# E M <sup>38</sup> 在黄河三角洲地区土壤盐渍化 快速检测中的应用研究

姚荣江,杨劲松 ,刘广明

(中国科学院南京土壤研究所, 江苏南京 210008)

摘 要:针对目前黄河三角洲地区存在的土壤盐渍障碍问题,以该地区典型地块为研究对象,电磁感应仪 EM38 检测与田间采样相结合,分析土壤电导率的剖面分布特征,建立磁感式表观电导率与土壤电导率间的回归模型,并对运用电磁感应仪EM38 划分土壤盐渍剖面类型进行探讨。结果表明:研究区表层土壤盐分具有较强的表聚性与变异强度,剖面各土层电导率间存在着关联性;土壤电导率与磁感表观电导率 EM<sub>h</sub>、EM<sub>o</sub> 间呈极显著的相关关系和对数相关关系,EM<sub>h</sub> 对浅层土壤电导率的解译精度较高,对深层土壤电导率、EM<sub>o</sub> 的解译精度要高于 EM<sub>h</sub>;利用电磁感应仪EM38 可将研究区土壤盐渍剖面准确划分为表聚型、底聚型与均匀型三种类型,其中表聚型 与底聚型是研究区最主要的盐渍剖面类型,进一步的统计分析证明了采用电磁感应仪EM38 对土壤盐渍剖面的分 类结果具有较高的精度与可信度。该结果对研究黄河三角洲地区土壤盐渍化的发生机理、预测与评估该地区土壤 盐渍化的发生发展具有重要参考意义。

**关键词:**电磁感应仪EM<sup>38</sup>;黄河三角洲;盐渍化;快速检测 **中图分类号:**S<sup>151.9</sup>S<sup>159-3</sup>**文献标识码:**A**文章编号:**1000-7601(2008)01-0067-07

盐渍化是制约黄河三角洲地区农业生产发展的 主要障碍因子之一,盐渍土地的改良利用对实现该 区农业资源的可持续利用具有重要意义,掌握大面 积农田盐渍化的程度以及动态跟踪观测盐渍化发展 过程是科学管理、合理改良利用盐渍化土地的必要 前提。由于传统的取样方法、取样数量受需要较多 人力、物力等因素的限制,往往不能反映出所希望掌 握的完整信息。电磁感应仪EM38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 土壤盐渍化的测量,EM38 用联接 DL 600 数据采集 器电缆的方式,较常规方法的调查速度快 100 倍以 上,能轻松快速地完成一般常规测量<sup>引</sup>。

自 20 世纪 90 年代以来,国外已利用 E M 38 对 土壤盐分、含水量、养分以及土壤组成等性质进行了 大量的研究<sup>2,3</sup>。国内在利用电磁感应仪进行土壤 盐渍化评价方面也有较多报道,如宋长春等<sup>4</sup>在分 析了盐渍化土壤导电性决定因子的基础上,提出了 针对不同土壤物理特性对电磁感应仪进行校正的理 论依据。陈玉娟<sup>9</sup>分析了 E M 38 大地电导仪的感 应灵敏度随距地高度的变化,并对表观电导率与土 壤含盐量的相关性进行了探讨。赵军伟等<sup>9</sup>通过 运用EM<sup>38</sup>电磁感应仪测量法调查了新疆阿瓦提县 丰收灌区土壤含盐量,并将EM38测定读数与常规 测定方法所获得的结果进行比较分析。李海涛 等<sup>7]</sup>利用电磁感应仪EM<sup>38</sup>对新疆焉耆盆地土壤 表观电导率进行测量,分析了电磁感应方法测得的 结果和室内分析结果之间的相关关系,并对焉耆盆 地土壤盐渍化状况进行了定性评价。然而,目前国 内现有研究以西北内陆地区为主,对河口地区及海 涂土壤的研究较少。为此,本试验以黄河下游三角 洲典型区域为研究对象,结合电磁感应仪EM38的 田间测量和田间采样,研究了土壤电导率的剖面分 布特征,建立了电磁感应仪测量值和土壤电导率间 的回归模型,并运用电磁感应仪EM38对该地区土 壤盐渍剖面类型的划分进行了探讨。该结果不仅为 黄河三角洲地区盐渍土地的科学管理与合理改良利 用提供一定参考依据,同时对研究该地区土壤盐渍 化的发生机理、预测与评估该地区土壤盐渍化的发 生发展具有重要意义。

