

杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局*

邵学新¹ 杨文英^{1,2} 吴明^{1**} 蒋科毅¹⁽¹⁾ 中国林业科学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研究站, 浙江富阳 311400; ⁽²⁾ 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要 通过研究杭州湾自然潮滩湿地和围垦湿地土壤有机碳含量及其分布格局, 揭示湿地植被演替、外来物种入侵和围垦活动对土壤有机碳分布的影响. 结果表明: 潮滩湿地土壤表层有机碳含量在 $4.41 \sim 8.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值 $6.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 不同植被类型下表层土壤有机碳表现为: 芦苇 ($8.56 \pm 0.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 互花米草 ($7.31 \pm 0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 海三棱藨草 ($5.48 \pm 0.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 光滩 ($4.47 \pm 0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); 围垦湿地表层土壤有机碳表现为: 20 世纪 60 年代 ($7.46 \pm 0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 2003 年 ($5.12 \pm 0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 20 世纪 80 年代 ($1.96 \pm 0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 即土壤有机碳含量随围垦时间延长表现为先降低后升高的趋势; 土壤有机碳在垂直剖面上均表现为由表向下逐渐降低的趋势. 潮滩湿地和围垦湿地的土壤有机碳与 pH 呈显著负相关, 与总氮呈显著正相关, 表明在土壤中氮主要以有机氮的形态存在. 潮滩湿地有机碳与碳氮比相关性不明显, 而围垦湿地具有显著正相关性, 说明围垦利用对湿地土壤碳氮比产生了一定影响. 研究表明, 潮滩湿地土壤固碳能力随着植物群落演替逐步增强, 而外来入侵种互花米草的大量入侵和扩散将有可能降低潮滩湿地生态系统土壤的储碳功能. 围垦引起的土壤水分、颗粒组成的变化以及耕作、土地利用和利用历史是影响围垦湿地土壤有机碳分布的主要原因.

关键词 杭州湾 滨海湿地 植被演替 围垦 有机碳

文章编号 1001-9332(2011)03-0658-07 中图分类号 S153 文献标识码 A

Soil organic carbon content and its distribution pattern in Hangzhou Bay coastal wetlands.SHAO Xue-xin¹, YANG Wen-ying^{1,2}, WU Ming¹, JIANG Ke-yi¹ (¹Wetland Ecosystem Research Station of Hangzhou Bay, State Forestry Administration, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China; ²College of Resources and Environment, Southwest China University, Chongqing 400716, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(3): 658-664.

Abstract: In this paper, the soil organic carbon (SOC) content and its distribution pattern in the natural intertidal zones and reclaimed wetlands of Hangzhou Bay were studied, aimed to explore the effects of vegetation succession, exotic species invasion, and reclamation on the SOC in coastal wetlands of the Bay. In intertidal zones, the surface SOC content ranged from 4.41 to $8.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, with an average of $6.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, and differed significantly under different vegetations, with a tendency of under *Phragmites australis* ($8.56 \pm 0.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > *Spartina alterniflora* ($7.31 \pm 0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > *Scirpus mariqueter* ($5.48 \pm 0.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > mudflats ($4.47 \pm 0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$); in reclaimed wetlands, the surface SOC content was $7.46 \pm 0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the 1960s, $1.96 \pm 0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in the 1980s, and $5.12 \pm 0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ in 2003, showing a trend of increased after an initial decrease with increasing reclamation year. The SOC in the profiles all showed a decreasing trend from the surface to the bottom. The SOC in intertidal zones and reclaimed wetlands was significantly negatively correlated with soil pH, and positively correlated with soil total nitrogen (TN), suggesting a large reserve of organic nitrogen in TN. The correlation between SOC and soil C/N ratio was not obvious in intertidal zones, but significantly positive in reclaimed wetlands, indicating that reclamation affected soil C/N ratio to a certain extent. This study showed that in the intertidal zones, soil carbon sequestration capacity increased gradually with plant community succession. However, the invasion of exotic species *Spartina alterniflora* might decrease the capacity of carbon sequestration in intertidal zones. It was also found that the changes of soil moisture content, particle composition,

* 中国林业科学院基本科研业务费专项(CAFYBB2008018)和国家“十一五”科技攻关项目(2006BAD03A1902)资助。

** 通讯作者. E-mail: hangzhoubay@126.com

2010-07-27 收稿, 2010-12-06 接受。

vegetation coverage, and reclamation history were the main factors affecting the SOC distribution in reclaimed wetlands.

Key words: Hangzhou Bay; coastal wetland; vegetation succession; reclamation; soil organic carbon.

