

# 植被演替对杭州湾南岸盐沼物质循环的影响

夏 添<sup>1,2</sup>, 陈一宁<sup>2</sup>, 高建华<sup>1</sup>, 黄思龙<sup>2</sup>

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 自然资源部 第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 本研究选择杭州湾庵东浅滩作为研究区, 选取盐沼区三个不同植被带进行柱状样的采集, 通过测量沉积物的粒度、沉积速率、碳氮含量(有机碳、总碳、总氮、碳氮比)等参数, 系统分析研究区盐沼湿地植被演替对盐沼物质循环产生的影响。研究结果发现, 不同植被覆盖下沉积物粒径差异显著, 沿海向陆逐渐变细; 沉积速率从海三棱藨草滩、互花米草滩、植被交错区依次递减; 总碳、总氮、有机碳含量特征为互花米草滩>植被交错区>海三棱藨草滩, 碳氮比介于 6~9, 有机碳以海源物质为主; 通过计算, 发现有机碳埋藏速率为互花米草[159 g/(m<sup>2</sup>·a)]>海三棱藨草[140 g/(m<sup>2</sup>·a)]>植被交错区[119 g/(m<sup>2</sup>·a)]。从整体上来看, 杭州湾南岸盐沼从海三棱藨草群落向互花米草群落演替时, 沉积物颗粒发生细化, 沉积速率有所变化, 而总碳、有机碳、总氮含量增加, 盐沼有机碳埋藏速率增加。

**关键词:** 粒度特征; 盐沼植被; 碳埋藏速率

**中图分类号:** P736    **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3096(2019)10-0035-08

**DOI:** 10.11759/hykw20190224001

盐沼是受潮汐作用, 在低潮期暴露的平缓坡面, 表面被耐盐植物所覆盖的淤泥质滩涂, 多位于海陆交错地带<sup>[1-3]</sup>。根据盐沼发育的环境条件, 将盐沼分为以海洋潮汐作用为主导和以河流径流为主导两类<sup>[4]</sup>。盐沼湿地是我国主要的滨海湿地类型, 主要分布在长江、黄河、钱塘江等河流入海口的三角洲冲积平原以及东部沿海淤泥质海岸地区<sup>[5]</sup>。

盐沼生态系统具有较高的生产力, 兼具“源”与“汇”功能, 在滨海地区的碳氮物质循环中发挥了重要作用<sup>[6]</sup>。在气候与成土母质基本一致的情况下, 沉积物中碳氮含量主要受植被影响<sup>[7-9]</sup>。由于不同植被生物量的不同, 其向沉积物中输入与输出的碳氮数量存在差异。盐沼植被吸收的碳氮通过枯落物进入沉积物中, 草滩前缘碳氮主要来自于藻类以及潮汐带来的颗粒有机物<sup>[10]</sup>。

海三棱藨草(*Scripus marqueter*)与互花米草(*Spantina alterniflora*)是我国南方典型盐沼植被, 分别属于C<sub>3</sub>与C<sub>4</sub>型植物。海三棱藨草是我国特有物种, 而互花米草引自北美, 并且在很多盐沼地区大规模入侵。互花米草的入侵会导致原生盐沼类型的改变, 甚至有可能取代原生植被。所以当引种的互花米草处于快速扩散阶段, 海三棱藨草会相对减少, 碳氮含量会有所变化<sup>[11-13]</sup>。

杭州湾南岸庵东浅滩滨海盐沼主要植被群落为

海三棱藨草和互花米草。海三棱藨草是杭州湾潮间带地区的的优势物种<sup>[14]</sup>。自互花米草引种至中国后, 在该地区的外来物种入侵情况较为严重, 已经形成较大规模的互花米草盐沼<sup>[15]</sup>。杭州湾南岸盐沼的植被群落既有以海三棱藨草为代表的本土种植物, 又处于外来物种互花米草入侵的阶段, 因此该区域是研究植物演替影响下的盐沼碳氮循环过程的理想区域。

本文选取庵东浅滩盐沼作为研究对象, 采用现场采样和实验室分析相结合的方法, 以沉积物粒度、沉积速率以及碳氮含量为指标, 通过对庵东浅滩盐沼区内部不同植被区的对比, 研究植被演替对于盐沼湿地物质循环的影响。

## 1 研究区概况

杭州湾位于浙江省东北部, 与钱塘江和东海连接, 呈喇叭状, 潮差大, 属于浅海半日潮, 年平均气温 16.0℃, 年平均降水量 1 344 mm。沉积物主要来自长江及钱塘江和周边河流<sup>[16]</sup>, 以细颗粒泥砂为主<sup>[17]</sup>。

收稿日期: 2019-02-24; 修回日期: 2019-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41776096)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41776096]

作者简介: 夏添(1994-), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要从事滨海盐沼湿地碳氮物质循环研究, 电话: 0571-81963329, E-mail: xiati317@foxmail.com; 陈一宁, 通信作者, 博士, 副研究员, 研究方向: 河口海岸学, 电话: 0571-81963680, E-mail: yining.chen@sio.org.cn

