

盐分对土壤电阻率的影响研究

张润霞¹, 王益权¹, 解迎革², 史红平¹, 徐鹏霞¹, 刘建魁¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学理学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为了解盐渍化对土壤电阻率的影响, 本研究在室内设置了不同盐分类型、不同盐分浓度的土壤, 采用四电极法对各处理的电阻率进行相应测定, 分析了土壤含水量、含盐量和单、复盐构成对土壤电阻率的影响。研究表明: 土壤电阻率随着含水量的增大而从 16.08 Ω·m 下降到 4.25 Ω·m, 呈对数函数下降; 随盐分含量的增大呈幂函数下降, 含 NaCl 盐分的土壤电阻率从 2.04 Ω·m 下降至 0.20 Ω·m, 含 Na₂SO₄ 盐分的土壤电阻率从 2.89 Ω·m 下降至 0.39 Ω·m; 不同盐分类型的构成对电阻率的影响同样存在显著差异, 含盐量为 0.1% 时, 碳酸盐、硫酸盐、氯化物盐、氯化物-硫酸盐作用下土壤的电阻率分别为 4.40、3.64、2.05、2.25 Ω·m, 碳酸盐对土壤电阻率影响明显; 当含盐量分别为 0.5%、1.0%、1.5%、2.0% 时, 硫酸盐对土壤电阻率影响显著, 对应的硫酸盐土壤电阻率分别为 1.72、1.03、0.74、0.58 Ω·m, 氯化物盐土壤电阻率分别为 0.59、0.36、0.27、0.21 Ω·m。含水率和盐分总量是影响土壤电阻率的重要因素, 电阻率随土壤中 NaCl 和 Na₂SO₄ 含量的增加均呈幂函数递减规律; 单、复盐类型不同, 对土壤电阻率的影响存在差异。

关键词: 电阻率; 含水量; 盐分含量; 盐分组成
中图分类号: S153.3 **文献标志码:** A

Influence research of salts on the soil resistivity properties

ZHANG Run-xia¹, WANG Yi-quan¹, XIE Ying-ge², SHI Hong-ping¹, XU Peng-xia¹, LIU Jian-kui¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. College of Science, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to know the impact of salinization on soil resistivity, have put up the soil samples with different salt type and concentration and measured the electrical resistivity of eah treatment using the four-electrode method in laboratory, also analyzed the impacts of soil water content, salt concentration and single, double salt composition on the soil electrical resistivity. The research results showed that: The soil electrical resistivity was decreased from 16.08 Ω·m to 4.25 Ω·m with increase of the soil moisture content assumed a logarithmic function; and it was decreased with increase of the salt concentration assumed an exponential function. The soil electrical resistivity was decreased from 2.04 Ω·m to 0.20 Ω·m with NaCl, it was decreased from 2.89 Ω·m to 0.39 Ω·m with Na₂SO₄. The composition of different salt type still present notable difference on the soil electrical resistivity. When the salt content was 0.1%, under the action of carbonates, sulfates, chlorides and chloride-sulfate, the soil resistivity was 4.40, 3.64, 2.05 Ω·m and 2.25 Ω·m, respectively. The carbonate had obvious effect on soil resistivity. When the salt content was 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0%, the sulfate had obvious effect on soil resistivity, the relative soil resistivity was 1.72, 1.03, 0.74 Ω·m and 0.58 Ω·m, respectively, and for the chlorides salt, the soil resistivity was 0.59, 0.36, 0.27 Ω·m and 0.21 Ω·m, respectively. The soil moisture content and the total amount of salt were the important factors affecting soil resistivity. The soil resistivity was assumed a power function decrease with the increase of the NaCl and Na₂SO₄ content; The different salt types of single and double, existed different impact on soil resistivity.

