

基于磁感式大地电导率仪的土壤盐分解译模型^①

李 兵¹, 刘广明^{1*}, 苏里坦², 陈 诚³, 杨劲松¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 荒漠与绿洲生态国家重点实验室(中国科学院新疆生态与地理研究所), 乌鲁木齐 830011; 3 黄河水利职业技术学院, 河南开封 475004)

摘 要:以新疆伊犁地区盐渍土为研究对象,通过分层采样测定土壤盐分含量,采用 EM38 和 EM31 两种磁感式大地电导率仪测定土壤表观电导率,分析不同土壤层次盐分与土壤表观电导率的相关性,应用逐步回归方法构建土壤盐分解译模型,并进行了模型精度验证。研究表明:土壤盐分含量与土壤表观电导率之间呈显著线性相关,构建的土壤盐分解译模型具有良好的精度。本研究将为精确解译伊犁地区土壤盐渍化特征提供重要的方法支撑。

关键词:磁感式大地电导率仪;盐分解译模型;土壤盐渍化;干旱地区

中图分类号:159.2 文献标识码:A

传统的土壤盐分测定方法比较费时费力,不利于大面积土壤盐分的快速调查和测定^[1-2]。磁感式大地电导率仪测量方法由于其无需电极插入、测量速度快、数据获取量大,在土壤盐渍化调查、监测与评估研究中得到了广泛应用^[3-5]。磁感式大地电导率仪能在地表直接测量土壤表观电导率,为非接触直读式,适用于大面积土壤盐渍化的测定,较常规方法的调查速度快 100 倍以上^[6],能轻松快速地完成一般常规测定。大地电导率仪 EM38 可以进行土壤质地、盐分状况的调查,对复垦耕地质量进行定性评价,为水利工程和防护林体系建设提供科学依据,指导节水灌溉^[1]。刘海霞和丁建丽^[7]发现 50 cm 以内水平模式对电导率值更敏感。李海涛等^[8]发现在不同的深度上,EM38 和传统方法之间都存在很好的相关性。

新疆位于干旱半干旱地区,面积约为我国国土总面积的六分之一。该地区光照充足、降雨量小、蒸发量大,土壤盐分表聚现象严重^[7],不利于植物生长。新疆耕地大部分处在冲积洪积扇扇缘及三角洲地带,能够开垦的后备耕地资源大都远离水源;这些地方地势平缓,地下水径流不畅,土壤极易积盐,加上灌溉的不合理,极易造成地下水位的升高,土壤次生盐渍化危害严重。伊犁河谷有“塞外江南”的美誉,降雨量较新疆其他地区要多,当地以种植水稻为主;经过反复淋洗,土壤盐分含量较新疆其他地区低得多。尽

管如此,土壤盐分亦会制约当地农业的发展。对伊犁地区土壤盐分含量进行精确解译与评估,对于指导农业生产,消减农田土壤盐分障碍具有重要的意义。本研究以伊犁地区农田为研究对象,通过面域土壤盐分调查,结合磁感式大地电导率仪测定土壤表观电导率,获得土壤盐分与土壤表观电导率的相关性,建立分层土壤盐分解译模型,为精确评估伊犁地区土壤盐分含量提供可靠方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆伊犁地区察布查尔锡伯族自治县纳达齐牛录乡(43°17' ~ 43°57' N, 80°31' ~ 81°43' E),属大陆性北温带温和干旱气候,热量丰富,光照充足,四季分明,年均气温 7.9 °C,极端最高气温 39.5 °C,极端最低气温 -43.2 °C。年平均日照时数 2 810.7 h, ≥10°C 的积温 3 389.1 °C,无霜期 161 d,年均降水 206 mm。

1.2 磁感式大地电导率仪的结构与原理

磁感式大地电导仪为非接触直读式,能在地表直接测量土壤表观电导率。其主要由信号发射(T)和信号接收(R)两个端口组成,两者之间相隔一定的距离,信号发射端子以具有特定频率的交流电为动力,发射频率为 14.6 kHz。工作时,信号发射端子产生一个随

①基金项目:新疆维吾尔自治区科技计划项目(201531116)、国家重点研发计划项目(2016YFC0501402)和河南省科技计划项目(152102110097)资助。