庵东浅滩位于杭州湾南岸潮滩的突出段，处于不断淤积的状态。从断面特征上看，自海向陆，随着高程的增加，依次发育有光滩、海三棱藨草滩、植被交错区、互花米草滩等典型自然生物群落演替序列。庵东浅滩沉积物以粉砂为主，自海向陆随着高程增加以及随着植被带的变化，沉积物颗粒逐渐变细<sup>[17]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

2017年10月，在杭州湾庵东镇第十二塘外的盐沼湿地中利用柱状采样器分别从海三棱藨草滩、植被交错区、互花米草滩取柱状样S1、S2、S3(图1)，所有柱状样长度均为1 m(表1)，样品密封并带回实验室进行分样。

### 2.2 测试方法

样品在实验之前均冷冻保存，柱状样每隔2 cm

进行分样。柱状样整段进行粒度实验，用0.05 mol/L的六偏磷酸钠溶液( $(NaPO_3)_6$ )浸泡24 h，之后用Mastersize 2000激光粒度仪测量粒度。有机碳、总碳、总氮取1 cm作为起点，从9 cm开始每隔10 cm取样进行实验。由于 $^{210}Pb$ 底部活度较为稳定，所以分样间隔标准如下：50 cm以上从1 cm开始以6 cm为间隔，50 cm以下以8 cm为间隔进行分样。有机碳、总碳、总氮、 $^{210}Pb$ 测年等实验均采用冻干处理，用63  $\mu\text{m}$ 筛子过筛。其中碳氮实验采用高温燃烧法<sup>[18]</sup>。 $^{210}Pb$ 测年实验过筛后，称量样品5 g左右，加入纯水和 $^{209}\text{Po}$ 示踪剂；之后依次加入10 mL浓硝酸和10 mL高氯酸，摇匀后加热至蒸干，再加入6 mol/L的盐酸10 mL，加热至蒸干，之后再加入6 mol/L的盐酸10 mL和0.3 mol/L的盐酸15 mL，加热，离心，镀膜，用 $\alpha$ 能谱仪进行比活度测量。

### 2.3 数据处理方法

自然条件下，由于杭州湾特殊的地理环境，柱

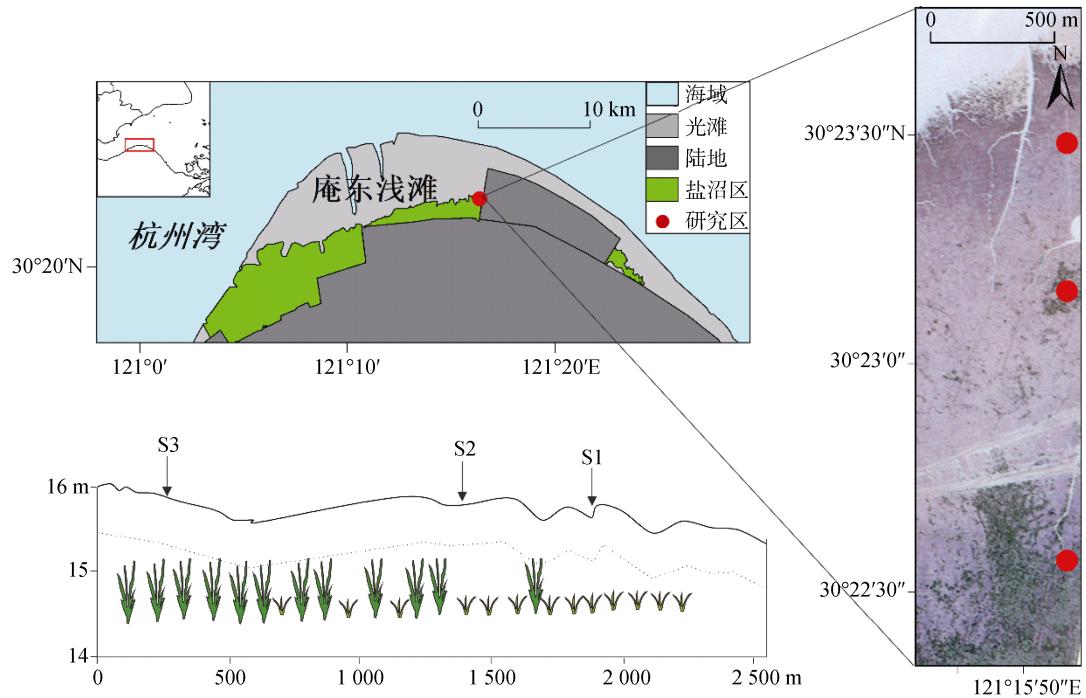


图1 研究区位置、采样点分布及其断面示意图  
Fig. 1 Study area, sampling sites and its section of cores

表1 研究区采样点信息表

Tab. 1 Sampling information within the study area

采样区	样品编号	长度/m	样品描述
盐沼区	S1	1	柱状样，位于海三棱藨草滩，层理结构无显著变化，黄灰色，在30 cm以上有根系分布
	S2	1	柱状样，位于植被交错区，层理结构无显著变化，黄灰色，在60 cm以上有根系分布
	S3	1	柱状样，位于互花米草滩，层理结构无显著变化，黄灰色，在50 cm以上有根系分布

