

# 滨海棉田土壤盐分时空分布特征研究\*

孙运朋<sup>1,2</sup> 陈小兵<sup>2,3†</sup> 张振华<sup>1</sup> 吴从稳<sup>4,2</sup> 颜坤<sup>2,3</sup> 张立华<sup>2,3</sup>

(1 鲁东大学地理与规划学院, 山东烟台 264025)

(2 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003)

(3 中国科学院海岸带环境过程重点实验室, 山东烟台 264003)

(4 烟台大学生命科学学院, 山东烟台 264005)

**摘要** 在黄河三角洲滨海一农田试验田共采集 3 期(春、夏、秋三季)EM38 表观电导率数据, 运用经典统计学和地统计学方法, 分析试验区盐分时空分布特征。结果如下: 垂直方向电导率相关系数均大于 0.8, 具有强相关性, 水平方向相关系数在 -0.2 至 0.2 之间, 相关性很弱。土壤盐分分布呈底聚型。变异系数比较显示, 同期数据中, 表层变异强度最强, 底层变异强度最弱。半方差分析中各层块金值与基台值之比大多在 25% ~ 75%, 盐分空间上偏向于中等空间相关性。棉花长势赋值后生成空间插值图, 对比同期电导率插值图, 将盐渍化程度划分成 4 个等级。分析按等级重分类后的栅格插值图中各盐渍土等级所占比例值, 表层中非盐化土所占面积比已由初期的 5.54% 增加至 11.93%, 轻度盐化土所占面积比增加了 42 个百分点。

**关键词** EM38 表观电导率; 盐分; 时空分布; 盐渍化

**中图分类号** S151.9 **文献标识码** A

黄河三角洲是我国最大的三角洲, 地域辽阔, 自然资源丰富, 是我国重要的后备土地资源。但是, 近、现代黄河三角洲近 50% 的土地为不同程度的盐渍化土。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<sup>[1]</sup>。棉花因其耐盐碱性较高以及市场的高需求, 虽一直是黄河三角洲地区主要栽培的经济作物之一, 但受土壤盐碱化等因素的影响, 平均单产低。长期以来, 黄河三角洲盐渍土改良和实现棉花高效种植研究为广大科研工作者所关注。对农田盐渍化动态进行快速监测与评价则是科学管理、合理改良利用盐渍化土地的必要前提。

目前, 国内针对区域盐渍土质量及其空间变异性的评估主要依赖于采样调查与盐分分析测试技术。这些方法工作量大、分析测试成本高且耗时长, 劳动力需求多, 所获取数据量较少, 难以对区域的盐渍土盐分割面与空间分布状况进行精确有效地定量评估, 从而在很大程度上制约了盐渍土的科学规划及其高效利用<sup>[2]</sup>。EM38 磁感应电导仪(又

称大地电导仪)能在地表直接测量土壤表观电导率, 是非接触直读式, 适用于大面积土壤盐渍化的测量, 且方便、快速, 为解决上述问题的有效手段<sup>[3]</sup>。

对于 EM38 磁感应电导仪用于土壤盐渍化的研究, 国内外多限于建立某一季节(时相)土壤含盐量(土壤电导率)与表观电导率(EM38 所测值)的回归方程, 确定电磁感应方法的有效性, 而后基于电磁感应方法测量的结果, 仅对某一季节(时相)土壤盐渍化的程度进行评价<sup>[4-6]</sup>, 缺少结合作物生长季节的作物长势对土壤盐分动态进行多时相的空间分析, 不利于对盐碱化土壤进行有针对性的评估与改良。EM38 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, 土壤电导率可以直接反映出全盐的含量, 故常被用作土壤盐分测定方法之一, 尤其近年来, 国内外许多学者建议直接用电导率表示土壤含盐量<sup>[7-11]</sup>。鉴于以上分析, 本研究应用 4 月、7 月、10 月的 3 期 EM38 表观电导率数据来直接表征研究区的土壤盐渍化程度, 结合棉花长势, 利用

\* 公益性行业(农业)科研专项经费项目(200903001)、海洋公益性行业科研专项(201105020)和国家自然科学基金项目(41271236)资助

† 通讯作者, E-mail: xbchen@yic.ac.cn

作者简介: 孙运朋(1989—), 男, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事区域水土资源高效利用研究。E-mail: 596012314@qq.com

收稿日期: 2013-04-28; 收到修改稿日期: 2013-06-19

地统计软件,对盐分时空分布特征进行分析,以揭示盐渍化状况与时空变异规律,为黄河三角洲河口地区土壤盐渍化的科学管理、合理改良提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于山东垦利县的中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态实验站(37°45′58.7″ N, 118°58′40.1″ E),地处北温带大陆性季风型气候带,四季气候变化明显,降水多集中在6—8月份,年均蒸降比约为3.22。该区土壤主要发育于海相沉积物上,同时受海水侧渗浸渍等作用,抬高了地下水位,增加了土壤含盐量。地下水埋深多介于1.6~2.4 m之间,平均矿化度为24.63 g L<sup>-1</sup>,最高可达167.5 g L<sup>-1</sup>。滨海潮盐土是该区最主要的盐土类型,土壤盐分以氯化钠为主,研究区地势平坦,常年种植棉花。

### 1.2 数据采集

数据采集初期在站内划定一块正北朝向约4 hm<sup>2</sup>的矩形试验田,从2012年4月棉田种植开始到2012年10月棉花成熟期,在试验田内分别于4月初、7月中旬、10月末分3期采集EM38表观电导率数据,每期采集点位置大致不变,每次采样270个。

