

# 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究\*

张文敏<sup>1</sup> 姜小三<sup>1†</sup> 吴明<sup>2†</sup> 邵学新<sup>2</sup> 周斌<sup>3</sup>

(1 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

(2 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 国家林业局杭州湾湿地生态系统定位观测研究站, 浙江富阳 311400)

(3 杭州师范大学理学院遥感与地球科学研究院, 杭州 311121)

**摘要** 应用地统计学与地理信息系统相结合的方法, 研究了杭州湾南岸慈溪市域内不同土层(0~20、20~40、40~60、60~80、80~100、0~100 cm)的土壤有机碳含量空间变异特征。结果表明: 研究区各土层土壤有机碳平均含量变化范围为 3.49~7.95 g kg<sup>-1</sup>, 变异系数介于 54.51%~67.34% 之间, 属中等程度变异; 地统计分析得出块金效应变化范围为 0.141~0.372, 表现为较强空间自相关性; 自表层至底层最优半方差模型依次为高斯、指数、指数、高斯和球状模型; Kriging 插值结果显示各土层土壤有机碳含量自滩涂向内陆呈递增趋势, 其中 0~20 cm 土层土壤有机碳含量呈平行于海岸线的带状分布; 土壤有机碳含量随剖面深度增加呈递减规律; 不同土地利用方式和不同围垦时期均增加了土壤有机碳的空间变异性。从研究结果看, 慈溪市土壤有机碳空间异质性主要由结构性因素引起, 研究结果可为了解杭州湾南岸土壤有机碳分布特征提供参考。

**关键词** 土壤有机碳; 空间变异; 地统计学; 杭州湾南岸

**中图分类号** S158.9 **文献标识码** A

全球变暖、温室气体减排已经成为国际社会共同关注的热点问题。土壤有机碳是陆地生态系统碳库的主要组成部分, 对全球气候变化背景下的大气二氧化碳浓度变化有着重要影响<sup>[1]</sup>。全球约有 1.5 × 10<sup>18</sup> g 碳储存于土壤碳库中<sup>[2]</sup>, 储量约为大气碳库的 3 倍<sup>[3-4]</sup>。此外, 土壤有机碳也是评价土壤肥力的关键指标, 影响着土壤的物理、化学和生物等特性及各种过程<sup>[5]</sup>。因此, 研究土壤碳库源汇转化及其影响因素对全球变化具有重要意义。

由于成土母质、气候、地形、植被的不同以及人类干预程度的不同, 无论在大尺度上还是在小尺度上, 土壤均存在着一定程度的空间异质性<sup>[6-8]</sup>。土壤空间异质性的研究不仅可以有效揭示空间格局与生态过程和生态功能之间的关系, 对元素生物地球化学过程的认识也具有重要意义<sup>[9]</sup>。地统计学作为研究空间变异强有力的工具, 其能够定量地揭示土壤中各种属性变量在空间上的分布、变异及其他相关特征<sup>[10-12]</sup>, 因此被广泛应用于土壤学、生态学和环境科学等研究中。土壤有机碳作为土壤的

一个特性值, 由于土壤物理过程、化学过程以及生物过程在不同方向上存在差异, 具有不均一性, 是在空间上发生变化的连续体。研究表明, 即使在土壤质地相同的区域内, 土壤有机碳在不同空间位置上也存在明显差异, 即存在明显的空间变异性<sup>[13-14]</sup>。因此, 对土壤有机碳空间异质性进行研究不仅可以提高区域有机碳储量估算的准确性, 也有助于加深对土壤的形成过程、结构和功能的认识。

杭州湾南岸慈溪市的社会发展史很大程度上是围垦与开发杭州湾南岸海涂湿地的历史<sup>[15-16]</sup>。冯利华等<sup>[17]</sup>对杭州湾南岸滩涂围垦的历史进行了探讨, 距今约 2 500 a 慈溪全境已形成南丘北海、中部为滨海平原的地貌格局; 慈溪滩涂属于淤涨型滩涂, 自宋代以来已修建 11 道海塘, 新中国成立前海岸线平均每年向外推移 25 m, 之后则达到 50~100 m。改革开放以来已围垦土地 1.33 万 hm<sup>2</sup>, 约占城市面积的 60% 以上<sup>[18]</sup>。自然滩涂湿地演变为农业用地、城镇用地等, 导致植被群落以及土地利用方式发生改变, 也必然对土壤有机碳空间分布产生影

\* 国家自然科学基金项目(31000296)、中国林科院亚热带林业研究所基本科研业务费(RISF61256)和杭州师范大学遥感与地球科学研究院开放基金(DDKF2011YG01)共同资助

† 通讯作者, E-mail: gis@njau.edu.cn; hangzhoubay@126.com

作者简介: 张文敏(1987—), 男, 安徽五河人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源环境遥感与信息技术研究。E-mail: min\_927@126.com

收稿日期: 2013-09-23; 收到修改稿日期: 2013-12-30

响。因此,本研究以杭州湾南岸围垦城市慈溪为研究对象,应用地统计学和 GIS 相结合的方法,在半方差函数理论的基础上对研究区土壤有机碳含量空间异质性进行探索分析,以期从空间变异方面认识杭州湾南岸土壤碳生态学过程。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