状样底部的比活度没有到达本底值。在前人研究的基础上, 取杭州湾外部的本底值 1 dpm/g 进行计算<sup>[17]</sup>。<sup>210</sup>Pb 测年沉积速率计算采用 CRS 模式<sup>[19]</sup>进行计算, 具体公式如下:

$$\sum A_i = (\sum A_b) \left( 1 - e^{-\lambda \left( \frac{M}{R} \right)} \right), \quad (1)$$

$$M/R = -(1/\lambda) \ln[1 - (\sum A_i / \sum A_b)], \quad (2)$$

其中  $\sum A_i$  是从表层到第  $i$  层过剩 <sup>210</sup>Pb 活度值(dpm/g)的和,  $\sum A_b$  是整段柱状样的总过剩 <sup>210</sup>Pb 活度值的和。 $\lambda$  是 <sup>210</sup>Pb 衰变常数( $0.03114 \text{ a}^{-1}$ ),  $M$  是质量深度( $\text{g/cm}^2$ ),  $R$  是沉积物沉积通量( $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ )。公式(2)也可以用深度  $H(\text{cm})$  和沉积速率  $S(\text{cm/a})$  表达, 具体为

$$H/S = -(1/\lambda) \ln[1 - (\sum A_i / \sum A_b)], \quad (3)$$

粒度数据用 Folk and Ward<sup>[20]</sup>公式计算平均粒径。

利用 SPSS17.0 对数据进行统计分析, 采用非参

数检验中的 Kruskal-Wallis(K-W)检验分别成对分析柱状样粒度以及碳氮之间的差异性。该检验假设是基于多个独立样本来自的多个总体的分布无显著差异, 当  $P < 0.05$  时则拒绝该假设。

## 3 结果

### 3.1 盐沼区沉积物粒度特征

庵东浅滩柱状沉积物平均粒径大部分介于 8~15 μm (图 2, 表 2)。柱状样平均粒径整体上呈现上下较为均一的状态, 尽管有波动, 但是无明显粗化或者细化的趋势(图 2)。利用 K-W 检验发现三个柱状样平均粒径存在显著性差异( $P < 0.05$ , 表 4), 随着高程与植被的变化, 沉积物颗粒越来越细。由于随着高程增加和植被带变化, 水动力作用的影响变弱, 平均粒度变化幅度也在逐步变小(表 2)。S2 与 S3 沉积物平均粒径分别比 S1 细 23% 与 35%。

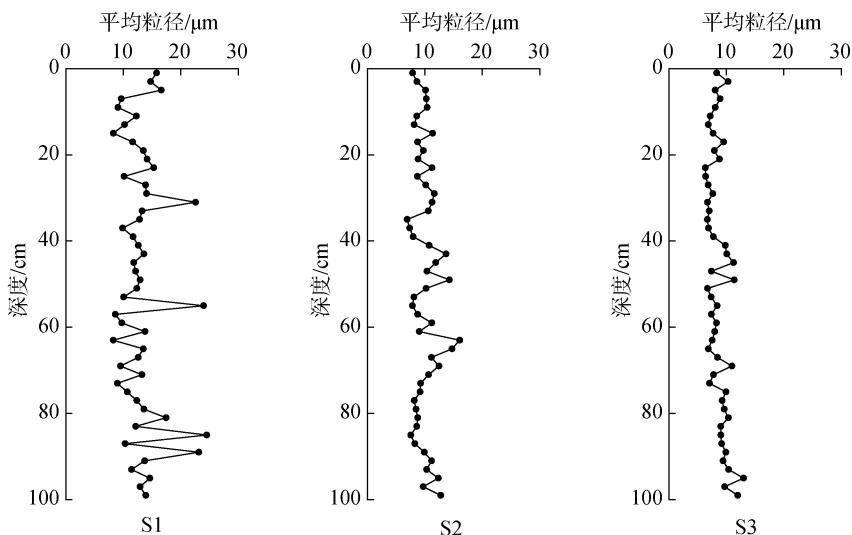


图 2 柱状沉积物 S1、S2、S3 粒度特征垂向分布图

Fig. 2 Vertical distribution of particle size of sediment cores S1, S2, S3

表 2 柱状样 S1、S2、S3 平均粒径、TOC、TC、TN 数据

Tab. 2 Mean Particle Size, TOC, TC and TN data of cores (S1, S2 and S3)

样品	平均粒径/μm	TOC/%	TC/%	TN/%	C/N
S1	$13.14 \pm 3.76$	$5.57 \pm 1.12$	$13.75 \pm 0.65$	$0.67 \pm 0.12$	$8.44 \pm 1.58$
S2	$10.07 \pm 2.00$	$6.45 \pm 1.30$	$14.54 \pm 0.72$	$0.81 \pm 0.12$	$8.07 \pm 1.69$
S3	$8.58 \pm 1.58$	$8.51 \pm 2.29$	$16.01 \pm 1.63$	$0.99 \pm 0.15$	$8.55 \pm 0.95$

### 3.2 沉积速率

不同植被区沉积速率具有一定差异性, 如图 3 所示为各柱状样 <sup>210</sup>Pb 过剩活度值。过剩活度值垂向分布沿深度波动, 高过剩比活度与低过剩比活度样