每个采样点与相邻南北及东西采样点间间距分别为20 m和8 m,用GPS仪测定采样点经纬度数据并同时记录测定点周围的棉花长势状况。与其他EM38仪器在每点只可采两个层次范围的数据不同,所用EM38仪器具体型号为EM38-MK2,为改进版EM38,它在每个点上可采集三个层次电导率数据,测量值反映了地表以下0.375 m、0.75 m、1.5 m范围内电导率均值。将每期数据分别划分为表层、中层、底层三部分来表示各测定对应范围内的整体所处层次,采集的时期分别代表春、夏、秋季(下同)。依相对株高、花蕾数、健康状况等指标对中期棉花长势进行分级并赋值。

### 1.3 数据处理

利用SPSS 18.0软件进行描述性分析。用GS+7.0软件进行半变异函数模型拟合,采用ArcGIS 9.3地统计分析模块功能进行土壤电导率Kriging插值。结合经典统计学分析和地统计学分析结果,对比电导率插值图与棉花长势动态监测插值图,进行土壤盐渍化时空分布特征分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤电导率的描述性统计特征

EM38表观电导率数据经SPSS 18.0软件描述性分析汇总见表1。

表1 不同层次电导率统计特征参数

Table 1 Statistical feature parameters of electrical conductivity at different layers

| 土层<br>Soil layer     | 最小值<br>Minimum<br>(mS m <sup>-1</sup> ) | 最大值<br>Maximum<br>(mS m <sup>-1</sup> ) | 均值<br>Mean<br>(mS m <sup>-1</sup> ) | 偏度<br>Skewness | 峰度<br>Kurtosis | 变异系数<br>Coefficient of variation<br>(%) |
|----------------------|---|---|-------------------------------------|----------------|----------------|---|
| 表层(春)Surface(spring) | 64.00                                   | 932.0                                   | 311.3                               | 1.036          | 0.688          | 63.06                                   |
| 中层(春)Middle(spring)  | 84.00                                   | 860.5                                   | 342.8                               | 0.761          | -0.113         | 52.20                                   |
| 底层(春)Bottom(spring)  | 54.00                                   | 732.0                                   | 341.2                               | 0.374          | -0.304         | 41.28                                   |
| 表层(夏)Surface(summer) | 61.00                                   | 682.0                                   | 265.2                               | 0.668          | 0.167          | 47.10                                   |
| 中层(夏)Middle(summer)  | 86.00                                   | 824.0                                   | 328.8                               | 0.666          | 0.135          | 44.47                                   |
| 底层(夏)Bottom(summer)  | 108.0                                   | 889.0                                   | 367.5                               | 0.492          | 0.045          | 39.28                                   |
| 表层(秋)Surface(autumn) | 66.00                                   | 745.0                                   | 238.0                               | 1.299          | 1.808          | 52.42                                   |
| 中层(秋)Middle(autumn)  | 89.00                                   | 759.0                                   | 296.0                               | 0.902          | 0.798          | 43.00                                   |
| 底层(秋)Bottom(autumn)  | 106.0                                   | 716.0                                   | 340.0                               | 0.414          | -0.247         | 35.36                                   |

从表 1 可知,各季节中春季表层数据极差值最大,为  $868 \text{ mS m}^{-1}$ ,这是由于试验初期表土层盐分空间变异性最强,在数据采集初期实验区内有光板地存在,个别测定点表观电导率非常高,在芦苇及杂草丛生的地块上测得的电导率非常小,从而造成这种巨大差异性。一般情况下,变异系数在  $0 \sim 20\%$  之间属于弱变异强度,在  $20\% \sim 50\%$  之间属于中等变异强度, $>50\%$  属于强变异强度<sup>[12]</sup>。春季表层和春季中层电导率变异程度属于强变异强度,春季底层属于中等变异强度,且数值由上向下递减。这是由于自然条件下植物生长持续减盐和光板地地区持续聚盐作用,表层和中层盐分变异较大,底层主要受地下水影响变异较小。同期测得站内地下水监测水井水深  $2.4 \text{ m}$ 。均值对比春季各层间变化不大,土壤盐分分布近似成均匀型分布但已有向底聚型发展的趋势。峰度均远离 3,数据不成正态分布。夏季数据都呈中等变异强度,且数值上都较春季同层变异值小。这是由于 7 月份正值本区雨水期,对表层盐分有较强淋洗作用,促使盐分向底层聚集,同时棉花处于开花期,对营养元素及水分需求量大,土壤中部分盐分被植物吸收<sup>[13]</sup>。同时,均值比较显示表层  $<$  中层  $<$  底层且差异巨大,表层和中层均值较春季同层均减小,但底层较前期增大,土壤盐分分布呈明显底聚型。秋季数据显示,在相

同土层该期均值最小且较夏季各层均不同程度地减少,但是秋季表层呈强变异强度,中层底层呈中等变异强度,这可能是由于 10 月份正值棉花成熟期,植物对表层盐分吸收作用微弱。同时此时多为大风和干燥天气,表层水分蒸发较快,表层盐分分布有渐渐回归自然状态的趋势。虽然 7—9 月中旬雨水季节使地下水位有一定程度的上升,但此后水位下降的也快。至 10 月份时,地下水位基本维持在  $2.14 \text{ m}$  左右,所以中层和底层的变异程度较表层弱很多。秋季各土层均值上呈表层  $<$  中层  $<$  底层的现象,土壤盐分分布呈明显底聚型,相比于春季和夏季数据,在人为因素和自然因素的双重作用下,表层盐分含量大大减少。由表 1 还反映出总体上底层的电导率变异系数较小,说明土壤底层受外界干扰小,即使盐分含量在不同时期会有变化,但是盐分分布状态比较稳定。所有数据偏度均  $>0$ ,表明在一定范围内数据值小的样点多,数据值大的样点少,呈现一定的偏态分布,说明无论是自然状态还是人为干预下,土壤含盐量均有一种趋同性<sup>[12]</sup>。

利用 SPSS 18.0 计算各期数据同期不同层及同层不同期间相关系数,以及对同层不同期间数据进行  $T$  检验,分析它们之间的相关性和变化的显著性<sup>[14]</sup>,计算值汇总见表 2。

