

基于电磁感应的典型干旱区土壤盐分时空变异快速诊断*

李晓明 杨劲松 刘广明 刘梅先 姚荣江

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

【摘要】 选取新疆典型干旱区研究其土壤盐分时空变异,在研究区域选取校正点测定表观电导率(ECa),并同时采集土壤样品,研究表明土壤盐分含量与大地表观电导率具有良好相关性($R=0.935$),可由此建立土壤盐分电磁感应解译模型。构建移动式磁感调查系统对研究区域进行调查,获取足量表观电导率信息,结合 GIS 和地统计等相关知识研究土壤盐分的空间异质性。经过不同年份、不同季节的调查实现时空变异的快速诊断。结果表明,研究区域存在严重的盐渍化问题,且存在秋季盐渍化重于春季,2009 年重于 2008 年的趋势。

关键词: 土壤盐分 干旱区 电磁感应 时空变异 快速诊断

中图分类号: S156.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0079-07

Rapid Diagnosis of Soil Salinity Temporal-spatial Variances Based on Electromagnetic Induction in a Typical Arid Area

Li Xiaoming Yang Jingsong Liu Guangming Liu Meixian Yao Rongjiang

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract

A typical arid area in South Xinjiang was selected to study the temporal-spatial variances of soil salinity. Calibration sites were selected in the study area. Apparent electrical conductivities (ECa) were measured, and soil samples were collected in the calibration sites. The results showed there was a good correlation between soil salt content and the apparent electrical conductivity, so the interpretation model for soil salinity could be established. A mobile electromagnetic induction survey system was constructed to survey the study area with enough ECa data collected. The spatial variance could be studied with GIS and geo-statistics knowledge, and the temporal-spatial variances could be rapid diagnosed by EM surveys over different times. The results showed serious salinization existed in the study area, and salinization in autumn was worse than that in spring, salinization in 2009 was more serious than that in 2008.

Key words Soil salinity, Arid area, Electromagnetic induction, Temporal-spatial variance, Rapid diagnosis

引言

盐渍土是我国最主要的中低产土壤类型之一,总面积约为 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占全国可利用土地面积的 4.88%^[1], 分布广泛, 从湿润地区到极端干旱的荒漠地区, 均有大量盐渍土的分布^[2]。尤其在干旱地区, 土壤盐渍化严重制约当地农业生产。对土壤

盐渍化的时空变异进行快速诊断, 研究盐渍化现状及变化趋势, 对指导农业生产具有重要意义。目前, 频繁的采样如挖掘、钻孔等侵入式监测费时费力而且费用高, 更主要的是采集样点数目有限, 难以为盐渍化的快速监测提供足量的数据^[3~4]。电磁感应式大地电导率测量(EM)方法由于其无需电极插入、测量速度快, 在土壤盐分含量和盐渍化调查、监测与

收稿日期: 2010-08-13 修回日期: 2010-09-13
* 国家公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001)、国家自然科学基金资助项目(40771097)、新疆自治区科技攻关重点课题(200733144-1)和中国科学院知识创新工程重大资助项目(KSCX1-YW-09)
作者简介: 李晓明, 博士生, 主要从事资源环境和遥感信息研究, E-mail: xml@issas.ac.cn
通讯作者: 杨劲松, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤和水资源利用与管理研究, E-mail: jsyang@issas.ac.cn

评估研究中得到广泛的应用^[1,5~11]。

本文基于电磁感应技术对研究区域进行移动式磁感调查,获取大量的与盐分含量相关的表观电导率信息,为研究盐分空间变异提供数据基础,并且通过多时段的磁感调查,实现研究区域盐分时空变异的快速诊断。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