品交替分布, 并且表层比活度低于次表层。此种形状的分布在部分河口与潮滩地区也有出现, 具有一定的普遍意义<sup>[17]</sup>。用公式(3)计算得 S1、S2、S3 沉积速率分别为 2.81 cm/a、2.05 cm/a、2.36 cm/a, 表明不同植被类型沉积速率存在差异。S1 相较于 S2 更靠近

光滩,有更多的沉积物来源, S1 沉积速率比 S2 所在的植被交错区要高。S3 为互花米草滩, 沉积速率高于 S2, 但是低于 S1, 这是因为互花米草对于沉积物

的捕获能力更强, 所以沉积速率比 S2 快。同时, 因为一部分沉积物已经在盐沼前缘被海三棱藨草捕获, 所以整体物源减少, 沉积速率低于 S1。

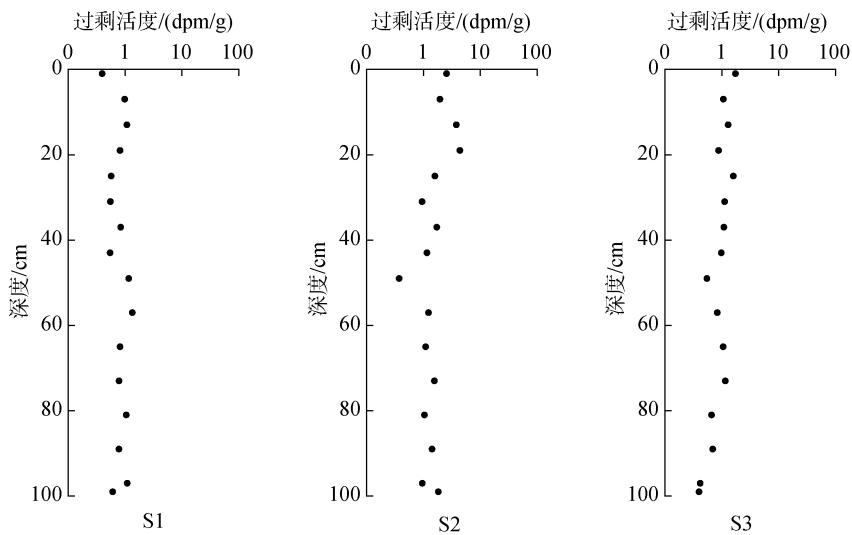


图 3 柱状沉积物 S1、S2、S3  $^{210}\text{Pb}$  过剩活度垂向分布图  
Fig. 3 Vertical distribution of excess  $^{210}\text{Pb}$  versus quality of cores S1, S2, S3

### 3.3 盐沼区垂向碳氮含量特征

当植被从海三棱藨草演替到互花米草时, TC、TN、TOC 含量均有所增加(图 4, 表 3), 标准偏差也在增加, 表明互花米草会显著增加沉积物中的碳氮含

量和变化幅度。利用 K-W 检验, 发现除去海三棱藨草与交错区有机碳含量外, 互花米草滩、海三棱藨草滩以及交错区碳氮含量差异显著( $P<0.05$ ), 表明三者来自于三个不同的总体, 即植被对碳氮含量有显著影响。

表 3 Kruskal-Wallis 检验结果

Tab. 3 The results of Kruskal-Wallis tests

检验内容	对比	卡方	P	结论
平均粒径	S1vsS2	24.500	7.43E-7	有显著差异
	S1vsS3	49.668	1.82E-12	有显著差异
	S2vsS3	14.904	1.13E-4	有显著差异
TOC	S1vsS2	2.804	0.094	无显著差异
	S1vsS3	13.282	2.68E-4	有显著差异
	S2vsS3	7.977	0.005	有显著差异
TC	S1vsS2	5.132	0.023	有显著差异
	S1vsS3	15.783	7.11E-5	有显著差异
	S2vsS3	10.359	0.001	有显著差异
TN	S1vsS2	4.867	0.027	有显著差异
	S1vsS3	15.845	6.87E-5	有显著差异
	S2vsS3	6.077	0.014	有显著差异

有机碳(TOC)、总氮(TN)之间的比值 C/N 是反映有机碳来源的量, 该值越高表示受陆源影响越大, 越低表示受海源物质影响越大。通常来说, 盐沼湿地有机碳主要有两种来源: 本地植物的输入(陆源)和浮游以及底栖生物等(海源), 其 C/N 分别是>12