Keywords: electrical resistivity; water content; salt content; salt composition

收稿日期: 2014-04-16
基金项目: 陕西省农业厅“渭北果园土壤钙素退化”研究(K332021312)
作者简介: 张润霞(1987—), 女, 甘肃白银人, 硕士, 研究方向为土壤改良。E-mail: runxiazhang@163.com。
通信作者: 王益权(1957—), 男, 陕西旬邑人, 教授, 主要从事土壤物理与改良研究。

土壤电阻率是反映土壤导电性能的指标,是土壤重要的性质参数之一,电阻率法是以介质的导电性差异为基础,通过施加电场探测土壤中目标结构、污染范围等,其因快速、非侵入性、无损测量等特点得到广泛应用。电阻率法常用于污染土体检测^[1-2]、岩土工程^[3-4]、地质水文^[5]、地基处理^[6]、含水率预测^[7]、接地装置的评估^[8]、地下金属腐蚀的预测^[9]等方面,并能快速无损地测定土壤的盐度^[10],Barbiero 等已经使用这些方法来估计土壤盐度的空间变异性,且使用效果良好^[11]。

国内外已经有很多关于土壤电阻率及其影响因素的研究,早已证实,土壤电阻率与土壤众多理化特性相关^[3,9,12-14]。章钢娅^[15]通过对塔里木地区土壤中砂土的含水量、含盐量、砾石含量及密实度等电阻率的影响因素研究得出,土壤含水量对电阻率的影响最大,特别是当地的含盐地下水,砾石含量的影响次之,孔隙比的影响则相对较小。聂向辉^[16]对不同含水量大港土的电阻率研究结果表明,土壤电阻率随含水量的增加而降低。李玲等^[2]研究了土壤含水率、含盐量、孔隙比等对盐渍土电阻率的影响,得出土壤中大颗粒较多时,电阻率较高,而粘粒含量较多时电阻率降低;随含水率的增加,电阻率呈幂函数降低;随着饱和度增大,电阻率呈幂函数减小。电阻率随各因素的变化程度不同,因素之间相互影响,共同作用。张永霞等^[17]研究了有机、无机溶液污染黄土后的电阻率,分析了含水率、污染物、孔隙率对土壤电阻率的影响,指出含水率是影响土壤电阻率的首要因素,电阻率随含水率的增大而减小;在土中加入 NaCl、ZnCl₂ 等可溶盐,土壤电阻率降低,且溶液浓度越高,电阻率越低;随柴油含量增大,电阻率逐渐增大;孔隙率对电阻率的总体影响较小。Fukue M^[18]通过实验得出沙土含水率越大,柴油含量对电阻率的影响越不明显。Yoon 等^[19]实验发现在土中加入 5% 的渗滤液时,电阻率发生了很大变化,随渗滤液侵入量的增多,土壤孔隙水含量及离子浓度提高,电阻率逐渐降低,当侵入污染介质的污染物达到一定浓度后,电阻率降低幅度减小,最后趋于平缓。

孙宇瑞^[20]以壤土作为研究对象,对土壤含水量、土壤盐分与土壤电导率之间相互关系研究结果表明,土壤盐分对土壤电导率的影响较土壤含水量大得多。尽管前人在土壤电阻率的影响因素方面做了卓有成效的研究工作,但是,涉及土壤盐分类型与组成,尤其是土壤中“复盐”对土壤电阻率的影响研究仍然鲜见。

自然界的盐渍土不仅有盐分含量的变化,也有盐分组成的变化,土壤中盐分类型复杂多样,水盐随季节更替处于动态变化过程中。因此研究土壤中盐分组成对土壤电阻率的作用和影响将对于了解土壤的电性特征,或根据土壤电阻勘探成果反演土壤各种性质有着极为重要的作用^[21]。本文模拟不同类型的盐渍化土壤,并进行室内电阻率测试,旨在分析盐渍化土壤电阻率与含水率、盐分浓度、盐分类型、盐分组成之间的关系,以期对盐渍化土壤的电动修复及水盐动态监测、盐渍化土壤工程性质评价提供技术参数。

1 材料与方法

1.1 材料与装置

为了减少土壤自身所含离子对实验目标的影响,以便准确地反映离子类型和数量对土壤电阻率的影响,本实验选取了风沙土作为供试基质,土样采取 0~20 cm 表层土壤,采自陕西省大荔县农场。它的 pH 值为 8.23(水土比 1:1),CEC 为 5.98 cmol·kg⁻¹,电导率用电导率仪(DDS-307A 型)进行测定,水土比为 5:1。比重测定—比重瓶法;颗粒组成及含量测定—吸管法;有机质—重铬酸钾容量法;Na⁺测定方法—火焰光度法;Ca²⁺、Mg²⁺测定方法—原子吸收法;Cl⁻测定方法—用硝酸银滴定法;SO₄²⁻测定方法—EDTA 间接络合滴定法;HCO₃⁻、CO₃²⁻测定方法—双指示剂—中和滴定法。土壤饱和含水量为 27%,用浸水饱和法测定。

