

# 黄河三角洲多尺度土壤盐分的空间分异

王 红<sup>1</sup>, 官 鹏<sup>2</sup>, 刘高焕<sup>3</sup>

(1. 河海大学水资源环境学院, 南京 210098; 2. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093;

3. 中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101)

**摘要:** 本文利用多尺度采样数据, 探索了两个深度土壤盐分的空间分异, 分析了不同尺度、深度土壤盐分的变异系数和空间相关性(结构方差与基台值之比)的变化, 揭示了形成这种空间变异的地貌因素, 最后利用普通克立格(ordinary kriging)方法对土壤盐分的分布进行了估测。分析发现, 研究区土壤盐分的空间变异具有三个尺度。随着采样间隔的增加和区域的扩大, 盐分分布空间相关性增强, 且下层比上层具有更高的空间相关性。地貌因素(微地貌类型、坡度和高程)均具有较高的空间相关性, 当与地貌因素关系密切时, 该尺度及深度的土壤盐分空间相关性就大; 反之, 则小, 这时可能主要受具有较小空间相关性其他因子的影响(如人为活动)。最后对合理的土壤采样提出了建议。

**关键词:** 土壤盐分; 地貌因素; 空间相关性; 多尺度; 普通克立格; 黄河三角洲

文章编号: 1000-0585(2006)04-0649-10

## 1 引言

黄河三角洲是世界造陆速度最快的河口三角洲之一<sup>[1]</sup>, 这里土地资源丰富, 开发前景广阔, 惟土壤盐渍化严重, 滨海盐渍土面积约占土壤总面积的 63.6%<sup>[2]</sup>, 土壤盐渍化成了制约区域经济发展的主要因素<sup>[3]</sup>。盐渍化土壤是在一定的环境条件下形成和发育的, 在众多的环境因素中, 又以气候、地形、地质、水文和水文地质及生物因素的影响最为显著<sup>[4]</sup>。由于黄河尾间淤积、延伸、抬高、摆动、改道的规律性演变, 形成了岗、坡、洼相间排列的复杂微地貌<sup>[5]</sup>。这些微地貌控制着地表物质和能量的分配、地表径流和地下水的活动, 从而对水盐在不同中小地形部位的重新分配起着支配作用<sup>[4]</sup>。土体中的盐分产生重新分异: 高地以淋溶为主, 洼地既不淋溶也不累积, 坡地则累积于地表形成了盐碱地<sup>[6]</sup>。土壤盐渍化的轻重程度以及潜水深浅咸淡等一般是与微地貌单元的空间分布状态相吻合的<sup>[7]</sup>。

前人早就定性描述了不同小地形对土壤盐分分布的影响<sup>[8~10]</sup>, 利用传统统计学参数描述了黄河三角洲土壤盐分在不同微地貌类型之间的空间变异<sup>[11,12]</sup>。由于传统统计学视样本变量之间完全独立, 这与土壤盐分分布并非独立、而有一定的相关性不甚相符。地统计学由于引入区域化变量理论, 既考虑了土壤性质的随机性, 又考虑了其结构性, 较好地处理了土壤特性这个随机变量, 因而日益成为研究土壤空间变异性的重要工具<sup>[13~16]</sup>。虽然在国内其他区域, 利用半变异模型参数定量分析土壤盐分空间变异的研究已非常普

收稿日期: 2005-11-15; 修订日期: 2006-04-24

基金项目: 中国科学院海外杰出人才基金(2001-F-13); 国家自然科学基金项目(40371093)

作者简介: 王红(1968), 女, 江苏南通人, 博士, 目前于新西兰奥克兰大学从事空间数据结构和土地利用/覆盖变化的博士后工作。E-mail: wanghongnj@hotmail.com

遍<sup>[17~20]</sup>，也发现了土壤盐分具有不同尺度的空间变异<sup>[21]</sup>，但利用半变异模型参数揭示土壤盐分多尺度空间变异与环境因子之间定量关系的，还未见报道。在国外，学者们致力于多尺度的比较并且发现了嵌套尺度（nested scales）的空间结构<sup>[22~24]</sup>。为何土壤特性的空间变异具有尺度效应呢？土壤特性的多尺度变异说明了在土壤和环境系统中，不同环境因子影响是作用于不同尺度的<sup>[25]</sup>，故对多尺度土壤盐分空间变异结构和环境因子的研究有助于更好地理解这些作用于不同尺度的环境因素和土壤特性之间复杂的交互作用<sup>[26]</sup>。本文主要从影响土壤盐分的地形方面着手，探讨微地貌类型、坡度和高程三个因素对研究区土壤盐分空间变异的影响。以多尺度采样数据为基础，首先用传统统计方法描述土壤盐分在不同微地貌类型之间的空间分异特征，其次运用地统计学半变异函数参数——空间相关性探索土壤盐分在不同尺度、深度和区域的空间结构以及与地貌因素的定量关系，最后利用普通克立格法对不同尺度、深度的土壤盐分空间分布进行估测，以期研究土壤盐渍化空间变异的合理采样、理解不同尺度和区域土壤盐分空间分异的地貌因素提供依据。

