

## 江苏沿海典型滩涂围垦区土壤有机碳时空异质性<sup>①</sup>

李雪盈<sup>1,2</sup>, 濮励杰<sup>1,2\*</sup>, 许艳<sup>1,2,3</sup>, 徐辰星<sup>1,2</sup>, 朱明<sup>1,2</sup>, 徐彩瑶<sup>1,2</sup>, 解雪峰<sup>1,2</sup>

(1 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2 国土资源部海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023; 3 苏州科技大学环境科学与工程学院, 江苏苏州 215009)

**摘要:** 应用地统计学方法研究了如东县4个滩涂围垦区以及光滩不同土层(0~10、10~20、20~30、30~40、40~60 cm)剖面土壤有机碳含量时空变异特征。结果表明: 土壤有机碳含量随着围垦时间的增加呈上升趋势; Kriging 插值结果显示各层土壤有机碳含量均呈现自沿海向内陆增加的趋势, 并且不同土层呈现出不同的局部效应, 随着剖面深度的增加有机碳含量下降; 不同深度土壤有机碳含量的主控因素不同, 表层土壤有机碳比深层土壤有机碳更多地受地表活动控制; 从不同的土地利用方式来看, 土壤有机碳含量呈现出耕地大于养殖水体; 研究区土壤有机碳含量同土壤细颗粒特别是粒径在0.002~0.02 mm范围内的粉粒含量呈显著正相关关系, 同土壤pH及总盐呈负相关关系。研究结果表明围垦加剧了土壤有机碳的时空异质性, 对于后续指导滩涂合理有序的开发利用具有重要意义。

**关键词:** 围垦; 有机碳; 时空变异; 如东

**中图分类号:** S158.9 **文献标志码:** A

## Spatiotemporal Heterogeneity of Soil Organic Carbon in Reclamation Areas of Tidal Flat in North Jiangsu Province

LI Xueying<sup>1,2</sup>, PU Lijie<sup>1,2\*</sup>, XU Yan<sup>1,2,3</sup>, XU Chenxing<sup>1,2</sup>, ZHU Ming<sup>1,2</sup>, XU Caiyao<sup>1,2</sup>, XIE Xuefeng<sup>1,2</sup>

(1 School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2 The Key Laboratory of the Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Land and Resources, Nanjing 210023, China; 3 School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China)

**Abstract:** A study was carried out using Geostatistics method to explore the spatiotemporal variability of soil organic carbon (SOC) contents in different layers (0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–60 cm) in 4 reclamation areas and tidal flat in Rudong County of Jiangsu Province. The results show that the average content of SOC increased with the increase of the reclamation year. SOC content displayed an increasing trend from beach to inland with local effects according to different soil layers and a decreasing trend with soil depth in a soil profile. The main controlling factors of SOC contents were different among different soil layers, and the topsoil was more driven by people activities. From the perspective of land use, SOC content of cultivated land was higher than that of aquaculture body. SOC content was significantly positively correlated with soil fine particles especially silts, and negatively correlated with pH and total salt. The above results indicate that the reclamation intensified the spatiotemporal heterogeneity of SOC, which is of great significance for the guidance of rational and orderly development and utilization of tidal flat.

**Key words:** Reclamation; Organic carbon; Spatiotemporal variability; Rudong

全球气候变化、全球生态系统碳循环以及温室气体减排备受国际社会的关注。土壤碳库是全球陆地生态系统碳库的重要组成部分<sup>[1]</sup>, 其碳储量约为 $1.5 \times 10^{18}$  g<sup>[2]</sup>, 约为大气碳库的3倍<sup>[3-4]</sup>。如此庞大的碳储量对全球大气二氧化碳的浓度有着至关重要的影

响, 因此研究土壤碳库的动态变化以及影响因素对于全球变化、农业生产、粮食安全以及人类福祉都有着重要的意义。

滩涂指沿海地区由河流携带泥沙沉积形成的陆海交错带<sup>[5]</sup>, 是滨海自然湿地的重要组成部分<sup>[6]</sup>。江

①基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230751)资助。

\* 通讯作者(ljpu@nju.edu.cn)