杭州湾位于浙江省东部,西接钱塘江、东至东海,呈喇叭口形状,属河口海湾。研究区慈溪市(E 121°02′~121°42′,N 30°02′~30°24′)是杭州湾滩涂淤涨最快的区段,也是围垦利用最为突出的区域。该地区多年平均气温为 16.0℃,全年 1 月份最冷,平均气温为 3.8℃,7 月份最热,平均气温为 28.2℃;全年平均日照时数约为 2 038 h,无霜期约为 244 d,多年平均降水量为 1 345 mm。土壤为长江水和浙江入海河流输沙和海底沙淤积而成,属于滨海盐土带。慈溪市的成长与发展伴随着滩涂湿地的围垦,是一座滩涂围垦地上建立的城市。随着

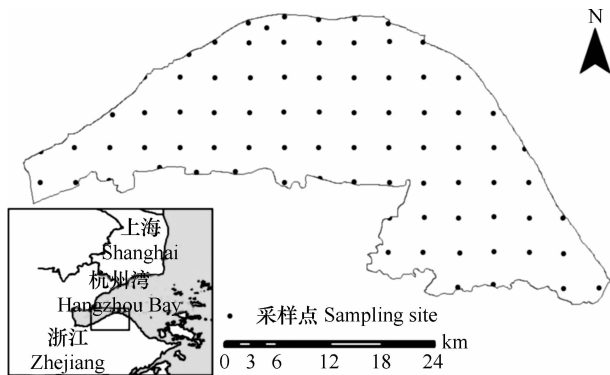


图 1 研究区采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of soil sampling points in Cixi City

### 1.3 数据处理

通过加权平均法,得到 0~100 cm 深度土壤有机碳平均含量;然后,应用 SPSS 对研究区各土层土壤有机碳含量进行描述性统计分析,应用 GS+ 对数据进行半方差函数拟合,应用 ArcGIS9.3 进行 Kriging 插值建立土壤有机碳含量空间分布图。

## 2 结果

### 2.1 土壤有机碳含量的统计特征

慈溪市土壤有机碳含量及进行自然对数转换

现代工程技术的发展,滩涂围垦的规模和速度加快,使得原来的湿地转变成陆地。而岸滩的自然淤涨速度跟不上围垦建设发展的速度,势必使海岸湿地面积特别是滩涂面积逐步减少,湿地植被、自然景观遭到破坏,湿地生态系统失去平衡。

### 1.2 样品采集与分析

本研究在慈溪市域内进行采样工作,2013 年 7 月在慈溪市采用 4 km×4 km 网格布点,同时兼顾土地利用方式,共布设 81 个(林地 12 个、农田 61 个、建设用地 8 个)样点(见图 1)。利用土钻分别采集 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 深度的原状土层,每个样点按 S 形取同层 3 个土样混合带回实验室,共采集 405 份土样。剔除动、植物残体和石块,四分法取出适量土壤样品自然风干,研磨过筛,用于测定土壤有机碳含量。土壤有机碳采用重铬酸钾容量法—外加热法测定,另外采用环刀法测定土壤容重<sup>[19]</sup>。用 GPS 记录采样点地理坐标,同时记录样点土地利用方式。利用 2010 年 7 月的 TM 影像对研究区的土地利用方式进行了解译分类(见图 2)。

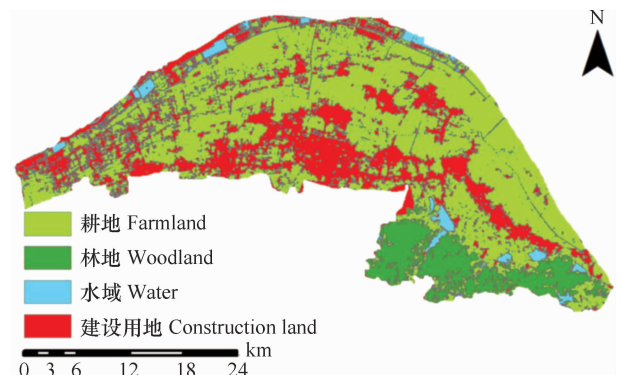


图 2 慈溪市土地利用图

Fig. 2 Land-use map of Cixi City

后的数据描述性统计结果见表 1。研究区土壤有机碳平均含量介于 3.49~7.95 g kg<sup>-1</sup>之间,其随剖面深度增加逐层降低。其中,0~20 cm 土层土壤有机碳含量最高(7.95 g kg<sup>-1</sup>);80~100 cm 土层土壤有机碳平均含量最低(3.49 g kg<sup>-1</sup>)。整体来看,0~100 cm 深度土壤有机碳平均含量为 5.10 g kg<sup>-1</sup>。变异系数(CV)的大小揭示了随机变量的离散程度,即土壤有机碳空间变异性的。通常认为 CV<10% 表现为弱变异性,10%<CV<100% 为中等变异性, CV>100% 为强变异性<sup>[20]</sup>。就变异系数来看,研究区各土层土壤有机碳均属于中等程度变异。检验数据是否

符合正态分布是进行地统计分析的前提,Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验结果表明,原始数据存在正偏态效