## 2 研究区概况与研究方法

### 2.1 研究区概况

近代黄河三角洲位于东经  $118^{\circ}07' \sim 119^{\circ}18'$ ，北纬  $36^{\circ}55' \sim 38^{\circ}12'$  之间，以垦利县的宁海镇为顶点，呈东南至淄脉河沟口与西北至套尔河之间的扇形区，面积约  $6000\text{km}^2$ 。研究区属暖温带半湿润大陆性季风气候区，多年平均气温  $11.7 \sim 12.6^{\circ}\text{C}$ ，降水量  $530 \sim 630\text{mm}$ ，蒸发量  $1750 \sim 2430\text{mm}$ 。本区地势低平，51%的面积高程  $< 3\text{m}$ ，只有5%的面积高程  $> 8\text{m}$ ，坡度  $\leq 3^{\circ}$ 的面积占55%。由于黄河多次改道，各种微地貌类型发育（图1）。其中河滩地主要分布于黄河河道至大堤之间；河成高地主要分布于历史时期黄河决口扇面

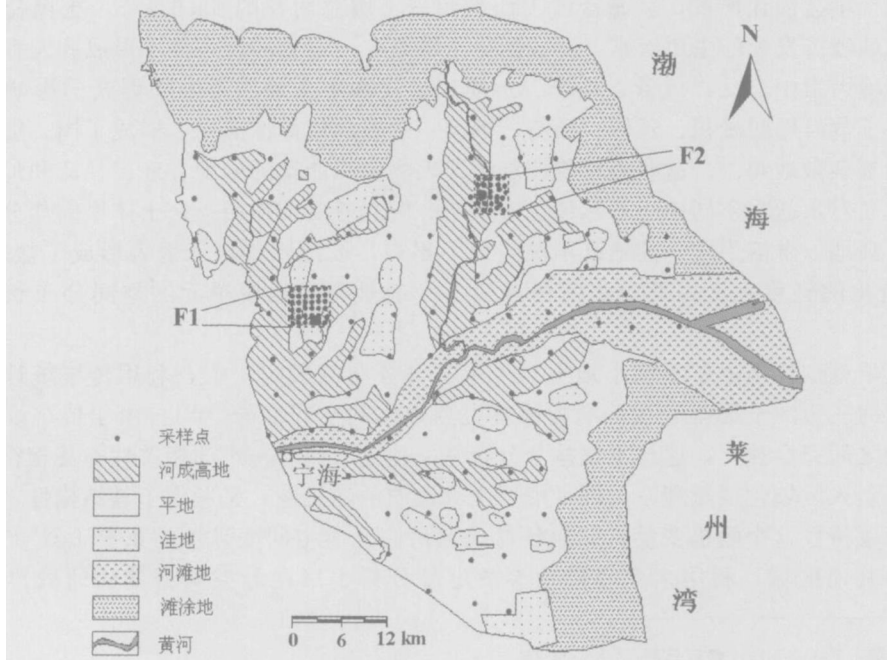


图1 黄河三角洲微地貌与采样点分布图

Fig 1 Micro geomorphology and the distribution of soil samples in the YRD

上游;微斜平地是岗、洼过渡地带;浅平洼地分布于微斜平地与缓岗之间以及黄河故道低洼处;滩涂地为沿海岸线滩涂。

2 2 采样点布局

有关土壤特性采样方法、设计和布局的一般准则已有很多讨论<sup>[27, 28]</sup>, 从一个区域到另一个区域不同尺度的土壤特性变异提醒我们不能单纯运用简单的“食谱”;而要根据不同研究区特点进行相应的设计<sup>[29]</sup>。为了掌握本区土壤盐分空间变异的特点, 样点呈 6km × 6km 的网格分布, 另有两个密集区 (F1 和 F2, 见图 1), 其内的样点分布分为三个层次: 1km × 1km, 0.2km × 0.2km 和 0.04km × 0.04km。除了 6km 间隔, 其他采样间隔的样点东西和南北向约有 4~ 6 个、共约有 20~ 35 个 (表 2 统计特征参数列和图 3)。两个密集区的选择基于这样的考虑: 不同的形成时间、微地貌类型以及黄河水测渗对土壤盐分的影响。F1 已有 100 年时间, F2 只有 40 年;平均高程分别为 6.34 m 和 3.28 m, 平均坡度分别为 3°和 10°; F1 微地貌类型有河成高地、平地 and 洼地, F2 只有河成高地和平地, 呈南北走向, 东侧平地, 西侧接近黄河故道 (1976 年以后改为现行河道), 为河成高地 (图 1)。