- 1 材料与方法
- 1.1 电磁感应仪EM 38 的结构与原理 电磁感应仪EM 38 总长度 1 m, 主要由信号发

作者简介:姚荣江(1980一),男,江苏靖江人,博士研究生,主要从事土壤水盐运动和土壤盐渍化预测预报。E-mail ijyao @ssas ac en。 通讯作者:杨劲松(1959一),博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为土壤盐渍化防控和盐渍土资源利用。E-mail jsyang @ssas.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期:2007-03-20

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-406-3);国家重点基础研究发展规划项目(2005CB121108)

射 $T_x$ )和信号接受( $R_x$ )两个端口组成(图<sup>1</sup>),两者 之间相隔一定的距离(S),发射频率为<sup>14.6</sup> kHz。 工作时,首先信号发射端子产生磁场强度随大地深 度的增加而逐渐减弱的原生磁场( $H_p$ ),原生磁场的 强度随时间动态变化,因此该磁场使得大地中出现 了非常微弱的交流感应电流。这种电流又诱导出次 生磁场( $H_s$ ),信号接受端子既接受原生磁场信息又 接受次生磁场信息。通常,原生磁场  $H_p$ 和次生磁 场 $H_s$ 均是两端子间距(S)、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<sup>§</sup>

$$EC_a = 4(H_s/H_p)/\omega\mu_0 S^2$$
 (1)

式中,  $EC_a$  为大地电导率(mS/m);  $H_s$ 、 $H_p$  分别为次 生磁场和原生磁场强度;  $\omega = 2 \mathfrak{f}$ , f 为发射频率 (Hz); S 为发射端子与接受端子之间的距离(m);  $\mu_0$ 为空间磁场传导系数。



**图**1 电磁感应技术原理示意

Fig. 1 Theoretical principle of electromagnetic induction instruments

#### 1.2 **样品与数据采集**

采样地点位于以山东省垦利县永安镇'东七村' 与'东义和村'为主体的区域,地理位置 118°47′51″ ~118°50′27″E, 37°33′26″~37°34′6″N, 该区东临渤 海,属典型黄河下游三角洲地区。采样点位置与数 量的确定综合考虑当地土质、植被类型以及土地利 用方式等因素。首先,分别采用电磁感应仪EM38 的水平和垂直测量模式,将其置于地表以读取采样 点剖面的表观电导率(分别记作  $EM_b$  和  $EM_r$ );然 后对测量完毕后的采样点同步进行土壤剖面挖掘, 每个采样点剖面均按 0~10、10~20、20~40、40~  $60, 60 \sim 80, 80 \sim 100, 100 \sim 120, 120 \sim 140, 140 \sim$ 160、160~180、180~200cm 进行分层采样, 共挖取 84个地下水埋深大于2.0m的土壤剖面,其中棉花 地 33 个, 盐蒿地 15 个, 光板地 18 个, 其余均为杂草 地。各采样点的相对坐标采用差分 GPS 定位技术 确定。

年9月下旬(均为旱季)分两次进行。此时正值棉铃 吐絮期,一方面这时的地下水埋深对土壤次生盐渍 化的影响较大,地下水性质受人为因素的影响也较 小,另一方面9月中旬至来年3月地下水动态可视 为相对稳定期,此时耕层土壤盐分及地下水性质较 为稳定,地下水的消退主要靠天然蒸发,而此时的蒸 发量也不大。

#### 1.3 **样品处理与分析**

采集的土样带回实验室内自然风干, 磨碎, 过2 mm 筛后备用。所有的土样均制备 1:5 土水比浸提 液,并测定其电导率 EC 1:5; 同时采用常规分析法 (土水比 1:5) 确定土壤各离子组成含量, 计算出相 应的土壤全盐含量, 具体测定方法参考 土壤农业化 学分析方法》<sup>[9]</sup>。

本研究采用土壤电导率 EC 1:5来分析电磁感应 仪测量值与土壤盐渍特征之间的关系,一方面是由 于土壤全盐含量和土壤电导率 EC 1:5之间有极显著 的相关性,另一方在于电磁感应仪测量值反映的是 土壤中游离态导电介质的含量,因此,采用浸提液电 导率 EC 1:5作为土壤盐渍化的指标与全盐含量相比 更具有真实性。

