

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2014.0772

张天雨, 葛振鸣, 张利权, 等. 2015. 崇明东滩湿地植被类型和沉积特征对土壤碳、氮分布的影响[J]. 环境科学学报, 35(3): 836-843

Zhang T Y., Ge Z M., Zhang L Q., et al. 2015. Influence of saltmarsh vegetation and sedimentation on the distribution of soil carbon and nitrogen in the Chongming Dongtan wetlands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 35(3): 836-843

## 崇明东滩湿地植被类型和沉积特征对土壤碳、氮分布的影响

张天雨, 葛振鸣, 张利权\*, 陈怀璞, 严格

华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062

收稿日期: 2014-05-06 修回日期: 2014-06-04 录用日期: 2014-06-04

**摘要:** 滨海湿地碳、氮储量的分布可能受盐沼植被和外源沉积物的综合影响。本文以长江口典型滨海湿地为研究对象, 分别在崇明东滩湿地北部、中部和南部设置 3 条样线, 根据外源沉积物的区域特征研究了 3 种主要盐沼植被 (芦苇 (*Phragmites australis*)、互花米草 (*Spartina alterniflora*)、海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*)) 和土壤中的有机碳 (TOC)、总氮 (TN) 的季节变化及空间特征。结果显示, 崇明东滩湿地北、中部为淤积型滩涂, 南部呈侵蚀态势。盐沼植被中芦苇和互花米草生物量 TOC、TN 累积量均显著高于海三棱藨草带。北、中样线的相同植被类型中的土壤 TOC、TN 显著高于南样线。高潮滩的芦苇带土壤 TOC 储量高于中潮滩的互花米草带, 而互花米草带土壤 TN 储量略高于芦苇带, 海三棱藨草带和光滩土壤 TOC、TN 储量最低。盐沼植被类型显著影响土壤各层次 TOC 和 TN 储量的分布, 其中, 0~10 cm 层次储量受植被类型和表层外源沉积物空间特征的交互作用影响。

**关键词:** 滨海湿地; 盐沼植被; 沉积物; 土壤有机碳; 总氮

文章编号: 0253-2468(2015)03-836-08 中图分类号: X53 文献标识码: A

## Influence of saltmarsh vegetation and sedimentation on the distribution of soil carbon and nitrogen in the Chongming Dongtan wetlands

ZHANG Tianyu, GE Zhenming, ZHANG Liqun\*, CHEN Huaipu, YAN Ge

State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062

Received 6 May 2014; received in revised form 4 June 2014; accepted 4 June 2014

**Abstract:** The distribution of carbon and nitrogen storage in coastal wetlands is hypothesized to be regulated by saltmarsh vegetation and sedimentation. In this study, the spatio-temporal changes of TOC and TN accumulation in the vegetation and soil were investigated for the three dominant saltmarsh vegetation (*Phragmites australis*, *Spartina alterniflora*, *Scirpus mariqueter*) along three sampling transects located in the northern, central and southern parts of the coastal wetlands of Chongming Dongtan in the Yangtze River Estuary. The results showed that the northern and central parts of the study area showed a sediment accretion, while the southern part showed an erosion. The TOC and TN accumulation in the zones of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* was significantly higher than that of *Scirpus mariqueter*. The soil TOC and TN storage in the northern and central transects was significantly higher than that of the same vegetation types in the southern transect. The soil TOC storage of *Phragmites australis* in the higher intertidal zone was higher than that of *Spartina alterniflora* in the middle intertidal zone. While the soil TN storage in *Spartina alterniflora* zone was marginally higher than that of *Phragmites australis* zone. The soil TOC and TN storage in the zones of *Scirpus mariqueter* and mudflat was the lowest. The spatio-temporal changes of TOC and TN storage in soil profiles were affected by the interactions between saltmarsh vegetation types and sedimentation, especially in the 0~10 cm soil profile.

**Keywords:** coastal wetlands; saltmarsh vegetation; sedimentation; soil organic carbon; total nitrogen

**基金项目:** 全球变化研究国家重大科学研究计划 (No.2010CB951204); 国家自然科学基金 (No.41201091); 上海市科委“浦江人才”计划 (No.13PJ1402200); 上海市科委国际合作项目 (No.12230707500)

**Supported by** the Global Change Scientific Research Program of China (No.2010CB951204), the National Natural Science Foundation of China (No.41201091), the Pujiang Program of Shanghai Science & Technology Committee (No.13PJ1402200) and the International Cooperation Project of Shanghai Science & Technology Committee (No.12230707500)

**作者简介:** 张天雨 (1984—), 男, E-mail: 109929378@163.com; \* 通讯作者 (责任作者), E-mail: lqzhang@sklec.ecnu.edu.cn

**Biography:** ZHANG Tianyu (1984—), male, E-mail: 109929378@163.com; \* **Corresponding author**, E-mail: lqzhang@sklec.ecnu.edu.cn

## 1 引言 (Introduction)

滨海湿地作为陆地生态系统和海洋生态系统间的交互地带,在地貌特征、水动力过程和盐沼植被分布等方面有着独特的空间与时间变化 (Dussaillant *et al.*, 2009). 在滨海湿地物理、化学和生物过程的作用下,大量陆、海源有机质在生态系统内部积累 (刘敏等, 2004); 而且滨海湿地植被一般具有很高的初级生产力,其单位面积生产力可达热带森林的 3 倍,这对湿地土壤碳 (C)、氮 (N) 储存量的增加有较高的贡献率 (Jordan *et al.*, 2011). 研究表明,滨海湿地在物理、化学和生物过程的综合作用下,可成为高效的 C、N 汇聚地 (毛志刚等, 2009). 在气候变化背景下,滨海湿地生态系统 C、N 累积过程及其时空格局变化受到了越来越多的关注 (Mitsch *et al.*, 2013).

