

海水倒灌农田土壤盐分空间变异特征^①

张冬明, 张 文, 郑道君, 吉清妹, 吴宇佳, 潘孝忠,
符传良, 王钟友, 谢良商*

(海南省农业科学院农业环境与土壤研究所/农业部海南耕地保育科学观测试验站, 海口 571100)

摘 要:以海南省海口市三江农场为研究区域,采集并化验海水倒灌后土壤样品 191 份,利用地统计学方法和空间插值法对区域土壤盐分空间变异特征进行了研究。结果表明: 4 个土层中土壤盐分的均值最大的为 0~5 cm 土层,土壤盐分平均含量达到 9.63 g/kg,最小的是 20~40 cm 土层,盐分平均含量仅为 4.36 g/kg; 4 个土层中第一层(0~5 cm)土壤盐分含量属弱相关性,第四层(20~40 cm)土层属于剧烈空间自相关性; 各土层土壤盐分分布格局差异明显,含盐量 < 1 g/kg 的各土层均没有分布;含盐量 1~3 和 3~5 g/kg 两个级别随着土层深度的增加面积逐渐增大,> 9 g/kg 的级别则面积逐渐减少。不同深度土壤层土壤盐分含量差异明显,空间变异特征各不相同,总体呈现土壤盐分表聚特征。

关键词:土壤盐分;地统计学;空间变异;三江农场;海水倒灌

中图分类号:S156

海南岛属热带岛屿季风性气候,沿海岸线有不少面积的农田分布,受东北和西南季风影响,热带风暴和台风频繁,海水倒灌耕地现象时有发生;尤其是受较强台风影响的时候,海水倒灌现象明显,受害农田面积大,土壤恢复耕性周期长。土壤盐分过高对作物的危害大致有 3 点: 造成作物的生理干旱; 盐分离子的毒害; 破坏作物的正常代谢。土壤盐分的空间变异一定程度上反映了耕层土壤盐渍化状况,土壤资源的科学合理利用是建立在正确掌握区域土壤属性空间变异特征基础之上的^[1]。研究土壤盐分空间变异特征是土壤改良利用和盐渍化防治的基础,因此,研究和摸清海水倒灌农田土壤表层土壤盐分含量及分布特征对于指导人们根据土壤盐分动态变化规律和空间变异特性进行改良和防治,提升耕地质量,提高农业效益和农业的可持续发展乃至为海南的绿色崛起具有重要意义^[2-4]。

近年来,随着 3S 技术的迅猛发展,许多国内外学者运用地统计学对土壤盐分的空间变异性进行了大量研究,取得了一定的成果。Jordan 和 Navarro^[5]对土壤盐分在干旱和半干旱地区地质和环境因素影响下的空间变异进行了研究;李亮亮等^[6]对地统计学

基本原理及在土壤物理特性、土壤养分、土壤盐分、土壤重金属等土壤空间变异研究中的应用进行了论述;姚荣江等^[7]针对黄河三角洲地区存在的土壤盐渍化问题,运用经典统计学和地统计学相结合的方法研究了不同深度土层盐分含量的空间变异特征,并绘制了各土层盐分的随机性和结构性的半方差图以及空间分布图;王勇辉等^[8]分析了艾比湖主要补给河流下游河岸带土壤盐分特征;张同娟等^[9]运用电磁感应仪 EM38,结合 GIS 技术和地统计方法对长江河口地区典型地段土壤含盐量的空间变异性进行研究;孙运朋等^[10]对滨海棉田土壤盐分时空分布特征进行了研究;冉启洋等^[11]对塔里木河上游绿洲土壤表层盐分特征进行了研究,认为在研究区内盐分指标影响最大的是 Cl^- 和 Na^+ 。本研究通过野外调查采样、室内分析化验、综合运用地统计软件,对海水倒灌三江农场土壤盐分空间特征进行分析,以揭示盐渍化状况和空间分布规律,为当地盐渍化土壤的综合提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海口市三江农场,位于海南岛北部地区,土地总

基金项目:海南省耕地改良专项(HNGDhs201501)和海南省科研院所技术开发专项(KYYS-2015-12, KYYS-2016-02)资助。

* 通讯作者(lshxie@163.com)