以南疆典型干旱区——巴州水管处西尼尔灌溉试验站为研究区,巴州地处天山南麓,气候干旱,年降水量大多在 100 mm 以下,而蒸发量在 2 500 mm 左右,蒸降比约为 40^[2],高蒸降比使该地区极易产生土壤盐渍化和次生盐渍化问题。年均气温 8.2 ~ 11.6℃,昼夜温差大,四季分明,属暖温带大陆性干旱气候,空气干燥,光照充足。研究区域以棉花为主要种植作物,面广地平,利于机械作业,为进行移动式磁感调查创造了有利的条件,本研究共选取约 170 hm² 的农田作为调查对象。

1.2 研究方法

电磁感应式大地电导率测定仪(EM38、EM31)基于电磁感应原理,通过测量原生磁场和次生磁场之间的相对关系来测定大地表观电导率^[12~13],大地表观电导率是很多土壤性状的间接表征,如土壤质地、盐分含量、含水率、阳离子交换量等。在盐渍化地区,大地表观电导率主要与土壤盐分含量有关,其贡献率大于 60%,而且贡献率会随盐渍化程度增强而变大^[14~16],所以在干旱易盐区采用电磁感应技术诊断土壤盐渍化是一种切实可行的方法。

EM38 和 EM31 有两种测量模式:水平模式(H)和垂直模式(V)。一般来说,EM38 水平模式测量深度可达 0.75 ~ 1.0 m,而垂直模式测量深度相对较深,可达 1.5 ~ 2.0 m^[17];EM31 的水平和垂直模式测量深度分别约为 3.0 m 和 6.0 m。当 EM38 和 EM31 与数据采集器、GPS 连接构建成移动式磁感调查系统^[13],就可以同时采集地理位置信息和大地表观电导率信息,进行大地表观电导率快速测量,经解译可获得土壤盐分含量^[1],从而可以有效提高盐渍化诊断的效率和精度。

在 170 hm² 研究区域的若干地块均匀随机选取 27 个校准点,测定 EM38 和 EM31 不同模式下大地表观电导率(水平模式和垂直模式),并同时采集 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土壤样品。土壤样品带回实验室自然风干,磨细过 2 mm 筛,按土水质量比 1:5 提取浸提液测定全盐含量,分析样品的全盐含量和大地表观电导率的相关性,建立解译方程用于磁感

式调查的盐分解译,结合 GIS 和地统计相关知识研究土壤盐分空间分布,对比分析不同时相的诊断结果,研究盐渍化的变化趋势,从而实现土壤盐渍化的快速诊断。

2 结果与分析

2.1 土壤盐分解译模型

选取 27 个校准样点测量不同模式下表观电导率,同时采集 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 两层土壤样品,并应用离子组成法测定其全盐含量^[18]。分析全盐含量与大地表观电导率的相关性,利用逐步回归法建立解译模型。0 ~ 10 cm 的解译模型为

以 x_1 为自变量

$$T_s = -0.583 + 0.047x_1 \quad (R = 0.930, n = 27)$$

(1)

以 x_2 为自变量

$$T_s = -0.720 + 0.056x_2 \quad (R = 0.884, n = 27)$$

(2)

以 x_3 为自变量

$$T_s = -3.038 + 0.027x_3 \quad (R = 0.877, n = 27)$$

(3)

以 x_4 为自变量

$$T_s = -2.936 + 0.021x_4 \quad (R = 0.841, n = 27)$$

(4)

以 $x_1、x_3$ 为自变量

$$T_s = -1.325 + 0.037x_1 + 0.007x_3$$

(5)

($R = 0.935, n = 27$)

以 $x_1、x_2、x_3$ 和 x_4 为自变量

$$T_s = -1.210 + 0.036x_1 + 0.006x_2 + 0.004x_4$$

(6)

($R = 0.937, n = 27$)

式中 T_s ——测定样品的全盐含量,g/kg
 x_1 ——EM38 水平模式读数,mS/m
 x_2 ——EM38 垂直模式读数,mS/m
 x_3 ——EM31 水平模式读数,mS/m
 x_4 ——EM31 垂直模式读数,mS/m