滨海湿地植物生长过程中生物量的变化会影响湿地土壤的 C、N 时空分布 (梅雪英等, 2007; 严格等, 2014), 盐沼植被生长区与光滩相比土壤 C、N 在水平和垂向分布上的积累均有增加,且土壤碳储量的增加与植物生物量间有着显著的线性关系 (严格等, 2014). 此外,由于受到潮汐的作用,上游泥沙会在滨海湿地发生沉积物的堆叠,这部分外源沉积物也会影响到湿地土壤的 C、N 含量变化 (Anderson *et al.*, 2006; Zhou *et al.*, 2007; Ouyang *et al.*, 2013; 陈庆强等, 2012). 有研究在对南北半球 158 个盐沼湿地调查综合的基础上提出,沉积物 C 的年增加量为  $242.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  (Ouyang *et al.*, 2013). 长江口的相关研究显示,由高潮滩到低潮滩表层沉积物的总有机碳 (TOC) 和总氮 (TN) 变化范围分别在  $0.1\% \sim 0.7\%$  和  $0.014\% \sim 0.078\%$  之间 (Zhou *et al.*, 2007). 但总体而言,涉及盐沼植被类型和外源沉积物对湿地土壤 C、N 时空分布综合影响方面的研究较少.

因此,本文以长江口典型滨海湿地-崇明东滩湿地作为研究对象,通过对湿地外源沉积物区域特征 (沉积区和冲刷区),以及 3 种主要盐沼植被类型 (芦苇、互花米草和海三棱藨草) 的 C、N 累积季节变化和空间特征研究,分析盐沼植被类型与外源沉积物对滨海湿地土壤 C、N 时空分布格局形成的影响. 以期研究气候变化影响下滨海湿地 C、N “源-汇”过程的响应提供数据支撑.

## 2 材料与方法 (Materials and methods)

### 2.1 研究区概况

崇明东滩湿地 ( $31^{\circ}25' \sim 31^{\circ}38' \text{N}$ ,  $121^{\circ}50' \sim 122^{\circ}05' \text{E}$ ) 位于崇明岛最东端 (图 1), 是长江口区域最大、地貌单元最为完善的河口型潮汐滩涂湿地之一,已被列入“拉姆萨国际湿地保护公约”国际重要湿地名录 (黄华梅等, 2007). 崇明东滩湿地受到长江径流携带的陆源物质沉积作用明显,地势平缓,坡度  $0.02\% \sim 0.05\%$ ,土壤盐度  $0.3\% \sim 0.6\%$ . 潮汐属非正规半日浅海潮,平均潮差为  $2.43 \sim 3.08 \text{ m}$ . 气候属于北亚热带海洋气候,年均气温在  $15 \sim 16^{\circ} \text{C}$  之间,降水丰富,多集中在 6—10 月 (葛振鸣等, 2010). 湿地内主要盐沼植被为芦苇 (*Phragmites australis*)、互花米草 (*Spartina alterniflora*) 和海三棱藨草 (*Scirpus mariqueter*) 群落,沿大堤向海方向,高潮滩主要分布芦苇与互花米草群落,中潮滩主要分布互花米草与海三棱藨草群落,低潮滩为海三棱藨草群落,光滩分布有硅藻等藻类 (葛振鸣等, 2008).

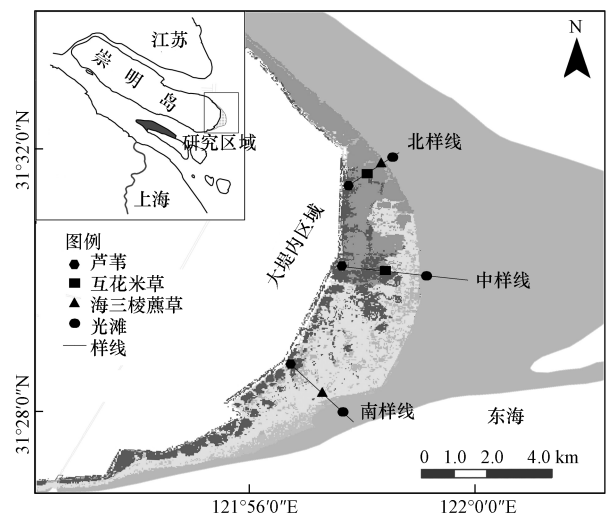


图 1 研究区域及盐沼植被类型分布和样线 (采样点) 位置

Fig. 1 Sketch map of the study area, saltmarsh vegetation distribution and location of sampling transects

### 2.2 采样点设置与样品采集

研究区域盐沼植被、土壤和外源沉积物的野外采样时间为 2012 年春季 (3 月)、夏季 (6 月)、秋季 (9 月) 和冬季 (12 月). 在崇明东滩湿地设立北、中、南 3 条样线 (图 1), 从大堤向海沿高潮带 (高程  $>2.9 \text{ m}$ )、中潮带 (高程  $2.2 \sim 2.9 \text{ m}$ )、低潮带 (高程  $<2.2 \text{ m}$ ) 设置采样点. 北样线依次为芦苇、互花米草、海三棱藨草群落和光滩采样点, 中样线为芦苇、互花米

草群落和光滩采样点,南样线为芦苇、海三棱藨草群落和光滩采样点.