作者简介:张冬明(1982—),男,江西井冈山人,硕士,副研究员,主要从事土壤改良与土壤信息系统研究。E-mail: purvery@163.com

面积 5 680 hm², 其中, 陆域面积 4 654 hm², 浅海滩涂地 1 026 hm²。属滨海平原地形, 地势东南高, 西北低, 西至北为大洋田, 地形平坦; 东南部地形为玄武岩和浅海沉积物形成的台地。主要土壤为水稻土、砖红壤、滨海盐土和潮汐土四大类。气候属热带季风气候, 年平均气温 23.4℃, 年降水量 1 560 mm, 光照充足适合农作物生长。目前, 三江农场水稻田以稻菜轮作模式为主, 即春夏季种植水稻、秋冬季种植瓜菜, 而旱坡地则以发展花卉和热带水果为主。据 2014 年 6 月采集的农田土壤分析结果可知, 农场农田土壤肥力中等, 主要养分含量为: 水溶性盐 0.92 g/kg、pH 5.10、有机质 1.97 g/kg、碱解氮 85.63 mg/kg、有效磷 13.52 mg/kg、速效钾 55.14 mg/kg。2014 年 7 月 18 日, 受超强台风“威马逊”和天文大潮的共同影响, 导致农场三分之一的农田倒灌海水, 加上水利设施的落后, 倒灌后的海水不能及时排掉, 造成多数田洋土壤盐分含量超标, 农作物根系腐烂变黑, 水稻严重减产或绝收, 直接影响到当地农民的吃饭问题。

1.2 土壤样品采集与分析

本次采样是在 2014 年第九号超强台风“威马逊”过后的 8 月 4—8 日, 以 2014 年 2 月 4 日拍摄的 MODIS 卫星影像数据为参考, 结合三江农场土地利用现状图, 应用 GPS 定位技术布设采样点(图 1), 观测点的布置综合考虑了当地土地利用方式、土壤类型和农田水利情况等因素, 并在此基础上尽可能规则分布, 以便于进行地统计分析。总共布设了 191 个采样点, 相邻两个采样点之间距离不超过 1.3 km, 每个样点用锄头挖出一个微型土壤剖面, 分层采集土壤样品, 取样深度为 0~5、5~10、10~20 和 20~40 cm, 每层取 3 个样品, 混合均匀后用四分法取大约 500 g 的土样带回实验室。土壤样品室内分析方法, 采用文献[12]的方法进行分析化验, 化验前先对土壤样品进行自然风干、磨碎、过筛处理, 制备 1:5 的土水质量比浸提液, 测定土壤全盐含量。

1.3 数据处理

采用 SPSS16.0 软件对研究区全盐的数据进行经典统计分析, 运用 GS+7.0 软件进行半方差函数计算, 而全盐空间插值以及分布图绘制均采用 ArcGIS 9.3 进行。