湿地是地球上主要的碳汇, 储藏在不同类型湿地中的碳约占地球陆地碳总量的 15%^[1]. 同时, 湿地也是温室气体排放的一个重要潜在源^[2]. 全球变化研究引起了人们对生态系统中碳储量及分布的日益关注, 湿地土壤有机碳是气候变化的一种敏感指示物, 能用来指示对全球气候变化的响应^[3]. 土壤有机碳的分布及其转化研究成为全球有机碳研究的热点.

植被类型和人为干扰活动对土壤有机碳含量和组成具有重要影响, 不同植物通过影响土壤有机碳的输入数量和质量而影响土壤有机碳分布^[4]; 人为活动通过对湿地的干扰和破坏, 使土壤中的有机碳分解速率加快, 导致温室气体的排放量显著增加^[5]. 研究土壤有机碳蓄积及其对生物、物理和人为因素等关键控制因子的响应, 是准确预测和评估碳收支的关键^[4]. 我国学者对湿地土壤有机碳含量、分布及转化进行了大量研究, 尤其对淡水沼泽湿地从土壤物理、化学性质以及人为活动如垦殖和不同土地利用方式等角度开展了较系统的研究^[6-7], 相关学者也对我国河口滨海湿地(如闽江口、长江口、黄河三角洲和苏北潮滩湿地等)开展了相关工作, 主要关注不同植被类型下土壤有机碳分布以及土地利用变化的影响^[8-10], 但目前对围垦利用影响的研究还不多见.

滨海湿地是我国湿地的重要类型之一. 以杭州湾为界, 杭州湾滨海湿地分成杭州湾以北和杭州湾以南两个部分. 杭州湾南岸湿地属于淤涨型滩涂, 每年新增大量湿地面积, 同时由于经济发展需要, 又被不断地围垦利用. 受自然因素和人为因素的双重影响, 生态系统的不稳定性和脆弱性表现极为突出, 是典型的生态环境脆弱区域. 外来种互花米草(*Spartina alterniflora*)的入侵和人为围垦活动已成为影响该地区湿地土壤有机碳随植被自然演替分布的主要原因. 目前人为活动对滨海湿地的直接或间接影响正在加剧, 根据浙江省滩涂围垦总体规划(2005-2020年), 杭州湾南岸慈溪市 2005-2010 年续建和新建围垦工程将达 $1.10 \times 10^4 \text{ hm}^2$; 根据《慈溪市滩涂围垦总体规划(2010-2020年)》, 该地区还将围涂 $1.95 \times 10^4 \text{ hm}^2$.

本研究对杭州湾滨海湿地不同植被类型及不同围垦年代下土壤有机碳含量和分布进行研究, 探讨外来种入侵和人为活动对湿地土壤有机碳分布的潜在影响, 以期为滨海湿地的合理开发与保护、退化湿地的恢复与重建提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域概况

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. 研究区设在杭州湾南岸慈溪三北滩涂湿地国家林业局杭州湾湿地定位研究站附近(图 1). 试验样区地理坐标为 $30^{\circ}17' - 30^{\circ}20' \text{ N}$, $121^{\circ}5' - 121^{\circ}10' \text{ E}$, 属北亚热带海洋性季风气候, 四季分明, 年均气温 16°C , 年均降水量 1273 mm , 日照 2038 h , 无霜期 244 d . 湿地主要土壤类型为盐土类的滨海盐土亚类和潮土化盐土. 随高程的增加和滩涂形成时间的逐渐加长, 潮湿湿地伴有典型的自然生物群落演替序列, 依次为光滩、海三棱藨草(*Scirpus mariqueter*)和芦苇(*Phragmites australis*)生长区^[11]. 此外, 由于外来种互花米草的入侵, 在海三棱藨草和芦苇生长区之间出现了互花米草镶嵌群落.

1.2 样品采集与分析

根据资料收集和现场勘察, 在垂直杭州湾南岸海岸线方向, 选择一条长 4000 m 、宽 500 m 的样带, 由北向南布设 7 处样地, 分别代表潮滩湿地淤泥质光滩、不同植被类型湿地和不同围垦年代湿地, 样地



图 1 研究区域地理位置

Fig. 1 Location of the research area.