在每个样点按 5 m 间隔设置 3 排方形木桩,每排设立木桩 3 根,间隔同为 5 m,木桩长度为 1.5 m,垂直打入土壤上露 35 cm 左右,每次采集样品时,测量方形木桩 4 个水平方向上的垂直高度,记录其变化以分析各采样期间每个样点的表层沉积物淤积和冲刷情况变化.

每次采样在植物采样点随机设置 3 个 1 m×1 m 的样方,样方间距大于 5 m,记录植物密度和株高等指标,并齐地收割样方内的植物活体.植物根系和土壤采集利用柱状采泥器(直径 5 cm)按梅花采样法(50 cm 深度)采取 5 个柱样,现场按 0~10 cm、10~30 cm、30~50 cm 切分合并装入自封袋,表层外源沉积物按照采样期间的冲淤高度变化采集装入自封袋,两部分土壤样品放于 0~4 °C 冷藏盒带回实验室处理.另利用容积为 50 cm<sup>3</sup> 的环刀采集不同层次根系土壤,重复 3 次,烘干处理后测定各层次土壤容重.

### 2.3 实验室分析方法

实验室环境下将外源沉积物和土壤样品风干,用木锤对样品进行碎化处理,分离样品中的植物根系,去除石块、昆虫等杂物;混匀后取其中 1 kg 样品过 2 mm 筛,取其中 10~20 g 样品用研钵细磨过 100 目筛,再取其中 0.5 g 样品放入 10 mL 离心管,加入 10% 稀盐酸进行 24 h 酸化处理,去除其中的无机碳成分;用 Mill-Q 水冲洗至中性,置于 60 °C 烘箱中烘至恒重,利用 CHN 元素分析仪测定处理样品中的 TOC 和 TN 含量(分析精度在 5% 以内).

植物样品(根、茎、叶)用自来水冲洗多遍至水清澈后,再用蒸馏水冲洗 3 遍,把植物组织碎化处理放入牛皮纸包装中在烘箱内(60 °C)烘干至恒重,测定干物质质量,用粉碎机碎末化,过 100 目筛,利用 CHN 元素分析仪测定处理样品中的 TOC 和 TN 总量.利用以下公式计算不同植被、土壤、外源沉积

物中的 TOC 和 TN 含量:

$$C_{P,TOC} = P_{P,TOC} \times B \quad (1)$$

$$C_{P,TN} = P_{P,TN} \times B \quad (2)$$

$$C_{S,TOC} = P_{S,TOC} \times V \times H \quad (3)$$

$$C_{S,TN} = P_{S,TN} \times V \times H \quad (4)$$

$$C_{E,TOC} = P_{S,TOC} \times V \times H \quad (5)$$

$$C_{E,TN} = P_{S,TN} \times V \times H \quad (6)$$

式中, $C_{P,TOC}$ 、 $C_{S,TOC}$ 、 $C_{E,TOC}$  分别为植物、土壤、外源沉积物中的 TOC 含量( $g \cdot m^{-2}$ ), $C_{P,TN}$ 、 $C_{S,TN}$ 、 $C_{E,TN}$  为相应的 TN 含量( $g \cdot m^{-2}$ ), $P_{P,TOC}$ 、 $P_{P,TN}$  分别为植物 TOC、TN 百分含量, $P_{S,TOC}$ 、 $P_{S,TN}$  分别为土壤 TOC、TN 百分含量, $B$  为植物生物量( $g \cdot m^{-2}$ ), $V$  为土壤容重( $g \cdot cm^{-3}$ ), $H$  为土壤厚度(m).

### 2.4 数据统计方法

将所获得的初始数据计算为平均值±标准差(SD),并利用 SPSS 18.0 软件进行统计分析.采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异(LSD)对植被、表层外源沉积物和土壤 TOC、TN 的种间/样线间差异进行显著性检验(显著性水平为  $p < 0.05$ ),并采用线性模式变量分析检验植被类型和沉积物特征对土壤 TOC、TN 储量的单因子和交互作用显著性(显著性水平为  $p < 0.05$ ).

## 3 结果(Results)

### 3.1 外源沉积物的时空格局特征与植被群落土壤容重

崇明东滩湿地外来沉积物总体表现出冬春季侵蚀(负值)和夏秋季淤涨(正值)的特征(表 1).北样线和中样线的外来沉积物年淤积量显著高于南样线.北样线光滩、海三棱藨草和互花米草区域年淤涨量最大,中样线光滩和互花米草区域淤涨量最大;南样线光滩和海三棱藨草区域侵蚀率高于淤积率,全年水平上表现为沉积物积累负增长态势,而芦苇区域则有少量淤积.

表 1 沿样线的外源沉积物动态和不同深度土壤容重

Table 1 Dynamics of sedimentation and soil bulk density with depth along the sampling transects

样线	植被类型	外来沉积物动态/cm					土壤容重/( $g \cdot cm^{-3}$ )		
		春季	夏季	秋季	冬季	总量	0~10 cm	10~30 cm	30~50 cm
北	芦苇	-1.7±2.0	7.7±3.7	5.7±1.7	-4.5±1.2	7.3±2.7 <sup>c</sup>	1.1±0.1 <sup>ab</sup>	1.2±0.2 <sup>ab</sup>	1.2±0.1 <sup>ab</sup>
	互花米草	-1.8±2.0	2.3±1.9	12.8±3.0	-1.5±0.7	11.8±2.5 <sup>b</sup>	0.9±0.1 <sup>b</sup>	1.1±0.2 <sup>ab</sup>	1.1±0.1 <sup>ab</sup>
	海三棱藨草	9.0±1.9	5.3±3.1	1.7±1.6	-6.0±0.7	10.0±2.2 <sup>b</sup>	0.9±0.1 <sup>b</sup>	0.9±0.03 <sup>b</sup>	0.8±0.1 <sup>b</sup>
	光滩	-5.6±1.9	13.6±1.7	11.6±2.1	-3.4±1.6	16.2±1.9 <sup>a</sup>	0.7±0.02 <sup>bc</sup>	0.9±0.2 <sup>b</sup>	1.1±0.2 <sup>ab</sup>