作者简介: 李雪盈(1994—), 女, 河北衡水人, 硕士, 主要从事土地利用变化与生态环境响应研究。Email: Lynn\_lxy@sina.com

苏沿海滩涂资源丰富,海岸线近千公里,苏北沿海地区拥有占全国 1/4 以上的滩涂面积<sup>[7]</sup>,开发历史悠久,沿海滩涂围垦已经成为江苏耕地、建设用地补充的主要方式。滩涂围垦过程中,人类活动对于沿海滩涂地区的能量交换、物质迁移会产生重大的影响。滩涂围垦后,原有的土地利用方式发生了改变,产生了与之前光滩不同的多种土地覆被类型<sup>[8]</sup>,湿地生态系统逐渐向陆地人工生态系统演替,这一过程中,土壤的理化性质发生重大改变,生态系统结构、生态过程以及生态系统服务功能发生了根本的变化<sup>[9-10]</sup>。有研究表明,围垦后不同的土地利用方式和利用年限会显著改变土壤的粒径分布特征,连年的耕作施肥会使得土壤总磷、有机质、氮素含量显著增加<sup>[8,11-13]</sup>。滩涂围垦过程中土壤植物覆被也发生了显著的变化,比如在原有滩涂湿地上生长的互花米草、碱蓬等植物会减少,取而代之的是养殖塘以及农作物面积会大幅增加,土地利用/覆被的变化会使得土壤中的生物化学过程发生改变<sup>[14]</sup>。金雯晖等<sup>[15]</sup>在研究表层土壤有机碳与围垦年限相关性时提出在围垦过程中,滨海盐土发挥了极大的固碳作用,土壤 pH 朝着更适宜植物生长的方向变化,土壤盐分逐渐降低。王琪琪等<sup>[13]</sup>提出在滩涂围垦活动下,土壤的盐分和含水量在围垦初期急剧下降,肥力水平逐渐提高,土壤环境得到改善。此外,滩涂经过围垦利用后,由于其植被、地形以及人类干预程度、土壤本身存在一定的空间异质性<sup>[16-18]</sup>,加上不同土地利用方式、管理方式以及植物残体归还量的差异使得土壤有机质输入存在差异,加强了土壤有机碳的空间变异程度<sup>[19]</sup>。罗由林等<sup>[20]</sup>对四川省仁寿县

0~20 cm 表层土壤有机碳含量主控因素进行分析,结果也表明土地利用方式对于研究区土壤有机碳有显著影响。目前对于江苏沿海滩涂围垦区土壤有机碳的研究主要着眼于不同围垦年限、不同土地利用方式下的表层土壤,对于剖面土壤有机碳的时空特征及土地利用方式的影响的综合研究较少<sup>[21-22]</sup>。本文选取如东县 4 个滩涂围垦区作为研究区,探讨了 0~60 cm 剖面土壤有机碳的时空分布特征及影响因素,进一步了解了围垦后土壤有机碳库的动态变化规律,以期能通过研究结果对沿海滩涂土地利用提出一些调控建议,促使滩涂资源的高效、合理利用。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

如东县,是江苏南通市下辖县,位于江苏省东南部、长江三角洲北翼,濒临黄海,地处 120°42'~121°22'E, 32°12'~32°36'N,拥有广阔的沿海滩涂(图 1)。属于亚热带海洋性季风气候,四季分明,气候温和,光照充足,全年平均气温 15℃,且降水充沛,多年平均降雨量达到 1 042 mm,但降雨年内分配不均。如东县海岸线全长 102.59 km,滩涂面积达 6.93 万 hm<sup>2</sup>,滩涂围垦历史悠久,早在宋代就开始修建范公堤围海造田。1949 年以来,经历过 20 多次大规模围海造田活动,围垦面积达 3.47 万 hm<sup>2</sup>,目前依然有巨大的围垦潜力<sup>[13]</sup>。本文研究区为如东县东部滩涂围垦区,土壤主要为滨海盐土,垦区土地多用于养殖业、种植业农业生产,并有少量土地用于林业以及工业。