* 通讯作者(gmliu@issas.ac.cn)

作者简介:李兵(1987—),男,河南浉池人,硕士,主要研究方向为土壤改良与作物栽培。E-mail:libing3130@126.com

时间变化并且强度随土层深度增加而逐渐减弱的原生磁场,该磁场强度随时间发生变化,因此在大地上产生非常微弱的交流感应电流,此电流又诱导出次生磁场。原生磁场信息和次生磁场信息被信号接收端子接收。

原生磁场和次生磁场均是两端子间距、交流电频率及大地电导率的复杂函数,且次生磁场与原生磁场强度的比值与大地电导率呈线性关系,可表示为:

$$EC_a = 4 (H_s / H_p) / \omega \mu_0 S^2$$

式中: EC_a 为大地电导率(mS/m); H_s 、 H_p 分别为次级磁场和初级磁场; $\omega = 2\pi f$, f 为发射频率(Hz); S 为发射端子与接收端子之间距(m); μ_0 为空间磁场传导系数^[6, 8-11]。

1.3 研究方法

EM38-MK2 大地电导率仪包含 2 个接收线圈,当线圈处于垂直偶极方向时,可测的有效深度范围分别为 0.75 m 和 1.5 m 以内;当线圈处于水平偶极平面时,可测有效深度则分别为 0.75 m 和 0.375 m 以内^[12]。本研究采用水平方向 0.75 m 和垂直方向 1.5 m 的数据^[6],分别用 H38 和 V38 表示。EM31-MK2 大地电导率仪水平和垂直模式测量深度分别为 3.0 m 和 6.0 m,用 H31 和 V31 表示。

将 GPS 与 EM38-MK2 和 EM31-MK2 连接,选取适当的位置同时记录样点的坐标值、EM38 和 EM31,读数前需校准 EM38。将 EM38 垂直放于地表,记录其读数;然后水平放置,记录读数。将 EM31 放置在没有金属的约 1 m 的架子上或人工(除去身上的金属和电子物品)抱离地面 1 m,分别读取其垂直和水平方向的读数并记录。记录完数据后,在原点用梅花状五点采样法分别采取 0~30、30~60、60~100cm

土层土样,各层土样混匀后选取适量样品装入采样袋内,带回实验室风干过筛后备用。

1.4 测试项目及方法

带回实验室的土壤样品测定 pH、电导率和盐分含量。利用 SPSS19.0 进行描述性统计分析,在 Excel 中分析土壤盐分含量与 H38、V38、H31 和 V31 之间的相关关系,然后利用 SPSS19.0 进行逐步回归。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分和表观电导率的描述性统计

土壤表观电导率是指由大地电导率仪直接测得的读数,大地表观电导率可以作为土壤盐分的间接表征^[3]。研究区域土壤质地有壤土、粉壤土和砂壤土。0~30 cm 土层土壤为弱碱性,pH 平均值为 7.67,30~60 cm 土层和 60~100 cm 土层土壤 pH 分别为 8.69 和 8.68。

如表 1 所示,0~30 cm 土层土壤盐分含量有较大的极差,为 13.051 g/kg,且平均值在 3 个层次土体中最高,表现一定的盐分“表聚”现象。不同深度土壤表观电导率不同,总体上随着土壤深度的增加,土壤表观电导率呈现先减小后增大的趋势^[13]。不同地域间土壤表观电导率差异较大。测定位在 1.5 m 以内的土体土壤表观电导率平均值均小于 1 dS/m,土壤盐分含量较低;最大值与最小值之间的比值分别为 69.11 和 51.00,差异明显。

由表 1 可知,不同样地之间土壤表观电导率差异较大。随着土体深度的增加,土壤表观电导率在逐步增加,相对于平均值,离散程度也不断增加;土壤盐分在深层土体中差异较大,在表层土体中由于水分的淋洗,土壤盐分含量较低,不同样地之间盐分比较趋于一致。

表 1 土壤盐分和表观电导率的描述性统计分析
Table 1 Descriptive statistics of soil salinity and apparent electric conductivity