由回归分析可知,土壤全盐含量与大地表观电导率具有很好的相关性,在仅选用一种模式条件下,水平模式下表观电导率与土壤盐分相关性高于垂直模式,这是由于所解译土层为耕作层土壤,而水平模式测量深度比垂直模式浅,浅层土壤盐分含量的水平模式测定表观电导率贡献率较大。同时以 $x_1、x_2、x_3$ 和 x_4 为自变量的回归方程相关系数最高,仅以 $x_1、x_3$ 为自变量的回归方程相关系数相对较低。但构建的电磁感应移动测量系统每次只能选用水平或垂直模式的一种,以 $x_1、x_3$ 为自变量的回归方程具有良好

的相关性,故在选用解译模型时选用以 x_1 、 x_3 为自变量的回归方程进行土壤盐分解译。

同理,分析 10 ~ 20 cm 土层样品,建立全盐含量与 x_1 、 x_3 之间的回归方程为

$$T_s = -1.199 + 0.025x_1 + 0.011x_3$$

$(R = 0.886, n = 27)$

(7)

2.2 土壤盐分空间异质性分析

2.2.1 调查数据经典统计分析及正态检验

利用移动式磁感调查系统对研究区域进行调查,测定 x_1 和 x_3 ,利用上文获取的解译模型(式(5)、(7))获取所有调查点位的土壤盐分含量信息。经典统计分析结果显示(表 1):10 ~ 20 cm 土壤盐分含量平均值高于 0 ~ 10 cm 盐分含量平均值;11 月份土壤盐分含量平均值高于 4 月份盐分含量平均值,但 4 月份盐分含量的最大值高于 11 月份,极差大;相邻两年 11 月份盐分含量差距不大。经单样本 K-S 检验,数据正态分布不明显,对数转换后数据均呈现明显的正态分布,因此数据可用于地统计分析。11 月份盐分含量平均值高于 4 月份盐分含量平均值,主要是由于 4 月到 11 月中间经历蒸降比非常大的高温季节,导致土壤中深层盐分上移,从而土壤中盐分含量有所增加。

表 2 半方差函数模型参数

Tab.2 Parameters of the semivariance models

年/月	深度/cm	模型	块金值	基台值	块金效应	变程/m	R^2	残差
2008/11	0 ~ 10	Spherical	0.126 0	0.501 0	0.251	373	0.955	5.03×10^{-3}
	10 ~ 20	Exponential	0.026 8	0.214 6	0.125	519	0.978	5.18×10^{-4}
2009/04	0 ~ 10	Spherical	0.403 0	1.066 0	0.378	357	0.947	1.80×10^{-2}
	10 ~ 20	Spherical	0.160 3	0.440 6	0.364	431	0.977	1.64×10^{-3}
2009/11	0 ~ 10	Spherical	0.260 0	1.112 0	0.234	466	0.911	6.71×10^{-2}
	10 ~ 20	Gaussian	0.114 9	0.416 8	0.276	530	0.994	7.99×10^{-4}

2.2.3 土壤盐渍化等级划分

利用拟合好的半方差模型,经过 Kriging 插值,研究研究区域土壤盐分空间异质性,参照半漠境及漠境区盐渍化分级标准^[2],对研究区域进行盐渍化分级,共分为非盐渍化、轻度盐渍化、中度盐渍化、重度盐渍化、盐土 5 个等级,如图 1 所示。统计 3 个时相各层盐渍化等级发现:2008 年 11 月,0 ~ 10 cm 土层有 61% 面积存在盐渍化威胁,10 ~ 20 cm 有 87.8% 面积存在盐渍化威胁;2009 年 4 月,0 ~ 10 cm 土层有 54% 面积存在盐渍化威胁,10 ~ 20 cm 有 66.5% 面积存在盐渍化威胁;2009 年 11 月,0 ~ 10 cm 土层有 61% 面积存在盐渍化威胁,10 ~ 20 cm 有 76.2% 面积存在盐渍化威胁,10 ~ 20 cm 盐渍化比 0 ~ 10 cm 严重,11 月份比 4 月份严重,这与已有