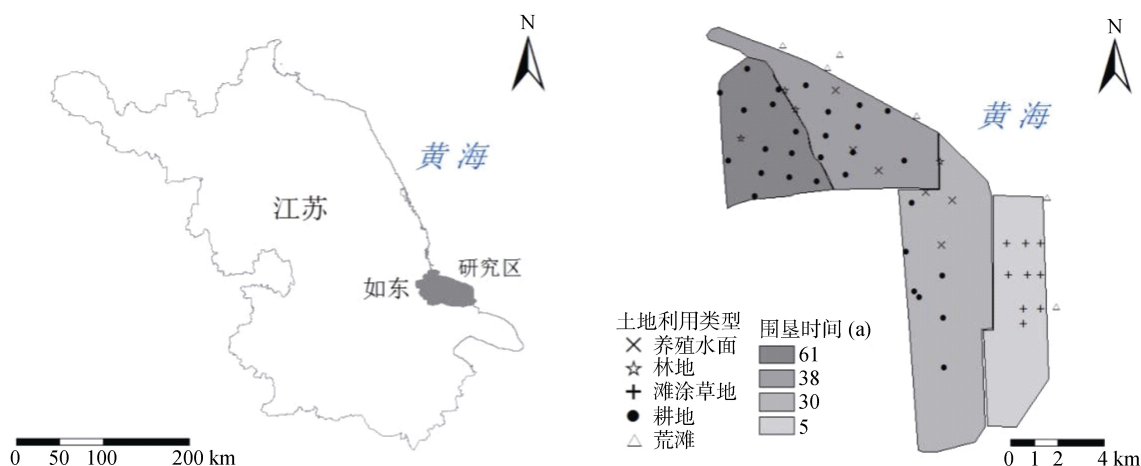


图 1 研究区位置及采样点示意图

Fig. 1 Location of study area and distribution of soil sampling sites

### 1.2 样品采集与分析

选取不同年代的 4 个围垦区作为研究对象,采样

时间为 2012 年 9 月。结合当地土地利用实际情况同时兼顾土地利用方式,在围垦区布设共计 49 个采样

点,并在未围垦的光滩布设 6 个样点,每个采样点都用 GPS 记录坐标并备注土地利用方式(图 1)。在每个样点采集 0~10、10~20、20~30、30~40、40~60 cm 深度土壤样品(其中养殖水面的样品是在晒塘时采集鱼塘底泥),共计 275 份,土样带回实验室风干过 2 mm 筛备用。

采用高温外热重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量;采用 PHS-3C 型 pH 计测定土壤 pH;采用激光粒度仪测定土壤粒度,并按照国际土壤分类制<sup>[23]</sup>对土壤粒度进行分级。本文用电导率  $EC_{1:5}$  表示总盐含量,测量时土水质量比 1:5,加入煮沸冷却的蒸馏水,振荡机振荡 5 min 后离心,用梅特勒-托利多电导率仪测定上清液电导率。

1.3 数据处理

采用 SPSS 22.0 对研究区土壤有机碳含量进行描述性统计分析,并做土壤各理化性质间的 Pearson 相关性分析;应用 GS+对有机碳数据进行半方差函数拟合,并在 ArcGIS10.2 中进行 Kriging 插值。

2 结果与讨论

2.1 研究区土壤有机碳含量统计特征

本文采用域法识别异常值<sup>[20]</sup>,用样本均值  $\bar{u}$  加减三倍标准差  $s$ ,在区间 $[\bar{u}-3s,\bar{u}+3s]$ 以外的数据均被判定为异常值,然后分别用正常的最大值和最小值来代替异常值。经检验,样本有机碳数据中存在 4 个异常值,数据处理结果如表 1 所示。

表 1 不同土层土壤有机碳含量描述性统计结果  
Table 1 Descriptive statistics of soil organic carbon contents in different soil layers

土层(cm)	最小值(g/kg)	最大值(g/kg)	平均值(g/kg)	标准差(g/kg)	偏度	峰度	变异系数 CV(%)
0~10	0.96	6.96	3.90	1.50	0.35	-0.56	38.53
10~20	0.76	7.10	3.15	1.59	0.85	-0.03	50.39
20~30	0.64	5.07	2.39	1.00	0.84	0.53	41.78
30~40	0.53	4.59	2.30	0.97	0.62	-0.01	42.36
40~60	0.25	4.18	1.75	0.79	1.03	1.82	44.87
0~60	0.25	7.10	2.70	1.42	1.04	0.73	52.49

土壤有机碳的含量主要取决于有机物质的输入和输出,输入源主要包括原来土壤中的有机物矿化和动植物残体的分解以及在人为改造利用过程中的人工施肥,输出主要包括消耗分解和侵蚀流失。分析结果显示,研究区土壤有机碳含量处于 0.25~7.10 g/kg,各土层平均含量为 1.75~3.90 g/kg,随着剖面深度的增加有机碳含量逐渐降低。其中,0~10 cm 土层有机碳平均含量最高(3.90 g/kg),40~60 cm 土层有机碳平均含量最低(1.75 g/kg),可能主要受到生物量以及有机质分解速率的影响<sup>[24]</sup>。整体来看,0~60 cm 土壤有机碳平均含量为 2.70 g/kg。根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准<sup>[25]</sup>可知,除去 0~10 cm 土层土壤有机碳含量属第 5 级外,其余各层土壤有机碳含量都处在第 6 级,0~60 cm 整体土壤有机碳含量处在第 6 级,属较为缺乏。而各层土壤有机碳含量均属于中等变异水平<sup>[26]</sup>。

2.2 研究区土壤有机碳含量时间分布特征

从时间维度来看,经过长期的围垦,人类活动施用大量有机肥以及耕作物、自然凋落物还田增加了表层有机碳的输入,加上围垦后的土壤经过长期耕作脱盐后,土壤本身性质得到了极大的改善,熟