续表1

样线	植被类型	外来沉积物动态/cm					土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> )		
		春季	夏季	秋季	冬季	总量	0~10 cm	10~30 cm	30~50 cm
中	芦苇	-6.9±4.1	7.6±1.5	7.8±1.6	-2.0±4.6	6.5±1.6 <sup>cd</sup>	1.1±0.1 <sup>ab</sup>	1.1±0.1 <sup>ab</sup>	1.3±0.1 <sup>a</sup>
	互花米草	2.9±3.0	8.8±2.4	-1.2±3.2	-1.6±2.4	9.0±2.7 <sup>bc</sup>	1.2±0.1 <sup>ab</sup>	1.2±0.1 <sup>ab</sup>	1.2±0.2 <sup>ab</sup>
	光滩	3.0±2.7	8.6±2.4	-0.4±3.1	-3.7±1.9	7.5±2.5 <sup>e</sup>	1.1±0.1 <sup>ab</sup>	1.1±0.1 <sup>ab</sup>	1.3±0.2 <sup>a</sup>
南	芦苇	-1.1±1.8	3.3±3.0	0.3±2.1	-1.5±1.8	2.1±2.3 <sup>e</sup>	1.2±0.1 <sup>ab</sup>	1.4±0.1 <sup>a</sup>	1.3±0.1 <sup>a</sup>
	海三棱藨草	-4.9±1.4	2.9±2.3	3.9±2.5	-6.4±3.6	-4.5±2.4 <sup>f</sup>	1.3±0.1 <sup>a</sup>	1.4±0.1 <sup>a</sup>	1.4±0.03 <sup>a</sup>
	光滩	-4.9±1.5	6.5±2.3	-2.4±2.0	-5.4±1.5	-6.2±1.9 <sup>fe</sup>	1.4±0.2 <sup>a</sup>	1.4±0.04 <sup>a</sup>	1.4±0.1 <sup>a</sup>

注:不同字母表示差异显著( $p < 0.05$ ).

盐沼植被土壤和光滩土壤容重在空间上呈现由北向南增大的趋势.在垂向上,土壤容重均表现出相同的由表层向下增大的特征.北样线不同植被带的土壤容重在同层次间基本表现为芦苇>互花米草>海三棱藨草、光滩,而中、南样线植被带间土壤容重差异不显著.

### 3.2 不同盐沼植被的总有机碳、总氮分布

崇明东滩湿地盐沼植被均为一年生草本植物,2月底至3月开始生长,其植物生物量 TOC 累积量最低;夏季为快速生长期,植物生物量大幅增加;秋季进入结实期,其植物生物量 TOC 和 TN 累积量最大;9—10月地上部分开始枯萎,冬季植物地上部分逐

渐枯死,植物生物量 TOC 和 TN 累积量下降,直到生长周期结束(图2).各生长季节间生物量 TOC 累积差异显著,而 TN 累积差异不显著.

北、中样线芦苇生物量 TOC 秋季最大,分别为(2018.6±117.2) g·m<sup>-2</sup>和(1690±237.5) g·m<sup>-2</sup>,显著高于南样线的(1262.1±124.9) g·m<sup>-2</sup>,而不同样线间芦苇生物量 TN 差异不显著.北样线和中样线互花米草生物量 TOC 和 TN 累积差异不显著.北样线海三棱藨草生物量 TOC、TN 累积秋季最大,分别为(570.2±70.7) g·m<sup>-2</sup>和(11.6±6.4) g·m<sup>-2</sup>,显著高于南样线.综合3条样线,芦苇和互花米草生物量 TOC、TN 累积量均显著高于海三棱藨草带.

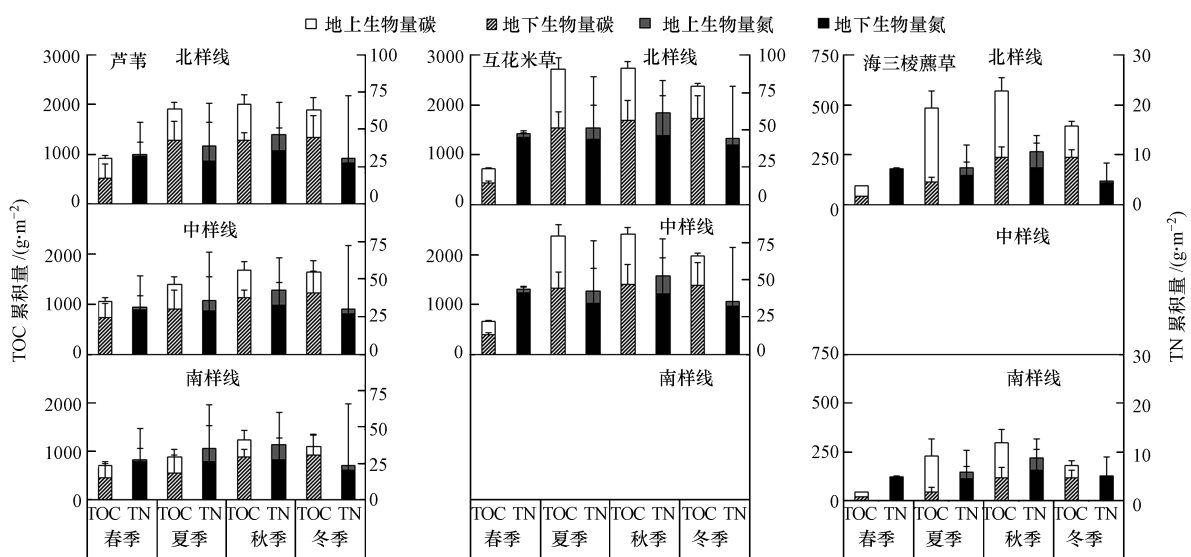


图2 沿样线的植物生物量总有机碳和总氮的季节累积

Fig.2 Seasonal accumulation of TOC and TN in plant biomass along the sampling transects