表 1 研究区土壤采样点信息

Table 1 Information of soil samples in the study area

土地类型 Land type	样点 Sampling site	经纬度 Latitude and longitude	样点描述 Site description
潮滩湿地 Intertidal zone	GT	30°20'48.79" N, 121°11'42.68" E	光滩 Mudflat
	BC	30°20'46.09" N, 121°11'47.04" E	海三棱藨草 <i>S. mariqueter</i>
	MC	30°20'34.77" N, 121°11'58.84" E	互花米草 <i>S. alterniflora</i>
	LW	30°19'46.8" N, 121°09'26.0" E	芦苇 <i>P. australis</i>
围垦区 Reclaimed wetland	W ₁	30°19'04.3" N, 121°10'36.2" E	2003 年围垦, 芦苇 Reclaimed in 2003, <i>P. australis</i>
	W ₂	30°18'27.8" N, 121°10'00.9" E	20 世纪 80 年代围垦, 旱地 Reclaimed in the 1980s, dryland
	W ₃	30°17'41.0" N, 121°10'34.5" E	20 世纪 60 年代围垦, 旱地 Reclaimed in the 1960s, dryland

详细信息见表 1. 每处样地设置 3 个 5 m×5 m 样方, 每个样方内布置 3~5 个样点, 采用收割法和直接剖面法获取植物地上部分和根系样品. 同时采用 Eijkelpamp 土壤取样器取柱状土壤样品, 该取样器为一半圆凿钻, 取得的土壤柱状样直径为 6 cm. 由于该地区滩涂围垦频繁, 湿地植物生长年限较短, 根系主要分布在 0~50 cm 土层, 因此每个土壤样点取样深度为 50 cm. 将柱状土壤样品按 0~5、5~10、10~20、20~30 和 30~50 cm 进行分层, 同一样方内同层样品均匀混合为一个样, 每种湿地类型获取 3 个重复样品.

植物样品烘干后测定干物质含量, 然后磨碎过筛. 土壤样品去除根系和石砾后, 阴凉处风干、研磨、过筛. 采用重铬酸钾容量法测定土壤和植物有机碳含量, 半微量开氏法测土壤全氮含量, 土壤 pH 值和电导率分别用 pH 计和电导率仪测定^[12].

采用 SPSS 13.0 软件进行 Pearson 相关性分析和单因素方差分析 (LSD 法进行多重比较).

2 结果与分析

2.1 潮滩湿地不同植被类型土壤有机碳含量

潮滩湿地 4 种植被类型土壤表层有机碳含量在 4.41~8.58 g·kg⁻¹, 平均值 6.45±1.70 g·kg⁻¹, 变幅较大 (图 2). 潮滩植被对土壤有机碳含量有显著影响, 各植被内表层土壤有机碳均显著高于无植被分布的光滩 (4.47±0.09 g·kg⁻¹). 不同植被下土壤有机碳存在显著差异, 表层有机碳含量由高到低依次为: 芦苇 (8.56±0.04 g·kg⁻¹) > 互花米草 (7.31±0.08 g·kg⁻¹) > 海三棱藨草 (5.48±0.29 g·kg⁻¹).

各植被带土壤剖面有机碳含量均高于光滩, 且有机碳含量在垂向上均表现为由表向下逐渐降低的趋势, 但不同潮滩植被对土壤有机碳剖面分布的影

响有明显差异 (图 2). 芦苇样地的有机碳含量在 10~30 cm 深度出现一个峰值 (9.34 g·kg⁻¹), 甚至高于表层土壤有机碳含量 (8.56 g·kg⁻¹). 由于研究区围垦频繁, 自然湿地芦苇生长年限较短, 所以芦苇根系主要集中在 10~30 cm 深度, 使该土层的有机碳含量较高; 30~50 cm 深度有机碳含量开始下降 (6.99 g·kg⁻¹), 且低于表土层. 尽管互花米草根生长也很发达, 但土壤剖面有机碳变化趋势与芦苇不同. 互花米草植被下土壤有机碳主要积累于 0~20 cm 土层, 且随土壤剖面加深有机碳含量下降较快, 0~5 cm 土层有机碳含量是 30~50 cm 土层的 1.5 倍, 这可能与该区域互花米草生长年限较短 (<3 a), 且互花米草为 C₄ 植物, 对深层土壤有机碳贡献较小有关^[13]. 同时, 互花米草根有机碳含量也低于芦苇根系 (表 2). 海三棱藨草根系生长较浅, 主要集中于 0~10 cm 土层, 因而 0~10 cm 土层有机碳含量略高于 10 cm 以下土层. 海三棱藨草作为高等植物的先锋种能在光滩上生长, 但其生物量比芦苇和互花米草小得多, 根系有机碳含量相对较低

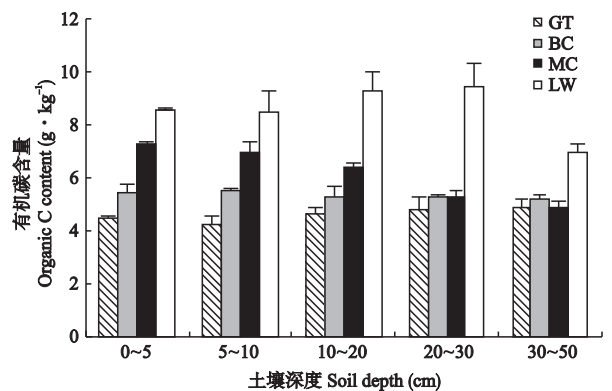


图 2 潮滩湿地土壤剖面有机碳含量

Fig. 2 Content of soil organic carbon in intertidal zones (mean ±SD).