表 1 各时相土壤盐分含量统计特征
Tab.1 Descriptive statistics of soil salinity
in different time

年/月	深度 /cm	最小值 /g·kg ⁻¹	最大值 /g·kg ⁻¹	平均值 /g·kg ⁻¹	标准差
2008/11	0 ~ 10	0.018	22.011	2.766	2.115
	10 ~ 20	0.768	21.817	3.482	1.864
2009/04	0 ~ 10	0.060	33.530	2.388	2.374
	10 ~ 20	0.076	37.764	2.919	2.145
2009/11	0 ~ 10	0.010	22.073	2.785	2.333
	10 ~ 20	0.109	21.295	3.235	2.219

2.2.2 半方差函数模型的最优拟合

对解译获取的土壤盐分数据,结合地理信息进行半方差模型的最优拟合,模型参数如表 2 所示,发现 0 ~ 10 cm 均以球状模型拟合效果最好,10 ~ 20 cm 3 个时相拟合模型不同,其中 2008 年 11 月以指数模型拟合效果最好;2009 年 4 月以球状模型拟合效果最好;2009 年 11 月以高斯模型拟合效果最好。分析各模型的块金效应发现,6 组数据均达到了强空间自相关性或中度空间自相关性^[19~20],其中 11 月份的空间自相关性明显优于 4 月份。

的结论一致。

2.3 土壤盐渍化趋势分析

统计各时相不同等级盐渍化土壤面积比例,如表 3 ~ 6 所示,从 2008 年 11 月到 2009 年 11 月:0 ~ 10 cm 土层,轻度盐渍化面积先减少后略有增加、中度盐渍化面积呈现缓慢减少的趋势、而重度盐渍化和盐土的面积则呈现缓缓增加的趋势;10 ~ 20 cm 土层,轻度盐渍化面积先减少后增加、中度盐渍化面积持续减少、重度盐渍化和盐土面积则呈现先略减少后增加的趋势。总体来说,非盐渍化、轻度盐渍化和中度盐渍化等级在两层变化趋势一致;而在重度盐渍化和盐土等级变化趋势有所差异,但均呈现增大的趋势,土壤盐渍化存在加剧的威胁。