表 2 不同层次电导率相关系数及显著性检验值

Table 2 Correlation coefficients and Duncan test value of electrical conductivity at different layers

| 土层<br>Soil layer     | 表层(春)               | 中层(春)              | 底层(春)              | 表层(夏)               | 中层(夏)              | 底层(夏)              | 表层(秋)               | 中层(秋)              | 底层(秋)              |
|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|
|                      | Surface<br>(spring) | Middle<br>(spring) | Bottom<br>(spring) | Surface<br>(summer) | Middle<br>(summer) | Bottom<br>(summer) | Surface<br>(autumn) | Middle<br>(autumn) | Bottom<br>(autumn) |
| 表层(春)Surface(spring) | 1                   |                    |                    | 0.136               |                    |                    |                     |                    |                    |
| 中层(春)Middle(spring)  | 0.971 **            | 1                  |                    | 0.068               |                    |                    |                     |                    |                    |
| 底层(春)Bottom(spring)  | 0.814 **            | 0.918 **           | 1                  |                     |                    | 0.028              |                     |                    |                    |
| 表层(夏)Surface(summer) | 0.139               |                    |                    | 1                   |                    |                    | 0.018               |                    |                    |
| 中层(夏)Middle(summer)  |                     | 0.0169             |                    | 0.965 **            | 1                  |                    |                     | 0.004              |                    |
| 底层(夏)Bottom(summer)  |                     |                    | 0.204 *            | 0.933 **            | 0.963 **           | 1                  |                     |                    | 0.001              |
| 表层(秋)Surface(autumn) |                     |                    |                    | -0.144 *            |                    |                    | 1                   |                    |                    |
| 中层(秋)Middle(autumn)  |                     |                    |                    |                     | -0.175 **          |                    | 0.967 **            | 1                  |                    |
| 底层(秋)Bottom(autumn)  |                     |                    |                    |                     |                    | -0.203 **          | 0.933 **            | 0.941 **           | 1                  |

注: \* 表示  $p < 0.05$  水平上差异显著, \*\* 表示  $p < 0.01$  水平上差异显著。左下半部为相关系数值,右上部分为  $T$  检验的 sig 值 Notes: \* shows that the difference is significant at the level of  $p < 0.05$ , \*\* shows that the difference is significant at the level of  $p < 0.01$ . Lower left part shows relationship values, and the upper part shows sig  $T$  test

表 2 显示,同期不同层间电导率具有强烈的相关性,且数值大小表层与中层的相关系数最大,表层与底层的相关系数最小。这很好地说明了土壤盐分分布在垂直空间上的变化关系。表层受到的干扰因素多从而导致土壤扰动大,底层土壤没有扰动,扰动影响程度由上到下逐渐减弱,造成了各土层电导率相关强度的差异性。

春季和夏季以及夏季和冬季间相同土层间的相关性非常低,且 sig 值由表层到底层,由前两期到后两期逐渐显著降低。春季表层和夏季表层以及春季中层和夏季中层的 sig 值均大于 0.05,表明两期同土层测得的数据平均值在大于 5% 的几率上是相等的,而在小于 95% 的几率上不相等,平均值相等的几率比较大,差异是不显著,从而认为两组数据之间平均值是相等的。而其他层的比较上, sig 值均小于 0.05,表明它们之间平均值在小于 5% 的几率上是相等的,而在大于 95% 的几率上不相等,平均值相等的几率比较小,差异显著<sup>[15]</sup>。产生这种差异的原因可能是由于在自然因素和人为因素的双重影响下,尽管春季到夏季土壤盐分分布有均匀型转为底聚型,但在土壤自身的缓冲作用下土壤盐分并未在表层及中层表现出强烈的变化。上层受到的影响向下传递至底层,底层盐分含量增加,但

表 1 中显示的变异系数却相对有所减小,显现了土壤整体上所具有的对外环境干扰和维持内环境平衡的缓冲能力。夏季和冬季 sig 值很小,相同层之间差异很显著,尽管均值上差异不是很明显,变异系数上中层和底层减小的变化也不是很明显均呈中等变异强度。但是表层变异强度由中等变异强度变化为强变异强度。这种巨大显著性差异可能是由雨季时 7 月末 8 月初大量降雨所致。当年 7 月下旬降水 162.1 mm 较常年偏多 102.9 mm,8 月上旬降水 167.7 mm 较常年偏多 114.3 mm。降水过后水对土壤原来的整体稳定性产生巨大冲击,经过土壤的缓冲,土壤整体达到不同于以往的另一种稳定状态,这种稳定状态由底层向上层传递。但是此时表层受它直接接触到的外界环境因素如风、温度等影响更为强烈,这种稳定状态还不能在表层得到很好的表现。

## 2.2 土壤电导率空间变异特征分析

半方差函数也称为半变异函数,它是地统计学中研究土壤变异性的关键函数。半方差分析主要用来确定结构性因素和随机性因素对土壤空间变异的影响大小以及各层土壤特性间的空间相关性。经 GS + 7.0 软件计算,得到的最优半方差函数模型及参数值如表 3 所示。