化程度不断提高,有利于土壤有机碳的积累,因而研究区各层土壤有机碳含量大体上均随着围垦年限的增加呈上升趋势,但不同土层略有差异。对相同深度不同围垦年限的土壤有机碳含量差异进行分析,结果显示在 0~10 cm 土层中,围垦 61 a 的垦区土壤有机碳含量略低于围垦 38 a 垦区;在 10~20 cm 以及 20~30 cm 土层中,未围垦的光滩土壤有机碳含量高于围垦 5 a 的滩涂草地;对于 0~60 cm 土层,围垦 5 a 的垦区土壤有机碳含量略低于未围垦的光滩。在围垦时间相同的情况下,随着土壤深度的增加,未围垦的光滩、围垦 38 a 以及围垦 61 a 的垦区土壤有机碳含量整体呈现下降趋势。不同深度土层土壤有机碳含量受围垦年限的影响不同,总的来看,除了 30~40 cm 土层,其余各层不同围垦年限土壤有机碳含量均有显著差异( $P<0.05$ ),并且随着土壤深度的增加,围垦年限对于有机碳含量变化的影响减弱,这是由于耕作层以下土壤受人类活动的影响较小,施肥以及植物残体还田对于土壤有机碳变化的贡献较弱,更多的受到土壤颗粒组成的影响<sup>[27]</sup>,接近土壤本身的理化性质。

表 2 不同年限围垦区土壤有机碳含量差异(g/kg)  
Table 2 Differences in soil organic carbon contents between different reclamation zones

围垦年限(a)	0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm	0 ~ 60 cm
0	2.44 b	2.07 b	2.02 b	1.81 b	1.30 b	1.93 c
5	2.82 b	1.94 b	1.65 b	1.89 b	1.33 b	1.92 c
30	4.29 a	2.95 a	2.19 b	2.22 a	1.54 b	2.64 b
38	4.42 a	3.58 a	2.59 a	2.39 a	2.04 a	3.00 a
61	4.34 a	4.08 a	2.97 a	2.49 a	2.09 a	3.19 a

注：表中同列小写字母不同表示不同围垦年限间差异在  $P<0.05$  水平显著。

2.3 研究区土壤有机碳含量空间分布特征

对剔除异常值后的数据进行半方差分析,根据决定系数( $R^2$ )和残差(RSS)等判断各层土壤有机碳数据的最优拟合模型,结果表明,20~30 cm 土层拟合效果最好, $R^2$ 为 0.634。0~10 cm 土层有机碳最优半方差模型为指数模型,20~30 cm 土层为高斯模型,10~20、30~40、40~60 cm 土层为球面模型,0~60 cm 土层为球面模型。研究区各层土壤块金值介于 0.045~0.466。0~10、10~20、20~30、40~60 cm 土层块金效应值均低于 25%,土壤有机碳具有强烈的空间自相关性;30~40、0~60 cm 土层块金效应值介于 25%~75%,土壤有机碳含量呈现出中等强度的空间自相关<sup>[26]</sup>(表 3)。

利用在 GS+软件中拟合的半方差理论模型参数,在 ArcGIS10.2 中采用 Kriging 插值方法对研究区土壤

有机碳含量进行空间插值分析,得到不同土层土壤有机碳含量空间分布,如图 2 所示。结果显示,研究区各土层土壤有机碳含量基本呈现由滩涂向内陆逐渐增加的趋势。在 0~10 cm 土层,土壤有机碳含量高值出现在研究区的西北部,大部分位于 61 a 围垦区和 38 a 围垦区交界处,实地采样发现这一区域主要为林地,一般林地的枯枝落叶归还量大,容易积累大量的有机碳;还有一小部分高值区位于 61 a 围垦区北部中间位置,土壤有机碳含量达 4.95~5.45 g/kg;自高值区向周围扩展土壤有机碳含量逐渐降低,最低值出现在靠近海岸区域,其平均含量为 2.95~3.45 g/kg;另外,还可以看出 61 a 围垦区东南部表层土壤有机碳含量明显低于中部,有研究认为该区域地下水盐度较高<sup>[11]</sup>,较难进行开发利用,有机质来源较少,土壤有机碳含量因此偏低。

表 3 土壤有机碳含量变异函数模型及相关参数  
Table 3 Variogram theory models and corresponding parameters of soil organic carbon contents in different layers

土层(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(km)	决定系数 $R^2$	残差 RSS
0 ~ 10	指数	0.146	2.116	6.90	0.63	0.138	1.23
10 ~ 20	球面	0.161	2.335	6.90	1.49	0.508	2.18
20 ~ 30	高斯	0.045	0.919	4.90	1.40	0.634	0.335
30 ~ 40	球面	0.466	0.944	49.36	2.63	0.354	0.338
40 ~ 60	球面	0.099	0.589	16.81	1.39	0.363	0.187
0 ~ 60	球面	0.317	0.635	49.92	3.60	0.402	0.141