供试土壤的基本性状见表 1 所示。原土样在测定电阻率前经过风干、剔除草根及杂质、研磨过 1 mm 筛等处理。

表 1 土壤样品的基本理化指标

Table 1 The basic chemical and physical index of soil samples

土壤类型 Soil type	颗粒组成及含量/(g·kg ⁻¹) Particle composition and content				比重 Particle density /(g·cm ⁻³)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	盐分组成及含量/(g·kg ⁻¹) Salt composition and content							电导率 Conductivity /(mS·cm ⁻¹)
	1~0.25mm	0.25~0.05mm	0.05~0.01mm	<0.01mm			Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
风沙土 Sandy soil	149	790	55	6	2.70	1.0	0.0017	0.0015	0	0	0.92	1.55	0.80	0.12

电阻率的测量是利用四电极法在 Miller Soil Box (图 1)内进行,在盒子长度方向的两个相对面上嵌入铜片,盒子内部尺寸长×宽×高为 42 mm×30 mm×28 mm,将配置好的含盐土壤按照设计容重装填入盒子中,在 AB 两点间和 MN 间连接导线,运用土壤电阻率仪进行测量,获得供试土壤电阻率。A、B 二电极为电流电极,其间距为 42 mm,M 和 N 为电压电极,电极间距为 15 mm。

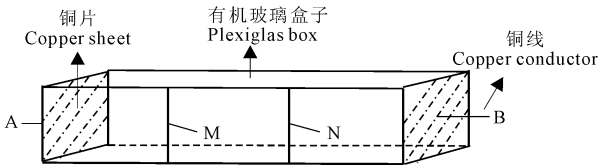


图 1 土壤电阻率测试箱示意图

Fig.1 Schematic diagram of the testing box for soil resistivity

1.2 土壤电阻率的测定

LandMapper ERM-02 是快速无损的测量田间、建设场地、修复场地及相似场地中土壤、植物电导率(ER)、电阻率(ER)以及自然电位的地球物理设备,其测量原理是四电极法,所测样品的电阻率可由式(1)^[4,7,22]计算。

$$ER = \frac{\Delta\varphi A}{LI} \tag{1}$$

式中:ER 为土壤电阻率,Δφ 为 M、N 间电压,I 为电流强度,L 为 M、N 二电极间距,A 为测试样品的横截面积。上式中 A/L 值常被称为几何因子 K(geometrical coefficient),实验所用电阻率仪可根据 Miller Soil Box 的大小进行 K 值的设定。所测样品电阻率可在仪表上直接得出。为了消除温度对土壤电阻率的影响,土壤样品在常温条件下进行测量。

1.3 实验方法

为了探求土壤含水量以及盐分对土壤电阻率的影响,本研究共设计了 3 个实验,第一个土壤水分含量实验,处理为 5%、10%、15%、20%、25% 共计 5 个水平,供试土壤未加盐;第二个实验处理为不同含盐量的单盐实验,单盐分别为 NaCl、Na₂SO₄,设计土壤盐分含量为 0.1%、0.5%、1%、1.5%、2% 等 5 个水平;第三个实验处理为“复盐”实验,实验设计分别为 NaCl 和 Na₂SO₄; NaCl 和 CaCl₂; Na₂SO₄ 和 CaSO₄; Na₂CO₃ 和 NaHCO₃ 共 4 组,总盐含量 5 个水平同单盐,每组两种盐含量各占一半重量,供试盐分均为化学纯试剂,所有含盐处理实验的土壤水分含量均控制为 15% 水平。

土样经碾碎、过筛、烘箱干燥 12 h 等处理后,根据 Miller Soil Box 体积计算并称取满足设计容重重要

求的土样质量。每个实验是将土样与水或盐溶液充分搅拌均匀,放入密封袋中平衡 24 小时,待土样中的水分、盐分含量均匀和平衡后,将所测样品分层装入 Miller Soil Box 中,确保试样表面与土样盒边缘平齐。将装有土样的 Miller Soil Box 与土壤电阻率仪连接后快速读数,读数结束后进行土样含水率的测定,由于在电阻率测定过程中可能有水分损失,因此其含水率以最后测定含水率为准。以上每个实验处理均设置 4 个重复。

