

# 长江三角洲南翼盐沼有机质分布及来源初探

杨钦川, 陈庆强, 姚振兴

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 通过对长江三角洲南翼最大淤涨带钻孔柱样进行沉积有机碳(POC)、有机碳同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )、总氮(TN)、粒度的测定, 研究长江三角洲南翼盐沼有机质分布及来源。结果表明: POC、TN 分布受控于长江入海泥沙及人类活动, 有机质主要赋存于细颗粒物中( $<16\ \mu\text{m}$ ), 长江入海泥沙偏粗, 有机质含量降低, 围垦导致物质组成趋向均一化。 $\delta^{13}\text{C}$  自陆向海方向增大, 自陆向海盐沼陆相有机质比例下降, 海相有机质比例上升。围垦活动使海相有机质比例上升, 长江入海泥沙对盐沼发育影响力下降, 但长江入海泥沙对盐沼发育仍起主导作用。此研究揭示流域水沙及人类活动对河口盐沼发育的影响, 丰富海岸带研究资料。

**关键词:** 盐沼; 有机质; 长江三角洲; 围垦

中图分类号: P736.21 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2019)02-0001-11

DOI: 10.11759/hyxx20180127001

河口区域陆海相互作用显著, 海陆物质交换频繁, 相对于陆地和海洋系统, 海陆共同作用下河口区物质和能量交换更为复杂多变。河口地区受到径流、潮流、沿岸流、波浪等共同作用<sup>[1-2]</sup>, 沉积物处于较强水动力和高沉积速率环境中。20 世纪 50 年代以来, 受森林砍伐、修建水库等活动影响, 长江流域水沙特性发生较大程度的变化, 对河口区沉积环境产生直接影响<sup>[3]</sup>。寻找合适的指示流域水沙变化及人类活动的“印记”, 对评估河口地区沉积环境平衡与稳定具有重要意义。

随着人口增长和经济发展的需要, 长江口盐沼的开发强度越来越大, 长江口广阔的盐沼区域成为上海市重要的土地资源。盐沼是生态系统中对环境变化比较敏感的区域, 通常位于被潮水周期性淹没、坡度较缓的海岸带地区<sup>[4]</sup>。长江入海泥沙为长江三角洲南翼盐沼淤涨提供了物质基础, 不同来源的有机质沉积过程记录了流域水沙变化及人类活动等信息。通过探究盐沼有机质分布、来源, 可了解流域水沙及人类活动对河口盐沼发育的影响, 有助于认识长江向海岸带地区输运有机质的重要性, 为合理开发、利用盐沼土地资源提供科学依据。

长期以来, 对河口区域有机质研究多集中于长江口有机质的来源<sup>[5-9]</sup>、碳通量及短期季节性变化<sup>[7, 9-12]</sup>, 以及潮滩表层有机质的更新与矿化<sup>[13-14]</sup>, 而对近百年盐沼有机质对流域水沙及围垦的响应的研究鲜有

报道。本文选择长江三角洲南翼盐沼为研究区, 利用碳稳定同位素组成( $\delta^{13}\text{C}$ )、沉积有机碳(POC)含量及粒度资料, 初步分析盐沼地层中有机质分布及来源, 探究流域水沙及围垦活动对盐沼有机质分布及来源的影响。

## 1 研究区概况

长江口是一个三级分汊四口入海的河口, 主泓由南支入海<sup>[15]</sup>, 研究区北接长江口, 南侧为杭州湾, 东为东海。研究区处于扬子地台北东缘, 被多条大断裂包围, 内部地质构造相对稳定, 地表层由厚度为 300 余米的疏松第四系地层, 疏松层下为基岩地层<sup>[16]</sup>。研究区为长江三角洲南翼一部分, 平均海拔 3~4.5 m, 地势低平坦荡<sup>[16]</sup>。研究区属亚热带季风气候, 季风作用下冬冷夏热明显, 冬夏长, 春秋短, 四季分明, 年均气温 15.6℃<sup>[17]</sup>, 雨热同期, 降水充沛。日照时数夏秋多于冬春, 7、8 月份全年太阳辐射最强, 12 月和 1 月全年太阳辐射最弱<sup>[16]</sup>。夏季盛行东南季风, 冬季风向相反。夏季时节多台风近岸, 风向多为偏东风。钻孔取样点位于南汇嘴以北的淤泥质潮间带区域, 为南