和 6~9<sup>[21, 22]</sup>。在本研究中, 各柱状样 C/N 均值较为接近, 介于 6~9 之间, 证明有机碳主要受海源物质的影响。

地下生物量数据(图 4)表明在 20 cm 以上随着深度的增加而增加, 表层普遍大于次表层, 并且与碳

氮含量有相同的趋势，表明植物根系对碳氮含量在40 cm以上有较大影响。互花米草滩地下生物量显著大于海三棱藨草滩( $P<0.05$ )，所以互花米草滩碳氮含

量在40 cm以上部分均显著高于海三棱藨草滩。而地下生物量在40 cm开始处开始下降直至为0，碳氮含量也逐渐趋于稳定。

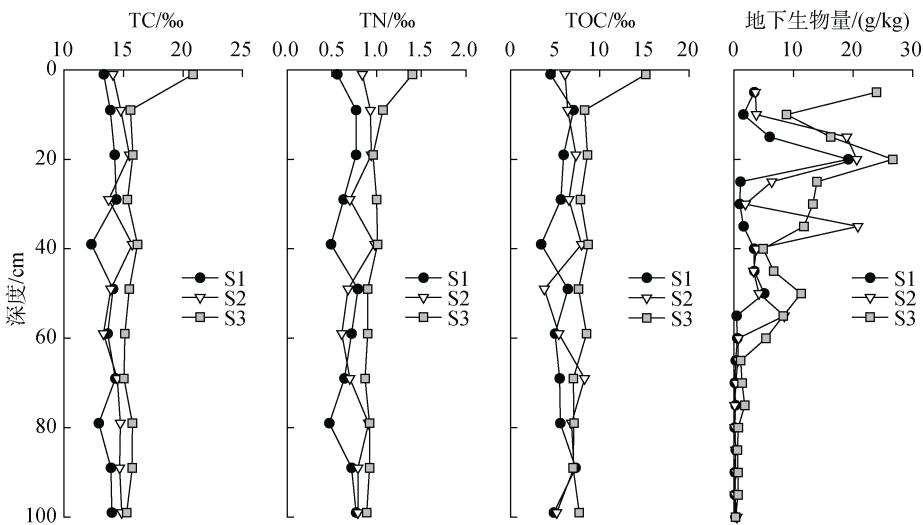


图 4 柱状沉积物 S1、S2、S3 TN、TC、TOC、地下生物量垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of TN, TC, TOC, Underground Biomass of cores S1, S2, S3

## 4 讨论

### 4.1 植被类型对沉积物的影响

为了证明柱状样在该区域具有代表性，分别在各草滩分别采集3个表层样进行内部一致性分析。结果发现，海三棱藨草滩、交错区、互花米草滩表层

样粒度数据分别介于9.76~14.27  $\mu\text{m}$ , 10.41~13.8  $\mu\text{m}$ 以及6.82~14.19  $\mu\text{m}$ 之间，全都在柱状样范围之内，表明表层样与柱状样来自于同一总体，具备内部一致性，所采集的柱状样可作为每一个植被区的代表进行讨论。具体数据如表4所示，结果发现，表层碳氮储量较低，可能是被底栖生物消耗并转移到草滩外部<sup>[23]</sup>。

表4 表层样平均粒径、TOC、TC、TN数据

Tab. 4 Mean particle size, TOC, TC, TN data of surface sediment samples

表层样	平均粒径/ $\mu\text{m}$	TOC/%	TC/%	TN/%	C/N
海三棱藨草滩	$11.35 \pm 1.94$	$3.80 \pm 2.69$	$12.91 \pm 0.85$	$0.53 \pm 0.16$	$6.70 \pm 2.69$
交错区	$10.91 \pm 0.62$	$3.46 \pm 0.70$	$12.66 \pm 0.18$	$0.51 \pm 0.03$	$6.82 \pm 1.23$
互花米草滩	$9.87 \pm 3.85$	$7.68 \pm 2.19$	$15.36 \pm 1.52$	$0.98 \pm 0.19$	$7.75 \pm 0.66$

沉积物的粒度特征变化规律反映了盐沼水动力条件对沉积物分布的影响，尤其是植被在盐沼发育过程中的影响<sup>[21]</sup>。互花米草相对于海三棱藨草根系发达，对底部沉积物有固结作用，同时也能减少潮流侵蚀。在本研究中，沉积物平均粒径从海三棱藨草滩的 $13.14 \mu\text{m} \pm 3.76 \mu\text{m}$ 减小到互花米草滩的 $8.58 \mu\text{m} \pm 1.58 \mu\text{m}$ 。这种变化主要是由于携带泥沙的潮流受到互花米草的阻滞作用，流速降低，沉积物快速沉降，沉积物粒径变小。杨世伦等<sup>[24]</sup>研究也发现，这种差异除了水动力条件以外，主要是由植被的差异造成的。

沉积物中碳氮含量有诸多影响因素，如植被类型，植被根系长短，外源输入，沉积物颗粒粗细等等，其中垂向上受植物根系影响显著。由于不同植物根系长短不一，地下生物量不同，不同植被覆盖下碳氮含量有所区别<sup>[25]</sup>。通常，表层碳氮都较高，随着植物根系与生物量的减少，碳氮含量明显降低<sup>[26]</sup>。在本研究中，海三棱藨草是本地先锋物种，根系较短，生物量较低，沉积物中碳氮含量较低。互花米草生物量显著高于海三棱藨草，导致互花米草沉积物中碳氮含量会显著高于海三棱藨草，表明随着植被的演替，植被对碳氮的贡献逐渐加大。刘景双等<sup>[27]</sup>以及陈庆