表 3 不同层次电导率半方差函数模型

Table 3 Semivariogram models for electrical conductivity at different layers

| 土层<br>Soil layer       | 理论模型<br>Theoretical model | 块金值 $C_0$<br>Nugget ( $\text{g kg}^{-1}$ ) <sup>2</sup> | 基台值 $C_0 + C$<br>Sill ( $\text{g kg}^{-1}$ ) <sup>2</sup> | 块金值/基台值<br>Nugget/Sill (%) | 变程<br>Range (km) | 决定系数<br>$R^2$ |
|------------------------|---------------------------|---|---|----------------------------|------------------|---------------|
| 表层(春) Surface (spring) | 球状 Spherical model        | 0.122   | 0.422   | 0.712                      | 0.626            | 0.809         |
| 中层(春) Middle (spring)  | 球状 Spherical model        | 0.056   | 0.304   | 0.817                      | 0.633            | 0.834         |
| 底层(春) Bottom (spring)  | 球状 Spherical model        | 0.109   | 0.219   | 0.502                      | 0.646            | 0.866         |
| 表层(夏) Surface (summer) | 球状 Spherical model        | 0.106   | 0.270   | 0.608                      | 0.663            | 0.802         |
| 中层(夏) Middle (summer)  | 球状 Spherical model        | 0.074   | 0.228   | 0.675                      | 0.653            | 0.830         |
| 底层(夏) Bottom (summer)  | 球状 Spherical model        | 0.044   | 0.184   | 0.761                      | 0.700            | 0.870         |
| 表层(秋) Surface (autumn) | 球状 Spherical model        | 0.086   | 0.252   | 0.723                      | 0.646            | 0.898         |
| 中层(秋) Middle (autumn)  | 球状 Spherical model        | 0.094   | 0.254   | 0.630                      | 0.631            | 0.901         |
| 底层(秋) Bottom (autumn)  | 球状 Spherical model        | 0.084   | 0.272   | 0.689                      | 0.666            | 0.941         |

块金值与基台值的比  $C_0/C_0 + C$  为空间相关度,表示可度量空间自相关的变异所占的比例,反映系统变量的空间相关性的程度。当比值  $< 25\%$ ,说明系统具有强烈的空间相关性;如果比值在  $25\% \sim 75\%$  之间,表明系统具有中等的空间相关性;若比值

$> 75\%$  则说明系统空间相关性很弱<sup>[16]</sup>。块金值与基台值的比值表示随机部分引起的空间异质性占系统总变异的比。如果该比值高,说明样本间的变异更多的是由随机性因素引起的,如果该比值低,说明样本间的变异更多的是由结构性因素引起

的<sup>[17]</sup>。在研究区内,这些随机性影响因素主要包括施肥、灌溉、耕作制度、种植制度等人为活动影响因素;研究区内的结构性影响因素主要包括气候、母质、地形、土壤等自然影响因素。

由表 3 可以看出,各土层决定系数均大于 0.8,理论模型在球状模型下拟合最好。分析块金值与基台值比值可知,春季数据中表层和中层电导率空间相关性很弱,数据间的变异更多的是由随机性因素造成,这是由于初期开荒破坏了土壤浅层土,人为活动干扰,地表自然生长植被被清除,此时气候干旱,地表水分蒸发快,土壤中水分流失快,进而影响电导率的表观测量值。春季土壤底层  $C_0/C_0 + C$  为 0.502 在 25% ~ 75% 之间,底层电导率有中等空间相关性,且随机性因素和结构性因素影响比重基本相当,这是由于浅层人为活动的干扰渐渐影响到底层,电导率间的差异性是为人为活动影响因素和母质、土壤等自然因素共同作用的结果。分析其他层次数据发现,夏季土壤底层电导率空间相关性很弱,主要受随机性因素影响强烈,采集时间处于雨季(降水类似灌溉也属随机性因素),棉花需施肥也较多,之前研究也显示盐分分布呈底聚型,可见数据处理结果与实际相符合。其他各层次电导率均具有中等的空间相关性,说明其空间变异性由随机性因素和结构性因素共同作用,但是随机性因素所占比重较大;结合实际情况采集后两期数据时,明显随机性因素即人为活动因素影响较自然因素影响大。

## 2.3 土壤盐渍化时空分布格局分析

### 2.3.1 盐渍化特征分析的依据

在数据选取上,7 月份数据更符合实际生产情况下对盐渍化特征分析的需求,采集时间处于棉花生长旺盛期。如果此期数据可以很好地拟合实际,那么用 EM38 表观电导率进行前期出苗率判断以及后期棉花产量判断上有更好的说服力和可信度。

电导率插值图默认划分为 10 个等级,为避免人为操作因素对电导率插值图重分类产生的影响,因此将棉花的长势划分为非常好、较好、好、一般、差、较差、非常差、无 8 个层次<sup>[18-19]</sup>,赋值依次在 1 ~ 10、11 ~ 20、21 ~ 30、31 ~ 40、41 ~ 50、51 ~ 60、61 ~ 70、71 ~ 80 之间。利用 ArcGIS 空间插值功能,生成棉花长势插值分析图和 II 期电导率插值图(图 1)。对比图像可以看出:颜色越深的图斑区,电导率越大,对应的长势插值图中颜色越深的图斑区作物长势越差。两图中由北至南方向,颜色均呈先加深后减弱再加深的趋势,由东至西方向上颜色均呈先减弱后

加深再减弱再加深的趋势。图斑显示在东北至西南均呈明显的条带性分布。由此可以说明,EM38 表观电导率分布非常符合实际生产中棉花长势分布趋势,也进一步表明了直接用 EM38 数据进行土壤盐渍化特征分析的可行性。

### 2.3.2 盐渍化等级的划分与空间分布

由图 1 中的对比看出,夏季表层电导率插值图与棉花长势插值图拟合得更好。分析夏季棉花不同长势下的夏季表层电导率,将土壤盐渍化程度划分为 4 个等级,这更符合生产实际对盐渍化等级划分的需求。由于现有研究划分土壤盐渍化等级并无统一标准,皆是结合各自研究人员多年研究或借鉴他人研究经验进行划分。本文根据实际研究需要和前人研究经验进行了盐渍化等级划分<sup>[20]</sup>,EM38 仪器的测量范围在 0 ~ 1 000  $\text{mS m}^{-1}$ ,结合图 1 中 10 种颜色对应的电导率阈值,划分的 4 个盐渍化等级依次为:非盐化 0 ~ 150  $\text{mS m}^{-1}$ 、轻度盐化 150 ~ 300  $\text{mS m}^{-1}$ 、中度盐化 300 ~ 500  $\text{mS m}^{-1}$ 、重度盐化 500 ~ 1 000  $\text{mS m}^{-1}$ 。