计算不同盐渍化等级变化转移矩阵,可分析盐

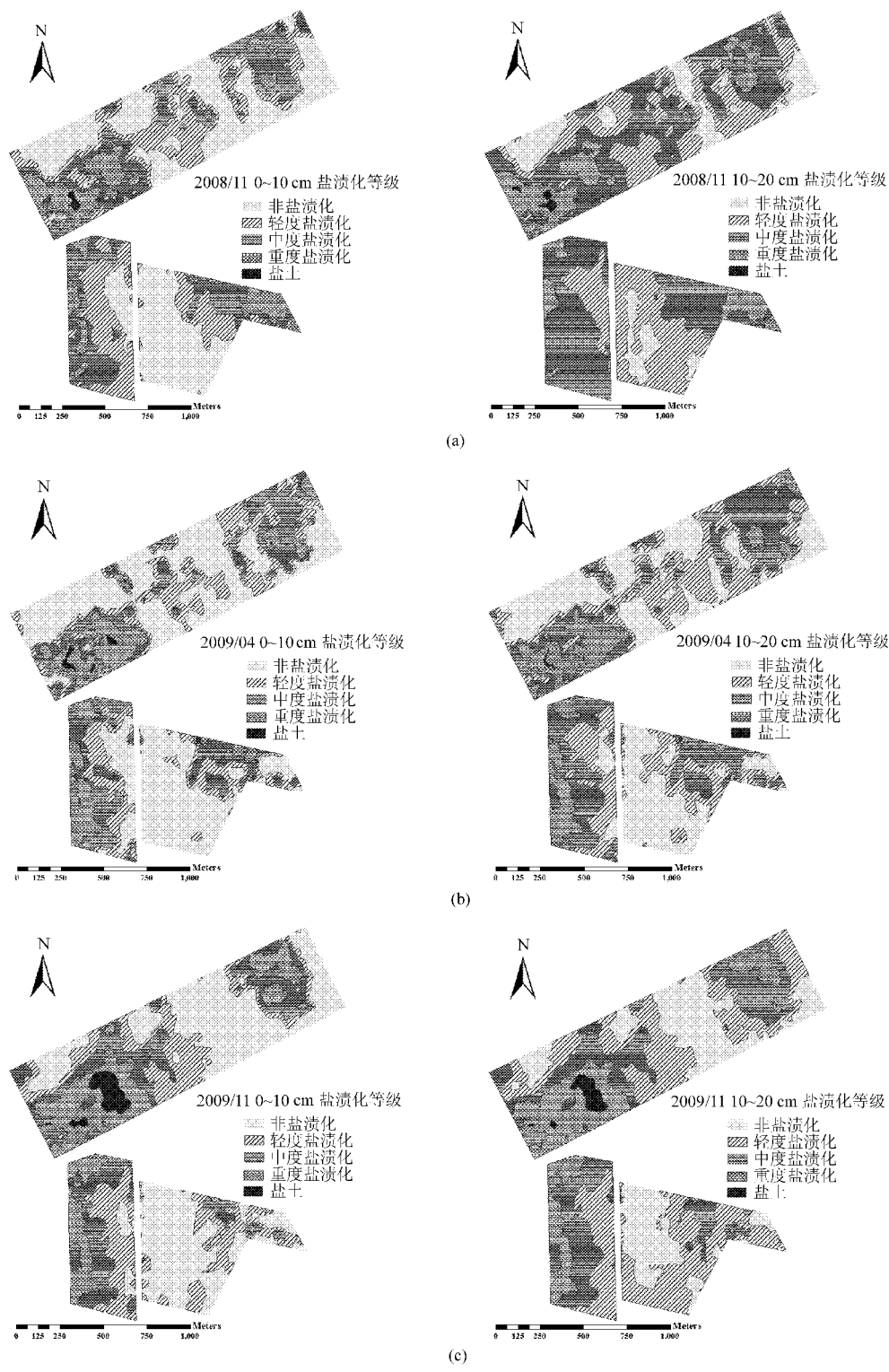


图 1 研究区盐渍化等级

Fig. 1 Salinization degradates in study area

(a) 2008 年 11 月 (b) 2009 年 4 月 (c) 2009 年 11 月

渍化变化趋势。如表 3、4 所示,比较 2008 年 11 月和 2009 年 11 月两个时相,分析相同季节相邻年份盐渍化变化趋势:0 ~ 10 cm 土层(表 3),约 15 hm² (27%) 非盐渍化转化为轻度盐渍化或中重度盐渍化;约 12 hm² (27%) 轻度盐渍化转化为非盐渍化,而 35% 轻度盐渍化转化为中重度盐渍化;近 15 hm²

(35%) 的中度盐渍化转化为重度盐渍化;近 6 hm² (28%) 重度盐渍化有减轻趋势,约 13% 重度盐渍化加剧为盐土;约 0.2 hm² 的盐土减轻为重度盐渍化,占盐土面积比例的 63%。10 ~ 20 cm 土层(表 4),近 6 hm² (28%) 非盐渍化转化为盐渍土;近 7 hm² (12%) 轻度盐渍化加剧为中度盐渍化,近 20 hm²

表 3 2008/11 ~ 2009/11 0 ~ 10 cm 盐渍化等级转移矩阵

Tab.3 Transition matrix of salinization degrades in 0 ~ 10 cm depth from Nov. 2008 to Nov. 2009