2 3 数据的获得

土壤采样时间为 2003 年 10 月 8~ 27 日, 因暴雨, 11 和 12 日没有采样。在每个样点, 用铁铲挖出 1m 的剖面, 土壤样本分别从 30~ 40cm 和 90~ 100cm 两层采集。对每个样点用 GPS 确定其地理位置。实际可用样点上层为 239 个、下层为 238 个。对所有采集的样品风干, 碾碎, 过 1mm 筛, 用常规法测定八大盐分离离子 (包括 K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, 单位: %) 含量<sup>[30]</sup>, 土壤盐分 (计算全盐量) 为上述八种离子含量之和。地貌因素 (微地貌类型、坡度和高程) 数据由黄河三角洲可持续发展图集空间数据库提供<sup>[5]</sup>。

2 4 地统计方法

地统计是最佳线性无偏局部估值方法, 能估测区域化变量在未知采样点的属性值<sup>[31]</sup>。土壤盐分半变异函数计算的一般表达式为:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \tag{1}$$

式中,  $Z(x_i)$  和  $Z(x_{i+h})$  分别为区域化变量  $Z$  在样点  $x_i$  和  $x_{i+h}$  的测量值,  $N(h)$  是给定距离  $h$  样点对数目。土壤全盐量的分布预测由半变异函数值的最优拟合实现, 经检验最优拟合曲线均为球状模型 (公式 2)。式中  $C_0$  是块金值 (nugget),  $C_1$  是结构方差 (spatial variance),  $a$  是变程 (range),  $h$  是步长大小 (lagged size)。采用交叉验证法 (cross-validation) 比较实测和预测值<sup>[32]</sup>。详细的地统计学原理与方法见文献<sup>[33]</sup>。本文所有地统计计算都基于 ArcGIS8.1 的 Geostatistical analyst 模块。

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \operatorname{sph}\left[\frac{h}{a}\right] \tag{2}$$

利用统计软件 SPSS10.0 的非参数 K-S 检验 (kolmogorov-semirnov test) 采样数据分布的正态性, 发现本区不同深度和采样尺度土壤盐分都呈非正态分布。数据的非正态分布导致非稳定性, 而稳定性是半变异函数分析的基本条件。一般的解决方法是把原始数据转换为接近正态分布的数据, 然后利用转换后的数据分析半变异函数, 显示最终结果之前再把数据转换回去; 另一种方法是首先去除确定性的全局趋势, 然后对残差 (随机变量) 进行

分析, 最后在插值结果显示之前再把全局趋势加进去。分别对这两种方法交叉验证结果进行比较, 显示后者精度更高, 故本文采取第二种方法。趋势的发现及去除的方法见文献[ 20]。

3 结果与分析

3.1 不同微地貌类型土壤盐分空间分异

土壤盐分最大值出现在平地上层, 最小值出现在河成高地和河滩地 (表 1)。经逐步聚类 (k-means cluster) 分析显示, 滩涂地和平地属于第一类型 (均值为 0.87), 河成高地、洼地和河滩地属于第二类型 (均值为 0.30)。从表 1 也可看出平地 and 滩涂地土壤盐分的均值高, 这与前人的研究相似<sup>[11, 12]</sup>。

表 1 黄河三角洲不同微地貌类型土壤盐分 (%) 变异的特征统计

Tab 1 Statistical character of salt distribution between different micro geomorphologic units in the YRD							
微地貌类型	面积比例 (%)	采样深度 (cm)	采样数	最小值	最大值	均值	变异系数
河成高地	18.17	30~40	92	0.03	1.41	0.34	0.91
		90~100	92	0.03	1.05	0.33	0.70
平地	35.52	30~40	86	0.07	2.04	0.72	0.67
		90~100	85	0.06	1.90	0.58	0.62
洼地	6.8	30~40	49	0.04	1.54	0.35	0.82
		90~100	49	0.06	1.65	0.33	0.84
河滩地	11.57	30~40	10	0.05	0.59	0.22	0.78
		90~100	10	0.03	0.59	0.25	0.77
滩涂地	27.94	30~40	2	0.55	1.48	1.02	0.65
		90~100	2	0.64	1.14	0.89	0.40
总计	100	30~40	239	0.03	2.04	0.48	0.88
		90~100	238	0.03	1.90	0.42	0.76

参考黄河三角洲土壤盐分分类标准<sup>[34]</sup>, 根据土壤表层盐分对农业开发利用的难易程度, 分之为三个等级: 土壤全盐量 < 0.4% 为非或轻度盐渍土, 0.4~0.8% 为中度盐渍土, > 0.8% 为重度盐渍土。对上层 239 个样本盐渍化程度空间分布进行统计 (图 2), 发现不同微地貌类型的盐渍化程度不同。河成高地和洼地主要是一些非及轻度盐渍土; 平地中轻、中、重度盐渍土分布比例基本接近, 重度所占比例略大; 河滩地 10 个采样点中有 9 个属于非及轻度盐渍土范围; 两个落在滩涂地的样点分别属于中度和重度盐渍土。