收稿日期: 2018-01-27; 修回日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471161)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41471161]

作者简介: 杨钦川(1988-), 男, 山东枣庄人, 硕士研究生, 研究方向: 海洋沉积学, E-mail: sklecmg@163.com; 陈庆强, 通信作者, 博士生导师, 教授, E-mail: qqchen@sklec.cnu.edu.cn

汇东滩。南汇东滩波浪 80% 为风浪，涌浪及混合浪分占 15% 及 5%，以 E 向频率最多<sup>[18]</sup>。南汇东滩呈现西北—东南走向，属中等强度潮汐区域，潮流性质为非正规浅海半日潮流<sup>[19]</sup>。据大治河站潮汐数据，平均潮差为 2.67 m，平均高潮位为 3.24 m，平均低潮位为 0.57 m，涨潮历时小于落潮历时<sup>[17]</sup>，边滩潮流为涨潮分流，落潮合流的往复流。南汇东滩潮间带区域呈现涨潮流优势流，涨潮期水体含沙量均大于落潮期<sup>[18-19]</sup>。长江多年平均径流量为  $8.964 \times 10^{11} \text{ m}^3$  (大通站 1950—2010 年)，多年平均输沙量为  $3.90 \times 10^8 \text{ t}$  (大通站 1951—2010 年)<sup>[20]</sup>。南汇东滩为淤涨型潮滩<sup>[18]</sup>，向东和东南方向呈舌状淤积。持续的高输沙通量为长江三角洲南翼提供了淤涨的物质基础<sup>[15]</sup>，其中由南槽分流约 30% 的长江入海水沙通量<sup>[18]</sup>。

## 2 样品与方法

### 2.1 样品采集

在长江三角洲南翼最大淤涨带内选择孔位进行钻探，钻探时间为 2017 年 3 月中下旬，具体孔位信息见图 1、表 1。根据历史海塘位置选定合适孔位位置，钻探采用旋转钻机取样，钻探过程中采用内径为 90 mm，长度 1 m 的 PVC 采样管。现场取样时，将表层 40 cm 土层挖掉后再全取样。现场取样后，利用同样材质的 PVC 堵头进行封装并用封箱胶带固定堵头，样品封装后及时送回驻地，并运回实验室进行剖分，拍照描述及 1 cm 间隔连续采样，并置于自封

袋保存。NH-1~NH-4 孔自西向东依次排列，钻孔柱样潮坪层序发育典型的砂泥纹层结构<sup>[21]</sup>，据此判断存在潮坪层序，统计潮坪厚度后根据粒度特征将潮坪划分为高、中、低三段(表 1)。