强等<sup>[28]</sup>研究也发现类似现象。

## 4.2 有机碳埋藏速率估算

盐沼湿地的固碳作用主要体现在两个方面。一方面，盐沼植物通过生长固定了大量有机碳。根据“最大现存法”推算互花米草年固碳能力约为 2 274 g/(m<sup>2</sup>·a)，是中国植被平均固碳能力(494 g/(m<sup>2</sup>·a))的 4.60 倍<sup>[29]</sup>；另一方面，盐沼植被可以捕获更多的沉积物，提高了沉积物有机碳埋藏速率。根据沉积物 TOC 含量和沉积速率在本项研究中可以采用公式(4)<sup>[30]</sup>进行计算：

$$B_O = \rho_{dry} \cdot S \cdot C_{TOC}, \quad (4)$$

其中  $B_O$  为有机碳埋藏速率(g/(m<sup>2</sup>·a)),  $\rho_{dry}$  为沉积物干密度(g/m<sup>3</sup>),  $S$  为沉积速率(m/a),  $C_{TOC}$  为沉积物中 TOC 含量(mg/g)。

在本项研究中，公式(4)中干密度、沉积速率、TOC 含量按照 S1~S3 顺序取值依次为：0.89、0.9、0.79(g/m<sup>3</sup>); 0.028 1, 0.020 5, 0.023 6(m/a); 5.57, 6.45, 8.51(mg/g)。经过计算，发现不同植被类型内部有机碳埋藏速率有一定差异，互花米草滩最高，为 159 g/(m<sup>2</sup>·a)，海三棱藨草滩次之，为 140 g/(m<sup>2</sup>·a)，植被交错区最低，为 119 g/(m<sup>2</sup>·a)。根据前人的研究，互花米草与海三棱藨草有机碳埋藏速率大致在 71~470 g/(m<sup>2</sup>·a)之间<sup>[31-34]</sup>，本项研究的结果位于前人研究的数值范围之内。互花米草滩最高是因为互花米草有机碳含量显著高于其余两者。海三棱藨草滩的碳埋藏速率次之是因为尽管地上生物量低于互花米草，该区域具有较高的沉积速率，可以捕获更多的沉积物，因此依然具有可观的碳埋藏速率。位于两种植被群落之间的交错区，不论地上生物量还是沉积速率，均不占优，因此形成低谷。从本项研究结果来看，当植被从海三棱藨草演替到互花米草时，储碳固碳能力能够得到增强，与邵学新等<sup>[35]</sup>的研究结果一致。同时，滨海湿地有机碳埋藏速率远高于中国内陆盐沼(67 g/(m<sup>2</sup>·a))<sup>[32]</sup>，是一个高效的碳汇。值得注意的是，当海三棱藨草被互花米草演替时，在交错区会出现一个碳埋藏速率的低谷，说明本地种和外来种植物调节碳汇的途径不一样，本地种主要是通过前缘泥沙的捕获来增加沉积速率，而位于高潮滩的外来植物则通过自身的高光合作用来贡献更多的有机碳。

## 5 结论

本项研究通过对杭州湾南岸滨海湿地不同植被区的柱状样采集，分析了植被从海三棱藨草演替到互花米草时，沉积物粒径、沉积速率、碳氮含量等参

数差异，发现植被的演替对沉积物各项参数影响显著。具体表现为沉积物颗粒变细，总碳、总氮、有机碳含量有所增加。在垂向上，柱状样平均粒径整体较为均一，碳氮含量自表向下逐渐降低。碳氮比均介于 6~9 之间，有机碳来源以海源物质为主。研究区沉积速率在 2~3 cm/a 之间变化，植被类型对沉积速率有一定影响，海三棱藨草(S1)>互花米草(S3)>交错区(S2)。有机碳埋藏速率受到沉积速率与有机碳含量影响，互花米草有机碳埋藏速率高于海三棱藨草，表明互花米草比海三棱藨草具备更强的固碳能力。

**致谢：**感谢厦门大学李炎教授对数据分析与论文修改给予的指导，感谢自然资源部第二海洋研究所蔡廷禄高级工程师在野外工作给予的帮助。

### 参考文献：

- [1] Williams T P, Bubb J M, Lester J N. Metal accumulation within salt marsh environments: A review[J]. Marine Pollution Bulletin, 1994, 28(5): 277-290
- [2] Boorman. Saltmarsh Review: An overview of coastal saltmarshes, their dynamic and sensitivity characteristics for conservation and management[R]. Joint Nature Conservation Committee Report, 2003, 334: 1-116.
- [3] Schwartz M L. Encyclopedia of Coastal Science[M]. Dordrecht: Springer, 2005: 965-975.
- [4] 童春富. 河口湿地生态系统结构、功能与服务——以长江口为例[D]. 上海: 华东师范大学, 2004. Tong Chunfu. Structure, function and services of estuarine wetland ecosystem: A case study in Yangtze Estuary[D]. Shanghai : East China Normal University, 2004.
- [5] 夏东兴, 王文海, 武桂秋, 等. 中国海岸侵蚀述要[J]. 地理学报, 1993, 5: 468-476.
- [6] Nixon S W. Between coastal marshes and coastal waters — A review of twenty years of speculation and research on the role of salt marshes in estuarine productivity and water chemistry[A]//Ater K B, Macdonald P. Estuarine and Wetland Processes[C]. New York: Plenum Press , 1980: 437-525.
- [7] Bull I D, Bergen P F V, Bol R, et al. Estimating the contribution of *Spartina anglica* biomass to salt-marsh sediments using compound specific stable carbon isotope measurements[J]. Organic Geochemistry, 1999, 30(7): 477-483.
- [8] Deyn G B D, Cornelissen J H, Bardgett R D. Plant functional traits and soil carbon sequestration in contrasting biomes[J]. Ecology Letters, 2008, 11(5): 516-531.
- [9] Gao J H, Bai F L, Yang Y, et al. Influence of *Spartina* colonization on the supply and accumulation of organic