测定项目		N	极小值	极大值	均值	标准差	方差	偏度	峰度
盐分(g/kg)	[0~30cm]	70	0.251	13.302	1.985	3.247	10.544	2.162	3.761
	(30~60cm)	70	0.268	12.393	1.887	2.643	6.986	1.923	3.560
	(60~100cm)	70	0.245	8.126	1.837	2.247	5.047	1.315	0.606
电导率(dS/m)	H38	70	0.090	6.220	0.852	1.178	1.388	2.491	6.328
	V38	70	0.090	4.590	0.794	0.903	0.816	2.195	4.636
	H31	70	1.480	10.120	2.976	1.698	2.885	2.081	4.456
	V31	70	1.660	15.200	3.995	2.643	6.986	2.084	4.558

注:表中[0~30cm]表示 0~30 cm 土层土壤盐分含量,包含 0 和 30 cm;(30~60cm)表示 30~60 cm 土层土壤盐分含量,包含 60 cm 但不包含 30 cm;(60~100cm)表示 60~100 cm 土层土壤盐分含量,包含 100 cm 但不包含 60 cm。下同。

2.2 土壤盐分与表观电导率的相关性

不同土层土壤盐分含量与土壤表观电导率之间

存在极显著的相关关系。如表 2 所示,比较不同土层土壤盐分含量与土壤表观电导率之间的相关系数可

知, 0 ~ 30 cm 土层和 30 ~ 60 cm 土层土壤盐分含量与 H38 的相关性最高, 分别为 0.959 2 和 0.916 2; 与 V38 的相关关系次之。60 ~ 100 cm 土层由于深度原因与 H31 的相关性最好, 达到 0.885 0。不同土层土壤盐分与土壤表观电导率之间的相关系数高低可以作为土壤盐分与土壤表观电导率之间逐步回归模型

的参考依据。

不同测定定位之间土壤表观电导率存在极显著的相关关系, 相关系数均大于 0.978。由不同测定定位之间土壤表观电导率的相关性可知, 浅层土体土壤盐分与表观电导率之间的相关性小于深层土体, 可能与表层土体的灌溉、播种和耕作等人为活动有关。

表 2 不同土层土壤盐分与土壤表观电导率的 Pearson 相关系数
Table 2 Pearson correlation coefficients between soil salinities and soil apparent electric conductivities in different layers

	[0~30cm]	(30~60cm]	(60~100cm]	H38	V38	H31	V31
[0~30cm]	1						
(30~60cm]	0.920 4**	1					
(60~100cm]	0.904 0**	0.950 4**	1				
H38	0.959 2**	0.916 2**	0.871 3**	1			
V38	0.943 9**	0.915 7**	0.882 9**	0.982 9**	1		
H31	0.932 7**	0.911 3**	0.885 0**	0.982 4**	0.985 3**	1	
V31	0.918 3**	0.907 1**	0.877 0**	0.978 0**	0.984 6**	0.997 0**	1

注: **表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)显著相关, 样本容量为 70。

2.3 电磁感应式土壤盐分解译模型

2.3.1 单一测定模式下土壤盐分解译模型 土壤电导率与单一测定模式下土壤表观电导率的关系模型为 $y=a+bx$, 其中 y 为土壤盐分含量(g/kg), x 为不同测定模式下土壤表观电导率, a 、 b 为常数, r 为相关系数。由表 3 可知, 各层土壤盐分与大地电导率仪在各种测量模式下获得的数据均存在很好的线性关系。0 ~ 30 cm 土层土壤盐分与 EM38 在水平模式下的相关性最高, 30 ~ 60 cm 和 60 ~ 100 cm 土层土壤盐分与 EM31 在水平模式下相关性最好。H38、V38、H31、V31 四种测定模式与不同土层土壤盐分回归模型的相关系数变化范围分别为 0.734 5 ~ 0.902 0,

0.753 0 ~ 0.868 2, 0.769 9 ~ 0.867 5 和 0.757 3 ~ 0.826 7, 对各关系模型进行相关性检验, 结果表明差异在 $P<0.01$ 水平下均具有统计学意义, 表明土壤盐分与单一测定模式下土壤表观电导率之间的回归效果显著。