### 3.3 表层外源沉积物总有机碳、总氮的分布

如图3所示,北、中、南3条样线上的表层外源沉积物 TOC 和 TN 积累与沉积量成正比关系.北样线芦苇、互花米草、海三棱藨草和光滩采样点表层外源沉积物 TOC 年累积量依次为(1.4±0.5)、

(0.8±0.2)、(0.6±0.1)、(2.0±0.2) g·m<sup>-2</sup>,TN 年累积量依次为(0.2±0.1)、(0.20±0.04)、(0.10±0.03)、(0.20±0.02) g·m<sup>-2</sup>.中样线芦苇、互花米草和光滩采样点表层外源沉积物 TOC 年累积量依次为(1.9±0.5)、(2.2±0.7)、(0.9±0.3) g·m<sup>-2</sup>,TN 年累积量



依次为 $(0.30 \pm 0.06)$ 、 $(0.30 \pm 0.20)$ 、 $(0.20 \pm 0.07)$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ . 南样线芦苇采样点表层外源沉积物 TOC、TN 年累积量分别为 $(0.3 \pm 0.3)$   $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $(0.05 \pm 0.03)$

$\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而海三棱藨草与光滩外来沉积物 TOC、TN 年累积量均表现为零增长状态.

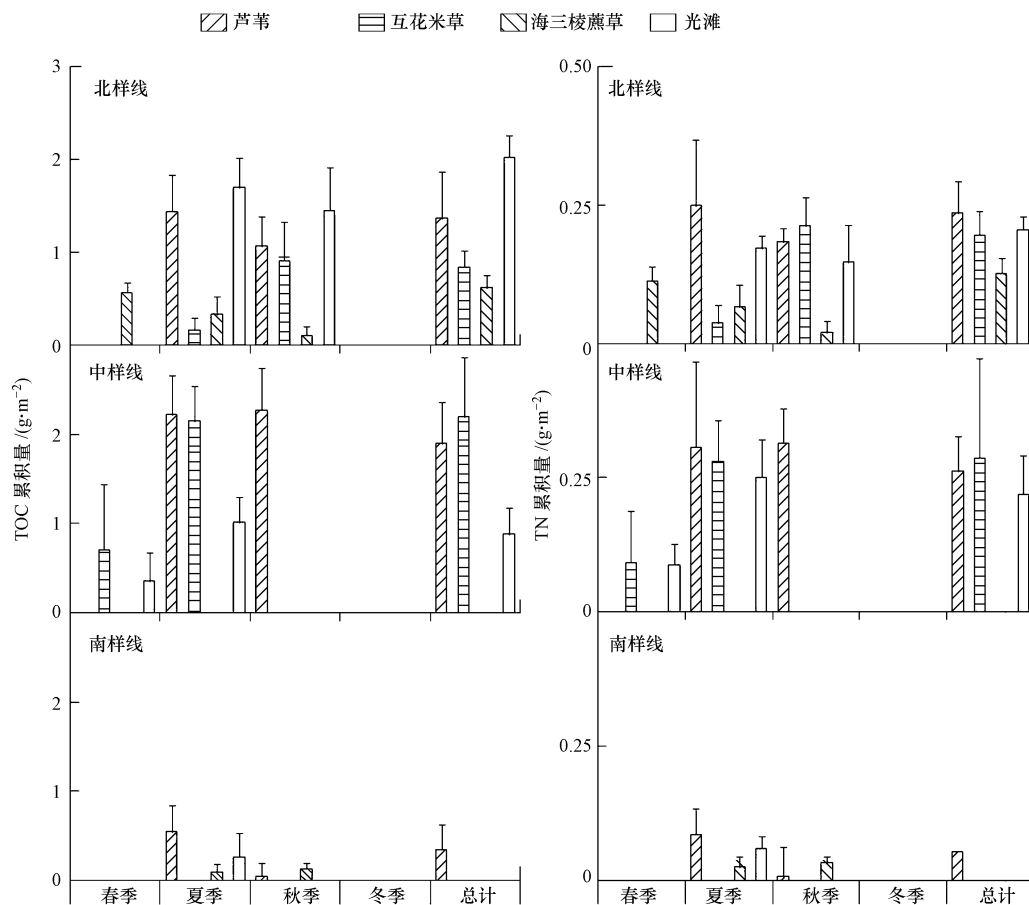


图3 外源表层沉积物有机碳和总氮的季节变化

Fig.3 Seasonal variation of TOC and TN in surface sediment

### 3.4 土壤总有机碳、总氮储量的分布

如图4所示,盐沼植被带土壤 TOC 储量总体表现为随季节递增,在0~10 cm 和10~30 cm 两个层次的变化明显,而在30~50 cm 层次相对比较稳定.盐沼植被带土壤 TN 储量夏季有所下降,秋、冬季略有增加,各季节间无显著差异.光滩土壤 TOC 和 TN 储量季节间差异不显著.北、中样线上相同植被类型的土壤 TOC、TN 显著高于南样线.综合3条样线,芦苇带土壤 TOC 储量高于互花米草带,互花米草带土壤 TN 储量略高于芦苇带,并显著高于海三棱藨草带和光滩.芦苇和互花米草带 TOC 储量均显著高于海三棱藨草带和光滩.