### 2 结果与分析

#### 2.1 土壤电导率的经典统计分析

表1列出了所有采样剖面各层次土壤电导率 EC1:5的统计特征值,可以看出,研究区各土层电导 率的特征参数值具有明显差异性。0~10cm 土层 电导率的变化幅度为 15.31 dS /m,最大值与最小值 之比达86.1,均明显高于其余各土层。从平均值来 看,各层土壤电导率均值的变化范围在 2.302~  $4.062 \, dS / m$ , 对应的土壤平均含盐量变化范围为 6.66~11.85g/kg,总体上属于重度盐化土类型,说 明了土壤高度盐渍化是制约该区农业生产的重要因 素;此外,不同深度电导率均值具有一定的差异,0~ 10cm 土壤电导率要明显高于其它土层,说明各层 土壤平均电导率在垂直方向上变异较强,也就是说 总体上盐分分布具有较强的表聚性,这主要与黄河 下游三角洲地区特定的气候、水文水资源、地形等条 件而导致的季节性积盐密切相关的。由变异系数可 以看出,各土层电导率的变异程度相差较大,变化范 围在 46.80%~105.24%, 除表层 0~10cm 表现为 强变异性外,其余各土层均呈中等变异性,造成这种 现象的原因在于研究区内微地形起伏、土地利用方 式差异、灌溉制度以及耕作方式不同等因素;随着土

(C样点采集分别于 2004 年 10月中下旬及 2005 publi 壤深度的增加,这些因素对盐分的影响逐渐减弱,导t

致盐分在水平方向上的变异强度趋弱,表现为土壤 电导率的变异系数随深度增加不断减小,这一点可 以从表1明显看出。

对各层之间土壤电导率进行 Pearson 相关系数 分析,结果如表 2 所示。可以看出,各土层电导率之 间相关系数在 0.622~0.980,都达到了 0.01 的极 显著水平( $n = 84, R_{0.01} = 0.2784$ ),且相邻层次土壤 电导率之间的相关系数较高,均达到90%以上,随 着深度差异的增大其相关系数则逐渐降低。该结果 表明研究区不同土层土壤盐分含量在空间上并不是 完全独立的,而是存在一定的关联性,其原因是与黄 河三角洲地区独特的气候、地形地貌以及土壤等因 素所导致的活跃的水盐运动密切相关的。

表 1 不同层次土壤电导率 EC 1:5 的统计特征参数

		1				2				
_	深度 Dept h (cm)	最小值 Min (dS /m)	最大值 Max · (dS /m)	平均值 Mean (dS/m)	中位数 Median (dS /m)	标准差 SD·	变异系数 <i>CV</i> (%)	峰度 Kurt	偏度 Skew•	
	0~10	0.18	15.49	4.062	2.065	4.275	105.24	0.296	1.215	
	$10 \sim 20$	0.16	8.66	2.498	1.635	2.214	88.63	-0.262	0.950	
	$20 \sim 40$	0.12	7.10	2.323	1.325	2.003	86.22	-0.833	0.782	
	$40 \sim 60$	0.21	6.58	2.302	1.801	1.785	77.54	-0.569	0.795	
	60~80	0.24	6.63	2.449	2.060	1.683	68.72	-0.458	0.712	
	$80 \sim 100$	0.29	6.84	2.590	2.155	1.772	68.42	-0.685	0.639	
	$100 \sim 120$	0.41	6.13	2.615	2.130	1.591	60.84	-0.839	0.526	
	$120 \sim 140$	0.44	7.04	2.680	2.430	1.503	56.08	-0.372	0.591	
	$140 \sim 160$	0.43	6.29	2.692	2.495	1.399	51.97	0.028	0.663	
	$160 \sim 180$	0.39	6.42	2.557	2.545	1.260	49.28	0.524	0.696	
	$180 \sim 200$	0.48	6.06	2.566	2.420	1.201	46.80	-0.171	0.537	

Table 1 Statistical feature parameters of soil electrical conductivity EC1:5at different layers

表 2 不同层次土壤电导率  $EC_{1:5}$ 的 Pearson 相关系数(n = 84)

Table 2 Pearson correlation coefficients of soil electrical conductivity  $EC_{1:5}$  at different layers (n = 84)