	非盐渍化/m ²	轻度盐渍化/m ²	中度盐渍化/m ²	重度盐渍化/m ²	盐土/m ²	总和/m ²	面积比
非盐渍化/m ²	496 561	151 554	31 866	553	0	680 533	0. 390
轻度盐渍化/m ²	120 782	165 914	140 827	20 766	16	448 305	0. 257
中度盐渍化/m ²	41 487	61 835	154 897	146 307	7 421	411 947	0. 236
重度盐渍化/m ²	21 089	18 460	17 923	116 165	26 567	200 204	0. 115
盐土/m ²	0	0	0	2 170	1 288	3 458	0. 002
总和/m ²	679 919	397 763	345 513	285 961	35 292	1 744 447	1
面积比	0. 390	0. 228	0. 198	0. 164	0. 020	1	

表 4 2008/11 ~ 2009/11 10 ~ 20 cm 盐渍化等级转移矩阵

Tab.4 Transition matrix of salinization degrades in 10 ~ 20 cm depth from Nov. 2008 to Nov. 2009

	非盐渍化/m ²	轻度盐渍化/m ²	中度盐渍化/m ²	重度盐渍化/m ²	盐土/m ²	总和/m ²	面积比
非盐渍化/m ²	154 037	58 622	187	0	0	212 846	0. 122
轻度盐渍化/m ²	196 532	306 999	66 130	260	0	569 921	0. 327
中度盐渍化/m ²	51 840	207 702	329 065	136 665	5 137	730 408	0. 419
重度盐渍化/m ²	12 919	30 199	37 700	127 664	16 901	225 383	0. 129
盐土/m ²	0	0	0	4 897	992	5889	0. 003
总和/m ²	415 328	603 522	433 082	269 486	23 030	1 744 447	1
面积比	0. 238	0. 346	0. 248	0. 154	0. 013	1	

表 5 2009/04 ~ 2009/11 0 ~ 10 cm 盐渍化等级转移矩阵

Tab.5 Transition matrix of salinization degrades in 0 ~ 10 cm depth from Apr. 2009 to Nov. 2009

	非盐渍化/m ²	轻度盐渍化/m ²	中度盐渍化/m ²	重度盐渍化/m ²	盐土/m ²	总和/m ²	面积比
非盐渍化/m ²	528 290	196 343	69 048	9 167	0	802 849	0. 460
轻度盐渍化/m ²	107 444	132 382	98 563	29 280	66	367 734	0. 211
中度盐渍化/m ²	34 807	58 615	158 689	107 076	3 577	362 763	0. 208
重度盐渍化/m ²	9 375	9 528	18 981	136 485	28 934	203 303	0. 117
盐土/m ²	3	894	231	3 954	2 716	7 798	0. 004
总和/m ²	679 919	397 762	345 512	285 962	35 293	1 744 447	1
面积比	0. 390	0. 228	0. 198	0. 164	0. 020	1	

表 6 2009/04 ~ 2009/11 10 ~ 20 cm 盐渍化等级转移矩阵

Tab.6 Transition matrix of salinization degrades in 10 ~ 20 cm depth from Apr. 2009 to Nov. 2009

	非盐渍化/m ²	轻度盐渍化/m ²	中度盐渍化/m ²	重度盐渍化/m ²	盐土/m ²	总和/m ²	面积比
非盐渍化/m ²	278 111	249 616	54 498	1 488	0	583 713	0. 335
轻度盐渍化/m ²	120 379	238 170	105 545	13 740	0	477 834	0. 274
中度盐渍化/m ²	16 839	103 250	246 060	119 885	2705	488 739	0. 280
重度盐渍化/m ²	0	12 079	26 977	133 285	20 199	192 540	0. 110
盐土/m ²	0	407	0	10 88	126	1 621	0. 001
总和/m ²	415 329	603 522	433 080	269 486	23 030	1 744 447	1
面积比	0. 238	0. 346	0. 248	0. 154	0. 013	1	

(34%)减轻为非盐渍化;约 14 hm² (20%)中度盐渍化土壤盐渍化加剧,约 26 hm² (35%)中度盐渍化土壤盐渍化程度减轻;近 2 hm² (7%)重度盐渍化土壤