在 10~20 cm 土层,土壤有机碳含量呈带状分布,最高值分布在研究区西北部 61 a 围垦区和 38 a 围垦区,土壤有机碳含量均值达 4.10~4.61g/kg;低值区出现在靠近海岸的部分,土壤有机碳含量介于 2.06~2.57 g/kg;该层有机碳含量整体水平低于 0~10 cm 土层。

在 20~30 cm 土层,土壤有机碳含量分布也呈现条带状同时伴有局部特征,高值区靠近内陆,位于 61 a 围垦区东部,这一区域由于围垦时间较长并且靠近内陆,相对于滨海土壤更适于植物生长,有机物质的输入增加,同时远离海水的冲刷使得有机物质流失

量减小,因而土壤有机碳含量较高;同时在 38 a 围垦区的西北部高值区呈现斑块状分布,其土壤有机碳含量均值为 3.11~3.49 g/kg。

在 30~40 cm 土层,土壤有机碳含量同时受到地表活动诸如土地利用、翻耕、施肥等以及植物根系生长、微生物活动、土壤本身物理性质等多重因素影响,影响因素变化复杂,土壤有机碳分布没有规律,局部特征明显。

在 40~60 cm 土层,研究区西南部土壤有机碳含量最高,为 2.20~2.45 g/kg,向东逐渐降低;同样在 30 a 围垦区南偏西位置出现小范围的高值;靠近海岸

区域土壤有机碳含量均值为  $1.20 \sim 1.70 \text{ g/kg}$ 。这一深度土壤有机碳含量受地表人类活动的影响较表层土壤有所减弱, 出现了同表层土壤有机碳不一样的分布规律。

整体上,  $0 \sim 60 \text{ cm}$  土层土壤有机碳含量基本呈现带状分布, 研究区西北角土壤有机碳含量介于

$2.86 \sim 3.22 \text{ g/kg}$ , 再向东南方向为高值区, 土壤有机碳含量达  $3.22 \sim 3.58 \text{ g/kg}$ ; 有机碳含量为  $2.50 \sim 2.86 \text{ g/kg}$  的区域在 38 a 围垦区以及 30 a 围垦区均有分布; 靠近海岸区域为有机碳含量低值区, 其平均值为  $1.78 \sim 2.14 \text{ g/kg}$ 。