3.2 描述性统计

不同区域、尺度和深度土壤盐分变异系数变化范围为 0.58~0.98 (表 2 统计特征参数列), 可以看出此区盐分具有较高度度的变异。在 F1 中, 小尺度 (采样间隔为 0.04~0.2 km) 上层的变异系数大于下层; 中尺度 (采样间隔为 1 km) 上层的变异系数小于下层。在 F2 中, 上下层变异系数的变化正好与 F1 相反。大尺度 (采样间隔为 6 km) 上层

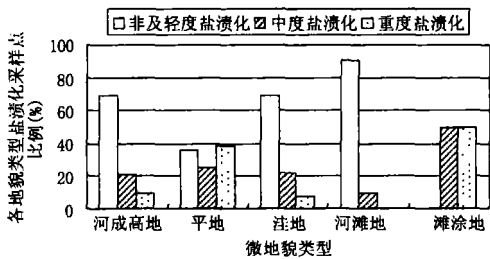


图 2 黄河三角洲土壤上层盐渍化程度的空间分异  
Fig 2 Spatial variation of soil salinity in top layer in the YRD

的变异系数大于下层。从表 2 还可发现, 多尺度混合和大尺度的变异系数大, 如最大值在 F2 (0.04~1km)。

3.3 空间结构分析

通过把方差引入到自相关性, 地统计方法能探测、量化大多数尺度的空间变异, 而这较之传统的数理统计方法更为有效<sup>[35]</sup>。不同尺度土壤盐分分布的最佳拟合模型特征参数见表 2 中的半变异理论模型参数列。空间相关性 (结构方差与基台值之比) 表明系统变量空间相关性程度。如果比值大于 0.75, 说明系统具有强烈的空间相关性; 在 0.25~0.75 之间, 表明系统具有中等的空间相关性; 小于 0.25 说明系统空间相关性很弱<sup>[14]</sup>, 即在该采样尺度几乎没有探测到空间结构<sup>[26]</sup>。表 2 (以及表 3) 中其他半变异模型参数的解释可参照文献 20。

表 2 黄河三角洲不同采样尺度与深度土壤盐分 (%) 的统计特征与半变异理论模型参数以及与地形指数的关系

Tab 2 Statistical character and semivariogram model of total salt (%) distribution and coefficients of correlation between total salt and geomorphic index in the YRD										
尺度与深度	统计特征参数			半变异理论模型(球状模型)参数				与地形指数相关关系(R)(%)		
	个数	均值	变异系数	结构方差	空间相关性	最大变程	RM SE	微地貌	坡度	高程
(1) 采样深度: 30~40 cm										
F1(0.04km)	24	0.28	0.69	0.021	0.597	0.149	0.198			
F1(0.2km)	25	0.38	0.74	0.039	0.484	0.596	0.268	-4.0	13.8	-5.5
F1(1km)	35	0.57	0.61	0.073	0.589	4.863	0.344	2.6	9.5	-49.6**
F1(0.04~1km)	80	0.42	0.75	0.026	0.661	0.179	0.274	14.0	19.6	-56.0**
F2(0.04km)	22	0.12	0.72	0.012	0.363	0.218	0.187		-7.8	0.7
F2(0.2km)	20	0.28	0.64	0.028	0.708	0.933	0.162		-23.1	-50.3**
F2(1km)	29	0.72	0.64	0.153	0.615	7.530	0.422	52.5**	-37.6**	-14.6
F2(0.04~1km)	65	0.43	0.98	0.015	0.458	0.218	0.335	69.4**	-39.7**	-51.6**
R(6km)	96	0.56	0.86	0.156	0.919	12.01	0.381	38.9**	-15.3	-35.5**
整个研究区 (0.04~6km)	239	0.48	0.88	0.202	0.921	6.848	0.342	42.6**	-17.2**	-30.2**
(2) 采样深度: 90~100 cm										
F1(0.04km)	24	0.25	0.59	0.006	0.369	0.109	0.144			
F1(0.2km)	25	0.25	0.58	0.005	0.203	0.794	0.147	-0.3	-0.1	25.9
F1(1km)	35	0.52	0.64	0.072	0.695	4.565	0.314	-1.9	10.5	-52.9**
F1(0.04~1km)	80	0.37	0.76	0.014	0.561	0.199	0.234	17.5	12.4	-63.1**
F2(0.04km)	22	0.26	0.77	0.042	1	0.159	0.181		45.1**	11.9
F2(0.2km)	20	0.26	0.66	0.029	0.939	0.993	0.137		-23.1	-50.3**
F2(1km)	29	0.55	0.61	0.080	0.605	7.487	0.276	59.4**	-35.8	
F2(0.04~1km)	65	0.40	0.75	0.041	1	0.169	0.213	65.1**	-26.4*	-39.8**
R(6km)	95	0.48	0.73	0.062	1	6.950	0.266	34.7**	-3.7	-39.6**
整个研究区 (0.04~6km)	238	0.42	0.75	0.101	0.900	5.756	0.251	4.3	-6.0	-32.7**

