

牛 旭,徐爱英,唐玉荣,等. 土壤介电常数的多因素模型研究[J]. 江苏农业科学,2017,45(7):258-261.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.07.067

# 土壤介电常数的多因素模型研究

牛 旭<sup>1</sup>, 徐爱英<sup>2</sup>, 唐玉荣<sup>2</sup>, 杨 璞<sup>2</sup>, 胡芸莎<sup>2</sup>

(1. 塔里木大学信息工程学院, 新疆阿拉尔 843300; 2. 塔里木大学机械电气化工程学院, 新疆阿拉尔 843300)

**摘要:**利用 LCR 数字电桥测量仪及自制加持平行电极板, 测量 10、100、1 000 kHz 条件下土壤的相对介电常数与 3 种主要影响因素之间的变化规律。采用多元线性回归分析原理及模型, 结合土壤相对介电常数的实测数据, 运用 SPSS 软件对 3 种主要影响因素进行多元回归分析, 得到了各因素与相对介电常数之间的相关关系及权重。结果表明, 含水率、容重和温度与土壤相对介电常数显著相关 ( $P < 0.05$ ), 其中含水率和温度与土壤相对介电常数极显著相关 ( $P < 0.01$ ); 利用多元线性回归建立不同测试频率下土壤相对介电常数与含水率、容重、温度 3 因素的回归方程, 且权重的大小顺序始终为容重 > 温度 > 含水率。

**关键词:**介电常数; 影响因素; 相关性; 多元线性回归; 模型检验

**中图分类号:** S151.9+2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)07-0258-03

土壤是地球陆地表层能够生长绿色植物的多空孔隙结构介质, 通常由矿物质、有机质、水和空气组成<sup>[1]</sup>。土壤介电常数是指土壤在极化电场下对外电场的响应, 它能够反映土壤品质与性质等众多物理信息<sup>[2]</sup>。国内外学者在土壤介电特性方面做了大量的研究。例如, Topp 等给出了土壤介电常数与土壤含水率的经验模型<sup>[3]</sup>; 由于原始的 Topp 模型缺乏物理机制, 它的实用性受到一定的限制, Jackson 等考虑了土壤容重、黏粒含量、有机质含量对土壤介电常数的影响, 建立了半物理半经验的 Topp 模型<sup>[4]</sup>; 康学远等研究出了土壤介电常数与含水率关系的一种模型<sup>[5]</sup>; 朱安宁等对不同类型土壤介电常数与体积含水量关系进行了研究<sup>[6]</sup>; Velázquez - Martí 等测定了农业土壤介电性质<sup>[7]</sup>; 土壤介电常数与频率、温度、容积密度的关系也有不少的研究<sup>[8-11]</sup>, 但含水率、容重、温度对土壤介电常数影响权重大小的研究却鲜有报道。本研究选用土壤含水率、温度和容重 3 因素进行土壤相对介电常数的研究, 通过 SPSS 软件进行数据分析, 得到影响土壤介电特性各因素之间权重大小的关系, 通过多元线性回归方程找到土壤相对介电常数的最佳回归方程。

## 1 多元回归分析数学原理与模型

多元线性回归是研究一个因变量与多个自变量之间的线性关系的统计分析方法。其基本目的是用一个自变量 ( $x_1, x_2, \dots, x_k$ ) 的数值估计另一个因变量 ( $y$ ) 及其变异性的统计分析方法。总体线性回归模型为

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon. \quad (1)$$

式中:  $y$  为因变量;  $\beta_0$  为模型常数项;  $\beta_k$  为回归系数;  $x_k$  为自变量。

样本线性回归方程为

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k. \quad (2)$$

式中:  $b_0$  为常数项, 表示当所有自变量为 0 时  $y$  的总体平均值的估计值;  $b_k$  是  $\beta_k$  的估计值, 自变量  $x_k$  的偏回归系数, 表示当方程中其他自变量保持不变时, 自变量  $x_k$  每改变 1 个单位时  $y$  平均变化的单位数。