2 结果与分析

2.1 不同土层土壤盐分的统计特征

由表 1 中偏度和峰度系数可以判断, 土壤 10~

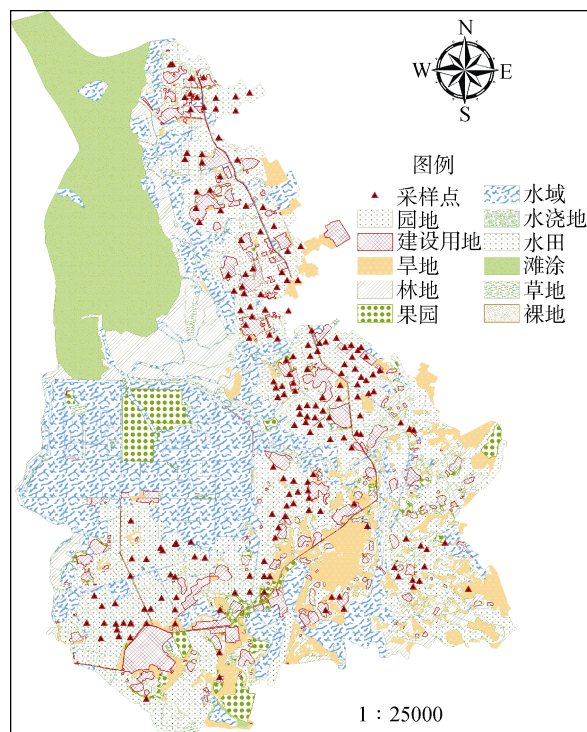


图 1 研究区土壤采样点分布图

20、20~40 cm 两个土层的土壤盐分含量均不符合正态分布类型, 在变异函数结构分析中一般需要将数据转化为符合正态分布或近似正态分布的数据类型, 避免产生比例效益^[13], 本研究中 10~20、20~40 cm 两个土层的土壤盐分含量经对数转换后符合正态分布; 而 0~5 和 5~10 cm 两个土壤盐分含量符合正态分布类型, 无需进行数据转换处理。4 个土层中土壤盐分的均值差异较大, 最大的为 0~5 cm 土层, 土壤盐分平均含量达到 9.63 g/kg, 最小的是 20~40 cm 土层, 盐分平均含量仅为 4.36 g/kg, 盐分含量大小顺序依次为: 0~5 cm>5~10 cm>10~20 cm>20~40 cm, 即随土层深度的增加土壤盐分含量逐渐降低。从平均值来看, 受本次海水倒灌的农田表层土壤盐渍化较为严重, 从单个土壤采样点的盐分含量来看, 仍有近 12.5% 的采样点土壤盐分超过了 20 g/kg。从变异系数来看, 4 个土层均超过了 100%, 属于强度变异性^[14], 说明受海水倒灌影响, 土壤盐分的差异性较大, 近海地区海拔相对较低, 海水浸泡时间长, 渗入到土壤表层的土壤盐分离子相对多; 反之亦然。

2.2 半变异函数分析

半方差函数模型的选取步骤是: 首先根据公式计算出 $Y(h)-h$ 的散点图; 然后用不同类型的模型进行拟合, 以选择离差平方最小为原则选择最佳模型, 最后用交叉验证法来修正所选模型的参数^[15]。本研究得到的半方差函数模型参数见表 2。

表 1 土壤盐分的描述性统计特征

土壤层次(cm)	分布类型	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	均值(g/kg)	标准差	变异系数(%)	偏度系数	峰度系数
0~5	正态	1.13	27.15	9.63	9.91	102.91	0.92	1.95
5~10	正态	1.11	25.08	6.05	6.32	104.46	0.99	1.51
10~20	非正态	1.41	27.46	5.04	6.38	126.59	3.14	11.59
20~40	非正态	1.33	27.35	4.36	6.48	148.62	3.26	12.11

表 2 土壤盐分变异函数模型参数

土壤层次(cm)	理论模型	块金值 C_0	基台值 C_0+C	块金效应 $C_0/(C_0+C)(\%)$	变程 $A_0(m)$
0~5	四球型	40.660	41.180	98.737	688
5~10	球形	89.010	104.958	45.889	826
10~20	球形	32.610	45.140	72.226	688
20~40	高斯	0.022	22.992	0.096	139

一般,半方差函数值都是随着样点间距的增加而增大,并在一定的间距(称为变程, arrange)升大到一个基本稳定的常数(称为基台, sill); C_0/C_0+C 为块金比(块金效应),表示空间异质性程度,即空间自相关程度。如果比值 $<25\%$,说明系统具有剧烈空间自相关性,空间变异主要受结构性因素的影响;如果比值在 $25\% \sim 75\%$ 之间,表明系统具有中等空间自相关性,空间变异是结构性因素和随机性因素共同作用的结果; $>75\%$ 说明系统空间自相关性很弱,空间变异主要是随机因素引起。由表 2 可知, $5 \sim 10\text{ cm}$ 和 $10 \sim 20\text{ cm}$ 两个土层土壤盐分含量属于中等空间自相关性,即空间变异是由结构性因素(成土母质、地形、地下水位和土壤类型等)和随机性因素(耕作模式、施肥方法等)共同作用的结果; $0 \sim 5\text{ cm}$ 土壤盐分含量属弱相关性,主要受随机因素引起的(如天气和农事活动等),即可把台风天气的海水倒灌理解成一次人为不合理措施;而 $20 \sim 40\text{ cm}$ 深土层属于剧烈空间自相关性,由于未直接与外界接触,其土壤盐分含量主要受地下水位和地表水渗漏的共同影响。从变程来看, $20 \sim 40\text{ cm}$ 土层土壤盐分趋于一个稳定数值的样点间距最短,仅 139 m ;此外, $5 \sim 10\text{ cm}$ 和 $10 \sim 20\text{ cm}$ 土壤盐分含量的半方差函数模型均为球形模型。