从表 1 分析已知,由于数据不符合正态分布,在进行空间分析前要进行数据正态转化,检验数据的正态分布性是使用空间统计学 Kriging 方法进行土壤特性空间分析的前提,只有当数据服从正态分布时, Kriging 方法才有效,否则可能存在比例效应。经 SPSS18.0 软件 K-S 检验分析,所有数据经对数转换后服从正态分布。利用 ArcGIS9.0 对各期数据 Kriging 插值处理,得到的图像经栅格化处理及重分类,计算各等级盐渍土在研究区 4  $\text{hm}^2$  土地上所占比例值见表 4,各土层盐渍化等级空间分布图见图 2。

### 2.3.3 盐渍化分布特征分析

分析表 4 可知,非盐化土和轻度盐化土所占比例在表层和中层内逐渐增加,这是由于雨季强降水等强烈干扰因素,对土壤起到了很好的改良作用。但是在底层上非盐化土所占比例依次为 0.26%、0、1.55% 呈先减小后增加的趋势,这是由于中期雨水丰富,前文的描述性分析中也显示盐分分布由均匀型逐渐变为底聚型,强降水后雨水携带盐分持续下渗向更深层聚集,底层盐分呈先增大后减小的趋势。中度盐化土所占比例在表层上所占比例依次为 43.54% > 34.39% > 20.51% 呈减小趋势;但在中层上,中度盐化土所占比例基本保持不变;在底层上中度盐化土所占比例和重度盐化土所占比例均先增加后减小。这可能是由于中期雨季强降水对土壤表层强烈淋洗,使盐分向底层聚集,后经土壤自身缓冲作用盐