应,因此对数据进行自然对数转换,其结果满足正态分布要求( $p > 0.05$ )。

表 1 不同土层土壤有机碳描述性统计结果

Table 1 Descriptive statistics of soil organic carbon in different soil layers

土层 Soil layer (cm)	平均值 Mean (g kg <sup>-1</sup> )	最大值 Maximum (g kg <sup>-1</sup> )	最小值 Minimum (g kg <sup>-1</sup> )	标准差 SD	变异系数 CV (%)	偏度 Skew	峰度 Kurtosis	$P_{k-s}$
0~20	7.95	27.24	1.07	4.80	60.38	1.81	4.51	0.047
20~40	5.96	21.24	1.46	3.57	59.90	2.06	5.58	0.010
40~60	4.34	20.57	1.16	2.60	59.91	3.46	18.98	0.034
60~80	3.76	20.78	1.41	2.45	65.16	4.92	31.07	0.000
80~100	3.49	16.66	1.17	2.35	67.34	4.35	22.63	0.005
0~100	5.10	20.70	1.27	2.78	54.51	2.88	12.70	0.035

## 2.2 土壤有机碳含量的空间结构特征

对转化后的数据进行半方差分析,根据决定系数( $R^2$ )和残差(RSS)等判断函数的最优拟合模型。各变异函数模型拟合曲线中,决定系数 $R^2$ 接近于1,残差RSS越小,则曲线拟合效果越好。如表2所示,地统计分析结果表明,20~40 cm 土层拟合程度相对较差, $R^2$ 仅为0.470,而其他土层拟合程度相对较好, $R^2$ 介于0.739~0.870之间。0~20 cm 和60~80 cm 土层土壤有机碳最优半方差模型为高斯模型,20~40 cm 和40~60 cm 土层最优半方差模型为指数模型,而80~100 cm 和0~100 cm 土层最优半方差模型为球状模型。

从变异因素角度看,块金值( $C_0$ )反映随机性变异,由采样尺度及系统属性本身变异特征控制,同时还受测量误差的影响;偏基台值( $C$ )为结构方差,表示由土壤母质、地形、气候等非人为的结构因素

引起的变异;基台值( $C_0 + C$ )表示系统内总的变异,其值越高表示总的变异程度越高;块基比 $C_0/(C_0 + C)$ 即块金效应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因素引起的;如果该比值接近1,则说明该变量在整个尺度上具有恒定的变异。当比值 $< 25%$ ,表明系统具有强烈的空间自相关性;比值在 $25% \sim 75%$ 之间,系统具有中等强度的空间自相关性;比值 $> 75%$ ,则表现出弱空间自相关性<sup>[21]</sup>。由表2可知,各土层块金值( $C_0$ )介于0.071~0.178之间。0~20 cm、60~80 cm、80~100 cm 土层及0~100 cm 深度的块金效应值均 $< 25%$ ,则土壤有机碳具有强烈的空间自相关性;而20~40 cm 和40~60 cm 土层块金效应值介于 $25% \sim 75%$ 之间,则土壤有机碳表现为中等强度的空间自相关性。

表 2 土壤有机碳含量变异函数理论模型及其相关参数

Table 2 Variogram theory models of soil organic carbon content and their corresponding parameters

土层 Soil layer (cm)	理论模型 Theoretical model	块金值 Nugget $C_0$	基台值 Still $C_0 + C$	块金效应 Nugget/Still (%)	变程 Range (m)	决定系数 Determination coefficient $R^2$	残差 Residual RSS
0~20	高斯 Gaussian	0.093	0.454	0.205	21 790	0.870	0.035
20~40	指数 Exponential	0.178	0.478	0.372	107 400	0.470	0.044
40~60	指数 Exponential	0.093	0.305	0.305	53 220	0.739	0.013
60~80	高斯 Gaussian	0.114	0.810	0.141	122 500	0.810	0.006
80~100	球状 Spherical	0.071	0.309	0.230	61 040	0.763	0.012
0~100	球状 Spherical	0.074	0.306	0.242	58 770	0.804	0.009

### 2.3 土壤有机碳空间分布特征

基于半方差函数理论模型及相关参数,在 Arc-GIS9.3 的地统计分析模块中应用 Kriging 最优内插法,对研究区土壤有机碳含量进行分层插值。研究区不同土层土壤有机碳空间分布如图 3 所示,总体来看,土壤有机碳含量分布自滩涂向内陆表现为递增变化,慈溪市东南部的掌起镇、三北镇和龙山镇等地分布着山体林地,其土壤有机碳高出其他区域。在 0~20 cm 土层,土壤有机碳分布呈明显带状

并平行于海岸线,东南角土壤有机碳含量最高,介于  $11.34 \sim 27.24 \text{ g kg}^{-1}$  之间,而靠近海岸区域土壤有机碳含量较低,其平均含量在  $1.07 \sim 0.33 \text{ g kg}^{-1}$  之间。20~40 cm 和 40~60 cm 两个土层土壤有机碳分布特点类似,其分布亦呈条带状但不再平行于海岸线。60~80 cm 和 80~100 cm 土层土壤有机碳分布特征相似,伴有局部特征,主要表现为西北靠近滩涂区域土壤有机碳含量较低,其平均含量分别在  $1.31 \sim 2.38 \text{ g kg}^{-1}$  和  $1.17 \sim 2.04 \text{ g kg}^{-1}$  范围