多元线性回归不仅需要进行回归系数的检验, 估计回归系数的置信区间, 进行预测与假设检验等方面的讨论, 还需要考虑各个自变量之间的关系, 如它们之间是否存在共线性的问题<sup>[12]</sup>。

Shang 等在 200 ~ 400 MHz 频率范围内研究黏土试样的相对介电常数和介质损耗与不同含水率、密度、孔隙流体盐度的相关关系并建立多元线性回归模型<sup>[13]</sup>。Shi 等研究比较了多元线性回归、偏最小二乘回归和支持向量机回归估计土壤全氮含量的优劣性<sup>[14]</sup>。Bilgili 等研究了多元回归和人工神经网络模型对预测土壤温度和气象变化量之间的相关关系和回归方程<sup>[15]</sup>。周晨等利用多元线性回归模型对东北地区需水量进行了分析和检验<sup>[16]</sup>。黄安等利用多元线性回归分析集成所有成土因子对土壤养分进行了空间分布预测<sup>[17]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品制备

本研究土壤样品取自新疆阿拉尔市十团未耕作棉花地。土壤自然风干后, 将干燥的土壤研磨后用 18 目筛子 (孔径 1 mm) 过筛, 然后将土壤在 105 ℃ 的烤箱中烘 14 h, 干燥后的土壤样品装入密封塑料袋保存备用。加适量水, 配制成含水率为 5%、10%、15%、20% 的样本, 土壤样品装入相同大小的容器 (直径为 30.08 mm, 高度为 63.02 mm) 内静置 24 h 保证土壤样品的均匀性。

### 2.2 试验方法

本研究采用数字电桥测量仪 (TH2828S 高频 LCR 数字电

收稿日期: 2016-08-24

基金项目: 塔里木大学校长基金青年创新项目 (编号: TDZKQN201608)。

作者简介: 牛 旭 (1982—), 男, 陕西西安人, 硕士, 讲师, 主要从事经济数学模型及区域经济发展研究。E-mail: 150388340@qq.com。

通信作者: 徐爱英, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向为农业机械化。

E-mail: 474042917@qq.com。

桥)测量土壤相对介电常数特性。将直径为 36.05 mm 的铜制探头与样品表面紧密接触,设定相同电压、相同受力,为避免外界干扰,样品在屏蔽箱内进行测量。以测试频率、含水率、温度和容重为试验因素,以电容为考核指标。在同一测量频率下,测量土壤样品电容随含水率、温度、容重增大的变化规律,测量 6 组,取平均值。最后计算出相对介电常数。测量后的土壤样品,用天平(FA1004)称质量并记录,然后用烘干法(电热鼓风干燥箱,型号 GZX - 9140MBE)测量其含水率<sup>[18]</sup>。

介质材料的介电常数一般采用相对介电常数  $\varepsilon_r$  来表示,表征介质材料的介电性质或极化性质的物理参数,通常采用测量样品的电容量,经过计算求出  $\varepsilon_r$ ,它是一个无量纲数,因此单位是 1,满足如下关系:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{Ch}{\varepsilon_0 S} = \frac{4Ch}{\varepsilon_0 \pi d^2} \quad (3)$$

式中: $\varepsilon$  为绝对介电常数; $\varepsilon_0$  为真空介电常数, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F/m; $S$  为样品的有效面积; $h$  为样品的厚度; $d$  为样品的直径; $C$  为被测样品的电容量。本试验中,样品的直径、高度均用游标卡尺测量(测量 6 次),直径平均值为 30.08 mm,高度平均值为 63.02 mm。