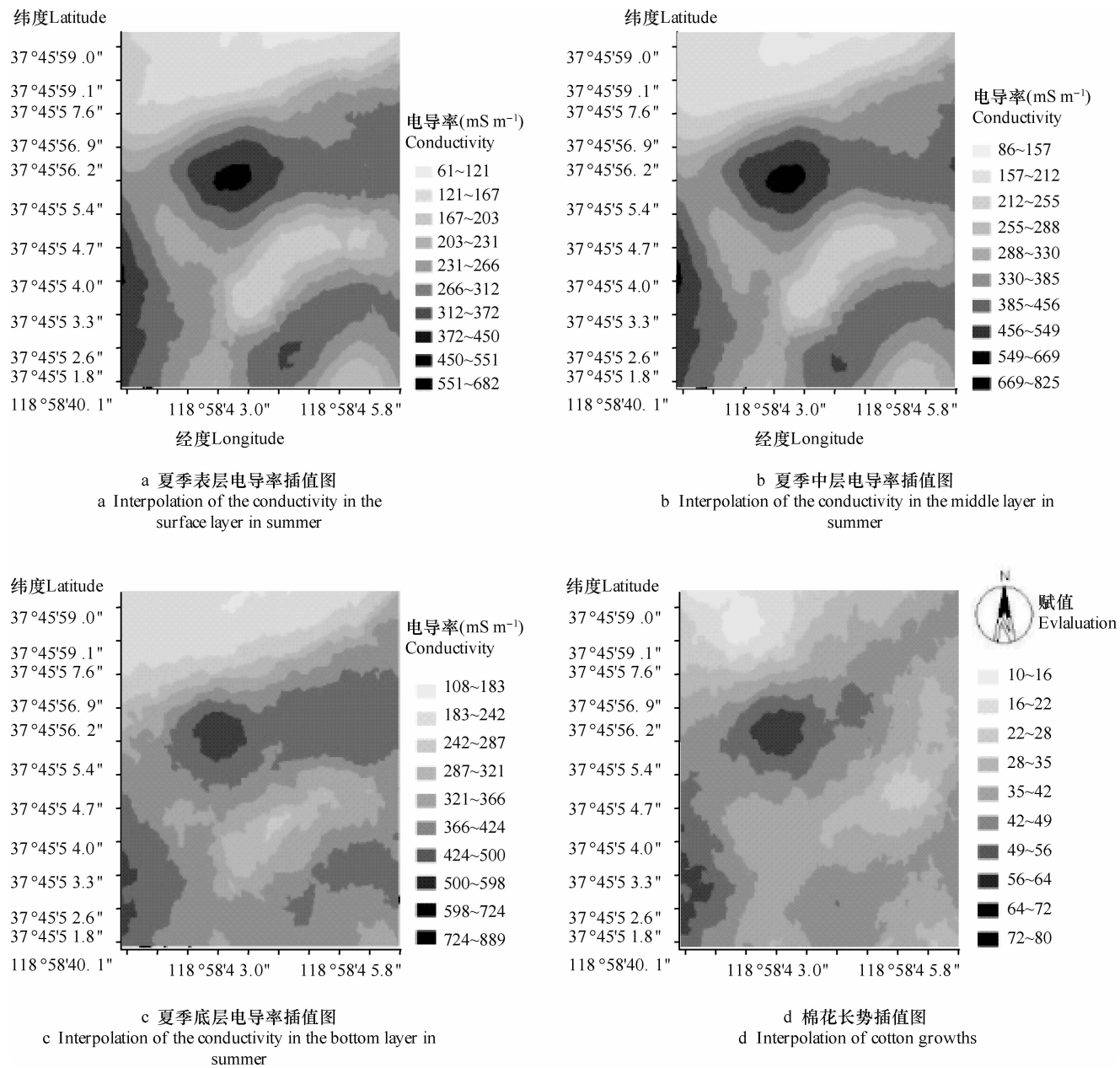


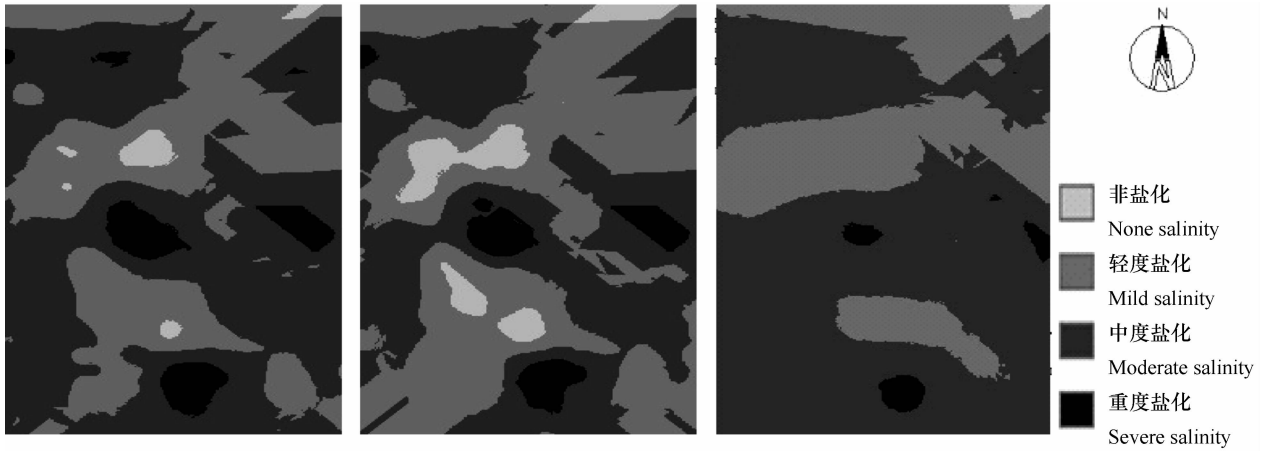
图 1 电导率插值图插值图与长势 Kriging 插值图

Fig. 1 Kriging interpolation diagrams of conductivity and plant growth

表 4 各层盐渍化等级的比例统计表

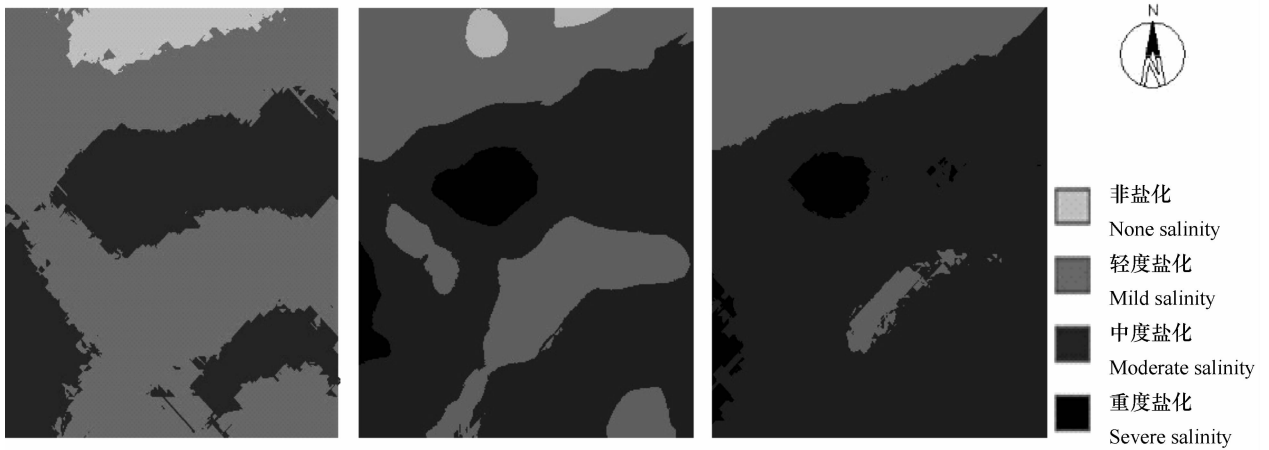
Table 4 Statistics of proportions of various grades of salinization in different soil layers (%)

| 盐渍化等级<br>Soil-salinity-class | 表层(春)<br>Surface<br>(spring) | 中层(春)<br>Middle<br>(spring) | 底层(春)<br>Bottom<br>(spring) | 表层(夏)<br>Surface<br>(summer) | 中层(夏)<br>Middle<br>(summer) | 底层(夏)<br>Bottom<br>(summer) | 表层(秋)<br>Surface<br>(autumn) | 中层(秋)<br>Middle<br>(autumn) | 底层(秋)<br>Bottom<br>(autumn) |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 非盐化 None salinity            | 5.54                         | 1.59                        | 0.26                        | 5.75                         | 1.71                        | 0.00                        | 11.93                        | 3.94                        | 1.55                        |
| 轻度盐化 Mild salinity           | 45.98                        | 36.69                       | 29.24                       | 59.86                        | 35.54                       | 21.73                       | 67.56                        | 42.13                       | 29.54                       |
| 中度盐化 Moderate salinity       | 43.54                        | 56.26                       | 68.69                       | 34.39                        | 57.31                       | 74.09                       | 20.51                        | 53.21                       | 65.51                       |
| 重度盐化 Severe salinity         | 4.95                         | 5.46                        | 1.81                        | 0.00                         | 5.44                        | 4.18                        | 0.00                         | 0.72                        | 3.40                        |