比较 1 m 土体内土壤盐分与土壤表观电导率之间关系模型的相关系数发现: 土壤盐分与 4 种测定模式的相关系数均随着土体深度的增加而逐渐减小; 0 ~ 30 cm 土层土壤盐分与 4 种模式的相关系数随着测定位的增加而不断减小, 30 ~ 60 cm 土层呈现先降后升再降的趋势, 60 ~ 100 cm 土层则表现出先升后降的变化规律。

表 3 单一测定模式下土壤盐分与表观电导率的关系模型
Table 3 Relation models between soil salinity and apparent soil electrical conductivity under one measurement mode

土层(cm)	x	a	b	R^2
[0~30]	H38	-0.239 0	2.587 9	0.902 0
	V38	-0.720 3	3.340 0	0.868 2
	H31	-3.407 9	1.786 7	0.867 5
	V31	-2.541 0	1.119 8	0.826 7
(30~60]	H38	0.233 1	1.994 7	0.825 4
	V38	-0.181 4	2.622 7	0.824 6
	H31	-2.297 8	1.406 1	0.827 5
	V31	-1.691 1	0.897 9	0.818 6
(60~100]	H38	0.5790	1.5814	0.734 5
	V38	0.2260	2.1064	0.753 0
	H31	-1.5074	1.1399	0.769 9
	V31	-1.0066	0.7258	0.757 3

2.3.2 复合模式下土壤盐分解译模型 鉴于土壤盐分与不同测定模式下土壤表观电导率之间的线性关系, 以相关关系最高的方程为基准模型, 逐步增加其他测定模式下土壤表观电导率作为自变量, 以增加模型所包含的信息, 提高解译精度, 建立复合模式下的逐步回归模型如表 4 所示, 其中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 为常数, y 表示土壤盐分含量(g/kg), R^2 为决定系数。

由表 4 可知, 复合模式下土壤盐分与表观电导率之间的相关关系均高于单一模式, 变化范围为 0.794 ~ 0.920, 说明以多测定模式进行土壤盐分的解译模型精度要高于单一模式。不同土体的回归模型包含的变量种类和数量不同, 解译模型的相关系数随着土体深度的增加而逐渐减小, 说明表层土体解译模型的精度要高于深层土体。

2.3.3 回归模型的残差分析 回归模型标准化残差的直方图表示模型精度的大小, 其变化越接近正态分布, 回归模型越准确; 回归模型标准化残差的标准

表 4 复合模式下土壤盐分与表观电导率的关系模型
Table 4 Relation models between soil salinity and apparent soil electrical conductivity under compound mode

土层(cm)	$y = a + b \times H38 + c \times V38 + d \times H31 + e \times V31$					R^2
	a	b	c	d	e	
[0~30]	-0.216 0	2.499 0	0	0	0	0.920
(30~60]	-0.069 4	1.018 8	1.259 5	0	0	0.846
(60~100]	-1.310 3	0	1.060 2	1.924 1	-0.879 4	0.794

p-p 图表示样本数据偏离标准值的程度。如图 1 ~ 图 3 所示,不同土体复合模式下土壤盐分逐步回归方程残差均服从正态分布,各个回归模型能够很好地用来表征土壤盐分与磁感式大地电导率仪测定的土壤表观电导率之间的关系;其中,0~30 cm 土层回归方程残差最服从正态分布,表明其解译模型精度最高。由回归方程标准化残差的标准 p-p 图可知:样本容量为 60 的各土层回归模型中,数据在标准值周围呈现规律性分布,没有明显偏离的情况,回归方程比较准确。

2.3.4 解译模型的校验 应用另外 10 个不同于模型建立时使用的数据,对复合模式下土壤盐分解译模型(表 4)进行拟合度、显著性检验,如表 5 所示。其中 F 表示 F 值, R^2 为决定系数, SE 为标准误。由决定系数可以得出,各模型拟合度均较高,不同土层模型拟合度不同,表层模型拟合度较高。对模型进行检验可知 F 值均较高,在 $P < 0.01$ 水平表现显著,表明各模型的拟合效果均达到极显著水平,即各关系模型的自变量与因变量之间确实存在显著的线性相关关系。