2 结果与分析

2.1 土壤含水量对电阻率的影响

Miller Soil Box 中土壤的装填实际容重为 1.61 g·cm⁻³,不同含水量条件下土壤电阻率有着极为密切的负相关关系,见图 2 所示。经统计并检验得出,土壤电阻率随含水量的增大呈对数递减关系,与前人研究结论基本上一致^[4,15]。

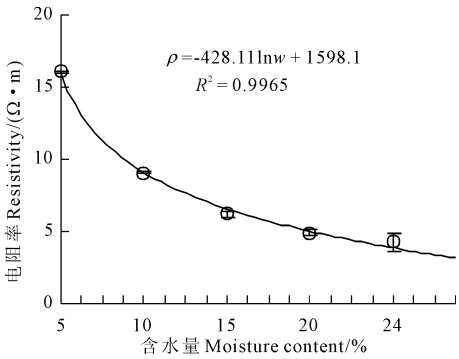


图 2 风沙土电阻率随含水率的变化关系

Fig.2 Variation relationship of electrical resistivity with moisture content for sand soil

土壤电阻率主要为孔隙水电阻率和土壤颗粒电阻率^[23]。在质地相对较粗的风沙土壤中,土壤颗粒中粘粒含量较少,因此土壤电阻率主要是孔隙水的电阻率。由图 2 可见,当土壤含水率小于 10% 时,电阻率随含水率增加而递减的幅度较明显。随着含水率进一步增加,土壤电阻率递减幅度趋于缓和,因为随含水率增大,土壤中孔隙几乎处于水分占据状态,空气占据比例下降,甚至土壤含水量为 25% 处理时,土壤几乎处于水分饱和状态,土壤电阻率随之减小到最低值。

2.2 盐分类型与含量对土壤电阻率的影响

土壤电阻率在很大程度上取决于含盐量,关于电阻率与土壤含盐量间的关系研究结论不甚一致,一些学者认为它们之间是线性关系,而另外一些学者则认为含盐量在较大的范围内变化时,关系曲线

就会由线性关系变成非线性的^[17]。从图 3 中可以看出,土壤电阻率与 NaCl、Na₂SO₄ 含量的相关关系均为非线性关系。电阻率随土壤中 NaCl 和 Na₂SO₄ 含量的增加均呈幂函数递减规律,与前人研究一致^[22]。在盐分含量小于 0.5% 时,电阻率的变化较显著,盐分含量大于 1.0%,电阻率变化很小。对于两种不同类型的盐分,土壤电阻率均随含盐量的增加而呈幂函数下降,这是因为在一定含水量条件下,土壤溶液中的导电离子数量增加,土壤导电性增强。同时图 3 还清楚显示,在相同含盐量情况下,土壤电阻率随盐分类型的不同差别也很明显,一般为含 Na₂SO₄ 土壤的电阻率总是高于含 NaCl 的,这是由于土壤导电性主要取决于盐分的电荷总量和离子迁移速度,在相同含盐量条件下,Na₂SO₄ 和 NaCl 的物质的量浓度和离子所带电荷量存在差异,这两个因素决定了正负电荷的数量;硫酸根离子在富含碳酸盐的土壤中活度较低;再者,硫酸盐结晶时结合一定的水分子导致土壤体积增大,孔隙变大,电阻率增大。由于土壤的复杂特性,土壤中离子强度对电阻率的影响另当考虑。

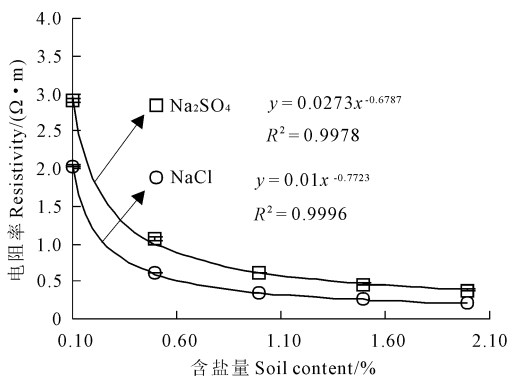


图 3 含水率为 15% 时土壤电阻率与盐分含量的关系曲线

Fig.3 The relation curve of soil electrical resistivity and salt content when water content was 15%