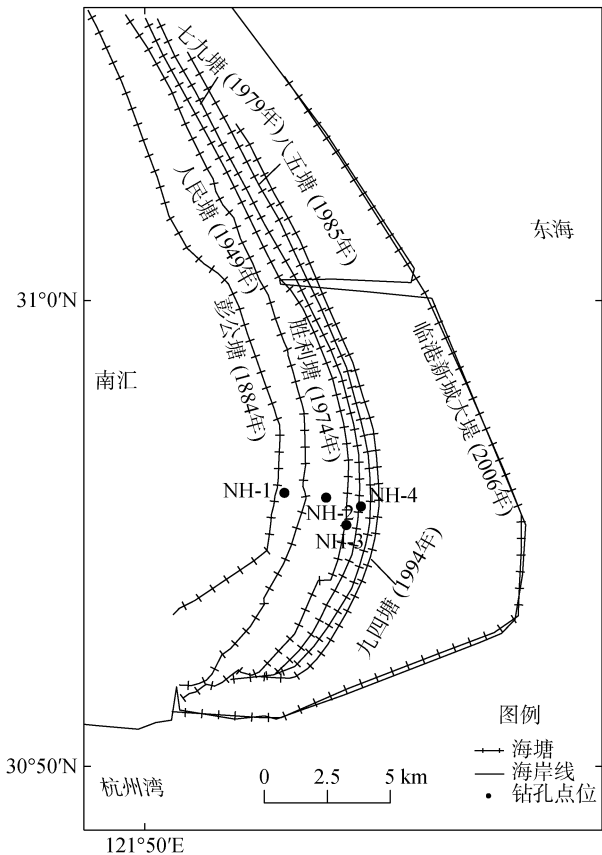


图 1 南汇海塘及钻孔分布示意图  
Fig. 1 Distribution of Nanhui seawalls and drilling cores

表 1 南汇钻孔信息统计

Tab. 1 Detailed information of Nanhui drilling cores

钻孔	钻孔位置	钻孔深度/cm	潮坪厚度/cm	潮坪顶界/cm	潮坪分界/cm		潮坪底界/cm
					高/中	中/低	
NH-1	30°55'52.1"N, 121°53'00.2"E	710	131	56	81	135	187
NH-2	30°55'45.8"N, 121°53'54.1"E	631	115	73	110	142	188
NH-3	30°55'10.6"N, 121°54'20.0"E	644	119	127	157	186	246
NH-4	30°55'34.7"N, 121°54'39.0"E	600	76	131	155	185	207

据《南汇水利志》<sup>[17]</sup>记录，南汇东滩 1952 年潮水可到达人民塘(1949 年修筑)塘脚，1957 年以后滩地转冲为淤，南汇东滩滩地淤积面积增大。因此可推测 NH-2 孔位置处 1952 年处于被潮水经常覆盖区域，可能为中、低潮滩区域。各钻孔均位于两海塘之间，

因此，两海塘中年代较晚的海塘建设年代应为两海塘间正常潮坪层段沉积结束的年份。据南汇东滩海塘建设年代、潮滩沉积速率<sup>[21-22]</sup>及人民塘位置推测 NH-2~NH-4 孔沉积年代大致为 1949—1985 年。同时期，长江中下游区域农业开垦、毁林开发的情况较为

严重<sup>[23]</sup>, 导致长江水沙通量处于历史高位, 其中 1951—1985 年长江大通站年均沙量为 4.71 亿 t<sup>[24]</sup>, 同时期长江潮流界悬沙中值粒径偏粗<sup>[25]</sup>。据《南汇水利志》<sup>[17]</sup>记录七九塘与胜利塘仅相距 400~760 m, 两海塘建筑时间相差 5 年, 同时期围垦活动较强。受此影响 NH-4 孔潮坪层段厚度仅有 76 cm (表 1)。

## 2.2 实验室分析

$\delta^{13}\text{C}$  分析: 取烘干研细的样品约 1 g 置于 50 mL 烧杯内, 称重后使用 4 mol/L 盐酸去除无机碳, 然后用纯水洗至中性, 置于烘箱 60℃ 下烘 48 h 后, 待自然降至室温后称质量, 得到样品酸化前后的质量变化。将经过酸化烘干的样品进行包样后, 利用 Delta plus XP 型稳定同位素质谱仪测定碳稳定同位素。 $\delta^{13}\text{C}$  分析精度为 $\pm 0.1\%$ 。利用碳同位素标样 IAEA-600(caffeine)、IAEA-CH3(cellulose)、GBW04407 炭黑对  $\delta^{13}\text{C}$  进行校正。根据质量数为 44 的离子峰的强度计算样品 POC 含量。根据样品酸化前后样品质量损失, 将酸化样品的  $w(\text{POC})$  换算成全样  $w(\text{POC})$ 。根据前人研究结果<sup>[26]</sup>, 沉积样中溶解有机碳含量低可忽略不计, 故此全样  $w(\text{POC})$  即代表 POC 质量分数。

总氮(TN)含量: 将经过烘干研细的样品取约 40~80 mg 样品, 利用锡舟包样并称质量, 使用 Vario EL-III 元素分析仪测定 TN 质量分数  $w(\text{TN})$ , 分析精度为 $\pm 8\%$ 。

粒度分析: 取约 150 mg 样品置于 50 mL 小烧杯中, 依次加入 10 mL 30%  $\text{H}_2\text{O}_2$  去除有机质, 6 h 后加入 10 mL 10% HCl 溶液去除无机碳。再往小烧杯中加入纯水, 静置过夜, 第二天将上层清液倒掉, 再加