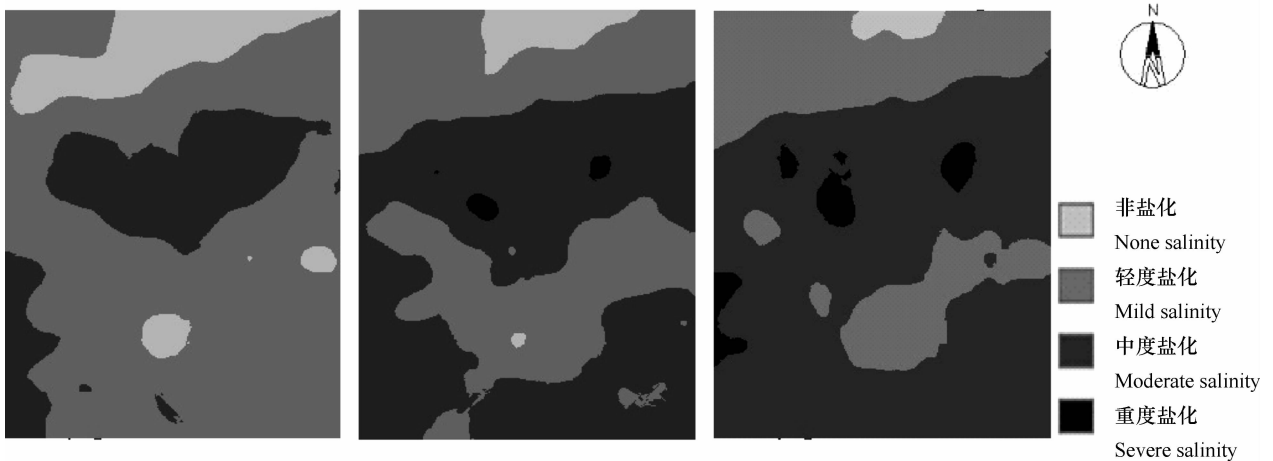
a 春季表层、春季中层、春季底层

a Salinity in the surface, middle and bottom layers in spring



b 夏季表层、夏季中层、夏季底层

b Salinity in the surface, middle and bottom layers in summer



c 秋季表层、秋季中层、秋季底层

c Salinity in the surface middle and bottom layers in autumn

图2 不同层次盐渍化等级空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of grades of salinization in different soil layers

分向更深层转移,底层中的盐分又恢复到它所能稳定维持的状态。重度盐化土在表层和中层上变化强烈,且这种变化影响由表层向中层传递,夏季时表层已不存在重度盐渍化土,但是中层变化不大,到秋季时中层重度化土所占比例由之前的 4.18% 降至 0.72%。这是由于表层土壤性质发生巨大变化,中层土壤受其影响也在变化。总体上分析可以认为,人为活动影响和强降水,对表层和中层的土壤盐渍化改良效果显著,对底层的盐渍化改良效果并不明显,这表明底层土壤的稳定性较表层和中层更高,结合图 2 中各色图斑变化,可以明显地看出土壤盐渍化特征变化程度上表层 > 中层 > 底层。EM38 表观电导率数据代表土壤含盐量结合实时作物长势动态观测确实可以对土壤盐渍化进行有效的动态分析。本文所做研究依据所测土壤表观电导率数据,研究区域尺度相对较小,在进行更大范围尺度的相关类似研究时,还应结合具体的实地条件制定更完备的方案以验证相关理论是否合理可行。

### 3 结 论

受降水等因素影响,黄河三角洲滨海区域土壤盐分分布类型在年内动态由均匀型转变为底聚型。棉花种植对盐渍化土壤有积极作用,但只是在表层间效果明显,同时由于棉花生长季节性,到下个种植季节,改良的效果可能不再存在。受土壤类型、水文地质条件及降水等因素影响,本区土壤各土层间盐分垂直方向上表现为强相关性,但是在水平层面上有强相关性时往往更多是由人为因素影响造成。

EM38 表观电导率分布与生产中棉花长势分布趋势有很好的相关性,即电导率越低,长势越好,由此也表明直接用 EM38 数据可进行土壤盐渍动态监测与特征分析。表观电导率受土壤水盐含量、土壤温度、土壤质地、土壤有机质及地下水动态等多个因素的影响,在下一步工作中将加大对上述参数的研究,结合棉花的出苗、开花、产量等参数精细测定,进行更加深入细致的研究,构建相关模型,以拓展 EM38 在盐渍化土地改良与管理中的应用。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 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. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 67—73. Yao R J, Yang J S, Liu G M. Application of electromagnetic induction EM38 to rapid analysis of soil salinization in the Yellow River delta ( In Chinese ). Agricultural Research in the

Arid Areas, 2008, 26(1): 67—73

- [ 2 ] 杨劲松. 灌溉土地利用的可持续性 with 盐渍土的修复. 土壤学报, 1999, 30( 专辑 ): 77—81. Yang J S. Irrigation land use sustainability and reatoration of saline soil ( In Chinese ). Chinese Journal of Soil Science, 1999, 30( Special Issue ): 77—81
- [ 3 ] 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. 水土保持学报, 2009, 23( 6 ): 210—214. Zhang T J, Yang J S, Liu G M. Study the soil salinization character of the Yangtze River Estuary Area weith an electromagnetic induction EM38 ( In Chinese ). Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23( 6 ): 210—214
- [ 4 ] 刘广明,吕真真. 典型绿洲区土壤盐分的空间变异特征. 农业工程学报, 2012, 28( 14 ): 100—107. Liu G M, L Z Z. Spatial variation characteristics of soil salinity in typical oasis region ( In Chinese ). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28( 14 ): 100—107
- [ 5 ] 吴月茹,王伟真,王海兵,等. 采用新电导率指标分析土壤盐分变化规律. 土壤学报, 2011, 44( 4 ): 869—873. Wu Y R, Wang W Z, Wang H B, et al. Analysis of variation of soil salt with new electric conductivity index ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2011, 44( 4 ): 869—873
- [ 6 ] 刘娅,潘贤章,王昌昆,等. 基于可见-近红外光谱的滨海盐土土壤盐分预测方法. 土壤学报, 2012, 45( 4 ): 824—829. Liu Y, Pan X Z, Wang C K, et al. Prediction of coastal saline soil salinity based on VIS-NIR reflectance spectroscopy ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2012, 45( 4 ): 824—829
- [ 7 ] 杨劲松,姚荣江,刘广明. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异性的指示克立格分析评价. 土壤学报, 2008, 41( 4 ): 585—593. Yang J S, Yao R J, Liu G M. Analysis and evaluation on spatial variability of soil salinity by indicator kriging with an electromagnetic induction gauge ( In Chinese ). Acta Pedologica Sinica, 2008, 41( 4 ): 585—593
- [ 8 ] Kühn J, Brenning A, Wehrhan M, et al. Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. Precision Agriculture, 2009, 10( 6 ): 490—507
- [ 9 ] Gregg E M, David M B, Chris R P, et al. Mapping soil pore water salinity of tidal marsh habitats using electromagnetic induction in Great Bay Estuary, USA. Wetlands, 2011, 31( 2 ): 309—318
- [ 10 ] Cambouris A N, Nolin M C, B, Zebarth J, et al. Soil management zones delineated by electrical conductivity to characterize spatial and temporal variations in potato yield and soil properties. American Journal of Potato Research, 2006, 83( 5 ): 381—395
- [ 11 ] Carolyn B, Hedley I, Yule J. Soil water status mapping and two variable-rate irrigation scenarios. Precision Agriculture, 2009, 10( 4 ): 342—355
- [ 12 ] 刘宁. 不同土地利用方式下黄河三角洲土壤特性空间变异研究——以垦利县为例. 山东: 山东农业大学资源与环境学院, 2007: 37. Liu N. Spatial variability of soil characteristics on different land use types in the Yellow River Delta-A case study in Kenli county ( In Chinese ). Shan Dong: College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, 2007: 37
- [ 13 ] 杨玉玲,田长彦,盛建东,等. 灌淤土壤可溶性盐分空间变异