盐渍化程度加剧,而有 36%盐渍化程度减轻;盐土中有 83%减轻为重度盐渍化。综合分析两个土层,对比不同等级盐渍化面积变化,可看出,轻、中度盐

渍化土壤面积有所减少,重度盐渍化和盐土面积有所增加,2009年比2008年11月盐渍化有加剧趋势。

如表5、6所示,比较2009年4月和2009年11月两个时相,分析相同年份不同季节盐渍化变化趋势:0~10 cm土层(表5),约27.5 hm²(34%)非盐渍化演化为盐渍土;近13 hm²(35%)轻度盐渍化土壤盐渍化程度加剧,约29%轻度盐渍化土壤演化为非盐渍化土,免除盐渍化威胁;约11 hm²(31%)中度盐渍化土壤盐渍化程度加剧,约26%盐渍化程度减轻;近3 hm²(14%)重度盐渍化演化为盐土,近19%重度盐渍化土壤盐渍化程度减轻;约0.5 hm²(65%)的盐土盐渍化程度减轻。10~20 cm土层(表6),约30 hm²(52%)非盐渍化演化为盐渍土;约12 hm²(25%)轻度盐渍化土壤盐渍化程度加剧,另有约25%免除盐渍化威胁;约12 hm²(26%)中度盐渍化土壤盐渍化程度加剧,另有约24%盐渍化程度减轻;约2 hm²(10%)重度盐渍化土壤盐渍化程度加剧,约20%盐渍化程度减轻;约0.15 hm²盐土盐渍化程度减轻。综合分析两个土层,对比不同等级盐渍化面积变化,可以看出2009年秋季与春季相比,非盐渍化土壤面积明显减少,轻度盐渍化面积有所增加,中度盐渍化面积略有减少,重度盐渍化和盐

土面积有所增加,总体而言,秋季较春季有盐渍化加剧的趋势。

3 结论

(1) 研究表明土壤盐分含量与大地表面电导率具有良好的相关性,由于EM38和EM31测定大地表面电导率的深度不同,仅以 x_4 为自变量的相关系数最低($R=0.841$),而以 x_1 、 x_2 、 x_3 和 x_4 为自变量的回归方程相关系数最高($R=0.937$)。构建移动式磁感调查系统只能选择水平或垂直模式,水平模式测量深度小于垂直模式,对较浅土层土壤盐分含量测量的贡献较高,以 x_1 、 x_3 为自变量与土壤盐分含量之间仍具有良好的相关性($R=0.935$),采用 x_1 、 x_3 进行大地表面电导率的盐分解译是切实可行的。对照3个时相的盐渍化等级分布,发现其各盐渍化等级分布位置相近,这也可以说明利用电磁感应技术解译土壤盐分含量是比较准确的。

(2) 通过构建移动式磁感调查系统对研究区域进行调查,快速获取大量数据,实现对研究区域土壤盐渍化的快速监测诊断,GIS和地统计学相关知识为研究土壤盐渍化的空间异质性提供了有力工具。经过不同时段多次调查,发现研究区域存在严重的盐渍化问题,而且存在进一步加剧的趋势。