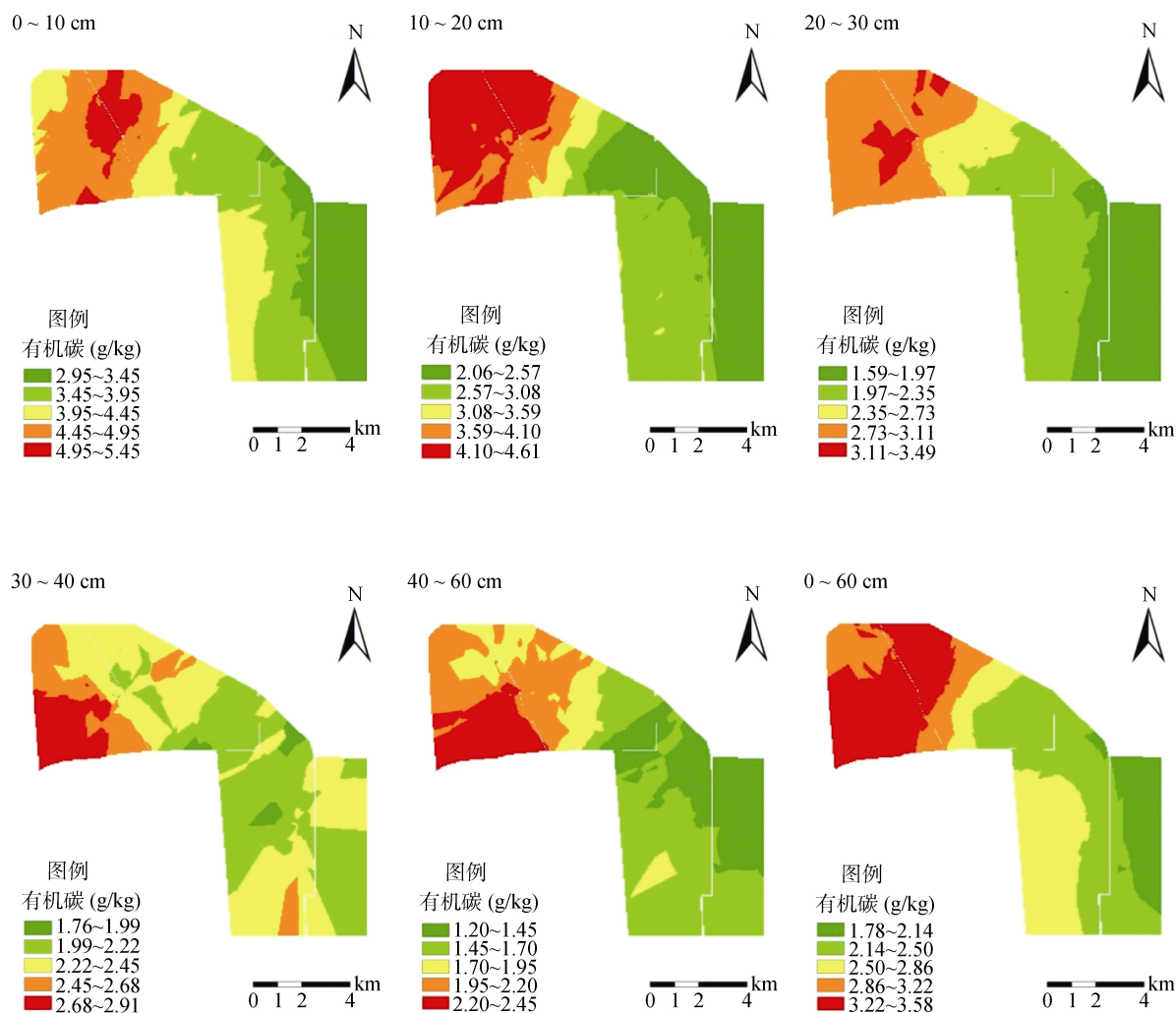


图2 研究区不同土层深度土壤有机碳含量空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of soil organic carbon contents in different layers in study area

## 2.4 研究区不同土地利用方式土壤有机碳含量差异

根据实地采样时记录的土地利用方式, 对不同围垦年限、不同土地利用方式下的  $0 \sim 60 \text{ cm}$  土壤有机碳含量进行分析, 结果(表4)显示, 围垦 5 a 的滩涂草地土壤有机碳含量均值最低为  $1.92 \text{ g/kg}$ , 未围垦的光滩土壤有机碳含量略高于滩涂草地, 其均值为  $1.93 \text{ g/kg}$ , 二者没有显著差异, 这是由于 5 a 围垦区内种植了田菁、盐蒿等耐盐作物, 这些植物残体进入土壤成为表层土壤有机质的重要来源, 但是由于围垦初期土壤盐碱度高难以利用, 土壤有机碳输入较

少, 同时微生物的呼吸作用也会消耗有机质, 因而有机碳含量同未围垦光滩并无显著差异; 同期围垦的耕地其土壤有机碳含量显著高于养殖水面, 这是因为在围垦年限相同的情况下鱼塘底泥有机质输入量比耕地低; 61 a 围垦区耕地土壤有机碳含量略低于 38 a 围垦区耕地, 滩涂土壤经过人类有序的垦殖利用后, 其土壤有机碳含量显著增加。

对不同围垦年限不同土地利用方式下的各层土壤有机碳含量进行分析, 结果显示,  $0 \sim 10 \text{ cm}$  土层土壤有机碳含量差异最为明显, 未围垦的光滩有机碳含量最

低,相同围垦时期耕地的土壤有机碳含量显著高于养殖水面, 61 a 围垦区耕地土壤有机碳含量略低于 38 a 围垦区耕地; 10~20、20~30、30~40、40~60 cm 土层土壤有机碳含量差异明显小于 0~10 cm 表层土壤, 土

地利用方式对深层土壤有机碳含量并无明显影响; 除 30~40、40~60 cm 土层 61 a 围垦区耕地土壤有机碳含量略低于 38 a 围垦区耕地外, 同一土地利用方式土壤有机碳含量随着围垦年限的增加呈现上升趋势。

表 4 不同垦区不同土地利用方式土壤有机碳含量差异(g/kg)  
Table 4 Differences in soil organic carbon contents under different land use types in different reclamation zones

围垦时间(a)	土地利用方式	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm	40~60 cm	0~60 cm
0	荒滩	2.44 b	2.07 b	2.02 ab	1.81 ab	1.30 c	1.93 bc
5	滩涂草地	2.82 b	1.94 b	1.65 b	1.89 b	1.33 c	1.92 bc
30	耕地	4.66 a	3.04 ab	2.07 ab	2.10 ab	1.74 abc	2.72 ab
30	养殖水面	3.76 ab	3.17 ab	2.23 ab	2.44 ab	1.25 bc	2.57 abc
38	耕地	4.52 a	3.76 a	2.78 a	2.81 a	2.25 a	3.23 a
38	养殖水面	2.84 b	2.92 ab	1.93 ab	1.28 b	1.27 bc	2.05 b
61	耕地	4.21 ab	3.92 a	2.89 a	2.70 a	2.14 ab	3.17 a