- 性与棉花生长关系研究. 干旱区地理, 2002, 25(4): 329—335. Yang Y L, Tian C Y, Sheng Y D, et al. A study on relationship between spatial variability of soil solute salt and the cotton growth (In Chinese). Arid Land Geography, 2002, 25(4): 329—335
- [14] 张文彤, 闫杰. SPSS 统计分析基础教程. 北京: 高等教育出版社, 2004: 289—292. Zhang W T, Yan J. The basic tutorial of SPSS statistical analysis (In Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2004: 289—292
- [15] 孙逸敏. 利用 SPSS 软件分析变量间的相关性. 新疆教育学院学报, 2007, 23(2): 120—123. Sun Y M. Using SPSS software to analyze the correlation between variables (In Chinese). Journal of Xinjiang Education Institute, 2007, 23(2): 120—123
- [16] 谭万能, 李志安, 邹碧. 地统计方法在土壤学中的应用. 热带地理, 2005, 25(4): 306—310. Tan W N, Li Z A, Zou B. The application of geostatistics to soil science (In Chinese). Tropical Geography, 2005, 25(4): 306—310
- [17] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究. 农业工程学报, 2003, 19(2): 39—44. Zhang S J, He Y, Fang H. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS (In Chinese). Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(2): 39—44
- [18] 柏军华, 李少昆, 李静, 等. 基于多时相棉花长势遥感的棉花质量诊断. 中国农业科学, 2008, 41(4): 1003—1011. Bo J H, Li S K, Li J, et al. Diagnosing cotton field quality with multi-temporal remote sensing data of cotton growth (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(4): 1003—1011
- [19] 廖楚江, 王长耀, 李红, 等. 基于地质统计学影像纹理的石河子地区化控期棉花长势监测. 农业工程学报, 2006, 22(8): 135—139. Liao C J, Wang C Y, Li H, et al. Cotton growth monitoring during chemical control stage using geostatistical image texture: a case study of Shihezi (In Chinese). Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(8): 135—139
- [20] 刘庆生, 刘高焕, 薛凯, 等. 近代及现代黄河三角洲不同尺度地貌单元土壤盐渍化特征浅析. 中国农学通报, 2006, 22(11): 353—359. Liu Q S, Liu G H, Xue K, et al. Elementary Analysis on characteristics of soil salinization of geomorphology units with different scales in the neoteric and modern Yellow River delta (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(11): 353—359

## TEMPORAL-SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL SALT IN COASTAL COTTON FIELD SOIL

Sun Yunpeng<sup>1,2</sup> Chen Xiaobing<sup>2,3†</sup> Zhang Zhenhua<sup>1</sup> Wu Congwen<sup>4,2</sup> Yan Kun<sup>2,3</sup> Zhang Lihua<sup>2,3</sup>

(1 College of Geography and Planning of Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China)

(2 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China)

(3 Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, China)

(4 Institute of Life Science of Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

**Abstract** Using a portable Geonics EM38 electromagnetic soil conductivity meter, electrical conductivity of an experiment field at the Yellow River delta was measured in spring, summer and autumn to. Study the temporal-spatial distribution of soil salt. With the help of classical statistics and geostatistics, analysis was performed of the measurements. Results show that the correlation coefficients were all higher than 0.8 and hence in the category of strong correlation, while horizontally, they were in the range of -0.2 ~ 0.2 and the hence in the category of weak correlation. Soil salt was found to be accumulated in the bottom soil layer. Comparisons of coefficients of variation indicate that among the data collected at the same time, the variation was the highest in the surface layer and the lowest in the bottom layer. Semi-variance analysis shows that the nugget/sill ratios of the soil layers were all in the range of 25% ~ 75%. Spatial distribution of salt tended to be moderate in spatial correlation. Spatial interpolation diagrams were formed after values were assigned to cotton growth, and the diagrams of the same season were compared. Soil salinity was sorted into four grades. Proportion of each grade of soil salinity in the grid interpolation of the re-sorted salinity grades was calculated, and shows that the proportion of non-salinized soil has increased from 5.54% to 11.93% in the surface soil layer and that of slightly, salinized soil increased by 40%.

**Key words** The data of EM38; Salt; Temporal-spatial distribution; Salinity