<i>EC</i> 1:5 (dS/m)	${f S}$ 0~10	${f S}$ 10~20	${f S}$ 20 $\sim$ 40	<b>S</b> 40~60	${f S}$ 60 $\sim$ 80	${f S}$ 80~100	<b>S</b> 100~120	S $_{120\sim140}$	<b>S</b> 140~160	S $_{160\sim 180}$	S 180~200
S 10~20	0.939	1.000	_	_	_	_	_	_	_	_	_
$\mathbf{S}_{20\sim40}$	0.884	0.949	1.000	—	—	—	_	—	—	—	—
${f S}$ 40 $\sim$ 60	0.848	0.902	0.974	1.000	_	_	_	_	_	_	_
${f S}$ 60 $\sim$ 80	0.809	0.864	0.940	0.966	1.000	—	_	—	—	—	—
$\mathbf{S}$ 80~100	0.807	0.843	0.904	0.938	0.964	1.000	—	—	—	—	—
$\mathbf{S}$ 100~120	0.802	0.838	0.883	0.917	0.942	0.980	1.000	_	_	_	_
${f S}_{120\sim 140}$	0.713	0.742	0.808	0.854	0.896	0.926	0.947	1.000	—	—	—
$\mathbf{S}_{140\sim 160}$	0.694	0.714	0.765	0.804	0.861	0.882	0.910	0.941	1.000	—	—
$\mathbf{S}_{160\sim180}$	0.689	0.691	0.755	0.802	0.850	0.863	0.869	0.906	0.926	1.000	—
${f S}$ 180~200	0.622	0.656	0.717	0.776	0.825	0.829	0.825	0.863	0.889	0.940	1.000

注 S 下标表示对应的土壤深度。

Note : The suffix of "S" means the corresponding depth of soil  $\cdot$ 

#### $2.2 E M_h$ 和 $E M_v$ 与土壤电导率相关性分析

文献表明,线性回归是研究不同土层盐分含量 (或饱和浸提液电导率)与磁感式土壤表观电导率关 系的经典方法<sup>10,11]</sup>。本文以84个标定剖面作为总 体,分别以*EM<sub>h</sub>*和*EM<sub>v</sub>*为自变量,以各土层电导率 为依变量进行回归分析;事实上,由于土壤表观电导 率反映的是不同深度电导率与其贡献率之积的加权 值,且相对贡献率在土壤深度上表现为非线性,因 此,在理论上不同深度的土壤电导率与表观电导率 应较为符合对数线性关系。进一步对土壤电导率与 表观电导率 *E M<sub>h</sub>* 和*E M<sub>v</sub>* 的对数值分别进行回归分 析,结果如表 3 所示。

69

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 土壤电导率与磁感表观电导率的回归及对数回归方程

Table <sup>3</sup> Linear and log linear equations between soil electrical conductivity and electromagnetic conductivity

深度(cm)	<i>EC</i> 1:5(	$\ln EC_{1:5} = a$	$+_b \times EM_h(\ln E)$	$(M_h)$	$EC_{1:::}(\ln EC_{1:::}) = A + B \times EM_{v}(\ln EM_{v})$			
Dept h	a	Ь	SD	R	A	В	SD	R
0~10	-1.407(-1.074)	1.150(1.441)	1.769(0.466)	0.912(0.923)	-2.843(-1.434)	1.866 1.881)	2.624(0.659)	0.792(0.839)
$10 \sim 20$	-0.457(-1.172)	0.621(1.260)	0.689(0.422)	0.951(0.918)	-1.366(-1.517)	1.044(1.670)	1.152(0.564)	0.856(0.868)
20~40	-0.403(-1.303)	0.573(1.312)	0.492(0.292)	0.970(0.961)	-1.423(-1.742)	1.012(1.808)	0.801(0.409)	0.91& 0.923)
40~60	-0.084(-0.935)	0.502(1.105)	0.547(0.280)	0.953(0.951)	-1.057(-1.358)	0.90& 1.567)	0.691(0.310)	0.923(0.939)
60~80	0.274(-0.640)	0.457(0.977)	0.659(0.308)	0.921(0.927)	-0.677(-1.048)	0.845(1.414)	0.697(0.292)	0.911(0.934)
80~100	0.325(-0.552)	0.476(0.955)	0.737(0.309)	0.911(0.923)	-0.669(-0.960)	0.880(1.390)	0.770(0.283)	0.902(0.936)
100~120	0.608(-0.292)	0.422(0.808)	0.701(0.314)	0.899(0.905)	-0.316(-0.659)	0.792(1.195)	0.686(0.273)	0.904(0.921)
$120 \sim 140$	0.943(-0.080)	0.365(0.691)	0.858(0.339)	0.823(0.846)	0.072(-0.414)	0.705(1.039)	0.794(0.295)	0.851(0.886)
$140 \sim 160$	1.168(0.051)	0.320(0.613)	0.887(0.347)	0.777(0.808)	0.392(-0.260)	0.622(0.935)	0.831(0.303)	0.807(0.858)
$160 \sim 180$	1.222(0.064)	0.281(0.575)	0.831(0.340)	0.755(0.796)	0.538 -0.222	0.546(0.872)	0.783(0.304)	0.786(0.841)
$180 \sim 200$	1.365(0.171)	0.253(0.505)	0.848(0.355)	0.713(0.741)	0.750 - 0.081	0.491(0.766)	0.811(0.329)	0.742(0.783)