2.3 “复盐”及其组成对土壤电阻率的影响

土壤盐分含量和类型不同,对作物生长和土壤的工程性质影响很大,在地质工程中,以氯化物和硫酸盐为主的土壤,有溶陷性、膨胀性和腐蚀性等特征,易造成路基和建筑危害^[24]。碳酸钠盐对作物生长危害最大,碱性会增大土体膨胀,对工程建设存在许多不利的影响^[25],所以,无论是在地质工程、埋地工程还是在农业生产等方面,都非常重视监测土壤盐分的化学组成。客观实际中盐渍化土壤中的盐分并非单一离子,而“复盐”是最为普遍的,盐分组成对土壤电阻率的影响较为复杂。图 4 为电阻率与不同盐分组成的相关关系。当总盐含量小于 0.5% 时,4

种不同盐组分的土壤电阻率均随含盐量的增加而显著递减,只有在总含盐量大于 1% 时,递减幅度明显减小。在总含盐量小于 0.5% 时,以纯碳酸盐为组合的土壤电阻率为最大,其次为以纯硫酸盐为组合的盐渍土电阻率;在含盐量高于 1% 以后二者的电阻率大小发生了交换,而以纯氯化物为主的盐渍土电阻率始终为最小。这是因为对于土壤介质,在相同盐分含量条件下,土壤中盐分离子物质的量浓度不同,阴离子摩尔质量较大,因此相同质量下其物质的量会较小,因此电阻率较大,再者 SO₄²⁻ 和 CO₃²⁻ 易与土壤中其它的离子生成微溶性或难溶性化合物沉淀,从而使土壤中活性离子的数目减少,导电性减弱,电阻率增大,足见阴离子的化学性质在很大程度上左右着土壤电阻率的大小。李金铭^[26]研究了在水石英砂样中分别加入 NaCl、CaCl₂、FeCl₃ 后的电阻率,得出对一定浓度的溶液而言,阳离子电价越高,电阻率越小结论。刘磊等^[27]对土壤电阻率影响综合因子进行了系统研究,并依据与土壤电阻率关联度的大小依次将影响因子排序为:土壤含水量 > 土壤温度 > 可溶性盐总量 > CEC > Na⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺ > K⁺ > pH > SO₄²⁻ > 容重 > 有机质 > HCO₃⁻ > Cl⁻, 得出影响土壤电阻率的主导因子是土壤含水量、土壤温度、可溶性盐总量、CEC,尤其是不同类型阳离子对土壤电阻率的作用研究具有重要价值。Rinaldi 等^[28]通过实验发现,孔隙水分别为 NaCl、MgCl₂、KCl 溶液的饱和试样中,孔隙水电导率相同时,含 Na 试样的电导率为最高,然后依次是 Mg、K,他认为这一现象不仅归因于离子的迁移速率,而且归结于离子迁移、颗粒表面吸附及土壤结构共同作用的结果。

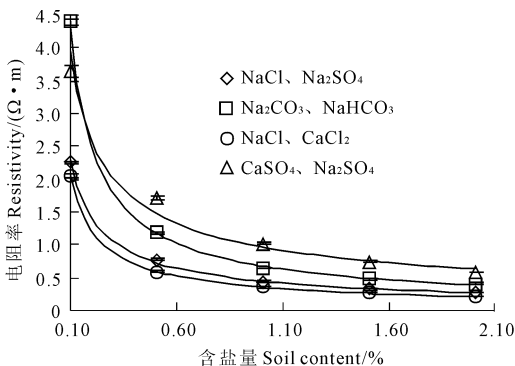


图 4 含水率为 15% 时土壤电阻率与“复盐”组成及含量的关系

Fig.4 The relationship of soil resistivity with double salt composition when water content was 15%

土壤电阻率与土壤总盐含量有很大的相关性,表 2 是电阻率与不同“复盐”盐分含量之间的相关关

系,通过进行统计分析得出,两者之间的关系可用幂函数很好地描述,相关性呈极显著。

表 2 电阻率与不同“复盐”盐分含量的拟合公式和相关关系

“复盐”类型 Double salt type	幂函数指数公式 Power function exponent formula	相关关系 Relationship
NaCl、Na ₂ SO ₄	$y = 1.6521x^{-0.7151}$	$R^2 = 0.9984$
Na ₂ CO ₃ 、NaHCO ₃	$y = 1.662x^{-0.0053}$	$R^2 = 0.9980$
NaCl、CaCl ₂	$y = 1.0847x^{-0.7582}$	$R^2 = 0.9998$
CaSO ₄ 、Na ₂ SO ₄	$y = 5.9206x^{-0.6076}$	$R^2 = 0.9814$