GT: 光滩 Mudflat; BC: 海三棱藨草 *S. mariqueter*; MC: 互花米草 *S. alterniflora*; LW: 芦苇 *P. australis*. 下同 The same below.

表 2 潮滩植物有机碳含量

Table 2 Content of organic C of plants in intertidal zones (mean±SD, %)

样点 Sampling site	地上 Aboveground	根 Root
LW	45.6±1.6	40.5±0.9
MC	45.3±0.1	38.0±0.3
BC	41.2±1.5	37.8±4.7

(表 2), 同时, 海三棱藨草生长区域频繁受到潮水干扰等水动力条件影响, 因而限制了土壤固碳能力的提高, 不同土层之间有机碳含量差异也不显著. 光滩土壤剖面有机碳含量最小, 剖面有机碳含量变异系数(5%) 小于芦苇(11%) 和互花米草(17%), 与海三棱藨草较接近(3%). 这是由于潮滩湿地光滩表面的淤泥都是经过潮水冲刷而滞留下来, 有机碳含量较低.

2.2 不同围垦湿地土壤有机碳含量

围垦后表层土壤有机碳表现为: 20 世纪 60 年代围垦 [W_3 , (7.46±0.25) g·kg⁻¹] > 2003 年围垦 [W_1 , (5.12±0.16) g·kg⁻¹] > 20 世纪 80 年代围垦 [W_2 , (1.96±0.46) g·kg⁻¹]. 从剖面来看, 土壤有机碳表现为随深度增加而下降的趋势(图 3). 不同围垦年代土壤有机碳在表层的变异系数较大, 而随深度增加, 变异系数降低.

围垦利用能够直接影响湿地生态系统的碳循环过程, 且围垦利用对生态系统表层土壤的影响比深层土壤的影响大得多^[14]. 对比未围垦潮滩湿地芦苇(LW)、互花米草(MC)、海三棱藨草(BC)、光滩(GT)表层土壤有机碳和不同围垦年代土壤有机碳

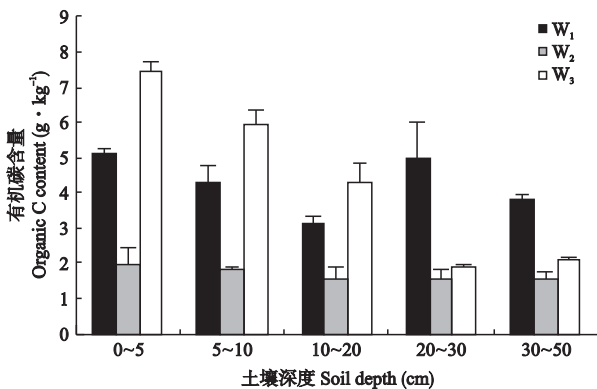


图 3 不同围垦年代土壤有机碳含量

Fig. 3 Soil organic carbon of different reclamation years (mean±SD).

W_1 : 2003 年围垦 Reclaimed in 2003; W_2 : 20 世纪 80 年代围垦 Reclaimed in the 1980s; W_3 : 20 世纪 60 年代围垦 Reclaimed in the 1960s. 下同 The same below.

含量变化(图 4). 20 世纪 60 年代围垦土壤有机碳含量显著高于光滩和海三棱藨草土壤($P<0.05$), 略高于互花米草土壤, 但低于芦苇土壤($P<0.05$); 20 世纪 80 年代围垦土壤有机碳比 4 种自然潮滩湿地都低($P<0.05$); 2003 年围垦土壤高于光滩土壤, 但低于其他 3 种自然植被($P<0.05$). 从整体趋势来看, 围垦初期, 5~30 a 间, 土壤有机碳含量呈下降趋势. 但围垦时间达到一定年限后, 土壤有机碳含量开始上升.

2.3 湿地土壤有机碳、全氮、pH 值、含盐量及碳氮比的关系

对湿地土壤 pH、含盐量、有机碳、总氮和碳氮比(C/N)的相关性检验表明(表 3), 潮滩湿地和围垦湿地中土壤 pH 与含盐量、有机碳和总氮之间都表现为显著负相关. 土壤 pH 通过影响微生物的活动而影响着土壤对碳氮的固定和累积能力, 它是影响土壤有机碳和全氮空间分布的环境因子之一. 由于杭州湾湿地新形成的光滩为滩涂盐土, 含盐量较高, pH 值较大, 随着海三棱藨草和芦苇等植被的生长演替, 土壤环境得到改善, 含盐量和 pH 逐渐降低, 而有机碳含量则逐渐增加, 因而土壤 pH 对有机碳具有一定的影响.