注:括号内数字表示对数回归方程的参数; SD 为标准差, 下同。

Note : The figure in the parentheses means the parameter of logarithmic regression equation ; SD is standard deviation  $\cdot$  The same as below  $\cdot$ 

从表 3 可知,各层土壤电导率与  $EM_h$ 、 $EM_v$ 之间均存在较好的线性和对数线性关系,相关系数变化范围在 0.713~0.970,达到极显著水平( $P < 0.01, n = 84, R_{0.01} = 0.2784$ )。比较相关系数可以看出:对于表层  $0 \sim 20$  cm 土壤,  $EM_h$  与土壤电导率间的相关系数明显高于  $EM_v$ ;当深度在 100 cm 以下时,  $EM_v$  与电导率间的相关系数高于  $EM_h$ ,其主要原因在于电磁感应仪 EM 38 水平和垂直测量模式对不同深度土壤盐分的敏感度存在差异。因此,对耕层土壤盐渍状况的判断宜采用水平测量模式,对于深层土壤采用垂直测量模式的解译效果较好。由进一步比较可知,在整个剖面上,  $EM_v$ 与土壤电导率对数回归方程的相关系数均大于与回归方程的相关系数;对于  $EM_h$ ,其对数回归方程与回归方程的相关系数在浅层土壤差异不大,在深层土壤,要高于

回归方程,说明在已知表观电导率 EM<sub>h</sub> 或EM<sub>v</sub> 条 件下,与传统回归方程相比,采用对数回归方程可在 一定程度上提高剖面土壤电导率的解译精度。

对各层土壤电导率与  $EM_h$ 、 $EM_v$  及其对数值 进行多元回归分析(表4)发现,以  $EM_h$  +  $EM_v$  为变 量的多元回归方程对各层土壤电导率的解译效果要 优于仅以  $EM_h$  或 $EM_v$  为变量的回归方程,这可由 表 3、表4 中相关系数的比较得出。此外,采用土壤 电导率与  $EM_h$ 、 $EM_v$  的对数多元回归分析可进一 步提高深层土壤电导率的解译精度。在已测得表观 电导率  $EM_h$ 和 $EM_v$ 条件下,通过表 3 和表4 中建 立的(对数)回归模型可对不同深度的土壤电导率进 行预测,对于浅层土壤仅采用  $EM_h$ 即可获得较高 预测精度,对于深层土壤采用  $EM_h$  牛 $EM_v$  的多元 对数回归模型可获得最佳预测效果。

表 4	土壤电导率与磁感式表观电导率的多元回归及对数多元回归方程
-----	------------------------------

Table 4 Multiple linear and multiple log linear equations between soil electrical conductivity and electromagnetic conductivity

深度		$EC_{1:::(\ln EC_{1:::})} = a + b \times EM_{h}(\ln EM_{h}) + c \times EM_{v}(\ln EM_{v})$							
$Dept \ h \ (\ c \ m)$	a	b	с	SD	R				
0~10	0.355(-0.589)	1.831 (2.478)	-1.352(-1.545)	1.571(0.411)	0.932(0.941)				
$10 \sim 20$	0.086(-0.861)	0.831(1.926)	-0.417(-0.993)	0.644(0.399)	0.958(0.938)				
$20 \sim 40$	-0.4639(-1.273)	0.550(1.375)	0.046(-0.094)	0.494(0.293)	0.971(0.961)				
$40 \sim 60$	-0.384(-1.106)	0.386(0.741)	0.230(0.543)	0.532(0.270)	0.956(0.955)				
$60 \sim 80$	-0.195(-0.916)	0.276(0.387)	0.360(0.879)	0.624(0.282)	0.931(0.940)				
80~100	-0.175(-0.855)	0.283(0.308)	0.384(0.965)	0.702(0.277)	0.920(0.939)				
$100 \sim 120$	0.032(-0.629)	0.199(0.087)	0.442(1.075)	0.650(0.274)	0.915(0.922)				
$120 \sim 140$	0.222(-0.442)	0.086(-0.084)	0.554(1.155)	0.792(0.296)	0.854(0.886)				
$140 \sim 160$	0.500(-0.327)	0.062 (-0.196)	0.513(1.206)	0.833(0.302)	0.808(0.861)				
$160 \sim 180$	0.622(-0.270)	0.048(-0.141)	0.461(1.067)	0.786(0.304)	0.788(0.842)				
$180 \sim 200$	0.829(-0.124)	0.045(-0.126)	0.411(0.940)	0.814(0.330)	0.743(0.785)				
(C)1994-2	023 China Academic	: Journal Electronic	Publishing House. A	Il rights reserved.	http://www.cnki.net				