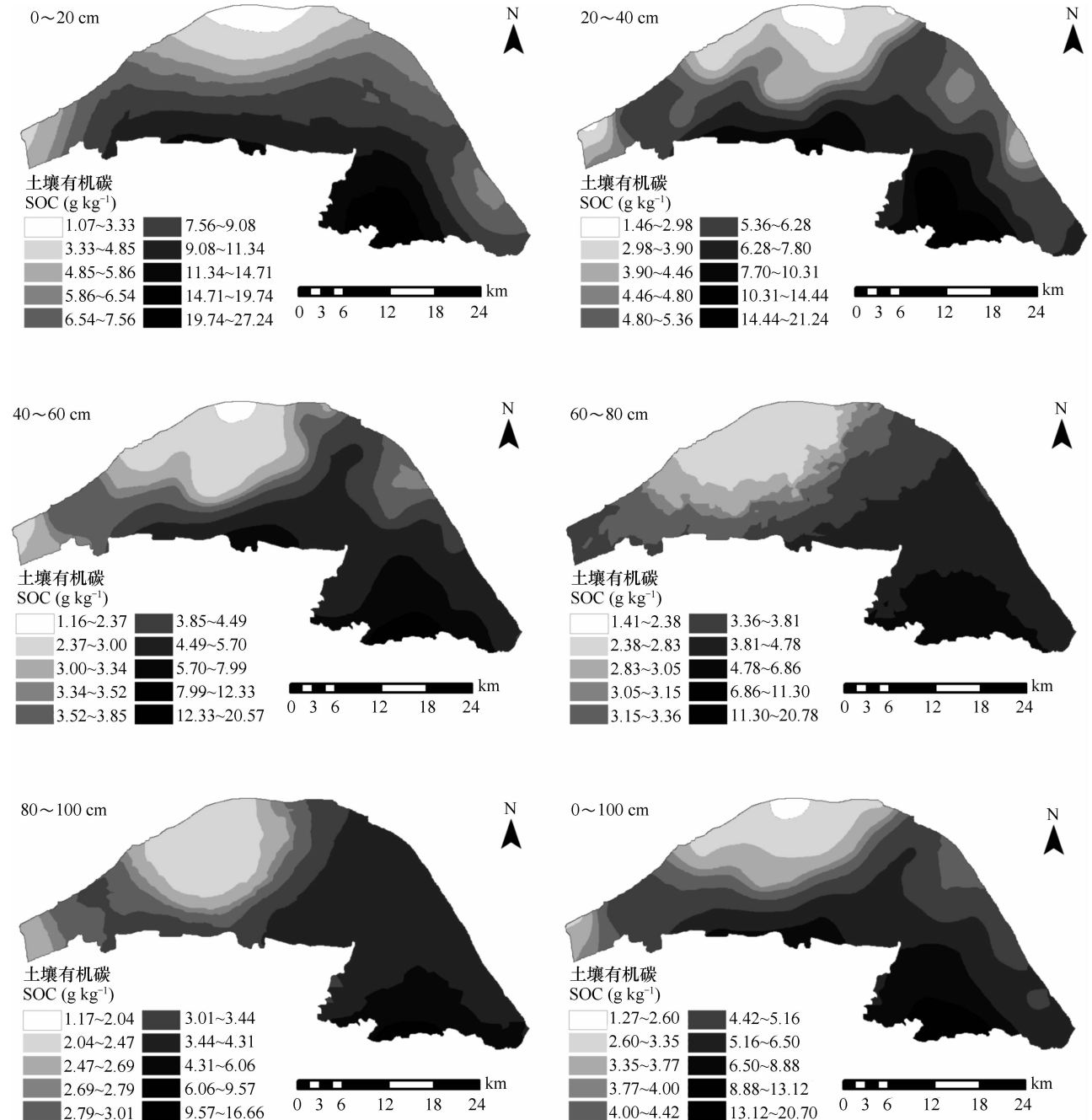


图 3 慈溪市土壤有机碳含量空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of soil organic carbon in Cixi City

内,东部出现局部性块状分布,有大片区域土壤有机碳含量分别集中在  $3.81 \sim 4.87 \text{ g kg}^{-1}$  和  $3.44 \sim 4.31 \text{ g kg}^{-1}$  之间。整个  $0 \sim 100 \text{ cm}$  深度土壤有机碳分布综合了各土层的特点,呈条带状但没有明显局部特征。土壤有机碳含量剖面分布的变化表现为随着土层深度增加其含量逐渐降低,自表层向下两个土层降幅较高,依次为  $25.03\%$ 、 $27.18\%$ ,底部两个土层降幅仅为  $7.18\%$ ,这是因为深层土壤有机碳受表层土地利用方式、人类干扰等影响较小。