注: F1 和 F2 分别表示密集区 1 和密集区 2, R 表示采样间隔为 6km 的区域; 微地貌类型河滩地、河成高地、洼地、平地  
和滩涂地分别设置为 1、2、3、4、5 五个等级(下同), 然后与土壤盐分作相关分析; RMSE 为均方根误差; 所有空白的  
区域表示无法作相关分析; \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$  (双侧)

从表 2 中的空间相关性数值看出, ①在小、中尺度 (0. 04~ 1km), 上、下层空间相关性的变化与变异系数相同。在大尺度 (6km), 上层空间相关性小于下层, 这与变异系数的变化相反 (表 2)。②除了下层 F1 (0. 2km) 外, 研究区土壤盐分空间分布具有中等和高的空间相关性。③F1 上层空间相关性大于下层, 而 F2 则相反。④整体上, 随着采样尺度的增加, 空间相关性增强, 且下层比上层具有更高的空间相关性。这一方面说明了小尺度采样数据少 (20~ 25 个) 或者主要受随机因素 (如人为活动) 影响而不能完全反映局部性的空间变异, 另一方面也说明随着采样间隔增加和区域的扩大, 反映的主要是大尺度 (区域性) 的空间结构——这也许主要受结构性因素的影响 (如地形)。上层空间相关性小于下层的可能原因是上层受人为活动等随机因素影响大, 增加了变异性。

3.4 多尺度土壤盐分空间分异的地貌因素

为了理解不同尺度、深度和区域土壤盐分空间变异与地貌因素之间的关系, 选取了微地貌类型、坡度和高程这三个因素, 在不同尺度上把它们与土壤盐分作相关分析, 所有空白的区域表示无法作相关分析 (表 2 中的与地形指数相关系列)。从相关系数大小看出, ①微地貌类型和坡度在密集区 F2 与土壤盐分显著相关, 在 F1 影响不显著; 在区域 R, 微地貌类型与土壤盐分含量关系密切, 而坡度的影响不显著; 高程则在 F1、F2 以及区域 R 上均具有显著的影响。②不同地貌因素作用于不同尺度。坡度的影响主要在小、中尺度, 微地貌在中、大尺度, 高程则在所有尺度都对土壤盐分分布格局产生影响。

为了进一步了解土壤盐分空间相关性与作用于不同尺度和区域地貌因素的关系, 利用上层全部采样点数据, 对三个地貌因素进行半变异函数参数统计, 发现它们均具有较高的空间相关性 (表 3)。当土壤盐分与具有高空间相关性的地貌因素任意一个或多个显著相关时, 空间相关性数值大于 0. 6 (表 2); 相反, 当与地貌因无显著相关时, 土壤盐分空间相关性较小, 如在 F1 (0. 2), 上层是 0. 48, 下层是 0. 20, 这时可能主要受空间相关性较小的其他环境因子影响 (如人为活动)。可见当与地貌因素关系密切时, 土壤盐分具有较高的空间相关性; 反之, 则相对较低。

表 3 黄河三角洲地貌因素理论半变异模型参数

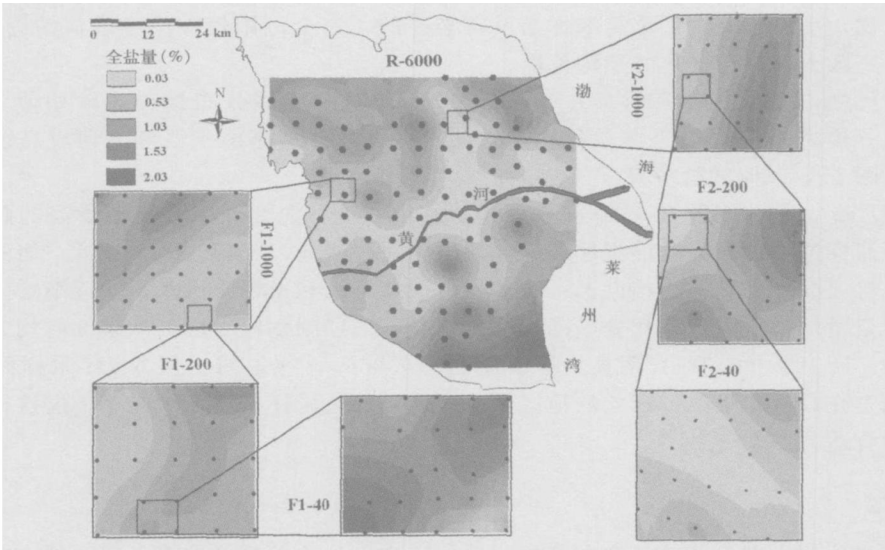
Tab 3 Theoretical semivariogram parameters for geomorphic factors in the YRD