2.3 数据处理方法

数据采用 Excel 和 SPSS 进行处理和分析,采用多元线性回归比较各因素的权重。

3 结果与分析

3.1 线性回归变量选取

为了充分了解含水率、温度和容重与对应的土壤介电常

数的权重大小,根据相对介电系数的试验实测数据,选取土壤的相对介电常数  $y$  为预测目标(因变量),含水率  $x_1$ 、温度  $x_2$ 、容重  $x_3$  作为预测因子(自变量)。

3.2 线性回归分析过程

回归分析的主要任务是探寻各项预测因子之间的相互关系及对于预测目标贡献值的大小,采用多元回归法对预测量  $y$  与预报因子  $x_k$  之间的关系进行分析。本研究是根据土壤的相对介电常数  $y$  与含水率  $x_1$ 、温度  $x_2$ 、容重  $x_3$  的测量值来解决以下几个问题:(1)通过将测量值带入回归方程,确定常数项及待定参数的值,并给出回归方程。(2)对回归方程进行回归标准差、相关系数检验,以验证自变量与因变量之间是否高度正相关,以确定方程是否可以用于预测土壤相对介电常数。(3)在方程可以用于预测条件下,利用回归方程对因变量进行预测。

3.3 相关性结果分析

由表 1 可知,在频率为 10、100、1 000 kHz 测试条件下,3 个变量中容重对土壤相对介电常数的影响程度最大,其次是温度,而含水率的影响最小。从显著性水平的  $P$  值也可以看出模型整体的拟合效果较好,含水率、容重、温度与土壤相对介电常数显著相关( $P < 0.05$ ),其中含水率、温度与土壤相对介电常数极显著相关( $P < 0.01$ )。考虑到含水率、容重、温度与土壤介电常数显著相关,因此对含水率、容重、温度做基于土壤相对介电常数的多元线性回归预测,预测模型中自变量的容差在 0.931 ~ 0.972 之间, $VIF$  值在 1.029 ~ 1.074 之间,接近于 1,表示回归方程式的自变量之间多元共线性非常弱,回归方程可以选择含水率、容重、温度为预测因子。

表 1 土壤相对介电常数与主要因素之间的相关性

频率 (kHz)	因素	非标准化系数		相关系数	$t$ 值	$P$ 值	共线性统计量	
		$B$	标准误差				容差	$VIF$
10	常量	-181.132	22.046		-8.216	0.000 **		
	含水率(%)	1.796	0.167	0.627	10.723	0.000 **	0.931	1.074
	容重(g/cm <sup>3</sup> )	51.168	15.207	0.187	3.365	0.012 *	0.972	1.029
	温度(℃)	6.565	0.701	0.554	9.366	0.000 **	0.948	1.055
100	常量	-180.118	22.673		-7.944	0.000 **		
	含水率(%)	1.802	0.172	0.652	10.466	0.000 **	0.931	1.074
	容重(g/cm <sup>3</sup> )	58.617	15.639	0.222	3.878	0.007 **	0.972	1.029
	温度(℃)	6.009	0.721	0.507	8.366	0.000 **	0.948	1.055
1 000	常量	-147.910	24.173		-6.119	0.000 **		
	含水率(%)	1.756	0.184	0.719	9.561	0.000 **	0.931	1.074
	容重(g/cm <sup>3</sup> )	45.464	16.674	0.162	2.727	0.029 *	0.972	1.029
	温度(℃)	5.035	0.769	0.431	6.551	0.000 **	0.948	1.055

注: $B$  为 Betain 的缩写,代表回归系数; $t$  为对回归系数的显著性检验; $P$  为显著性水平,“\*”表示  $P < 0.05$  (显著相关),“\*\*”表示  $P < 0.01$  (极显著相关); $VIF$  为方差膨胀因子。

3.4 线性回归结果分析

由表 2 可知,在频率为 10、100、1 000 kHz 测试条件下,以土壤的相对介电常数  $y$  为预测目标(因变量),含水率  $x_1$ 、温度  $x_2$ 、容重  $x_3$  作为预测因子(自变量)的多元线性回归方程相似,显著性指标  $P = 0.000$ ,即回归模型方程皆达到极显著水平( $P < 0.01$ ),相关系数  $r$  均大于 0.970,显著性检验系数  $F$  值均大于 38.700,多元线性回归方程拟合效果较好。