## 2.4 不同土地利用方式及围垦年限与土壤有机碳空间分布的关系

由表 3 可知,林地各土层土壤有机碳含量显著高于农田及建设用地,其平均含量介于  $5.84 \sim$

$16.43 \text{ g kg}^{-1}$  之间,农田与建设用地之间土壤有机碳含量差异不显著。就变异系数来看,林地  $60 \text{ cm}$  以上三个土层土壤有机碳变异系数介于  $35.85\% \sim 64.31\%$  之间,属中等程度变异,其底部两个土层则表现为强变异;农田和建设用地各土层土壤有机碳均处于中等程度变异,并随土壤剖面增加其变异程度逐渐减弱。各土地利用方式的  $0 \sim 100 \text{ cm}$  深度土壤有机碳空间变异性均为中等程度变异。

表 4 所示,随围垦年限延长农田土壤有机碳含量呈增加趋势,各土层土壤有机碳增幅各异,部分围垦年限之间含量差异达显著水平。此外,围垦年限对深层土壤有机碳变化影响较弱。

表 3 不同土地利用方式下土壤有机碳含量变异  
Table 3 Variability of soil organic carbon affected by land use

土层 Soil layer (cm)	林地 Woodland			农田 Farmland			建设用地 Construction land		
	均值 Mean ( $\text{g kg}^{-1}$ )	范围 Range ( $\text{g kg}^{-1}$ )	变异 系数 CV (%)	均值 Mean ( $\text{g kg}^{-1}$ )	范围 Range ( $\text{g kg}^{-1}$ )	变异 系数 CV (%)	均值 Mean ( $\text{g kg}^{-1}$ )	范围 Range ( $\text{g kg}^{-1}$ )	变异 系数 CV (%)
0 ~ 20	16.43a	8.47 ~ 27.24	35.85	6.46b	1.07 ~ 11.99	38.80	6.06b	1.63 ~ 10.98	54.95
20 ~ 40	11.56a	4.14 ~ 21.24	46.63	4.90b	1.46 ~ 9.44	35.92	5.01b	1.46 ~ 9.80	55.49
40 ~ 60	7.51a	3.23 ~ 20.57	64.31	3.77b	1.16 ~ 6.41	36.87	3.71b	1.68 ~ 7.11	49.87
60 ~ 80	6.04a	2.47 ~ 20.78	88.74	3.32b	1.41 ~ 6.09	34.04	3.47b	2.01 ~ 5.79	33.14
80 ~ 100	5.84a	1.75 ~ 16.66	87.67	3.08b	1.17 ~ 5.87	34.74	2.87b	1.39 ~ 4.06	34.84
0 ~ 100	9.47a	4.96 ~ 20.70	46.99	4.31b	1.27 ~ 7.12	30.85	4.23b	2.18 ~ 6.70	40.89

注:同行不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ ) Note: Different letters in the same row represent significant difference( $p < 0.05$ )

表 4 不同围垦时期农田土壤有机碳含量差异

Table 4 Differences in soil organic carbon content between farmlands different in reclamation history( $\text{g kg}^{-1}$ )

围垦时期 Reclamation history (yyyy)	0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	60 ~ 80 cm	80 ~ 100 cm	0 ~ 100 cm
1047 - 1489	9.91a	7.96a	5.61a	4.76a	4.49a	6.55a
1724 - 1734	8.79ab	6.41b	4.35b	3.22b	3.14b	5.18b
1796 - 1815	7.80b	5.65bc	3.92bc	3.47bc	3.05b	4.78b
1892 - 1952	5.74c	4.49c	3.21cd	2.42bc	2.36b	3.64c
1968 - 2002	3.40d	2.98d	2.76d	2.52c	2.28b	2.79d

注:同列不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ ) Note: Different letters in the same column represent significant difference ( $p < 0.05$ )

## 3 讨论

结合地统计学和 GIS 技术对慈溪地区土壤有机

碳含量空间异质性进行分析,有助于认识土壤性质与环境因子的关系。异常值的存在会影响变量的分布特征,造成变量连续表面的中断,使得半方差函数发生畸变,甚至会掩盖变量固有的空间变异结

构。因此,在统计分析前先进行异常值的识别,对异常值进行替换或删除处理<sup>[22]</sup>。本研究结果存在的异常值经检验由实验误差所引起,故对异常值进行替换处理。还需注意,正如传统的统计学研究一样,在地统计学分析中也需要变量服从正态分布,即使没有严格的要求,但是太高的偏度、峰度或异常值将影响变异函数的结构和 Kriging 插值的结果。因此,在进行地统计学分析之前还应检验数据是否符合正态分布,如不符合,可对数据进行对数转化、稳健处理、域法处理(样本平均值  $X \pm 3s$ )和 Box-Cox 转化<sup>[23]</sup>。就变异系数来看,研究区各土层土壤有机碳属于中等程度变异且变异系数较高,表明研究区可能受到人为干扰较为强烈,抑或受结构性因素影响所致。然而,经典统计分析难以完全反映土壤有机碳空间结构性、随机性、相关性和独立性等空间分布信息,因而有必要进一步利用地统计学分析其空间异质性。