自然湿地和围垦湿地土壤有机碳与总氮之间的相关性都极显著, 表明在土壤中氮主要是以有机氮的形态存在. 土壤中碳与氮的相关关系是通过微生物连接起来的. 土壤微生物的活性对于土壤有机碳分解非常重要, 而土壤 C/N 的高低对土壤微生物的活动能力有一定的促进或限制作用^[7]. 研究区自然湿地芦苇 C/N 为 11.57±1.45、互花米草为 11.75±1.85、海三棱藨草为 11.15±1.62、光滩为 11.88±0.85. 自然湿地土壤有机碳与 C/N 之间的相关性不明显, 而围垦湿地则具有显著正相关性, 围垦湿地

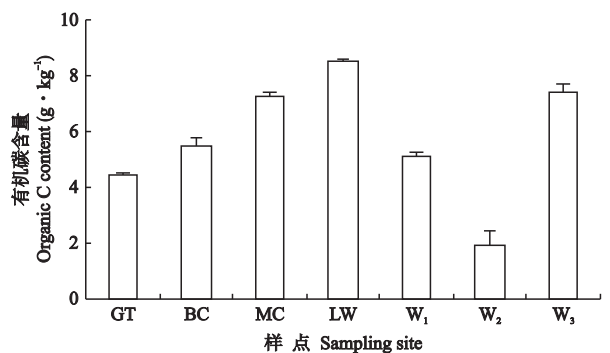


图 4 围垦前后土壤有机碳含量

Fig. 4 Soil organic carbon before and after reclamation (mean±SD).

表 3 湿地土壤有机碳、全氮、pH 值、含盐量和碳氮比的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of organic C, total N, pH, salinity and C/N in soils of wetlands

	pH		含盐量 Salinity		有机碳 Organic C		总氮 Total N		碳氮比 C/N	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
pH	1	1								
含盐量 Salinity	-0.373 *	-0.413 *	1	1						
有机碳 Organic C	-0.750 **	-0.445 *	0.170	0.224	1	1				
总氮 Total N	-0.722 **	-0.432	0.077	0.227	0.925 **	0.967 **	1	1		
碳/氮 C/N	-0.064	-0.486 *	0.187	0.266	0.192	0.819 **	-0.180	0.681 **	1	1

A: 潮滩湿地 Intertidal zones; B: 围垦湿地 Reclaimed wetlands. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

C/N 随有机碳含量的降低而降低,说明围垦利用造成湿地土壤有机碳的损失,并对湿地土壤碳氮比产生影响。

3 讨 论

3.1 不同植被类型对湿地土壤有机碳含量的影响

土壤有机碳含量在较大区域尺度上的变异受气候、成土母质和水文条件等影响较大,而在小区域范围内,在气候和母质基本一致条件下,主要受植被类型的影响。植被主要影响土壤有机碳的输入量和输入有机碳的质量^[4]。本研究表明,不同植被类型下土壤有机碳含量的分布趋势与植物地上茎叶和地下根系有机碳含量的分布趋势相近。表层土壤有机碳的重要来源是大量的地表枯落物^[15]。对于滨海湿地,土壤有机碳可以有本地植物(陆源)及浮游和底栖生物等(海源)两种来源。通常,陆源和海源有机质的 C/N 分别是 >12 和 $6 \sim 9$ ^[10,16]。毛志刚等^[16]对盐城滨海湿地的研究表明,表层土壤 C/N 的变化格局基本可反映海源和陆源物质由海向陆沿程分配的变化,即光滩以海源为主,互花米草和芦苇滩等都以陆源为主。高建华等^[10]借助常规分析和 C、N 稳定同位素对该地区不同生态带土壤有机碳来源的辨析也得到了类似结果。然而,本调查结果显示,不同类型下土壤 C/N 都在 11 左右,反映出土壤有机碳的陆源和海源的混合来源,这可能同该地区围垦活动剧烈,潮滩各植被发育时间较短有关。前期研究也表明,光滩、海三棱藨草、互花米草和芦苇群落是杭州湾滨海湿地演替前期的动态和方向^[11]。

土壤有机碳在剖面上的垂直分布也受植被类型影响,这是因为不同植物的根系分布格局不同,且植物根系中大量死根的腐解归还,为土壤提供了丰富的碳源^[17],从而影响剖面有机碳的分布。通常而言,表层土壤有机碳含量较丰富,而过渡层以下,植物根系分布较少,有机碳含量开始明显降低。刘景双等^[18]对三江平原沼泽湿地的研究表明,湿地土壤过