### 3.5 植被类型与表层外源沉积物对土壤碳、氮分布的影响

统计分析结果(表2)表明,盐沼植被类型显著

影响土壤各层次 TOC 和 TN 储量的分布,而表层外源沉积物空间特征(北、中部沉积,南部侵蚀)显著影响0~10 cm 和10~30 cm 层次土壤 TOC 储量,以及0~10 cm 层次土壤 TN 储量的分布.0~10 cm 层次土壤 TOC 储量受植被类型和表层外源沉积物空间特征的交互作用影响.

## 4 讨论(Discussion)

本研究结果表明,长江口滨海湿地的土壤 TOC 和 TN 分布受盐沼植被空间格局和沉积物空间特征的共同影响.历史上长江口湿地的原生盐沼植被群落主要为芦苇和海三棱藨草群落.自20世纪90年代引入外来物种互花米草以来,该物种通过快速的无性与有性繁殖在长江口潮间带形成了大面积的单优势群落(Li *et al.*, 2009).由于互花米草相对于

土著物种芦苇和海三棱藨草具有更强的竞争优势和更广的生态幅,其上线分布于高潮带的芦苇群落,下限达到海三棱藨草群落和部分前沿光滩.根据实地调查和模型模拟,从高潮滩到低潮滩,崇明东滩北、中部的盐沼植被组成主要为芦苇群落和大面

积互花米草群落,盐沼植被前沿仅存有小斑块状的海三棱藨草,而南部盐沼植被仍以芦苇和海三棱藨草群落为主 (Ge *et al.*, 2013; 2014a; 黄华梅等, 2007).

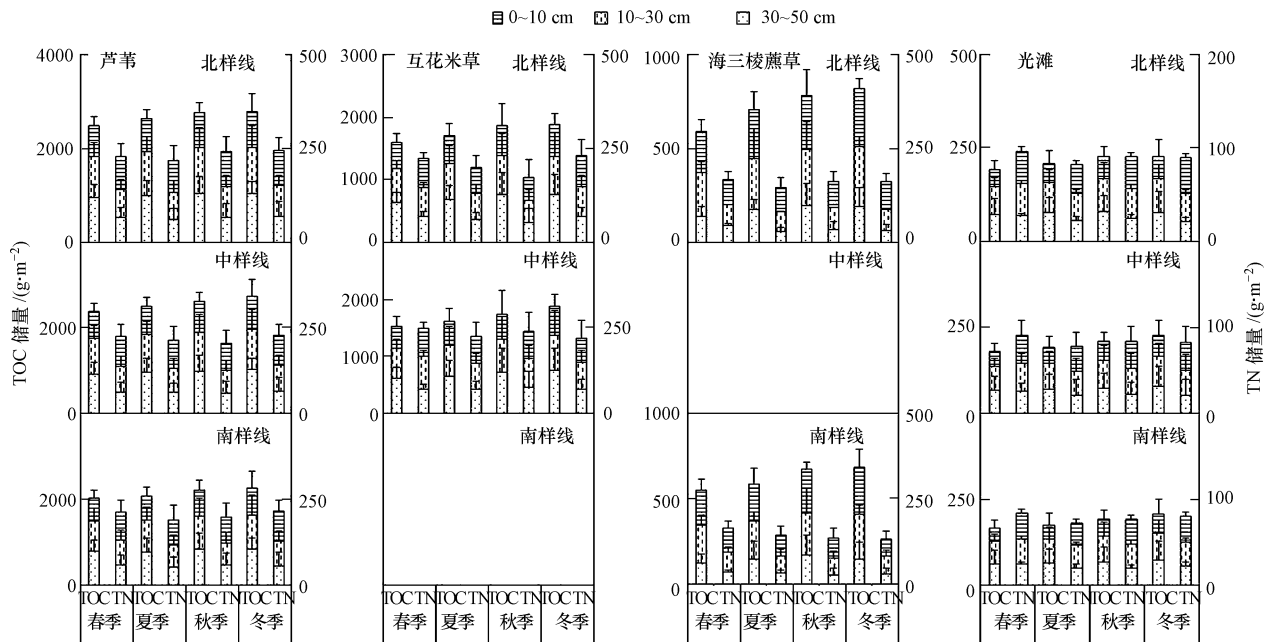


图 4 不同深度土壤有机碳和总氮储量季节变化

Fig.4 Seasonal variation of organic carbon and nitrogen in soil profile

表 2 植被类型和沉积物特征(根据样线区域)与不同深度土壤 TOC、TN 储量的相关性

Table 2 Effects of vegetation type and sedimentation on TOC and TN storage in soil profile

因子	总有机碳			总氮		
	0~10 cm	10~30 cm	30~50 cm	0~10 cm	10~30 cm	30~50 cm
植被类型(vege)	<0.001 **	0.001 **	0.01 **	0.005 **	<0.001 **	0.01 **
样线/沉积物(sedi)	0.04 *	0.05 *	0.09	0.05 *	0.65	0.12
vege×sedi	0.01 *	0.17	0.06	0.29	0.43	0.086