土壤异质性是由结构性因素和随机性因素共同作用的结果。研究表明,慈溪市各土层土壤有机碳块金值介于 0.071 ~ 0.178 之间,说明在当前的采样尺度范围内存在由采样误差和随机因素等引起的变异,而块金值相对较小,表明采样密度能够充分揭示研究区土壤有机碳的空间结构<sup>[23]</sup>。总体来看块基效应也较小,最大仅为 0.372,表现为强烈的空间自相关性或中等强度的空间自相关性,说明结构性因素对研究区土壤有机碳空间变异起主导作用,而随机性因素对其影响相对较小。研究区新成滩涂土壤由海相沉积物淤积而成,内滩涂土地均为经人工围垦筑堤后而发育成的滨海盐土,数百年来远海土壤经过植被演替及农业改良等,土壤发育向草甸滨海盐土、红壤、水稻土、潮土等土壤类型转变并已显成熟<sup>[24]</sup>,而土壤有机碳也随之发生演变。尽管目前研究区土壤会受到城镇发展及农业施肥差异等小尺度因素影响,但在本研究尺度上还未达到破坏其原有空间格局的程度。采样尺度对变量空间异质性有较大影响,如王丹丹等<sup>[25]</sup>对东北地区较大尺度的县级、地市级和省级土壤全氮的变异研究表明,表层和剖面的平均全氮含量变异性均随着幅度的扩展而增大。雷咏雯等<sup>[26]</sup>对较小尺度土壤养分变异研究表明,随着采样尺度增加,各变量的块金系数均趋于增加或稳定。据此可以看出,空间异质性与观测尺度密切相关,并且一般随研究尺度的增大,空间异质性随之增加。本研究采取较大采样尺度(4 km × 4 km),一方面,在一定程度可能

增大了土壤有机碳空间异质性;另一方面,它虽不像小尺度研究能够很好地揭示其空间变异细节,但适于拟合趋势值<sup>[27]</sup>。考虑到小尺度研究的作用,在本研究基础之上,有待于进一步展开小尺度的研究,分析不同尺度上空间信息的相似性和相异性,以提高对研究区土壤有机碳分布规律预测的精度。也需注意,地统计学方法进行变量的空间分析在较大区域进行比较合适,而面积过小时,由于空间变异趋势微弱,随机变异所占比例相对增加,可能不利于进行空间相关性分析<sup>[28]</sup>。

Kriging 插值结果表明,总体上研究区各土层土壤有机碳含量分布自滩涂向内陆逐渐递增,且表层土壤有机碳含量呈平行于海岸线的条带状分布,金雯晖等<sup>[14]</sup>对东台县域表层土壤有机碳研究亦有类似结论。从空间分布图可直观了解土壤有机碳空间分布特征,如呈条带状、斑块状以及局部特征等,各种分布特点与研究区土壤在不同空间位置上的各种理化性质和生物过程有着密切联系。与本研究关系尤为密切的是研究区土地利用处于不同围垦时期,土壤发育时间长短不一,期间土壤有机质的输入输出也必然存在差异。滨海盐土经过植被演替以及农业利用改良,尤其经过灌溉、施肥等农业生产措施,使土壤盐分大大降低,土壤有机碳含量呈上升趋势。围垦时间越久,土壤发育成熟度越高,有机质积累越多,因而可能造成土壤有机碳随围垦时间呈带状分布并向内陆延伸呈递增趋势。慈溪市的东南部山体林地分布带系四明山余脉,土壤有机碳含量显著高于其他区域,主要是因为林地对土壤有机碳输入量明显高于其他类型<sup>[29]</sup>,也表现了土地利用方式的不同造成了土壤有机碳空间分布的差异<sup>[30]</sup>。自表层向下土壤有机碳分布逐渐出现局部特征,条带状分布特征减弱,尤以 60 cm 以下两个土层表现明显,因为随着土层深度的增加,土壤有机碳受地表活动影响减弱,其含量主要受土壤母质影响,因而表现出较为均匀分布特征。同时,伴随着土层深度的增加其土壤有机碳含量逐渐降低,因为深层土壤植物根系分布减少,有机质来源减少,也表明无论土壤发育以及受到人类干扰程度如何,此递减规律并未随之而发生改变<sup>[31]</sup>。

不同土地利用方式,管理措施、凋落物量和质量的差异导致土壤有机质输入存在差异,进而增加土壤有机碳的空间变异<sup>[10]</sup>。研究区三种土地利用方式土壤有机碳主要表现为中等程度变异。农田土壤有机碳变异系数相对较小,表明农田土壤有机

碳较为稳定。随着土层深度增加,变异系数逐渐减小,进一步表明深层土壤有机碳受地表活动影响较弱。贾宇平等<sup>[32]</sup>对砖窑沟流域不同地貌部位土壤有机碳空间变异研究亦有同样结论。此外,本文分析了土壤有机碳与围垦年限之间的关系,研究表明,随围垦年限的增加,各土层土壤有机碳含量呈增加趋势,增幅各异,金雯晖<sup>[14]</sup>等有类似研究,主要是因为随着土壤围垦年限的增加,其土壤熟化程度增高,有利于土壤有机碳的积累。正是如此,不同围垦时期区域内土壤有机碳含量的差异增加了土壤有机碳的空间异质性。