2.3 空间插值分析

为了更直观地反映整个农场土壤盐分的空间分布格局,依据 2.2 节所得到的半方差函数模型,采用 Kriging 最优内插法,编绘了研究区不同深度土壤盐分含量的空间分布图。

图 2 显示了各层土壤不同含盐量范围的面积分布情况。总体而言,随着土壤深度的增加土壤含盐量逐渐下降,第一层($0 \sim 5\text{ cm}$)土壤含盐量相对较高,

含量 $>9\text{ g/kg}$ 的土壤有 $3\,938.16\text{ hm}^2$,占农场总面积的 36.39% ;第二层($5 \sim 10\text{ cm}$)土壤含盐量较第一层有所降低,尤其是 $>9\text{ g/kg}$ 的区域有较大幅度的减少,只剩西部沿海地区有连片分布,此层土壤盐分含量集中在 $5 \sim 7\text{ g/kg}$,面积为 $3\,737.61\text{ hm}^2$,占总面积的 65.86% ;从第三层($10 \sim 20\text{ cm}$)土壤盐分的插值图可以看出,在西部沿海呈现一个三角形状的较高含盐量($7 \sim 9\text{ g/kg}$)区域,面积为 $1\,710.27\text{ hm}^2$,占总面积的 30.13% ,此区域的南部地区含盐量低于北部地区;第四层土壤盐分含量表现出与第三层土壤类似的变化规律,即以本农场西南沿海地区为中心,由西南向东北阶梯状下降的圆弧变化规律,只有极少面积的土壤含盐量 $>9\text{ g/kg}$,面积仅为 24.38 hm^2 ,仅占总面积的 0.43% ,绝大部分土壤含盐量 $<5\text{ g/kg}$ 。各土层的不同含盐量面积分布情况见表 3。

同样,从表 3 还可以看出,土壤含盐量 $<1\text{ g/kg}$ 的各土层均没有分布。含盐量 $1 \sim 3$ 和 $3 \sim 5\text{ g/kg}$ 两个级别随着土层深度的增加,面积逐渐增大。 $0 \sim 5$ 和 $5 \sim 10\text{ cm}$ 两个土层中含盐 $5 \sim 7\text{ g/kg}$ 的级别面积增加最大,第二层较第一层增加了 $3\,204.90\text{ hm}^2$;面积减少最多的是土壤含盐量 $>9\text{ g/kg}$ 的级别,第二层较第一层减少了 $3\,872.09\text{ hm}^2$ 。

3 结论与讨论

采集的海口市三江农场土壤剖面 4 个土层中土壤盐分的均值差异较大,最大的为 $0 \sim 5\text{ cm}$ 土层,土壤盐分平均含量达到 9.63 g/kg ,最小的是 $20 \sim 40\text{ cm}$ 土层,盐分平均含量仅为 4.36 g/kg ,盐分含量大小顺序依次为: $0 \sim 5\text{ cm}>5 \sim 10\text{ cm}>10 \sim 20\text{ cm}>20 \sim 40\text{ cm}$,表层土壤第一、二层次($0 \sim 5, 5 \sim 10\text{ cm}$)的盐分含量服从正态分布;第三、四层土壤($10 \sim 20, 20 \sim 40\text{ cm}$)