渡层一般在 30 cm 左右,再往下植物根系难以深入,分布较少,根系的周转量急剧下降,使该层土壤有机碳含量开始明显降低。对盐城滨海湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征影响的研究也表明^[16],各植被带土壤有机碳和全氮的分布均呈自表向下逐渐降低的趋势,15 cm 以下其含量基本保持稳定。本研究结果较之类似,除芦苇湿地外,不同类型土壤剖面有机碳含量在 30 cm 以下趋于一致。

植被是生态演替过程中的重要生物因子^[19],但生态演替不仅包括生态系统内植被等生物群落的变化过程,还包括非生物组分(如地形、流域、沉积和营养盐等)在群落演替过程中的变化^[20]。对陆地森林的原生演替^[21]、次生演替^[22]以及湿地植被自然演替过程^[8]的研究都发现,植被的固碳能力随着植物群落演替而逐步增强。本研究对杭州湾滨海湿地的调查结果表明,从海三棱藨草演替到芦苇群落的过程中,在植物群落发生变化的同时,土壤有机碳含量也逐渐增加,表明土壤固碳能力随植被演替而逐步增强。

在湿地植被的自然演替过程中,外来种的入侵可能引起原有生态系统的退化,被认为是滨海湿地所面临的五大威胁之一^[23]。目前,评价外来植物入侵对于生态系统影响的研究多集中在地上部分^[24],对于生态系统地下部分以及土壤质量和功能的变化研究相对较少。已有研究表明,外来植物入侵对生态系统地下碳循环和碳库产生影响,但由于入侵植物种类较多以及研究地点环境条件的不同,关于外来植物入侵对于土壤碳库和土壤有机碳矿化影响的研究结论并不统一^[24]。如法国西部海湾披碱草入侵对于盐沼湿地土壤全碳含量无显著性影响^[25]。美国新泽西州海岸狐米草(*Spartina patens*)沼泽的入侵种为芦苇,虽然两者生物量不同,但土壤有机碳含量无显著差异^[26]。而 Cheng 等^[13]对比入侵长江河口九段沙湿地自然保护区 7 a 的 C_4 植物互花米草群落土壤碳库和已有 30 a 的 C_3 本地植物海三棱藨草群

落土壤碳库, 结果为互花米草群落下的土壤比海三棱藨草下土壤中的全碳、土壤有机碳含量更高, 土壤无机碳含量无显著差别. 研究表明, 互花米草植被下土壤有机碳含量高于海三棱藨草, 但低于芦苇植被. 由于互花米草相对潮间带土著植物芦苇具有更强的竞争优势和更广的生态幅^[27], 因而其在杭州湾滨海湿地的大量入侵和扩散将有可能降低自然湿地生态系统土壤的储碳功能.

3.2 人为围垦活动对湿地土壤有机碳含量的影响

杭州湾南岸滨海湿地是我国的重要湿地, 然而, 由于人多地少、经济发展等需要, 该地区滩涂围垦规模越来越大, 滨海湿地有机碳含量受到人为活动直接或间接的影响也越来越大. 土壤有机碳含量主要取决于有机物的输入量和输出量, 围垦后农业湿地土壤有机碳除人工施肥外, 主要源于土壤原有机物的矿化和动植物残体的分解, 有机碳的输出量则主要包括分解和侵蚀损失^[28]. 而围垦引起的土壤水分、颗粒组成的变化、耕作、土地利用及利用历史将对湿地土壤有机碳的输入和输出产生影响, 从而影响湿地土壤有机碳含量和分布. 首先, 围垦耕地时, 机械作用使土壤破碎、分散和混合, 直接或间接地造成土壤有机碳含量下降^[29]. 一般认为, 耕作使土壤团聚体破碎, 从而导致土壤有机质的物理保护层的破坏, 表层土壤有机质充分暴露在空气中. 耕作的机械扰动还会导致土壤呼吸作用的增强, 促进了土壤有机碳的分解作用^[30]. 耕作措施也使下层土壤不断翻至表层造成稀释. 其次, 围垦造成湿地干湿交替环境的改变. 随着湿地的围垦, 其地势抬升, 地下水位逐步下降, 土壤通气条件改善, 有机质分解加快, 含量逐步降低. 再次, 围垦造成土壤温度的增高及氧化-还原条件的改变, 促进了土壤有机质的分解和土壤呼吸通量的增大^[6]. 此外, 不同土地利用方式对湿地土壤环境均产生影响, 如耕作导致湿地土壤有机质分解加快; 围垦农田的收割, 使土壤有机质来源较少, 间接影响了土壤碳含量. 研究表明, 湿地转化为农田、森林和城市, 都造成碳的大量释放; 而湿地恢复和重建的碳积累速率远低于湿地转化碳损失的速率^[5]. 因此, 本研究区在围垦初期(2003 年围垦和 20 世纪 80 年代围垦), 由于耕作、水位和土地利用变化等原因, 土壤有机碳表现为下降的趋势, 而围垦后期(20 世纪 60 年代围垦), 可能由于土壤有机碳除了自然的植物残体归还外, 还有人为有机肥源的输入, 土壤熟化程度越来越高, 有机碳输入量大于输出量, 使表层土壤有机碳含量提高, 而深层土壤有机