- carbon in tidal salt marshes of northern Jiangsu Province, China[J]. Journal of Coastal Research, 2012, 28(2): 486-498.
- [10] 张天雨, 葛振鸣, 张利权, 等. 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, 2015, 35(3): 836-843.  
Zhang Tianyu, Ge Zhenming, Zhang Liqian, et al. Influence of saltmarsh vegetation and sedimentation on the distribution of soil carbon and nitrogen in the Chongming Dongtan Wetlands[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(3): 836-843.
- [11] Cheng X L, Luo Y, Xu Q, et al. Seasonal variation in CH<sub>4</sub> emission and its <sup>13</sup>C-isotopic signature from *Spartina alterniflora* and *Scirpus maricueter* soils in an estuarine wetland[J]. Plant & Soil, 2010, 327(1-2): 85-94.
- [12] Li B, Liao C H, Zhang X D, et al. *Spartina alterniflora* invasions in the Yangtze River estuary, China: an overview of current status and ecosystem effects[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(4): 511-520.
- [13] Zhang Y, Ding W, Luo J, et al. Changes in soil organic carbon dynamics in an Eastern Chinese coastal wetland following invasion by a C4 plant *Spartina alterniflora*[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2010, 42(10): 1712-1720.
- [14] 陈中义, 李博, 陈家宽. 互花米草与海三棱藨草的生长特征和相对竞争能力[J]. 生物多样性, 2005, 13(2): 130-136.  
Chen Zhongyi, Li Bo, Chen Jiakuan. Some growth characteristics and relative competitive ability of invasive *Spartina alterniflora* and native *Scirpus maricueter*[J]. Biodiversity Science, 2005, 13(2): 130-136.
- [15] 李加林, 杨晓平, 童亿勤, 等. 杭州湾南岸互花米草生物海岸表层沉积物粒度分析[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(4): 52-55.  
Li Jialin, Yang Xiaoping, Tong Yiqin, et al. Granularity analysis of superficial sediments of *Spartina alterniflora* Salt Marsh on South Coast of Hangzhouwan Bay[J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(4): 52-55.
- [16] 吴统贵, 吴明基, 萧江华. 杭州湾滩涂湿地植被群落演替与物种多样性动态[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1284-1289.  
Wu Tonggui, Wu Mingji, Xiao Jianghua. Dynamics of community succession and species diversity of vegetation in beach wetlands of Hangzhou Bay[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(8): 1284-1289.
- [17] 李炎, 谢钦春. 庵东浅滩沉积分带和沉积速率[J]. 海洋学研究, 1993, 1: 23-35.  
Li Yan, Xie Qinchun. Zonation of sediment and sedimentary rate on Andong Tidal Flat in Hangzhou Bay, China[J]. Donghai Marine Science, 1993, 1: 23-35.
- [18] Froelich P N. Analysis of organic carbon in marine sediments[J]. Limnology & Oceanography, 1980, 25(3): 564-572.
- [19] Crozaz G, Picciotto E, De Breuck W. Antarctic snow chronology with Pb210[J]. Journal of Geophysical Research, 1964, 69 (12): 2597-2604.
- [20] Folk R L. Brazos river bar, a study in the significance of grain size parameter[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [21] 高建华, 欧维新, 杨桂山, 等. 苏北潮滩不同生态带沉积物分布特征[J]. 东海海洋, 2005, 23(1): 40-47.  
Gao Jianhua, Ou Weixin, Yang Guishan, et al. Characteristics of tidal flat sediment at different ecologic zones, north Jiangsu Province[J]. Donghai Marine Science, 2005, 23(1): 40-47.
- [22] 毛志刚, 王国祥, 刘金娥, 等. 苏北滨海湿地不同植被带沉积物粒度特征分析[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(4): 454-463.  
Mao Zhigang, Wang Guoxiang, Liu Jine, et al. Characteristics of grain-size distributions in different vegetation zones of caostal wetland in North Jiangsu[J]. Advances in Marine Science, 2008, 26(4): 454-463.
- [23] 仲启铖, 王开运, 周凯, 等. 潮间带湿地碳循环及其环境控制机制研究进展[J]. 生态环境学报, 2015(1): 174-182.  
Zhong Qicheng, Wang Kaiyun, Zhou Kai, et al. Research advances on carbon cycling an its environmental controlling mechanisms in intertidal wetlands[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015(1): 174-182.
- [24] 杨世伦, 徐海根. 长江口长兴、横沙岛潮滩沉积特征及其影响机制[J]. 地理学报, 1994(5): 449-456.  
Yang Shilun, Xu Haigen. Tidal flat sediments and sedimentation on the Changxin and Hengsha islands at the mouth of Changjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 1994(5): 449-456.
- [25] Jobbág A, Literáthy B, Tardy G. Implementation of glycogen accumulating bacteria in treating nutrient-deficient wastewater[J]. Water Science & Technology, 2002, 46(1-2): 185-190.
- [26] 邵学新, 杨文英, 吴明, 等. 杭州湾滨海湿地土壤有机碳含量及其分布格局[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 658-664.  
Shao Xuexin, Yang Wenying, Wu Ming, et al. Soil organic carbon content and its distribution pattern in Hangzhou Bay coastal wetlands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 658-664.
- [27] 刘景双, 杨继松, 于君宝, 等. 三江平原沼泽湿地土壤有机碳的垂直分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 5-8.  
Liu Jingshuang, Yang Jisong, Yu Junbao, et al. Study on vertical distribution of soil organic carbon in wetlands Sanjiang Plain[J]. Journal of Soli and Water Conservation, 2003, 17(3): 5-8.
- [28] 陈庆强, 周菊珍, 孟溯, 等. 长江口盐沼滩面演化的有机碳累积效应[J]. 自然科学进展, 2007, 17(5): 614-623.  
Chen Qinjiang, Zhou Juzhen, Meng Yi, et al. Cumulative