## 4 结 论

综上所述,杭州湾南岸滩涂围垦利用土地,经人类数百年耕作改良,滨海盐土已向不同土壤类型转变。各土层土壤有机碳变异系数变化范围为 59.90%~67.34%,属中等强度变异;块金效应介于 0.141~0.372 之间,表明研究区土壤有机碳具有较强空间自相关性,这种变异主要是由结构性因素引起;Kriging 插值结果显示自滩涂向内陆土壤有机碳含量呈递增趋势,土壤有机碳含量随剖面深度增加呈递减规律;不同土地利用方式与不同围垦时期均增加了土壤有机碳的空间异质性。

## 参 考 文 献

[ 1 ] Huang Y, Sun W J, Zhang W, et al. Changes in soil organic carbon of terrestrial ecosystems in China: A mini-review. *Sci China (Life Sci)*, 2010, 53: 766—775

[ 2 ] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(5677): 1623—1627

[ 3 ] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 2004, 123(1): 1—22

[ 4 ] Watson R T, Noble I R. Carbon and the science-policy nexus: The Kyoto challenge//Steffen W, Jager J, Carson D, et al. *Challenges of a changing earth. Proceedings of the Global Change Open Science Conference*. Berlin: Springer, 2003: 57—64

[ 5 ] 苏永中, 赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展. *中国沙漠*, 2002, 22(3): 220—228. Su Y Z, Zhao H L. Advances in researches on soil organic carbon storages, affecting factors and its environmental effects (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2002, 22(3): 220—228

[ 6 ] Mallarino A P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(5): 1473—1481

[ 7 ] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics.

*Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984 - 2012), 2000, 105(D9): 11865—11877

[ 8 ] Mohanty B, Famiglietti J, Skaggs T. Evolution of soil moisture spatial structure in a mixed vegetation pixel during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment. *Water Resources Research*, 2000, 36(12): 3675—3686

[ 9 ] Ettema C H, Wardle D A. Spatial soil ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2002, 17(4): 177—183

[ 10 ] Fang X, Xue Z, Li B, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2012, 88(1): 6—13

[ 11 ] 左小安, 赵哈林, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地退化植被恢复过程中土壤有机碳和全氮的空间异质性. *环境科学*, 2009, 30(8): 2387—2393. Zuo X A, Zhao H L, Zhao X Y, et al. Spatial heterogeneity of soil organic carbon and total nitrogen of sandy grassland in the restoration of degraded vegetation in Horqin Sandy Land, Northern China (In Chinese). *Environmental Science*, 2009, 30(8): 2387—2393

[ 12 ] 王玉刚, 肖笃宁, 李彦, 等. 三工河流域绿洲土壤有机碳的空间分布. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 101—107. Wang Y G, Xiao D N, Li Y, et al. Spatial distribution of oasis soil organic carbon in the Sangong River Catchment, Xinjiang, China (In Chinese). *Journal of Desert Research*, 2011, 31(1): 101—107

[ 13 ] 薛志婧, 侯晓瑞, 程曼, 等. 黄土丘陵区小流域尺度上土壤有机碳空间异质性. *水土保持学报*, 2011, 25(3): 160—163, 168. Xue Z J, Hou X R, Cheng M, et al. Spatial variability of soil organic carbon in catchment scale of Loess Hilly area (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(3): 160—163, 168

[ 14 ] 金雯晖, 杨劲松, 王相平. 滩涂土壤有机碳空间分布与围垦年限相关性分析. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 89—94. Jin W H, Yang J S, Wang X P. Spatial distribution of organic carbon in coastal saline soil and its correlation with reclamation age (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 89—94

[ 15 ] 陆宏, 许登坤, 厉仁安, 等. 慈溪市土壤环境质量与农产品安全生产对策. 杭州: 浙江大学出版社, 2005: 9—10. Lu H, Xu D K, Li R A, et al. Soil environmental quality and counter measure for agricultural production safety in Cixi City (In Chinese). Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005: 9—10

[ 16 ] 钱塘江志编撰委员会. 钱塘江志. 北京: 方志出版社, 1998: 400—401. Qiantang Clement Compiled Committee. *Qiantang Clement* (In Chinese). Beijing: Fangzhi Press, 1998: 400—401

[ 17 ] 冯利华, 鲍毅新. 慈溪市海岸变迁与滩涂围垦. *地理与地理信息科学*, 2006, 22(6): 75—78. Feng L H, Bao Y X. Coastal evolution process and tidal flat reclamation in Cixi City (In Chinese). *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(6): 75—78

[ 18 ] 吴明. 杭州湾滨海湿地生态特征及保护利用研究. *浙江林业科技*, 2004, 24(6): 43—47. Wu M. Study on wetland ecological properties and protection of Hangzhou Bay (In Chinese). *Journal of Zhejiang Forestry Science & Technology*, 2004, 24

