y J, et al. Site investigation of a pesticide contaminated factory based on in-situ resistivity piezocone tests in Southeastern China[J]. Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, Vols I and II. 2013: 1757 - 1764.
- [8] 蔡国军, 邹海峰, 刘松玉, 等. 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 Guo-jun, ZOU Hai-feng, LIU Song-yu, et al. Application of resistivity CPTU in evaluation of contamination site for pesticide factory[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(5): 821 - 826. (in Chinese))
- [9] 董晓强, 白晓红, 赵永强, 等. NaOH污染下水泥土的电阻率变化研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(11): 1715 - 1719. (DONG Xiao-qiang, BAI Xiao-hong, ZHAO Yong-qiang, et al. Study on electrical resistivity of soil-cement polluted by NaOH[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(11): 1715 - 1719. (in Chinese))
- [10] 章定文, 曹智国, 刘松玉, 等. 水泥固化铅污染土的电阻率特性与经验公式[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(9): 1685 - 1691. (ZHANG Ding-wen, CAO Zhi-guo, LIU Song-yu, et al. Characteristics and an empirical formula of electrical resistivity of cement solidified lead-contaminated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(9): 1685 - 1691. (in Chinese))

- [11] WAXMAN M H, SMITS L. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1968, **8**(2): 107 - 122.
- [12] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior (third edition)[M]. New York: Wiley, 2005.
- [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): 1671 - 1676. (ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun, et al. The electrical resistivity characteristics of unsaturated clayey soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(8): 1671 - 1676. (in Chinese))
- [14] 董晓强, 黄凤凤, 苏楠楠, 等. 非饱和黄土受压过程中交流电阻率特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **34**(1): 189 - 197. (DONG Xiao-qiang, HUANG Feng-feng, SU Nan-nan, et al. Experimental study of AC electrical resistivity of unsaturated loess during compression[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **34**(1): 189 - 197. (in Chinese))
- [15] 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.
- [16] DARAYAN S, LIU C, SHEN L C, et al. Measurement of electrical properties of contaminated soil[J]. Geophysical Prospecting, 1998, **46**(5): 477 - 488.
- [17] 韩立华, 刘松玉, 杜延军. 一种检测污染土的新方法——电阻率法[J]. 岩土工程学报, 2006(8): 1028 - 1032. (HAN Li-hua, LIU Song-yu, DU Yan-jun. New method for testing contaminated soil—electrical resistivity method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(8): 1028 - 1032. (in Chinese))
- [18] KELLER G V, FRISCHKNECHT F C. Electrical methods in geophysical prospecting[M]. New York: Pergamon Press, 1966: 66 - 68.
- [19] 郭秀军, 武瑞锁, 贾永刚, 等. 不同土壤中含油污水污染区的电性变化研究及污染区探测[J]. 地球物理学进展, 2005, **20**(2): 402 - 406. (GUO Xiu-jun, WU Rui-suo, JIA Yong-gang, et al. The study of electrical resistivity change of different saturation soils contaminated with oil sewage and the contaminated area detecting [J]. Progress in Geophysics, 2005, **20**(2): 402 - 406. (in Chinese))
- [20] SON Y, OH M, LEE S. Influence of diesel fuel contamination on the electrical properties of unsaturated soil at a low frequency range of 100 Hz-10 MHz[J]. Environmental Geology, 2009, **58**(6): 1341 - 1348.
- [21] LIU Z, LIU S, CAI Y, et al. Electrical resistivity characteristics of diesel oil-contaminated kaolin clay and a resistivity-based detection method[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **22**(11): 8216 - 8223.
- [22] 潘玉英, 贾永刚, 许中硕, 等. 不同影响因素下石油污染土电阻率特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(3): 880 - 889. (PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, XU Zhong-shuo, et al. The study on resistivity characteristics of oil contaminated soil in different influencing factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(3): 880 - 889. (in Chinese))
- [23] 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. (in Chinese))
- [24] CAMPANELLA R G, WEEMEES I. Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1990, **27**(5): 557 - 567.
- [25] TESTING A S. Standard test method for field measurement of soil resistivity using the wenner four-electrode method[J]. ASTM 2006, G 57-06, (Reapproved 2012)
- [26] 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.
- [27] KHOSRAVI E, GHASEMZADEH H, SABOUR M R, et al. Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite[J]. Engineering Geology, 2013, **166**: 11 - 16.
- [28] MEEGODA N J, RATNAWEERA P. Compressibility of contaminated fine-grained soils[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 1994, **17**(1): 101 - 112.
- [29] 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. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnical principle and calculation[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 1996. (in Chinese))