3.5 不同频率下的直方图与标准残差 P - P 图分析

图 1 至图 3 分别为 10、100、1 000 kHz 频率下的直方图与标准残差 P - P 图。回归标准化残差的直方图表明了数据的正态性;回归标准化残差的标准 P - P 图中,各观测的散点基本呈直线趋势,散点基本上都分布在对角线上,可以判断残差服从正态分布,说明该方程有意义。

4 结论与讨论

土壤作为一种代表性的电介质材料,它的基础物理参数

表 2 土壤相对介电常数多元线性回归

频率 (kHz)	多元线性回归方程	<i>R</i>	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
10	$y = 1.796x_1 + 51.168x_2 + 6.565x_3 - 181.132$	0.980	58.018	0.000
100	$y = 1.802x_1 + 58.617x_2 + 6.009x_3 - 180.118$	0.978	52.302	0.000
1 000	$y = 1.756x_1 + 45.464x_2 + 5.035x_3 - 147.910$	0.971	38.708	0.000

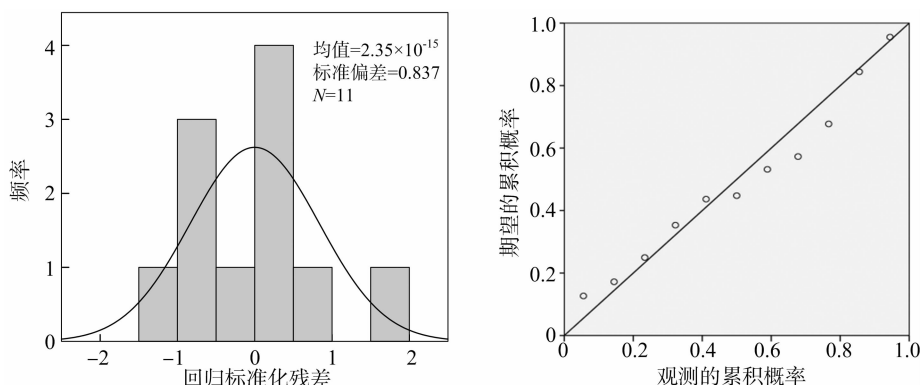


图1 10 kHz 频率下的直方图与 P-P 图

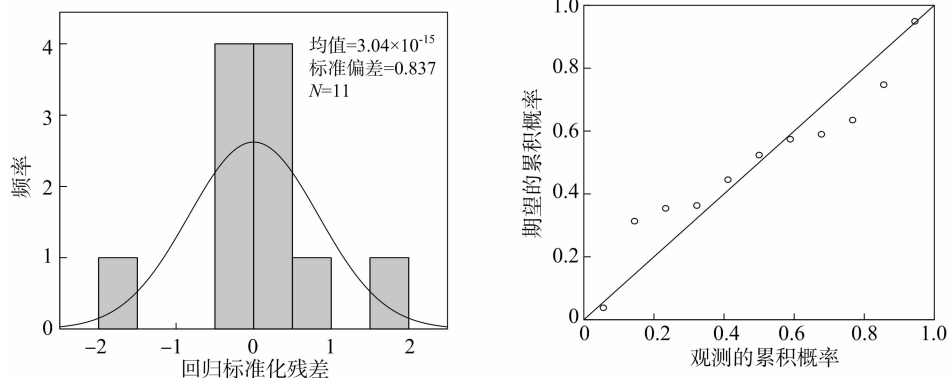


图2 100 kHz 频率下的直方图与 P-P 图

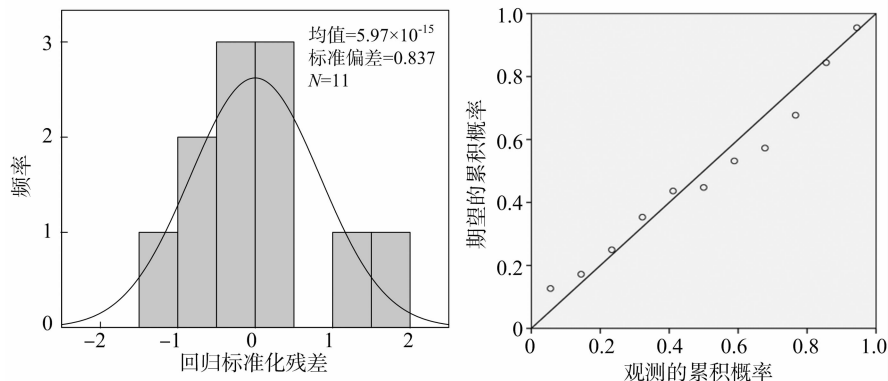


图3 1 000 kHz 频率下的直方图与 P-P 图

包括土壤容重、土壤温度、土壤含水率等相关参数<sup>[19-20]</sup>。本研究利用 SPSS 软件的统计分析功能对土壤相对介电常数进行了多元线性回归分析,得到了如下结论:在测试频率一定的条件下,土壤的相对介电常数作为预测目标与含水率、温度和容重预测因子之间的规律可用多元线性回归模型进行拟合;通过检验得出  $r$  均大于 0.970,预测目标与预测因子之间高度正相关,说明本研究采用的多元线性回归模型具有很好的实际应用价值;从预测的多元线性回归方程可以看出,在不同测试频率下,影响土壤的相对介电常数的 3 个预测因子中,权重

的大小顺序始终为容重 > 温度 > 含水率。