变量	块金值	空间相关性	最大变程 (km)	最小变程 (km)
微地貌	0	1. 00	3. 97	3. 13
坡度 (°)	7. 09	0. 92	5. 47	1. 97
高程 (m)	79. 77	0. 98	7. 33	3. 37

3.5 估测结果与评价

利用普通克立格法分别对两个深度 F1、F2 不同采样间隔和 R 土壤盐分分布进行估测 (图 3 和图 4)。

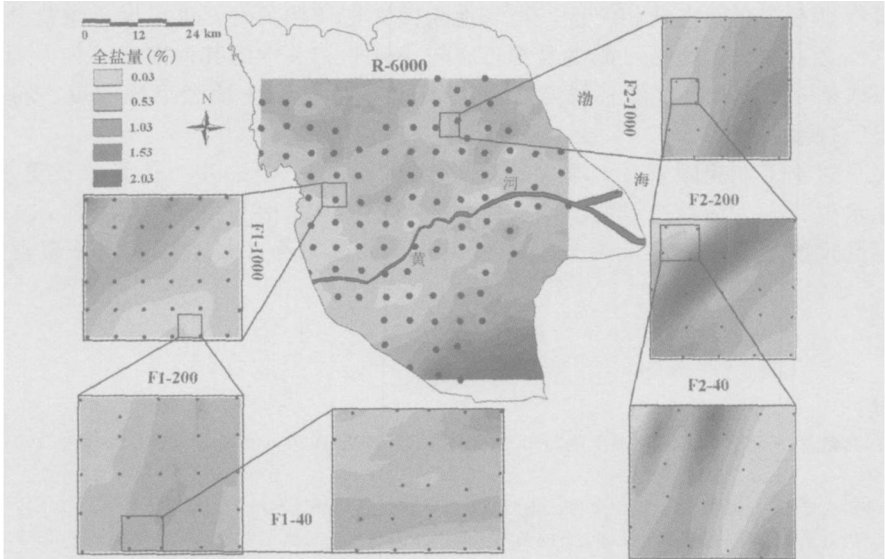
在小尺度, 上层 F1-40 和 F1-200 以及 F2-40 和 F2-200 空间结构比较相似, 都是东北和西南侧盐分含量较高, 而西或西北侧相对较低 (图 3)。下层 F2-40 和 F2-200 的土壤盐分呈东北-西南向高低值间隔分布, 下层 F1-40 和 F1-200 的盐分分布结构明显不一样 (图 4)。这是由于在 F1, 地貌因素不是主要原因 (表 2), 可能是地下水埋深 (该尺度采样点的地下水埋深均在 1 米左右) 或人为活动的影响起主要作用。总体上, 除了 F1 下层, 同一深度的 0. 04km 和 0. 2km 采样尺度插值结果结构比较相似, 为了节省开支, 可以取消 0. 04km 尺度的采样。正如 Oliver<sup>[36]</sup> 在采用套合取样方案确定土壤空间变异性尺度



R- 6000 采样尺度 6km; F1- 1000、F2 1000 采样尺度 1km;  
F1 200、F2 200 采样尺度 0 2km; F1- 40、F2-40 采样尺度 0 04km

图 3 黄河三角洲不同采样尺度上层土壤盐分分布图

Fig 3 Maps of kriging estimations of total salt in top layer at different sampling intervals in the YRD,  
R 6000: 6km; F1- 1000、F2 1000: 1 km; F1-200、F2 200: 0 2km; F1 40、F2 40: 0 04km



R- 6000 采样尺度 6km; F1- 1000、F2 1000 采样尺度 1km;  
F1 200、F2 200 采样尺度 0 2km; F1- 40、F2-40 采样尺度 0 04km

图 4 黄河三角洲不同采样尺度下层土壤盐分分布图

Fig 4 Maps of kriging estimations of total salt in bottom layer at different sampling intervals in the YRD,  
R 6000: 6km; F1- 1000、F2 1000: 1km; F1-200、F2 200: 0 2 km; F1 40、F2 40: 0 04km

的研究发现,小尺度上大量重复取样是没有必要的,完全可用较大尺度进行精确的估计,并求得研究区土壤特性变化的平均范围。

在中尺度,上、下层 F1-1000 和 F2-1000 土壤盐分空间分布结构比较相似。在 F1,西北侧盐分较高;在 F2,土壤盐分呈南北向带状分布。这是由于西侧是河成高地,东侧是平地(图 1),东侧的盐分高于西侧。

在大尺度,上、下层 R-6000 盐分分布均有中间低、向北和东南逐渐增高的趋势。这是由于黄河穿过中间,泥沙堆积形成地势较高的河漫滩地,土壤含盐量较低,而向北和东南两侧地势逐渐降低,分别接近渤海和莱州湾,地下水和土壤受海水影响逐渐增强,土壤中盐分逐渐增加。上层土壤盐分呈圈状分布明显,下层则比较平缓。从表 2 的均方根误差列也看出,R 上层(0.381)明显大于其下层(0.266),这说明上层 6 km 采样间隔太大了,特别是在具有“牛眼”现象的地区,故应适当加大采样密度;而对于下层这样的采样间距较为合适。