- effect of organic carbon on the evolution of salt marsh in the Changjiang Estuary[J]. Progress in Natural Science, 2007, 17(5): 614-623.
- [29] 冯振兴. 互花米草生物量变化对盐沼沉积物有机碳含量的影响[D]. 南京: 南京大学, 2015.  
Feng Zhenxing. The impact of biomass change of *Spartina alterniflora* on the organic carbon content in salt marsh[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015.
- [30] Xiaonan D, Xiaoke W, Lu F, et al. Primary evaluation of carbon sequestration potential of wetlands in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 463-469.
- [31] Chmura G L, Anisfeld S C, Cahoon D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(4): 1-12.
- [32] 段晓男, 王效科, 尹弢, 等. 湿地生态系统固碳潜力研究进展[J]. 生态环境, 2006, 15(5): 1091-1095.  
Duan Xiaonan, Wang Xiaoke, Yin tao, et al. Advance in the Studies on carbon sequestration potential of wetlands ecosystem[J]. Ecology and Environment 2006, 15(5): 1091-1095.
- [33] 冯振兴, 高建华, 陈莲, 等. 互花米草生物量变化对盐沼沉积物有机碳的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(7): 2038-2047.  
Feng Zhenxing, Gao Jianhua, Chen Lian, et al. The response of organic carbon content to biomass dynamics in *Spartina alterniflora* marsh[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(7): 2038-2047.
- [34] 黄梅, 葛晨东, 左平, 等. 米草引种对潮滩沉积物有机质的贡献及碳埋藏的影响[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 655-664.  
Huang Mei, Ge Chendong, Zuo Ping, et al. The contribution of *Spartina* introduction on organic matter source and its effects on carbon burial in tidal flats[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 2018, 54(3): 655-664.
- [35] 邵学新, 李文华, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地 3 种优势植物碳氮磷储量特征研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3451-3457.  
Shao Xuexin, Li Wenhua, Wu Ming, et al. Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus storage of three dominant marsh plants in Hangzhou Bay coastal wetland[J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3451-3457.

## Impact of vegetation succession on salt marsh material circulation in Southern Hangzhou Bay

XIA Tian<sup>1, 2</sup>, CHEN Yi-ning<sup>2</sup>, GAO Jian-hua<sup>1</sup>, HUANG Si-long<sup>2</sup>

(1. Nanjing University, School of Geography and Ocean Science, Nanjing 210023, China; 2. Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China)

**Received:** Feb. 24, 2019

**Key words:** particle size; saltmarsh; organic carbon burial

**Abstract:** Andong Shoal, Southern Hangzhou Bay was selected as the study area for collecting sediment cores along three saltmarsh vegetation zones. Based on the measurements of particle size, deposition rate, carbon and nitrogen contents [total organic carbon (TOC), total carbon (TC), total nitrogen (TN), carbon to nitrogen ratio (C/N)], the impact of vegetation succession on salt marsh material circulation was systematically analyzed. Results show that the particle size within different vegetation zones was significantly different, gradually becoming finer from seaward to landward. The deposition rate decreased from the *Scripus mariqueter* zone and *Spartina alterniflora* zone to the ecotone zone. The TC, TN, and TOC contents decreased from the *S. alterniflora* zone to the ecotone zone and then to the *S. mariqueter* zone. The carbon to nitrogen ratio ranged between 6 and 9; thus, the organic carbon was mainly sea sourced. The burial rate of TOC was estimated to decrease from the *S. alterniflora* zone ( $159 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) to the *S. mariqueter* zone ( $140 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ) and then to the ecotone zone ( $119 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ). Overall, when the saltmarsh on the south bank of the Hangzhou Bay succeeded from the *S. mariqueter* zone to the *S. alterniflora* zone, the sediment particles were refined and the deposition rate changed. The TC, TOC, and TC contents and the rate of organic carbon burial increased.

(本文编辑: 康亦兼)