碳含量仍维持降低的水平. 迟光宇等^[7]对三江平原不同开垦年限的水田及旱地研究表明, 开垦初期土壤有机 C 发生损失, 随着开垦历史的增加, 则趋于平缓甚至增加.

4 结 论

杭州湾自然潮滩湿地土壤表层有机碳含量在 $4.41 \sim 8.58 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值 $6.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 潮滩植被对土壤表层有机碳含量有显著影响, 表现为芦苇 ($8.56 \pm 0.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 互花米草 ($7.31 \pm 0.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 海三棱藨草 ($5.48 \pm 0.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 光滩 ($4.47 \pm 0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 说明不同类型土壤的固碳能力随着植物群落演替而逐步增强, 而互花米草作为外来入侵种, 对潮间带土著植物芦苇具有更强的竞争优势和更广的生态幅, 因而其在杭州湾滨海湿地的大量入侵和扩散将有可能降低自然湿地生态系统土壤的储碳功能.

人为围垦利用能够直接影响湿地生态系统的碳循环过程, 对土壤有机碳的影响表现为: 20 世纪 60 年代围垦 ($7.46 \pm 0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 2003 年围垦 ($5.12 \pm 0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) > 20 世纪 80 年代围垦 ($1.96 \pm 0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). 围垦引起的土壤水分、颗粒组成的变化、耕作、土地利用及利用历史是影响湿地土壤有机碳分布的主要原因.

研究区自然潮滩湿地和围垦湿地有机碳在垂直剖面上均表现为由表向下逐渐降低的趋势. 相关分析表明, 杭州湾潮滩湿地和围垦湿地中土壤 pH 与含盐量、有机碳、总氮之间都呈显著负相关, 土壤有机碳与总氮呈显著正相关, 表明在土壤中氮主要以有机氮的形态存在. 自然湿地有机碳与碳氮比相关性不明显, 而围垦湿地具有显著正相关性, 说明围垦利用对湿地土壤碳氮比产生了一定影响.

参考文献

- [1] Franzen LG. The earth afford to lose the wetlands in the battle against the increasing greenhouse effect. International Peat Society Proceedings of International Peat Congress, Uppsala, 1992: 1-18
- [2] Inubushi K, Furukawa Y, Hadi A, et al. Seasonal changes of CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes in relation to land-use change in tropical peatlands located in coastal area of South Kalimantan. *Chemosphere*, 2003, **52**: 603-608
- [3] Mitsch WJ. Wetlands. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1986
- [4] Zhou L (周 莉), Li B-G (李保国), Zhou G-S (周广胜). Advances in controlling factors of soil organic carbon. *Advances in Earth Science* (地球科学进展),