## 4 结论

不同微地貌类型土壤盐分存在分异。滩涂地和平地土壤盐分较高,河滩地、河成高地和洼地区则较低。土壤盐分的空间变异具有三个尺度。小尺度(采样间隔约为 0.04~0.2 km),土壤盐分一般是东北和西南侧区域比较高;中尺度(采样间隔约为 1 km),F1 西北侧盐分高,东南侧较低,F2 东侧高于西侧;大尺度(采样间隔为 6 km),黄河穿过地区盐分低,向北和东南侧逐渐升高。随着采样间隔的增加和区域的扩大,总是能从随机性(局部空间变异)中揭示规律性(区域总体分布结构),土壤盐分空间相关性随之而增强。地貌因素都具有较高的空间相关性,当与地貌因素密切相关时,该尺度土壤盐分的空间相关性强;反之,则弱,这时可能主要受具有较小空间相关性的其他因素(如人为活动)影响。可以取消 0.04 km 尺度的采样点;上层 6 km 尺度区域应加大采样密度,特别是在具有“牛眼”现象的地区。

本文只讨论了地貌因素对土壤盐分空间分异的影响,下一步工作是收集更多的资料,如地下水水位、人为活动造成的土壤有机质的变异以及土地利用类型等资料,以便更深入地了解不同尺度土壤盐分空间变异与环境因子的关系,为改良利用盐渍土资源提供科学依据。

## 参考文献:

- [1] 王红,宫鹏,刘高焕.黄河三角洲土地利用/土地覆盖变化研究现状与展望.自然资源学报,2004,19(1):110~118
- [2] 王春裕,武志杰,王汝镛,等.近代黄河三角洲的滨海盐渍土及其开发利用.土壤通报,2001,32(S1):1~2
- [3] 毛汉英,赵千钧,高群.生态环境约束下的黄河三角洲资源开发的思路与模式.自然资源学报,2003,18(4):459~466
- [4] 王遵亲,祝寿泉,俞仁培,等.中国盐渍土.北京:科学出版社,1993.7
- [5] 刘高焕,汉斯·德罗斯特.黄河三角洲可持续发展图集.北京:测绘出版社,1997.60~62
- [6] 吴忱.华北平原河道变迁对土壤及土壤盐渍化的影响.地理学与国土研究,1999,15(4):70~75
- [7] 谢逸民,刘淑瑶.近代黄河三角洲盐渍土的治理与开发.山东农业科学,1990,(1):46~48
- [8] 熊毅,席承藩.华北平原土壤.北京:科学出版社,1965.99~101
- [9] 刘培桐,王华东,张立诚,等.岱海盆地土壤中盐分的迁移过程和分异规律.北京:北京师范大学地理系,1964.7~23