70

#### 2.3 土壤盐渍剖面类型分析

围绕着应用电磁感应仪EM38两种测量模式下 的表观电导率  $EM_h$ 、 $EM_v$  判断土壤盐渍剖面类型, Cor win 等<sup>12</sup> 提出直接用  $EM_n / EM_h$  作为判别土壤 盐渍剖面类型的经验标准,若 $EM_{h}$ / $EM_{h}$  $\geq$ 1,为底 聚型; 若  $EM_{n}/EM_{h} \leq 1$ , 则为表聚型。但该经验判 别方程存在3个问题:①没有考虑到表观电导率 EM<sub>h</sub>、EM<sub>v</sub>和土壤盐渍间的非线性关系,尤其是在 盐渍化程度较重的区域;②仅能判别出表聚型与底 聚型两种盐渍剖面类型,而将均匀型剖面归为表聚 型或底聚型显然不合理;③忽略了表观电导率  $EM_h$ 、 $EM_v$  间存在的协线性相关。为解决上述问 题, Rhoades 等<sup>13</sup> 根据均质土壤的 $\ln EM_h$ 和 $n EM_h$ ¬In EM<sub>v</sub> 间的理论函数关系推导出盐渍剖面类型 判别方程,该方程以 $\ln EM_h$  ¬ $\ln EM_n$  及其理论值间 5%的相对偏差作为上下限, 若 $\ln EM_h$  न $\ln EM_v$  在 此区间内,为均匀型,低于下限为底聚型,高于上限 则为表聚型。考虑到研究区土壤盐渍化程度普遍较 高,且不同剖面间盐渍化程度差异较大,再加上研究 区活跃的水盐运动引起土壤盐分在垂直剖面上的分 布状况相当复杂,因此,本文采用 Rhoades 等推导出 的判别方程,并选取10%的相对偏差作为上下限, 各盐渍剖面类型具体判别条件如下:

均匀型:即土壤含盐量随土层深度的变化差异 不大

90% (0.04334+0.0305\space{n} E M\_h + 0.00836 E M\_h^2) <  $\ln E M_h \neg \ln E M_v < 110\%$  (0.04334+0.0305\space{n} E M\_h + 0.00836 E M\_h^2) 底聚型:即土壤含盐量随土层深度增加呈总体 上升趋势

 $\ln E M_{h} \dashv \ln E M_{v} < 90\% (0.04334 + 0.0305 \$_{n} E M_{h} + 0.00836 E M_{h}^{2})$ 

表聚型:即土壤含盐量随土层深度增加呈总体 降低趋势

 $\ln E M_{h} \neg \ln E M_{v} > 110\% (0.04334 + 0.0305 \&_{n} E M_{h} + 0.00836 E M_{h}^{2})$ 

通过上式的判别条件对 84 个剖面进行分析发 现:研究区土壤盐渍剖面类型以底聚型和表聚型为 主,其中表聚型剖面 38 个,占总剖面数的 45.2%; 底聚型 45个,占53.6%;均匀型仅1个。这说明研 究区土壤盐分在水平方向与垂直方向上均具有较强 的分异特征。表聚型盐渍剖面的典型特征示于图 2,其共同特征是表层 20cm 以上土壤电导率较高, 其它土层电导率明显小于该层。通过对黄河下游三 角洲盐渍土的成因分析,具有该类特征的盐渍剖面, 可以认为目前土壤脱盐过程不太明显,土壤盐分的 运移处于上升状态或平衡状态,如果没有人为因素 的强烈干扰或适宜的气候条件(如降雨),这种类型 的土壤在近期内不会发生明显的脱盐过程。该类型 盐渍剖面主要集中分布于研究区的东部和南部,而 且其分布特征是与地下水性质密切相关的。一方面 这是由于研究区东临渤海,东部受海水的浸渍侧渗 作用较强烈,地下水矿化度相对较高,且地下水埋深 由东向西呈增加趋势;另一方面研究区南部为灌溉 渠日东南部位毗邻大片人工开挖的养殖鱼塘,地势 相对较低,灌溉渠以及鱼塘中大量地下水入渗到该 部位。在旱季强烈地表蒸发作用下,这些部位受地 下水返盐影响更为强烈,导致表土盐分积聚性明显 高于其它部位。



#### 图 2 典型盐渍剖面类型部分采样点土壤电导率的分布

Fig.2 Soil electrical conductivity distribution patterns of some sample sites for the typical salinity profile types