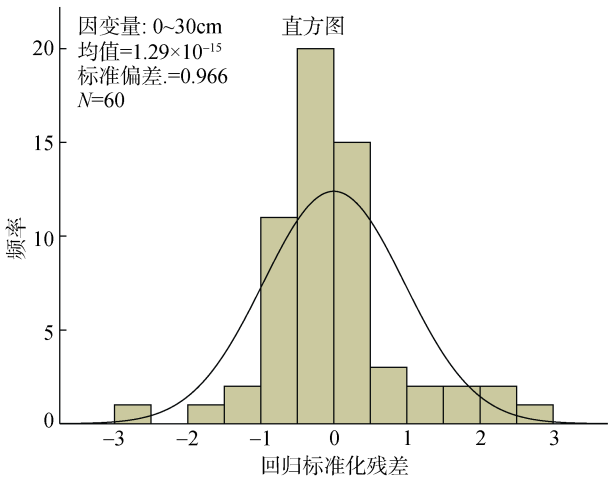


图 1 0~30 cm 土层回归模型的直方图和 p-p 图
Fig. 1 Histogram and p-p graph of regression model of 0—30 cm

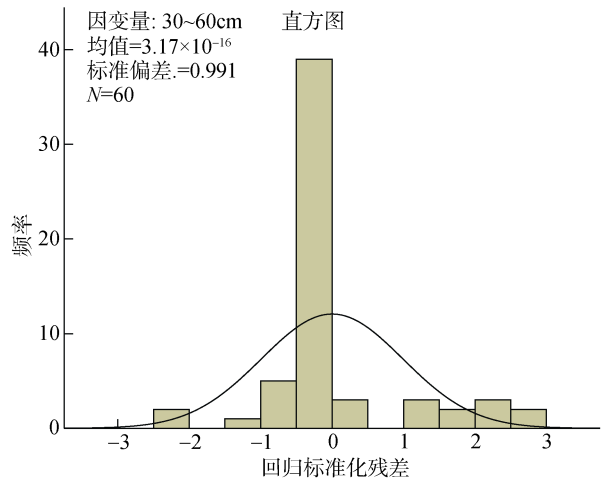


图 2 30~60 cm 土层回归模型的直方图和 p-p 图
Fig. 2 Histogram and p-p graph of regression model of 30—60cm

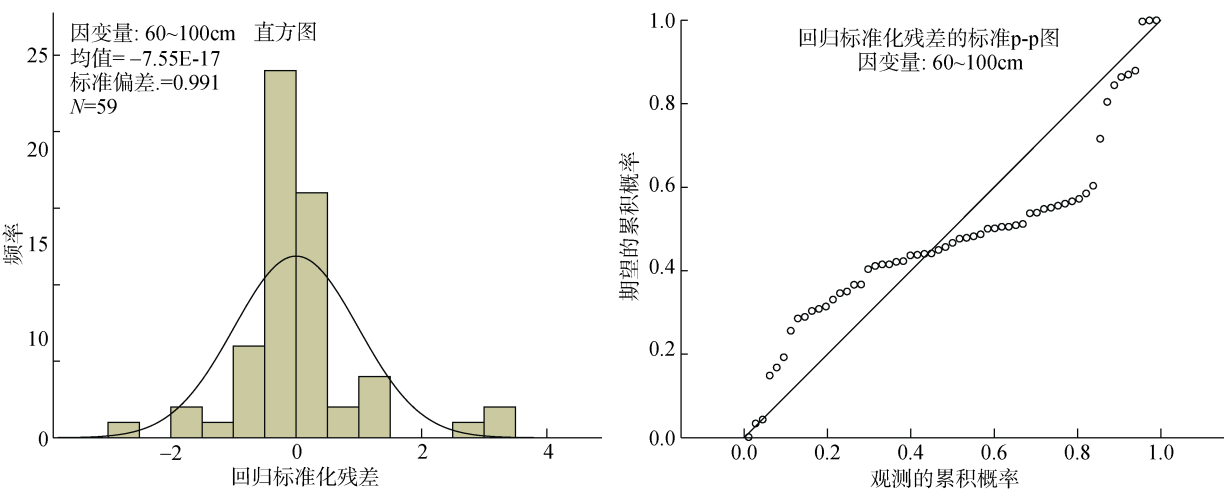


图 3 60 ~ 100 cm 土层回归模型的直方图和 p-p 图

Fig. 3 Histogram and p-p graph of regression model of 60—100cm

表 5 回归模型精度验证

Table 5 Accuracy verification of regression model

土层(cm)	<i>F</i>	<i>R</i> ²	SE
[0~30]	193.962**	0.920	0.072
(30~60]	122.632**	0.846	0.025
(60~100]	265.293**	0.794	0.068