- 2005, **20**(1): 99–105 (in Chinese)
- [5] Liu Z-G (刘子刚). Carbon stock and GHG emission of wetland ecosystem. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2004, **24**(5): 634–639 (in Chinese)
- [6] Song C-C (宋长春), Wang Y-Y (王毅勇), Yan B-X (阎百兴), *et al.* The changes of the soil hydrothermal condition and the dynamics of C, N after the mire tillage. *Environmental Science* (环境科学), 2004, **25**(3): 150–154 (in Chinese)
- [7] Chi G-Y (迟光宇), Wang J (王俊), Chen X (陈欣), *et al.* Dynamic changes of soil organic carbon (SOC) of different land use types in Sanjiang Plain. *Soils* (土壤), 2006, **38**(6): 755–761 (in Chinese)
- [8] Wang H-L (王红丽), Xiao C-L (肖春玲), Li C-J (李朝君), *et al.* Spatial variability of organic carbon in the soil of wetlands in Chongming Dongtan and its influential factors. *Journal of Agro-Environment Science* (农业环境科学学报), 2009, **28**(7): 1522–1528 (in Chinese)
- [9] Zeng C-S (曾从盛), Zhong C-Q (钟春棋), Tong C (全川), *et al.* Impacts of LUCC on soil organic contents in wetland of Mingjiang River Estuary. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(5): 125–129 (in Chinese)
- [10] Gao J-H (高建华), Yang G-S (杨桂山), Ou W-X (欧维新). Analyzing and quantitatively evaluating the organic matter source at different ecologic zones of tidal salt marsh, North Jiangsu Province. *Environmental Science* (环境科学), 2005, **26**(6): 51–56 (in Chinese)
- [11] Wu T-G (吴统贵), Wu M (吴明), Xiao J-H (萧江华). Dynamics of community succession and species diversity of vegetations in beach wetlands of Hangzhou Bay. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(8): 1284–1289 (in Chinese)
- [12] Lu R-K (鲁如坤). Analytical Methods for Soil Agrochemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [13] Cheng XL, Luo YQ, Chen JQ, *et al.* Short-term C₄ plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C₃ plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine Island. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, **38**: 3380–3386
- [14] Jiang C-S (江长胜), Wang Y-S (王跃思), Hao Q-J (郝庆菊), *et al.* Effects of land use change on carbon contents of marsh soil in the Sanjiang Plain. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2009, **23**(5): 248–252 (in Chinese)
- [15] Lü G-H (吕国红), Zhou L (周莉), Zhao X-L (赵先丽), *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon and total nitrogen in reed wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(3): 384–389 (in Chinese)
- [16] Mao Z-G (毛志刚), Wang G-X (王国祥), Liu J-E (刘金娥), *et al.* Influence of salt marsh vegetation on spatial distribution of soil carbon and nitrogen in Yancheng coastal wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(2): 293–297 (in Chinese)
- [17] Jobbagy EG, Jackson RB. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2002, **10**: 423–436
- [18] Liu J-S (刘景双), Yang J-S (杨继松), Yu J-B (于君宝), *et al.* Study on vertical distribution of soil organic carbon in wetlands Sanjiang Plain. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2003, **17**(3): 5–8 (in Chinese)
- [19] Bertness MD, Leonard GH. The role of positive interactions in communities: Lessons from intertidal habitats. *Ecology*, 1997, **78**: 1976–1989
- [20] Mei X-Y (梅雪英), Zhang X-F (张修峰). Carbon storage and carbon fixation during the succession of natural vegetation in wetland ecosystem on east beach of Chongming Island. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(4): 933–936 (in Chinese)
- [21] De Kovel CGF, Van Mierlo AJEM, Wilms YJO, *et al.* Carbon and nitrogen in soil and vegetation at sites differing in successional age. *Plant Ecology*, 2000, **149**: 43–45
- [22] Yang H-X (杨洪晓), Wu B (吴波), Zhang J-T (张金屯), *et al.* Progress of research into carbon fixation and storage of forest ecosystems. *Journal of Beijing Normal University* (北京师范大学学报), 2005, **41**(2): 172–177 (in Chinese)
- [23] Jackson JBC, Kirby MX, Berger WH, *et al.* Historical over fishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science*, 2001, **293**: 629–637
- [24] Yan Z-P (闫宗平), Tong C (全川). Impacts of exotic plant invasions on terrestrial ecosystem belowground carbon cycling and carbon pool. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(9): 4440–4448 (in Chinese)
- [25] Valery L, Bouchard V, Lefeuvre JC. Impact of the invasive native species *Elymus athericus* on carbon pools in a salt marsh. *Wetlands*, 2004, **24**: 268–276
- [26] Windham L, Lathrop RG. Effects of *Phragmites australis* (common reed) invasion on aboveground biomass and soil properties in brackish tidal marsh of the Mullica River, New Jersey. *Estuaries*, 1999, **22**: 927–935
- [27] Callaway JC, Josselyn MN. The introduction and spread of smooth cordgrass (*Spartina alterniflora*) in south San Francisco Bay. *Estuaries*, 1992, **15**: 218–226
- [28] Xiong H-F (熊汉锋), Liao Q-Z (廖勤周), Wu Q-F (吴庆丰), *et al.* Distribution on soil nutrients and correlation analysis in Lake Liangzi Wetlands, Hubei Province. *Journal of Lake Sciences* (湖泊科学), 2005, **17**(1): 93–96 (in Chinese)
- [29] Roberts WP, Chan KY. Tillage induced increases in carbon dioxide loss from soil. *Soil and Tillage Research*, 1990, **17**: 143–151
- [30] Rovira AD, Greacen EL. The effect of aggregate disruption on the activity of microorganisms in the soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1957, **8**: 659–673

作者简介 邵学新,男,1980年生,助理研究员.主要从事湿地生态学研究,发表论文8篇. E-mail: shaouxixin@126.com

责任编辑 肖红