#### 参考文献:

- [1] 邹 维. 土和土壤的工程名称与分类及使用区别[J]. 水土保持应用技术, 2010(2): 26-27.
- [2] 潘金梅, 张立新, 吴浩然, 等. 土壤有机质对土壤介电常数的影响[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 13-24.
- [3] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines[J].

王占义,侯佳,吴迪.羊草根系和叶片生长对煤粉尘沉降的响应[J].江苏农业科学,2017,45(7):261-264.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2017.07.068

# 羊草根系和叶片生长对煤粉尘沉降的响应

王占义<sup>1</sup>,侯佳<sup>2</sup>,吴迪<sup>3</sup>

(1. 内蒙古农业大学草原与资源环境学院,内蒙古呼和浩特 010018; 2. 内蒙古农业大学职业技术学院,内蒙古包头 014109;

3. 内蒙古呼伦贝尔市水利规划设计研究院,内蒙古呼伦贝尔 021000)

**摘要:**粉尘污染是露天煤矿开采中主要的环境问题之一,粉尘沉降对周边生态系统具有重要影响。采用室内人工喷撒煤粉到水培植物的方法,模拟研究了煤粉尘沉降对草地植物羊草的影响。结果表明,以  $1.18 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  的剂量喷撒煤粉 35 d 时,羊草根系生长速率、叶片净光合效率、气孔导度均降低,并最终导致植株生物量减小,与对照相比,植株总生物量显著减少。说明露天煤矿的粉尘沉降会阻碍矿区周边草地植物羊草的生长,长期作用可能导致周边草地植物多样性的改变。

**关键词:**粉尘;矸石粉;羊草;草原;光合

**中图分类号:** S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2017)07-0261-04

粉尘污染是露天煤矿开采过程中的主要环境问题之一。该问题在美国、中国、印度、俄罗斯、南非等 5 个国家普遍存在,这些国家占有了全球 84% 的煤炭绝对持有量<sup>[1-2]</sup>。近年