底聚型盐渍剖面的电导率分布如图 2 所示。可以看出,该类型剖面土壤电导率变化较为复杂,尽管 (C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net 土壤电导率随土层深度表现出总体升高的趋势,但 在很多剖面上耕层土壤电导率仍然较高,尤其是在 0~10 cm的表层。它实际反映的是短期内气候因 素对该类型盐渍剖面作用的结果,由于采样季节正 处于秋季稳定积盐期,这使得盐分在耕层呈一定的 积聚状态,但这并不影响其作为底聚型盐渍剖面的 本质。当这类剖面中底层土壤盐分较高时,土壤次 生盐渍化风险较大。该类型盐渍剖面的地表植被以 棉花/玉米、杂草为主,主要集中分布于研究区的西 部及西北部,此外在研究区的中部也零星分布,这是 由于在土壤盐分相对较低的研究区西部,土地利用 方式以棉花/玉米种植为主,由此可知,底聚型盐渍 剖面的形成往往是与该部位频繁的人为农业措施密

切关联的。

均匀型盐渍剖面是指土壤含盐量随土层深度的 变化差异不大的剖面类型,在研究区这种盐渍剖面 类型的数量最少,仅有1个。该类型盐渍剖面0~ 200cm土体电导率状态总趋势是整体剖面土壤电 导率平衡,随着深度的变化,土壤电导率稍有变化, 这表明具有这种剖面特征的土壤,其盐分处于总体 平衡状态,但由于采样季节正处于季节性积盐期,此 时气候、地形等因素的综合作用促使盐分向上运移 的强度大于盐分向下运移的强度,这可能也是导致 研究区均匀型盐渍剖面数量较少的最直接因素。因 此,在本文中均匀型盐渍剖面可以认为属于弱积盐 型剖面。

表 5 典型盐渍剖面类型不同深度土壤电导率的统计特征值

Table 5 Statistical parameters of soil electrical conductivity at different layers for the typical salinity profile types

深度		表聚型In	verted		底聚型 Nor mal				
Dept h (cm)	平均值 Mean (dS/m)	中位值 Median (dS/m)	标准差 $SD$	变异系数 CV( %)	平均值 Mean (dS /m)	中位值 Median (dS/m)	标准差 SD	变异系数 CV(%)	
0~10	7.566	7.500	4.154	54.90	1.161	1.044	0.764	65.82	
$10 \sim 20$	4.327	4.500	2.034	47.00	0.983	0.823	0.625	63.63	
$20 \sim 40$	3.982	4.375	1.806	45.37	0.969	0.796	0.685	70.69	
$40 \sim 60$	3.681	4.120	1.696	46.07	1.170	0.985	0.757	64.71	
60~80	3.684	3.935	1.595	43.31	1.442	1.168	0.880	61.01	
80~100	3.834	4.065	1.728	45.06	1.570	1.260	0.979	62.42	
$100 \sim 120$	3.630	3.790	1.596	43.96	1.777	1.460	1.007	56.71	
$120 \sim 140$	3.496	3.595	1.526	43.65	2.014	1.670	1.118	55.48	
$140 \sim 160$	3.376	3.275	1.473	43.64	2.134	2.090	1.062	49.78	
$160 \sim 180$	3.173	3.110	1.335	42.09	2.065	1.955	0.939	45.48	
180~200	3.126	3.170	1.305	41.76	2.105	2.090	0.893	42.43	

对主要盐渍剖面类型不同深度土壤电导率进行统计分析,结果(表5)表明:各盐渍剖面类型土壤电导率的变异系数已明显降低,如变异强度较大的表层 0~10cm 土壤电导率,表聚型和底聚型的变异系数分别为54.90%和65.82%,而总体的变异系数高达105.24%;对于整个盐分剖面,表聚型与底聚型土壤电导率变异系数的变化范围分别为41.76%~54.90%和42.43%~70.69%,而总体变异系数的变化范围为46.80%~105.24%,这表明本文中土壤盐渍剖面类型的分类结果具有较高可信度,同时也说明了电磁感应仪EM38在土壤盐渍特征解译中的实用性与高效性。

## 3 结 论

1)研究区各层土壤电导率均较高,总体上盐分分布呈较强的表聚型;变异系数为46.80%~ (C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publish為素聚型、底聚型与抱急型三种类型、表聚型与底

105.24%,除表层土壤电导率表现为强变异强度外, 其余各土层均表现为中等变异强度,且变异系数随 深度增加不断减小;受黄河三角洲地区活跃的水盐 运动影响,采样剖面各土层电导率间均呈显著的相 关性。