3 结论

1) 伊犁河谷土壤盐分在水平方向上具有强烈的变异性,表观电导率也有明显的变异性,二者表现出一致性;在垂直方向上,土壤表观电导率随测定位的加深而不断增加,土壤盐分则有升有降,表现出一定的“分异性”。土壤盐分含量与土壤表观电导率呈显著线性相关,在一定程度上可以用土壤表观电导率表征土壤盐分含量。

2) 不同土层土壤盐分含量与磁感式大地电导率仪的测定深度有一定的关系,表现在 0 ~ 30 cm 和 30 ~ 60 cm 土层土壤盐分含量与 M38(较浅的测定位)测定的土壤表观电导率呈现更为显著的线性相关,60 ~ 100 cm 土层土壤盐分含量则与 EM31 测定的土壤表观电导率相关性更强。

3) 本研究构建的基于磁感式大地电导率仪的伊犁地区分层土壤盐分解译模型具有良好的精度,能够用于该地区土壤盐渍化精确评估。

参考文献：

[1] 赵军伟, 蒋平安, 盛建东, 等. EM38 电磁发生仪测定结

果的影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 362–366

[2] 杨劲松, 姚荣江. 基于磁感式土壤表观电导率空间变异性的插值方法比较[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 50–57

[3] 李晓明, 杨劲松, 刘梅先, 等. 基于电磁感应的典型干旱区土壤盐分空间异质性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12):97–101

[4] 姚荣江, 杨劲松. 基于电磁感应仪的黄河三角洲地区土壤盐分时空变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 107–113

[5] 李洪义, 史舟, 吴次芳, 等. 基于 EM38 的滨海盐土剖面电导率原位测定[J]. 土壤学报, 2013, 50(6):1231–1235

[6] 刘广明, 杨劲松, 鞠茂森, 等. 电磁感应土地测量技术及其在农业领域的应用[J]. 土壤, 2003, (1):27–29

[7] 刘海霞, 丁建丽. 基于 EM38 和遥感影像的土壤表观电导率建模研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(11): 122–126

[8] 李海涛, 李小梅, Philip B, 等. 电磁感应方法在土壤盐渍化评价中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(1): 95–98

[9] 姚荣江, 杨劲松, 刘广明. EM38 在黄河三角洲地区土壤盐渍化快速检测中的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 67–73

[10] 夏英辉, 熊黑钢. EM38 在土壤盐分分带中的运用研究[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4):628–633

[11] 吕真真, 杨劲松, 刘广明. 基于 EM38—MK2 的滨海土壤电导率精确解译模型[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32 (10): 894–900

[12] 孙运朋, 张振华, 陈小兵, 等. 大地电导率仪 EM38—MK2 数据分析与应用拓展研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(4): 135–137

[13] 吴亚坤, 杨劲松, 李晓明. 基于光谱指数与 EM38 的土壤盐分空间变异性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(4): 1023–1027

Interpretation Model of Soil Salinity Based on Electrical Conductivity Meter of Electromagnetic Induction

LI Bing¹, LIU Guangming¹, Sulitan², CHEN Cheng³, YANG Jinsong¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China*; 3 *Yellow River Conservancy Institute, Kaifeng, Henan 475004, China*)

Abstract: Taking salinized soil as research object in Ili City of Xinjiang Uygur Autonomous Region, soil salinities were measured in different layers and soil electrical conductivity were recorded by EM38 and EM31. The correlation between soil salinities and apparent soil electrical conductivities in different layers were analyzed and interpretation models of soil salinity were established. The results showed that significant liner correlation existed between soil salinities and apparent soil electrical conductivities in different layers, which indicate the high accuracy of the established models. This study can provide an important support in accurately interpreting the characteristic of soil salinity in Ili.

Key words: Electromagnetic induction meter; Interpretation model; Soil salinization; Arid region