滨海湿地的盐沼植被在生长过程中吸收的 C、N 通过枯落物进入土壤储存,草本植物生长季期间的光合作用产物约 10% 以上可返回到土壤库中 (Kaštovská *et al.*, 2007). 无高等植物分布的低潮滩光滩土壤 C、N 储量最低,其主要来源可能是藻类生物残体和潮汐携带来的颗粒有机物.海三棱藨草为长江口盐沼植被的先锋物种,其生产力较低,单位面积生物量仅为互花米草和芦苇群落的 1/4,因此,其土壤 C、N 储量水平较低.崇明东滩湿地芦苇群落,在高潮滩建群历史较长,长期的生物量积累可致使芦苇带土壤 TOC 和 TN 储量达到最高.外来物种互花米草是 C<sub>4</sub> 类型植物,其净光合速率、叶面积指数和生物量显著高于本土 C<sub>3</sub> 植物芦苇和海三棱藨草

(Ge *et al.*, 2014b; 严格等, 2014). 本研究结果显示,芦苇带土壤 TOC 储量高于互花米草带.这是因为本次芦苇群落的样本均采集于建群期较长(大于 15 年)的高潮滩,而互花米草样本均采集于入侵期较短(10 年左右)的中潮滩.根据建群期相近区域的研究 (Li *et al.*, 2009),互花米草带的土壤 C 储量则略高于芦苇带.崇明东滩湿地北、中部芦苇和海三棱藨草带土壤 TOC 储量显著高于南部,这可能是由于崇明东滩南部的大规模放牧现象所致,芦苇与海三棱藨草受水牛的啃食、践踏等影响,其生物量损失较大.

土壤中 C、N 的积累和有机质分解与土壤微生物活动密切相关,较高的土壤有机质腐殖化有利于

土壤 C、N 库的增加 (吕国红等, 2006). 土壤碳氮比值 (C/N) 也是影响土壤有机质分解速率和过程的关键因子 (黄耀等, 2003), 一般 C/N 大于 25 被认为会影响土壤微生物活动, 导致分解作用减弱. 崇明东滩盐沼植被中的互花米草群落的土壤 C/N 值在 9~18 之间, 其土壤 TN 储量高于芦苇、海三棱藨草群落和光滩区域, 说明互花米草的生长促进了湿地土壤中 N 的积累. 此外, 互花米草凋落物的 N 含量较高, 纤维素和木质素含量较低, 其可分解性高于本土植物芦苇. 互花米草根系共生固氮菌对 N 有稳定的固定作用, 即使在碳源获取受干扰的情况下, 其 N 的获取所受影响也较小 (Bagwell *et al.*, 2000). 利用  $C^{13}$  与  $N^{15}$  同位素测定法的研究结果也表明, 上海和江苏沿海盐沼植被中外来物种互花米草群落显著增加了滨海湿地土壤中的根系生物量、根际微生物活性及土壤有机 C、N 的储量 (Cheng *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010). 本项研究结果与上述研究结果基本相符, 显示了建群期相近的互花米草带土壤 TOC 储量和 TN 储量高于芦苇带.

长江口滨海湿地作为典型的河口淤积型盐沼湿地, 近年来过境入海泥沙平均为  $1.0 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$  左右 (Yang *et al.*, 2011). 监测数据表明, 崇明东滩湿地北部淤积作用明显, 滩面平均淤涨  $19 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ , 中部也有较高的沉积物淤积率, 而由于毗邻长江口北港侧深槽, 崇明东滩湿地南部高潮滩淤积速率较小, 低潮滩则呈现侵蚀趋势 (Yang *et al.*, 2011), 这与本研究的年度观测结果相吻合. 沉积过程一般伴随着凋落物埋藏, 从而促进土壤 TOC、TN 储量 (Anderson *et al.*, 2006; Ouyang *et al.*, 2013). 本研究结果进一步显示, 崇明东滩湿地外源沉积物的区域特征对湿地土壤 C、N 储量的时空分布格局具有影响, 即北、中样线的相同植被类型采样点土壤 TOC、TN 显著高于南样线.

根据因子交互作用分析, 崇明东滩湿地 C、N 的分布受到盐沼植被类型和外来沉积物空间特征的共同影响, 尤其对土壤表层 (0~10 cm) 的 TOC 储量影响达到显著水平. 这可能是由于盐沼植被和外来沉积物对土壤 C、N 储量的叠加作用所致. 然而, 滨海湿地盐沼植被和沉积过程比较复杂 (Zhu *et al.*, 2012). van de Koppel 等 (2005) 和 Lambrinos 等 (2008) 对互花米草盐沼的研究表明, 植被生长和沉积过程存在正反馈关系, 植被茎秆和叶片的缓冲作用可减弱潮水水动力, 增加了沉积物的积累, 其又

促进了植被幼苗的定居和生长. 因此, 滨海湿地盐沼植被和沉积过程的相互作用对土壤 C、N 储量的影响还需要进一步研究.

## 5 结论 (Conclusions)

本研究以长江口典型滨海湿地-崇明东滩湿地为对象, 根据外源沉积物区域特征研究了 3 种主要盐沼植被 (芦苇、互花米草、海三棱藨草) 和土壤中 TOC、TN 的季节变化及空间特征. 结果显示, 崇明东滩湿地北、中部为淤积型滩涂, 南部呈侵蚀态势. 芦苇和互花米草生物量 TOC、TN 累积量均显著高于海三棱藨草带. 北、中样线的相同植被类型采样点土壤 TOC、TN 显著高于南样线. 高潮滩的芦苇带土壤 TOC 储量高于中潮滩的互花米草带, 而互花米草带土壤 TN 储量略高于芦苇带. 芦苇和互花米草带 TOC 和 TN 储量均显著高于海三棱藨草带和光滩. 植被类型显著影响土壤各层次 TOC 和 TN 储量的分布, 其中, 表层储量受植被类型和表层外源沉积物空间特征的交互作用影响.