注: 表中同列小写字母不同表示不同垦区及土地利用方式间差异在  $P<0.05$  水平显著。

2.5 研究区各层土壤有机碳含量影响因素

以往的研究多认为土壤有机碳对土壤的养分供应、理化性质有着直接的影响,是土壤理化性质变化的原动力。事实上随着现代农业的发展,人类活动比如施肥、灌溉、施用农药杀虫剂等会对土壤的理化性质产生极大的影响进而影响到土壤有机碳固定的微观环境,最终使得土壤有机碳的来源、固定或分解速率发生变化,土壤有机碳含量改变<sup>[28]</sup>。对研究区各层土壤有机碳、粒度、pH 及总盐之间的相关关系进行分析,结果表明(表 5), 0~10、10~20 以及 20~30 cm 土层有机碳含量与粉粒含量存在显著正相关关系( $P<0.05$ ),与砂粒含量、土壤 pH 以及土壤总盐呈显著负相关( $P<0.05$ ); 30~40 cm 土层土壤有机碳含量与土壤粒度以及 pH 不存在显著相关关系,与土壤总盐呈显著负相关( $P<0.05$ ); 40~60 cm 土层土壤有机碳含量与粒度相关性显著,与 pH 呈现显著负相关( $P<0.05$ ),与土壤总盐无显著相关关系。土壤 pH 主要从两个方面影响土壤的有机碳含量:一方面土壤 pH 会影响植物生长状况,而植物残体是土壤有机碳的重要来源,另一方面 pH 会影响土壤微生物活性<sup>[28]</sup>,而土壤微生物活动会分解土壤中的有机质,造成土壤有机质的流失。研究区土壤呈碱性<sup>[13]</sup>(pH>8),有研究表明在 pH>8 时,土壤有机质随着 pH 的增加快速下降<sup>[29]</sup>,这是由于随着土壤 pH 的增加,植物的生长以及微生物的分解活动都受到抑制,土壤有机碳源大大减少,因而研究区 0~30 cm 深度各层土壤有机碳含量均与 pH 呈显著负相关关系。土壤粒度对于土壤结构、养分有着重要的影响<sup>[30-31]</sup>。土壤中黏粒同有机质的结合能够增强其抵抗微生物分解的能力,土壤中黏粒含量高时,有机物质的分解速率较慢,土壤中有机

碳的含量也就相对较高<sup>[32]</sup>。已有研究表明,土壤颗粒组成的不同会造成养分差异<sup>[31]</sup>,小粒径土壤颗粒对有机碳有保护作用<sup>[33]</sup>,而砂粒中的有机物质容易矿化分解,此外粉粒含量对土壤含水量有影响<sup>[34]</sup>,因此土壤的黏粒、粉粒细颗粒的含量同土壤有机碳含量呈正相关,而砂粒的含量则与有机碳含量呈负相关<sup>[33]</sup>,本研究区的研究结果也印证了这一规律。以往研究表明,有机碳含量同土壤盐度一般呈负相关,这是由于土壤分形维数越高,土壤结构愈加紧实,土壤颗粒表面积增加,从而吸附的盐离子含量增加,相应地对有机质的固定就会减少<sup>[30]</sup>,在本研究区,0~40 cm 深度各个土层土壤有机碳含量与总盐均呈显著负相关。经综合分析,滩涂围垦区的演化同时受到自然与人为因素的双重影响<sup>[35]</sup>。

表 5 土壤有机碳含量与其他属性的相关性  
Table 5 Correlations between soil organic carbon contents and other soil properties

土层(cm)	砂粒	粉粒	黏粒	pH	总盐
0~10	-0.210	0.305*	-0.015	-0.665**	-0.308*
10~20	-0.299*	0.314*	0.111	-0.489**	-0.354**
20~30	-0.320*	0.333*	0.149	-0.295*	-0.296*
30~40	-0.197	0.266	0.193	-0.235	-0.311*
40~60	-0.441**	0.390**	0.317*	-0.318*	-0.152