- (6): 43—47
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [20] Goovaerts P. Geostatistical modelling of uncertainty in soil science. *Geoderma*, 2001, 103(1): 3—26
- [21] 王正权. 地统计学及其在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 71—99. Wang Z Q. Geostatistics and the application of geostatistics in ecology (In Chinese). Beijing: Science Press, 1999: 71—99
- [22] 赵业婷, 常庆瑞, 陈学兄, 等. 县域耕地土壤速效磷空间格局研究——以武功县为例. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(3): 157—162, 167. Zhao Y T, Chang Q R, Chen X X, et al. Study on the spatial pattern of available potassium in county farmland—Wugong County as an example (In Chinese). *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2011, 39(3): 157—162, 167
- [23] McGrath D, Zhang C S, Carton O T. Geostatistical analyses and hazard assessment on soil lead in Silvermines area, Ireland. *Environmental Pollution*, 2004, 127: 239—248
- [24] 陆宏, 厉仁安. 慈溪市土壤系统分类研究. *土壤*, 2006, 38(4): 499—502. Lu H, Li R A. Soils of Cixi City in soil taxonomy (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(4): 499—502
- [25] 王丹丹, 岳书平, 林芬芳, 等. 东北地区旱地土壤全氮空间变异性对幅度拓展的响应. *土壤学报*, 2012, 49(4): 625—635. Wang D D, Yue S P, Lin F F, et al. Response of spatial variability of soil total nitrogen to expansion of uplands in scale in northeast China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(4): 625—635
- [26] 雷咏雯, 危常州, 李俊华, 等. 不同尺度下土壤养分空间变异特征的研究. *土壤*, 2004, 36(4): 376—381. Lei Y W, Wei C Z, Li J H, et al. Characters of soil nutrient spatial variability in different scale (In Chinese). *Soils*, 2004, 36(4): 376—381
- [27] 巫振富, 赵彦锋, 齐力, 等. 复杂景观区土壤有机质预测模型的尺度效应. *土壤学报*, 2013, 50(2): 296—305. Wu Z F, Zhao Y F, Qi L, et al. Effect of scale of model on prediction of soil organic matter in complex landscape region (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 296—305
- [28] 路鹏, 彭佩钦, 宋变兰, 等. 洞庭湖平原区土壤全磷含量地统计学和 GIS 分析. *中国农业科学*, 2005, 38(6): 1204—1212. Lu P, Peng P Q, Song B L, et al. Geostatistical and GIS analyses on soil total P in the typical area of Dongting Lake Plain (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(6): 1204—1212
- [29] 张仕吉, 项文化, 孙伟军, 等. 湘中丘陵区不同土地利用方式对土壤有机碳和微生物量碳的影响. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 222—227. Zhang S J, Xiang W H, Sun W J, et al. Effects of different land use types on soil organic carbon and microbial biomass carbon in the hilly area, central Hunan Province (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 222—227
- [30] Wang Y, Fu B, Lü Y, et al. Local-scale spatial variability of soil organic carbon and its stock in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Quaternary Research*, 2010, 73(1): 70—76
- [31] 霍莉莉, 邹元春, 郭佳伟, 等. 垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响. *环境科学*, 2013, 34(1): 283—287. Huo L L, Zou Y C, Guo J W, et al. Effect of reclamation on the vertical distribution of SOC and retention of DOC (In Chinese). *Environmental Science*, 2013, 34(1): 283—287
- [32] 贾宇平, 苏志珠, 段建南. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳空间变异. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 31—34. Jia Y P, Su Z Z, Duan J N. Spatial variability of soil organic carbon at small watershed in Gully Region of Loess Plateau (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 31—34

## SPATIAL HETEROGENEITY OF SOIL ORGANIC CARBON ON THE SOUTH COAST OF HANGZHOU BAY

Zhang Wenmin<sup>1</sup> Jiang Xiaosan<sup>1†</sup> Wu Ming<sup>2†</sup> Shao Xuexin<sup>2</sup> Zhou Bin<sup>3</sup>

(1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

(2 Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, State Forestry Administration, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang, Zhejiang 311400, China)

(3 Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

**Abstract** A study was carried out using Geostatistics and Geographical Information System (GIS) technologies to explore spatial variability of soil organic carbon content in different soil layers (0 ~ 20, 20 ~ 40, 40 ~ 60, 60 ~ 80, 80 ~ 100, 0 ~ 100 cm) in Cixi City, on the south coast of the Hangzhou Bay. Results show that the average contents of soil organic carbon in the soil layers varied from 3.49 g kg<sup>-1</sup> to 7.95 g kg<sup>-1</sup> in the study area, with variation coefficients ranging from 54.51% to 67.34%, indicating a moderate degree of variability. Geostatistical analysis reveals that the value of nug-



get effect varied from 0.141 to 0.372, displaying strong spatial correlation, and that the optimal semi-variance models for the soil layers from the surface down to the bottom of a soil profile were Gaussian, exponential, exponential, Gaussian and spherical model respectively; The results of Kriging demonstrate that soil organic carbon displayed an increasing trend from beach to inland in all the soil layers, and a decreasing trend with soil depth in a soil profile, and was distributed in the surface soil layer (0 ~ 20 cm) like a band in parallel with the coastline. Both different land use patterns and different reclamation history intensified spatial variability of soil organic carbon. All the findings indicating that the spatial variability of soil organic carbon is mainly caused by structural factors in Cixi City, may provide soil organic matter reference to the study to understand characteristics of the distribution of organic carbon in soils on the south coast of the Hangzhou Bay.

**Key words** Soil organic carbon; Spatial variability; Geostatistics; South coast of the Hangzhou Bay

(责任编辑:檀满枝)