2.4 阴离子的类型对土壤电阻率的影响

图 5 首先显示无论是在单盐还是“复盐”影响下土壤电阻率的总体趋势都随含盐量增加而减小,但不同类型盐分处理下土壤电阻率从大到小排列为 Na₂SO₄ 单盐 > 硫酸盐与氯化物“复盐” > NaCl 单盐,即随着土壤中 SO₄²⁻ 所占比例的递减和 Cl⁻ 比例的递增,其土壤电阻率递减极为明显。同时,清楚地显示着,在不同的含盐量水平下,阴离子类型对土壤总电阻率的作用效应有很大差别,在含盐量小于 1% 情况下,离子类型效应差别显著,在含盐量高的情况下,离子类型效应逐渐被含量效应所淡化。显然,进一步证实,在低含盐情况下,土壤中阴离子 SO₄²⁻ 的活度会受到土壤中其它活性阳离子(诸如活性 Ca²⁺、Mg²⁺)影响,从而对电阻率作用明显,而在高含盐量浓度下,土壤溶液中除少部分 SO₄²⁻ 受阳离子的制约,活度较高 SO₄²⁻ 比例在显著增加,其土壤电阻率对离子类型的反应就不是比较敏感。因此可以得出,随着土壤含盐量的递增,土壤电阻率对盐分类型的反映敏感度在显著递减。只有在一定水平盐分含量范围内,土壤电阻率测定既可以帮助诊断盐渍化程度,也可以帮助诊断盐渍化的基本类型。

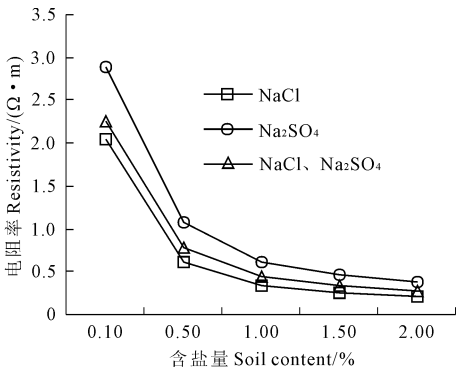


图 5 含水率为 15% 时电阻率随盐分类型变化的关系曲线
Fig.5 The relationship curve of resistivity with salt type when the water content was 15%

3 结 论

1) 模拟盐分类型污染风沙土实验表明,随着含水率的增加,土壤电阻率呈对数函数减小;盐分总量是影响土壤电阻率的重要因素,电阻率随土壤中 NaCl 和 Na₂SO₄ 含量的增加均呈幂函数递减规律;单盐类型不同,对土壤电阻率的影响不同,风沙土电阻率随盐分含量的升高而呈幂函数逐渐下降。组成“复盐”的盐分类型不同,对风沙土电阻率也存在一定程度的影响。

2) 由于影响电阻率的因素复杂多变,不同盐分类型的土壤中,影响电阻率的因素除了溶液中离子浓度之外,还与离子价态、阴离子类型等有关,离子强度对土壤电阻率的影响还需要进一步的研究。

3) 对盐渍化土壤电阻率的研究,有利于土壤盐渍化的动态变化检测,为盐渍化土壤改良提供理论依据,对盐渍化地区埋地金属的腐蚀以及接地电阻做指导。

参 考 文 献:

[1] 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,2006,28(8):1028-1032.

[2] 李 玲.盐渍土电阻率特性研究[D].兰州:兰州大学,2012.

[3] 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.

[4] 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,(1):83-87.

[5] Martínez J, Benavente J, García - Aróstegui J L, et al. Contribution of electrical resistivity tomography to the study of detrital aquifers affected by seawater intrusion-extrusion effects: The river Vélez delta (Vélez - Málaga, southern Spain)[J]. Engineering Geology, 2009, 108:161-168.

[6] 查甫生,刘松玉,杜延军.电阻率法在地基处理工程中的应用探讨[J].工程地质学报,2006,14(5):637-643.

[7] 张虎元,王少一,赵天宇,等.利用高密度电阻率法进行盐渍土含水率的测定[J].水文地质工程地质,2012,39(1):95-101.