- [10] 魏由庆, 刘思义. 陕西古黄河洼地中微地貌对盐渍土形成的影响. 北京: 中国农业科学院土肥站, 1984 1~ 9
- [11] 关元秀. 黄河三角洲土地盐碱化遥感监测、预报和治理研究. 北京: 中国科学院博士论文, 2001. 61~ 63
- [12] 吴志芬, 赵善伦, 张学雷. 黄河三角洲盐生植被与土壤盐分的相关性研究. 植物生态学报, 1994, 18(2): 184~ 193
- [13] Campbell J B Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineation of two soil mapping units Soil Sci Soc Am J, 1978, 42: 460~ 464
- [14] Cambardella C A, Moorman T B, Parkin T B, *et al.* Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils Soil Sci Soc Am. J, 1994, 58: 1501~ 1511
- [15] 李海滨, 林忠辉, 刘苏峡. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用. 地理研究, 2001, 20(4): 446~ 452
- [16] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间分布格局— Kriging 插值分析. 地理研究, 2003, 22(3): 373~ 379
- [17] 陈亚新, 史海滨, 田圃德, 等. 水盐空间变异性监测的条件模拟. 水利学报, 2000, (6): 67~ 73.
- [18] 胡克林, 李保国, 陈德立, 等. 农田土壤水分和盐分的空间变异性及其协同克立格估值. 水科学进展, 2001, 12(4): 460~ 466
- [19] 莫治新, 尹林克, 文启凯. 塔里木河中下游上层土壤盐分空间变异性研究. 干旱区研究, 2004, 21(3): 250~ 253
- [20] 王红, 刘高焕, 宫鹏. 利用 Cokriging 提高估算土壤盐离子浓度分布的精度. 地理学报, 2005, 60(3): 511~ 518
- [21] 徐英, 陈亚新, 史海滨, 等. 土壤水盐空间变异尺度效应的研究. 农业工程学报, 2004, 20(2): 1~ 5
- [22] Burrough P A. Multiscale sources of spatial variation in soil: I. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. Journal of Soil Science, 1983a, 34: 577~ 597.
- [23] Sylla M, Stein A, van Breemen N, *et al.* Spatial variability of soil salinity at different scales in the mangrove rice agroecosystem in West Africa Agriculture, Ecosystems and Environment, 1995, 54: 1~ 15
- [24] Odeh I O A, Todd A J, Triantafyllis J, *et al.* Status and trends of soil salinity at different scales: the case for the irrigated cotton growing region of eastern Australia Nutr. Cycl. Agroecosys., 1998, 50: 99~ 107.
- [25] Robertson G P, Gross K L Assessing the heterogeneity of belowground resources: quantifying pattern and scale In: Caldwell M M, Percy R W (eds.). Exploitation of Environmental Heterogeneity by Plants. San Diego, CA: Academic Press, 1994 237~ 253
- [26] Franklin R B, Mills A L Multiscale variation in spatial heterogeneity for microbial community structure in an eastern Virginia agricultural field. FEMS Microbiology Ecology, 2003, 44: 335~ 346
- [27] McBratney A B, Webster R, Burgess T M. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables I. Theory and method. Computer and Geoscience, 1981, 7: 331~ 334
- [28] Ustet A, Ruiz M E, Herrera J, *et al.* A geostatistical method for soil salinity sample site spacing Geoderma, 1998, 86: 143~ 151.
- [29] Schulin R, Webster R, Meuli R, *et al.* Regional soil contamination surveying Bern: Forest and Landscape (FOE-FLE) Documentation Services, 1994
- [30] 李茜开, 蒋柏藩, 袁可能. 土壤农业化学常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983
- [31] Journel A G, Huijbregts C J Mining Geostatistics London: Academic Press, 1978 304
- [32] Starks T H, Fang J H. On the estimation of the generalized covariance function Journal of Mathematic Geology, 1982, 14: 57~ 64
- [33] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999 35~ 149
- [34] 刘淑瑶, 谢逸民. 近代黄河三角洲盐渍土分类分级主要依据的探讨. 见: 祝寿泉, 刘有昌, 刘淑瑶, 等, 中国盐渍土分类分级文集. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989 40~ 47.
- [35] Cordy C B, Griffith D A. Efficiency of least squares estimators in the presence of spatial autocorrelation. Communication of Statistics Simulation, 1993, 22: 1161~ 1179
- [36] Oliver M A. Geostatistical methods: Recent development and application in surface hydrology: some novel geostatistical applications in soil science. Paris: UNESCO, 1992

# Multi-scale spatial variations in soil salt in the Yellow River Delta

WANG Hong<sup>1</sup>, GONG Peng<sup>2</sup>, LIU Gaohuan<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources & Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. International Institute for Earth System, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** The Yellow River Delta (YRD) is rich in land resource which has a great potential of development. However, soil salinization is serious in the coastal salinized land which accounts for 63.6% of the region's total land area. Soil salinization has become the main factors restricting the regional economic development. In order to utilize the salinized soil resources and realize the sustainable development of agriculture in the YRD, it is important to clarify the distribution of salinized soil and the reasons for the formation and development of salinization.

Based on the multi-scale samples, this paper determined the spatial variation of soil salinity at two depths using both statistical and geostatistical methods, comparing the correlation coefficients between soil salinity and three geomorphic factors (e.g. micro-geomorphologic type, slope gradient and elevation), and finally generating the distribution maps of soil salinity using ordinary kriging at multi-scales and two depths. The analysis revealed that there is higher soil salt content in the embanked former back swamps, salt marshes and tidal flats than in the contemporary flood plains, abandoned river channels and isolated depressions. The variations of soil salinity have three scales. At the small scale (sampling intervals are 0.04~0.2km), the soil has a higher value of salinity in the north east and the south west. At medium scale (1km), it is high in F1 in the north west, while in F2 it is higher in the east than in the west. At large scale (6km), the distribution of soil salinity is characterized by a low value in the central part, where the Yellow River flows through, but it rises gradually toward north and southeast in the upper and lower layers. By analyzing the parameter of spatial dependence (the ratio of spatial variance and sill) of soil salinity in the multi-scales, we found the spatial structure of soil salinity became obvious with the increase of sampling intervals and expanded areas. The paper demonstrates that all geomorphic variables have comparatively high spatial dependence. The distribution of soil total salt shows a clear structure when it is significantly impacted by factors which have high spatial dependence; contrarily, soil salinity has small spatial dependence, then it may be influenced by other environmental variables which have weak structure (e.g. human activities). Finally, reasonable soil sampling plan and research directions in the future were put forward.

**Key words:** soil salinity; geomorphic factors; spatial dependence; multi-scale; ordinary kriging; Yellow River Delta