2) 由相关性分析结果可知,黄河三角洲地区土 壤电导率与磁感表观电导率 *E M<sub>h</sub>*、*E M<sub>v</sub>* 均表现为 极显著的(对数) 相关关系,*E M<sub>h</sub>* 对浅层土壤电导率 的解译精度较高,*E M<sub>v</sub>* 对深层土壤电导率的解译精 度要高于*E M<sub>h</sub>*;与传统回归方程相比,采用对数回 归方程可在一定程度上提高剖面土壤电导率的解译 精度,通过所建立的回归模型可对该地区未采样剖 面的土壤盐渍状况进行快速检测。 第1期

聚型是最主要的盐渍剖面类型,其中底聚型属于脱 盐型剖面,表聚型和均匀型属于积盐型剖面。进一步的统计分析证明电磁感应仪EM<sup>38</sup>对土壤盐渍剖 面的分类结果具有较高的精度与可信度。

#### 参考文献:

- [1] 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.(3):27-29.
- [2] Corwin D L, Lesch S M. Apparent Soil Electrical Conductivity Measurements in Agriculture[J]. Comput Electron Agri, 2005, (46):11-43.
- [3] Sheets K R, Hendrickx J M H. Non invasive Soil Water Content Measurement Using Electromagnetic Induction[J]. Water Resour Res, 1995, (31):2401-2409.
- [4] 宋长春,阎百兴,宋新山.电磁技术在苏打盐渍化土壤研究中的运用J].地理科学,2002,22(1):91-95.
- [5] 陈玉娟·EM<sup>38</sup> 大地电导仪的应用研究[J]·干旱地区农业研究,2004,22(2):146-148.
- [6] 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.

- [7] 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.
- [8] 聂 杰,刘广明,翰茂森,等,滩涂磁感式调查规划技术与应用
  [J].中国农村水利水电,2002,(7):54-56.
- [9] 鲁如坤·土壤农业化学分析方法[M]·北京:中国农业科技出版 社,1999.
- [10] Triantafilis J, Laslett G M, Mcbratney A B. Calibrating an Electromagnetic Induction Instrument to Measure Salinity in Soil under Irrigated Cotton[J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, (64): 1009-1017.
- [11] Bennett DL, George RJ. Using the EM<sup>38</sup>to Measure the Effect of Soil Salinity on Eucalyptus Globulus in South western Australia[J]. Agricultural Water Management, 1995, (27): 69-86.
- [12] Corwin D L, Rhoades J D. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction [J]. Soil Sci Soc Am J, 1984, (48):288-291.
- [13] Rhoades J D., Chanduvi F., Lesch S. Soil Salinity Assessment Methods and Interpolation of Electrical Conductivity Measure ments[A] · FAO · FAO Irrigation and Drainage Paper[C] · Ro man .;FAO · 1999.

## Application of electromagnetic induction EM<sup>38</sup>to rapid analysis of soil salinization in the Yellow River Delta

YAO Rong jiang , YANG Jing song , LI U Guang ming

(Institute of Soil Science, Chinese Acade my of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract : Taking into account the problem of soil salinization existing in the Yellow River Delta at present , the profile distribution patterns of soil electrical conductivity was analyzed with the application of E M <sup>38</sup> and field sampling method , which was performed in typical field of the Yellow River Delta · Regression models between soil electrical conductivity and electromagnetic conductivity were established and the classification of soil salinization profile types by using E M <sup>38</sup> was further discussed · The results indicated that soil salinity at surface layer exhibited top enrichment and strong spatial variation across the study area , and soil electrical conductivity at all layers was correlated with each other · Soil electrical conductivity showed correlation and logarithmic correlation with electromagnetic conductivity  $E M_h$  and  $E M_v$  significantly , the interpretation accuracy between  $E M_h$  and soil electrical conductivity at upper layers was relatively high while the interpretation accuracy between  $E M_v$  and soil electrical conductivity at deeper layers was higher than  $E M_h$ . Soil salinity profiles were precisely classified into inverted , nor mal and uniform types with the use of E M <sup>38</sup>, and the predominant salinity profile types in the study area were inverted and nor mal · The further statistical analysis proved that the classification results of soil salinity profiles by using electromagnetic induction E M <sup>38</sup> were of high precision and reliability · The research re <sup>-</sup> sults were of great significance for the mechanism , prediction and evaluation of the occurrence and development of soil salinization in the Yellow River Delta ·

Key words : electromagnetic induction EM 38; Yellow River Delta ; salinization ; rapid analysis