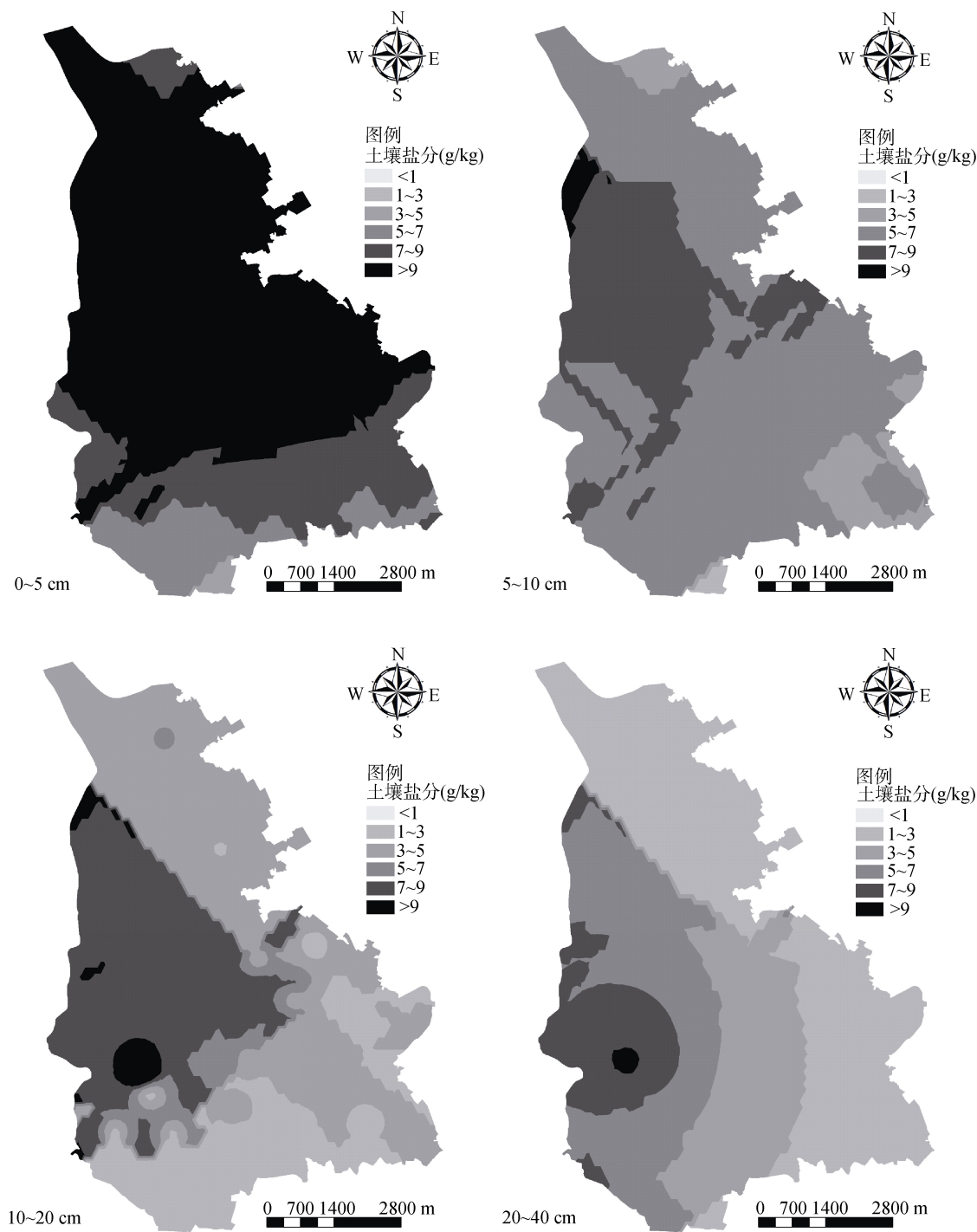


图 2 土壤盐分含量空间插值分布图

表 3 不同深度土层各盐分级别面积统计表

盐分分级 (g/kg)	0 ~ 5 cm		5 ~ 10 cm		较上一层 增量(hm ²)	10 ~ 20 cm		较上一层 增量(hm ²)	20 ~ 40 cm		较上一层 增量(hm ²)
	面积 (hm ²)	百分比 (%)	面积 (hm ²)	百分比 (%)		面积 (hm ²)	百分比 (%)		面积 (hm ²)	百分比 (%)	
<1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1 ~ 3	0.00	0.00	27.46	0.48	27.46	1 149.10	20.25	1 121.64	2 395.37	42.21	1 246.27
3 ~ 5	39.57	0.70	394.93	6.96	355.36	2 298.28	40.50	1 903.36	1 130.67	19.92	-1 167.62
5 ~ 7	532.71	9.39	3 737.61	65.86	3 204.90	388.11	6.84	-3 349.50	1 443.21	25.43	1 055.11
7 ~ 9	1 164.93	20.53	1 449.30	25.54	284.37	1 710.27	30.13	2 60.97	681.74	12.01	-1 028.53
>9	3 938.16	69.39	66.07	1.16	-3 872.09	1 29.60	2.28	63.53	24.38	0.43	-105.23

的盐分含量不服从正态分布。4个层次土壤盐分含量的变异系数均超过了100%，属于强变异程度。

从空间自相关性来看，第一层(0~5 cm)土壤盐分含量属弱相关性，第四层(20~40 cm)深土层属于剧烈空间自相关性；第四层(20~40 cm)变程最短，仅139 m；5~10 cm和10~20 cm土壤盐分含量的半方差函数模型均为球形模型。