注: \*\*表示在  $P<0.01$  水平显著相关; \*表示在  $P<0.05$  水平显著相关。

3 结论

自然因素及人为因素二者的权衡与协同对于土地资源的配置及沿海滩涂围垦后的土地利用空间格局产生重要影响,进而影响滩涂土壤中有机碳的累



积。结果显示, 研究区土壤有机碳含量均值为 1.75 ~ 3.90 g/kg, 江苏沿海典型滩涂围垦区各层土壤有机碳含量在经过人类围垦及开发利用之后都有了显著的提升, 一般来看, 土壤有机碳含量呈现出随着围垦时间的增加、自海向陆呈现逐渐增加的趋势, 随着土壤深度的增加呈下降趋势。相比于养殖鱼塘及草地, 耕地土壤有机碳含量更高; 研究区土壤有机碳含量随着 pH 以及总盐的增加呈下降趋势; 土壤有机碳含量与土壤细颗粒(黏粒、粉粒)含量呈正相关。不同土层土壤有机碳含量的主控因素不同, 表层土壤有机碳含量受人类土地利用活动的影响较大, 这也加剧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[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, 53(7): 766-775.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change[J]. Geoderma, 2004, 123(1/2): 1-22.
- [4] Watson R T, Noble I R. Carbon and the Science-Policy Nexus: The Kyoto Challenge[M]// Challenges of a Changing Earth. Springer Berlin Heidelberg, 2002: 57-64.
- [5] 任美镠, 丁方叔, 万延森, 等. 江苏省海岸带和滩涂资源综合调查报告[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [6] 徐彩瑶, 濮励杰, 朱明. 沿海滩涂围垦对生态环境的影响研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(3): 1148-1162.
- [7] 王资生, 阮成江, 郑怀平. 盐城滩涂资源特征及可持续利用对策[J]. 海洋通报, 2001, 20(4): 64-69.
- [8] 许艳, 濮励杰. 江苏海岸带滩涂围垦区土地利用类型变化研究——以江苏省如东县为例[J]. 自然资源学报, 2014, 29(4): 643-652.
- [9] 陈吉余, 陈沈良. 中国河口海岸面临的挑战[J]. 海洋地质动态, 2002, 18(1): 1-5.
- [10] Milliman J D, Meade R H. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. Journal of Geology, 1983, 91(1): 1-21.
- [11] 张濛, 濮励杰, 王小涵, 等. 不同干扰强度对滩涂围垦区土壤颗粒组成的时空分异特征的影响[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 845-854.
- [12] 张晶, 濮励杰, 朱明, 等. 如东县不同年限滩涂围垦区土壤 pH 与养分相关性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(2): 225-230.
- [13] 王琪琪, 濮励杰, 朱明, 等. 沿海滩涂围垦区土壤质量演变研究——以江苏省如东县为例[J]. 地理科学, 2016, 36(2): 256-264.
- [14] 张文敏, 姜小三, 吴明, 等. 杭州湾南岸土壤有机碳空间异质性研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1087-1095.
- [15] 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[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 89-94.
- [16] Mallarino A P. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1473-1481.
- [17] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2000, 105(D9): 11865-11877.
- [18] Mohanty B P, Famiglietti J S, Skaggs T H. Evolution of soil moisture spatial structure in a mixed vegetation pixel during the Southern Great Plains 1997 (SGP97) Hydrology Experiment[J]. Water Resources Research, 2000, 36(12): 3675-3686.
- [19] Fang X, Xue Z J, Li B C, et al. Soil organic carbon distribution in relation to land use and its storage in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2012, 88(1): 6-13.
- [20] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 四川省仁寿县土壤有机碳空间分布特征及其主控因素[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(1): 34-42.
- [21] 许鑫王豪, 赵一飞, 邹欣庆, 等. 盐城滨海湿地表层沉积物有机碳特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(11): 1957-1967.
- [22] 杨钊, 任航, 张振克, 等. 江苏沿海滩涂不同利用类型的土壤有机碳分布与影响因素[J]. 亚热带资源与环境学报, 2016, 11(4): 46-52.
- [23] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [24] 郭洋, 李香兰, 王秀君, 等. 干旱半干旱区农田土壤碳垂直剖面分布特征研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(6): 1433-1443.
- [25] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [26] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [27] 杨敏, 杨飞, 杨仁敏, 等. 祁连山中段土壤有机碳剖面垂直分布特征及其影响因素[J]. 土壤, 2017, 49(2): 386-392.
- [28] 辛琨, 颜葵, 李真, 等. 海南岛红树林湿地土壤有机碳分布规律及影响因素研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1078-1086.
- [29] 邓小华, 张瑶, 田峰, 等. 湘西植烟土壤 pH 和主要养分特征及其相互关系[J]. 土壤, 2017, 49(1): 49-56.
- [30] 杨婷, 景航, 姚旭, 等. 黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J]. 水土保持研究, 2016, 23(3): 1-5.
- [31] 张宏, 刘建军. 黄土沟壑区不同土地利用方式下土壤养分及其与土壤颗粒组成关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 80-85.
- [32] 李忠佩, 刘明, 江春玉. 红壤典型区土壤中有机的分解、积累与分布特征研究进展[J]. 土壤, 2015, 47(2): 220-228.
- [33] 曾伟斌, 邓琦, 张全发, 等. 丹江口库区不同土地利用土壤碳氮含量的变化[J]. 土壤, 2013, 45(3): 385-391.
- [34] 周倩倩, 丁建丽. 干旱区典型绿洲土壤有机质的反演及影响因素研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 313-324.
- [35] 方仁建, 沈永明. 围垦对海滨地区景观演变及其质心移动的影响——以盐城保护区部分区域为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(5): 772-783.