来内蒙古草原开采了很多露天煤矿,粉尘污染在地处干旱区的内蒙古草原也比较严重。2010 年内蒙古的煤炭产量在全国排第 1 位<sup>[3]</sup>。全国 14 个大型露天煤矿有 11 个分布在内蒙古<sup>[4]</sup>。大部分露天煤矿分布在内蒙古草原,而这些草地是当地畜牧业和牧民赖以生存的基础。因此,粉尘可能通过影响草地健康进而影响到居民的生存和健康。2011—2013 年内蒙古锡林浩特市至少有  $106 \text{ km}^2$  的草地被煤粉尘污染,67 万元人民币被用于支付草地污染补偿费<sup>[5]</sup>。

粉尘污染对生态系统具有重要影响。煤粉尘可以增加土壤表面温度<sup>[6]</sup>及矿坑淋溶地下水的 pH 值和金属离子浓度<sup>[7-8]</sup>。这些淋溶液包含氟、硫化物,对植物生长产生危害<sup>[9]</sup>。在南非的研究发现,煤尘排放遮挡阳光,减弱了植物

收稿日期:2016-06-22

基金项目:高等学校博士学科点专项基金(编号:20131515120003);

内蒙古农业大学博士科研启动基金(编号:BJ2013C-3);中国博士后科学基金(编号:2015M572634XB)。

作者简介:王占义(1981—),男,内蒙古包头人,博士,讲师,研究方向为草地环境污染与植物根系。Tel: (0471) 5193953; E-mail: zhanyiwang2006@163.com。

通信作者:侯佳,内蒙古呼和浩特人,讲师,研究方向为园艺植物生理与解剖。E-mail: hj116116@sina.com。

Water Resources Research, 1980, 16(3): 574-582.

[4] Jackson T J, Schmugge J, Engman E T. Remote sensing applications to hydrology: soil moisture[J]. Hydrological Sciences Journal, 1996, 41(4): 609-624.

[5] 康学远, 林琳, 刘义佳, 等. 土壤介电常数-含水量关系模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(8): 8-12.

[6] 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 不同类型土壤介电常数与体积含水量经验关系研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 263-268.

[7] Velázquez - Martí B, Gracia - López C, Plaza - Gonzalez P J. Determination of dielectric properties of agricultural soil[J]. Biosystems Engineering, 2005, 91(1): 119-125.

[8] 雷磊, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 干旱区盐渍土介电常数特性研究与模型验证[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 125-133.

[9] 司马文霞, 艾琳丰, 袁涛, 等. 土壤介电频变特性试验研究及其对接地极冲击特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4247-4253.

[10] 张鹏. 主要因素对土壤介电特性的影响分析研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.

[11] 郭文川, 张鹏, 宋克鑫, 等. 壤土介电特性与水分检测频率及温度影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(8): 713-718.

[12] 田兵. 多元线性回归分析及其实际应用[J]. 阴山学刊(自然

科学版), 2011, 25(1): 16-19.

[13] Shang J Q, Scholte J W, Rowe R K. Multiple linear regression of complex permittivity of a till at frequency range from 200 MHz to 400 MHz[J]. Sensing and Imaging, 2000, 1(3): 337-356.

[14] Shi T Z, Cui L J, Wang J J, et al. Comparison of multivariate methods for estimating soil total nitrogen; with visible/near-infrared spectroscopy[J]. Plant and Soil, 2013, 366(1): 363-375.

[15] Bilgili M. Prediction of soil temperature using regression and artificial neural network models[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2010, 110(1): 59-70.

[16] 周晨, 冯宇东, 肖匡心, 等. 基于多元线性回归模型的东北地区需水量分析[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(1): 118-123.

[17] 黄安, 杨联安, 杜挺, 等. 基于多元成土因素的土壤有机质空间分布分析[J]. 干旱区地理(汉文版), 2015, 38(5): 994-1003.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[19] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[20] Schmugge T J, Jackson T J, Mckim H L. Survey of methods for soil moisture determination[J]. Water Resources Research, 1980, 16(6): 961-979.