参 考 文 献

- 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837~845.
Yang Jingsong. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837~845. (in Chinese)
- 王遵亲,祝寿全,俞仁培,等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- 李洪义,史舟,程街亮,等. 基于EM38的土壤剖面电导率预测研究[J]. 中国农业科学, 2008, 41(1): 295~302.
Li Hongyi, Shi Zhou, Cheng Jieliang, et al. Inversion of soil conductivity profiles based on EM38 apparent electrical conductivity [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(1): 295~302. (in Chinese)
- Borchers B, Uram T, Hendrickx J M H. Tikhonov regularization of electrical conductivity depth profiles in field soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(4): 1004~1009.
- 李晓明,杨劲松,李冬顺. 基于电磁感应(EM38)典型半干旱区土壤盐分空间变异研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 695~699.
Li Xiaoming, Yang Jingsong, Li Dongshun. Spatial variability of soil salinity in typical semiarid area based on electromagnetic induction (EM38) [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2010, 41(3): 695~699. (in Chinese)
- 张同娟,杨劲松,刘广明. 基于EM38长江河口地区土壤盐渍化特征研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 210~214.
Zhang Tongjuan, Yang Jingsong, Liu Guangming. Study the soil salinization character of the Yangtze River estuary area with an electromagnetic induction EM38[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(6): 210~214. (in Chinese)
- 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.
Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Liu Guangming. Application of electromagnetic induction EM38 to rapid analysis of soil salinization in the Yellow River Delta[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 67~73. (in Chinese)
- Corwin D L, Plant R E. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1~3): 1~10.

- 9 Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity part II. Case study [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1~3): 135~152.
- 10 Corwin D L, Lesch S M. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity part I. Survey protocols[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1~3): 103~133.
- 11 姚荣江,杨劲松,赵秀芳,等. 滩涂土壤电磁感应仪与方差四叉树法采样布局研究[J]. 农业机械学报, 2010, 41(7): 174~180.
- Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Zhao Xiufang, et al. Application of electromagnetic induction (EM38) and variance quad-tree (VQT) method on spatial sampling scheme in coastal saline region [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7): 174~180. (in Chinese)
- 12 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, 35(1): 27~29.
- Liu Guangming, Yang Jingsong, Ju Maosen, et al. Technology of chorometry using electromagnetic induction and its application in agriculture[J]. Soils, 2003, 35(1): 27~29. (in Chinese)
- 13 鞠茂森,戴伟如,聂杰,等. 移动式电磁感应土地性质测定系统[J]. 水利水电技术, 2002, 33(4): 48~50.
- 14 Corwin D L, Lesch S M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1~3): 11~43.
- 15 Carroll Z L, Oliver M A. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity [J]. Geoderma, 2005, 128(3~4): 354~374.
- 16 Sudduth K A, Drummond S T, Kitchen N R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2001, 31(3): 239~264.
- 17 Lesch S M, Corwin D L, Robinson D A. Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2005, 46(1~3): 351~378.
- 18 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.
- 19 苑小勇,黄元仿,高如泰,等. 北京市平谷区农用地土壤有机质空间变异特征[J]. 农业工程学报, 2008, 24(2): 70~76.
- 20 姚荣江,杨劲松,刘广明,等. 黄河三角洲地区典型地块土壤盐分空间变异特征研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 61~66.
- Yao Rongjiang, Yang Jingsong, Liu Guangming, et al. Spatial variability of soil salinity in characteristic field of the Yellow River Delta[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(6): 61~66. (in Chinese)
-

(上接第 67 页)

- 8 马娟娟,孙西欢,郭向红,等. 蓄水多坑入渗条件下土壤水分运动建模与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 46~51.
- Ma Juanjuan, Sun Xihuan, Guo Xianghong, et al. Numerical simulation on soil water movement under water storage pits irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 46~51. (in Chinese)
- 9 吕岁菊,乔英,刘国林. 一维非饱和土壤溶质运移的有限体积法数值模拟[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 33~36.
- Lü Suiju, Qiao Ying, Liu Guolin. Numerical simulation for one-dimensional unsaturated soil solute transport [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 33~36. (in Chinese)
- 10 雷志栋,杨诗秀,谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1988.
- 11 Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. Longman; Prentice Hall Press, 1995: 85~154.
- 12 陶文铨. 数值传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- 13 孙西欢,马娟娟,周青云,等. 蓄水坑灌法技术要素初探[J]. 沈阳农业大学学报, 2004, 35(5): 405~407.
- Sun Xihuan, Ma Juanjuan, Zhou Qingyun, et al. A preliminary research on the technical elements of water storage pit irrigation method [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2004, 35(5): 405~407. (in Chinese)