**责任作者简介:** 张利权 (1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事植物生态学和景观生态学研究.

## 参考文献 (References):

- Anderson C J, Mitsch W J. 2006. Sediment, carbon, and nutrient accumulation at two 10-year-old created riverine marshes [J]. *Wetlands*, 26(3): 779-792
- Bagwell C E, Lovell C R. 2000. Persistence of selected *Spartina alterniflora* rhizoplane diazotrophs exposed to natural and manipulated environmental variability [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 66(11): 4625-4633
- 陈庆强, 杨艳, 周菊珍, 等. 2012. 长江口盐沼土壤有机质分布与矿化的空间差异 [J]. *沉积学报*, 30(1): 128-136
- Cheng X L, Chen J Q, Luo Y Q, *et al.* 2008. Assessing the effects of short-term *Spartina alterniflora* invasion on labile and recalcitrant C and N pools by means of soil fractionation and stable C and N isotopes [J]. *Geoderma*, 145(3/4): 177-184
- Dussailant A, Galdames P, Sun C L. 2009. Water level fluctuations in a coastal lagoon: El Yali Ramsar wetland, Chile [J]. *Desalination*, 246(1/3): 202-214
- 葛振鸣, 王天厚, 王开运, 等. 2008. 长江口滨海湿地生态系统特征及关键群落的保育 [M]. 北京: 科学出版社
- 葛振鸣, 周晓, 王开运, 等. 2010. 长江河口典型湿地碳库动态研究方法 [J]. *生态学报*, 30(4): 1097-1108
- Ge Z M, Cao H B, Zhang L Q. 2013. A process-based grid model for the simulation of range expansion of *Spartina alterniflora* on the coastal saltmarshes in the Yangtze Estuary [J]. *Ecological Engineering*,

- 58; 105-112
- Ge Z M, Zhang L Q, Yuan L. 2014a. Spatiotemporal dynamics of salt marsh vegetation regulated by plant invasion and abiotic processes in the Yangtze Estuary: observations with a modeling approach [J]. *Estuaries and Coasts*, doi: 10.1007/s12237-014-9804-7
- Ge Z M, Zhang L Q, Yuan L, *et al.* 2014b. Effects of salinity on temperature-dependent photosynthetic parameters of a native C<sub>3</sub> and a non-native C<sub>4</sub> marsh grass in the Yangtze Estuary, China [J]. *Photosynthetica*, 52(4): 484-492
- 黄华梅, 张利权, 袁琳. 2007. 崇明东滩自然保护区盐沼植被的时空动态[J]. *生态学报*, 27(10): 4166-4172
- 黄耀, 沈雨, 周密, 等. 2003. 木质素和氮含量对植物残体分解的影响[J]. *植物生态学报*, 27(2): 183-188
- Jordan S J, Stoffer J, Nestlerode J A. 2011. Wetlands as sinks for reactive nitrogen at continental and global scales: a meta-analysis [J]. *Ecosystems*, 14(1): 144-155
- Kaštovská E, Šantrůčková H. 2007. Fate and dynamics of recently fixed C in pasture plant-soil system under field conditions [J]. *Plant and Soil*, 300(1/2): 61-69
- Lambrinos J G, Bando K J. 2008. Habitat modification inhibits conspecific seedling recruitment in populations of an invasive ecosystem engineer [J]. *Biological Invasions*, 10(5): 729-741
- Li B, Liao C Z, Zhang X D, *et al.* 2009. *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River estuary, China: an overview of current status and ecosystem effects [J]. *Ecological Engineering*, 35(4): 511-520
- 刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 2004. 长江口滩涂有机质来源的 C、N 稳定同位素示踪[J]. *地理学报*, 59(6): 918-926
- 吕国红, 周莉, 赵先丽, 等. 2006. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征[J]. *应用生态学报*, 17(3): 384-389
- 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 2009. 盐城海滨湿地盐沼植被对土壤碳氮分布特征的影响[J]. *应用生态学报*, 20(2): 293-297
- 梅雪英, 张修峰. 2007. 崇明东滩湿地自然植被演替过程中储碳及固碳功能变化[J]. *应用生态学报*, 18(4): 933-936
- Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, *et al.* 2013. Wetlands, carbon, and climate change [J]. *Landscape Ecology*, 28(4): 583-597
- Ouyang X, Lee S Y. 2013. Carbon accumulation rates in salt marsh sediments suggest high carbon storage capacity [J]. *Biogeosciences Discussions*, 10(12): 19155-19188
- van de Koppel J, van der Wal D, Bakker J P, *et al.* 2005. Self-Organization and vegetation collapse in salt marsh ecosystems [J]. *American Naturalist*, 165(1): E1-E12
- 严格, 葛振鸣, 张利权. 2014. 崇明东滩湿地不同盐沼植物群落土壤碳储量分布[J]. *应用生态学报*, 25(1): 85-91
- Yang S L, Milliman J D, Li P, *et al.* 2011. 50, 000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta [J]. *Global and Planetary Change*, 75(1/2): 14-20
- Zhang Y H, Ding W X, Luo J F, *et al.* 2010. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C<sub>4</sub> plant *Spartina alterniflora* [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(10): 1712-1720
- Zhou J L, Wu Y, Kang Q S, *et al.* 2007. Spatial variations of carbon, nitrogen, phosphorous and sulfur in the salt marsh sediments of the Yangtze Estuary in China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(1/2): 47-59
- Zhu Z C, Zhang L Q, Wang N, *et al.* 2012. Interactions between the range expansion of saltmarsh vegetation and hydrodynamic regimes in the Yangtze Estuary, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 96: 273-279