4个土层盐分含量分布格局差异明显，含盐量<1 g/kg的各土层均没有分布。含盐量1~3和3~5 g/kg两个级别随着土层深度的增加，面积逐渐增大。0~5和5~10 cm两个土层中含盐5~7 g/kg的级别面积增加最大，第二层较第一层增加了3 204.90 hm²；面积减少最多的是土壤含盐量>9 g/kg的级别，第二层较第一层减少了3 872.09 hm²。

一般认为，土壤盐分的空间分布特征是自然条件和人为因素综合作用的结果，但主导因素各地区有所不同，受土地利用方式和地形地貌的影响较大。本研究中，海水倒灌是最主要因素，由于海拔较低又是沿海地区，地下水也是不可忽略的因素；同时，研究区内的水利设施欠完善，也是导致本次盐害不能及时排除或降低的重要因素之一，7—10月是海南的雨季，这4个月集中了全年60%的降雨量，按常理经过这几个月的降雨洗盐作用，土壤盐分应该有较大幅度下降，但是研究人员几次到实地调研，发现多数田洋还是积水，但土壤盐分含量还有待第二次采样调查，在此未能进行研究讨论。

参考文献：

- [1] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 等. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 946-954
- [2] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙, 等. 基于聚类分析的土壤盐渍剖面特征及其空间分布研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(1): 56-65
- [3] 管孝艳, 王少丽, 高占义, 等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 1 002-1 010
- [4] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 178-181
- [5] Jordan M M, Navarro P J. spatial dynamics of soil salinity under arid and semiarid conditions[J]. Environmental Geology, 2004, 45: 448-456
- [6] 李亮亮, 依艳丽, 凌国鑫, 等. 地统计学在土壤空间变异研究中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 265-268
- [7] 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
- [8] 王勇辉, 马蓓, 海米提, 等. 艾比湖主要补给河流下游河岸带土壤盐分特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(2): 196-201
- [9] 张同娟, 杨劲松, 刘广明. 长江河口地区典型地段土壤盐分特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(3): 32-35
- [10] 孙运朋, 陈小兵, 张振华, 等. 滨海棉田土壤盐分时空分布特征研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(5): 891-899
- [11] 冉启洋, 贡璐, 韩丽, 等. 塔里木河上游绿洲土壤表层盐分特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4): 1 098-1 103
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005
- [13] Yao R J, Yang J S. Quantitative analysis of spatial distribution pattern of soil salt accumulation in plough layer and shallow groundwater in the Yellow River Delta[J]. Transactions of the CSAE., 2007, 23(8): 45-51
- [14] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间变异性特征[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 33-38
- [15] 颜安, 蒋平安, 盛建东, 等. 玛纳斯河流域表层土壤盐分空间变异特征研究[J]. 土壤学报, 2014, 52(2): 410-414

Spatial Variability of Surface Soil Salinity of Farmland by Seawater

ZHANG Dongming, ZHANG Wen, ZHENG Daojun, JI Qingmei, WU Yujia, PAN Xiaozhong ,
FU Chuanliang, WANG Zhongyou, XIE Liangshang^{*}

*(Agricultural Environment and Soil Research Institute of Hainan Academy of Agricultural Sciences /Scientific Observing and
Experimental Station of Arable Land Conservation (Hainan), Ministry of Agriculture, Haikou 571100, China)*

Abstract: Characteristics of the soil salinity of the SanJiang farm in Haikou city was studied by using geostatistics and spatial interpolation methods on the bases of collecting and measuring soil samples with seawater intrusion. The results showed that the maximum mean soil salinity was 9.63 g/kg happened in 0–5 cm layer, and the minimum one was 4.36 g/kg, happened in 20–40 cm layer. The 0–5 cm layer was a weak correlation in soil salt content while the 20–40 cm layer was intense spatial correlation. The distribution pattern of soil salinity had obvious difference between different layers, and no layer with less than 1 g/kg of salt content. With the increase of soil depth, the areas of 1–3 g/kg and 3–5 g/kg salt contents increased gradually, while the area of greater than 9 g/kg salt content reduced. The differences of soil salt contents in different soil depths were obvious, and spatial variability were also different, generally there is a surface accumulation of salt.

Key words: Soil salinity; Geostatistics; Spatial variation; Sanjiang farm; Seawater intrusion