[8] 韩方雨,于华都.接地电阻值对防雷效果的影响[J].铁路通信信号工程技术,2010,7(4):75-76.

[9] 李良福.土壤电学[M].北京:气象出版社,2008.

[10] Didier Michot, Christian Walter, Issifou Adama, et al. Digital assessment of soil-salinity dynamics after a major flood in the Niger River valley[J]. Geoderma, 2013,207/208:193-204.

[11] Barbiéro L, Cunnac S, Mane L, et al. Salt distribution in the Senegal middle valley. Analysis of a saline structure on the future irrigation schemes from N' Galenka creek[J]. Agricultural and Water Management, 2001,46:201-213.

[12] 韩立华,刘松玉,杜延军.温度对污染土电阻率影响的实验研究[J].岩土力学,2007,28(6):1151-1155.

[13] 曹晓斌,吴广宁,付龙海,等. 温度对土壤电阻率影响的研究[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 1-6.

[14] 司马文霞,骆 玲,袁 涛,等. 土壤电阻率的温度特性及其对直流接地极发热的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1192-1198.

[15] 章钢娅,刘顺明,孙慧珍. 塔里木地区土壤电阻率的影响因素研究[J]. 土壤学报, 2006, 43(1): 160-163.

[16] 聂向辉,杜 鹤,杜翠薇,等. 大港土电阻率的测量及其导电模型[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(9): 981-985.

[17] 张永霞. 污染土的电阻率特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2010.

[18] 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.

[19] Yoon G L, Oh M H, Park J B. Laboratory study of landfill leachate effect on resistivity in unsaturated soil using cone Penetrometer[J]. Environmental Geology, 2002, 43: 18-28.

[20] 孙宇瑞. 土壤含水率和盐分对土壤电导率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2000, (4): 36-41.

[21] 周仲华,郑 龙,孙 博. 土遗址墙体含水量与电阻率关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 4054-4058.

[22] 白 兰,周仲华,张虎元,等. 污染土的电阻率特征分析[J]. 环境工程, 2008, 26(2): 66-69.

[23] 查甫生,刘松玉. 土的电阻率理论及其应用探讨[J]. 工程勘察, 2006, (5): 10-15.

[24] 陈彪来. 甘肃省盐渍土分类与公路工程特性分区评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 32(5): 110-113.

[25] 刘彦辉. 碳酸盐渍土的膨胀性研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 119-121.

[26] 李金铭,张春贺,肖 顺. 水污染的导电性和激电性与污染浓度变化关系的几个实验结果[J]. 地球物理学报, 1999, 42(3): 428-433.

[27] 刘 磊. 土壤电阻率估算及影响因素研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011.

[28] Rinaldi V A, Cuestas G A. Ohmic conductivity of a compacted silty Clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(10): 824-835.

(上接第 207 页)

[10] 徐明岗,于 荣,孙小凤,等. 长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459-465.

[11] 徐明岗,于 荣,王伯仁. 长期不同施肥下红壤活性有机质与碳库管理指数变化[J]. 土壤学报, 2006, 43(5): 723-729.

[12] 薛 蕊,刘国彬,潘彦平,等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤活性有机碳与碳库管理指数演变[J]. 中国农业科学, 2009, 42(4): 1458-1464.

[13] 邱莉萍,张兴昌,程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 84-89.

[14] 邱莉萍,张兴昌,程积民. 不同封育年限草地土壤有机质组分及其碳库管理指数[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1166-1171.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-34.

[16] Hadrian F Cook, Gerardo S B Valdes, Howard C Lee. Mulch effects on rainfall interception, soil physical characteristics and temperature under *Zea mays* L. [J]. Soil & Tillage Research, 2006, 91(1-2): 227-235.

[17] 佟小刚,韩新辉,杨改河,等. 碳库管理指数对退耕还林土壤有机碳库变化的指示作用[J]. 中国环境科学, 2013, 33(3): 466-473.

[18] Whitbread A M, Lefroy R D B, Blair G J. A survey of the impact of cropping on soil physical and chemical properties in north-western New South Wales[J]. Australian Journal of Soil Research, 1998, 36: 669-681.

[19] 吴建富,曾研华,潘晓华,等. 稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1572-1578.

[20] Prentice K C, Fung I Y. The sensitivity of terrestrial carbon storage to climate change[J]. Nature, 1990, 346: 48-51.