入 10 mL 5% 六偏磷酸钠溶液, 超声震荡 10 min 后利用 Coulter LS13 320 激光粒度分析仪测试。

以上各钻孔潮坪层段, 各实验分析取样数量分别为 NH-1 孔 130 个; NH-2 孔 116 个; NH-3 为 117 个; NH-4 孔为 77 个。

## 3 结果

### 3.1 盐沼粒度组成及沉积层序划分

对 NH-1~NH-4 孔沉积柱样潮坪层段进行粒度分析, 结果表明长江三角洲南翼盐沼潮坪层段粒度组成主要为粉砂, 黏土、砂质含量较粉砂含量低。物质组成与长江口南槽附近悬沙物质组成研究结果一致<sup>[27]</sup>。自上向下平均粒径逐渐变粗。高潮坪层段粒度偏细, 以黏土质粉砂、黏土为主, 中潮坪层段以粉砂及黏土质粉砂为主, 低潮坪层段砂质含量增多, 以砂质粉砂及粉砂为主。

据潮坪层序砂泥纹层结构及沉积特征描述, 大致对潮坪层段进行划分, 利用粒度分析结果可较精确划分潮坪层序。高潮坪层段较中潮坪层段黏粒含量( $< 4 \mu\text{m}$ )高, 而低潮坪层段较中潮坪层段砂质含量( $> 62.5 \mu\text{m}$ )高<sup>[28]</sup>。粉砂对于沉积动力的变化敏感程度较粗、细部分弱<sup>[29]</sup>。因此, 据不同层段黏土、粉砂、砂含量变化及平均粒径对潮坪层序进行划分。NH-1~NH-4 孔潮坪层序划分结果见表 1。分析表 2, 自陆向海潮坪层段粒度增粗。NH-1~NH-2 孔间、NH-3~NH-4 孔间潮坪对应层段黏土、粉砂、砂含量差异较小。NH-3~NH-4 孔较 NH-1~NH-2 孔潮坪对应层段黏土含量降低, 砂质含量上升, 粉砂含量变化较小。

表 2 南汇柱样 NH-1—NH-4 孔潮坪层段粒度百分比统计

Tab. 2 Statistics of grain size ratio of cores from NH-1~NH-4 tidal flats in Nanhui

钻孔	粒度百分比/%								
	黏土			粉砂			砂		
	H	M	L	H	M	L	H	M	L
NH-1	19.42	14.11	10.95	77.31	80.80	73.31	3.27	5.09	15.74
NH-2	19.93	16.42	11.53	76.66	77.48	73.03	3.40	6.10	15.44
NH-3	16.01	13.82	10.67	77.14	76.15	69.03	6.84	10.03	20.29
NH-4	12.51	12.84	11.93	80.83	73.92	67.35	6.66	13.25	20.72

注: H、M、L 分别代表高、中、低潮坪层段, 下同。

盐沼柱样沉积物中值粒径能较好反映颗粒的粗细变化特征<sup>[30]</sup>。对比 4 个钻孔高、中、低潮坪层段中值粒径均值(图 2)发现, 高一中潮坪层段中值粒径较中—低潮坪层段差异小, NH-1~NH-4 孔中、低潮坪

层段差异逐渐缩小。NH-1、NH-2 孔各层段中值粒径差异不大, NH-2~NH-4 孔高、中潮坪层段中值粒径逐渐增大, 低潮坪层段由粗变细。整体上, NH-1~NH-4 孔潮坪层段中值粒径变化特征与表 2 各钻孔粒度百

分比呈现一致的趋势。

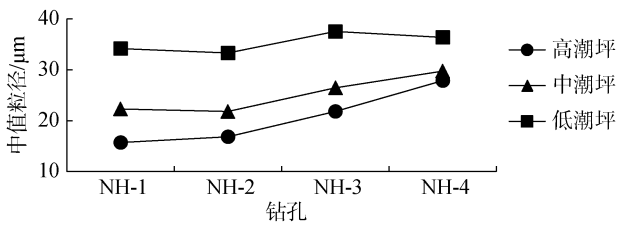


图2 南汇柱样潮坪层段中值粒径变化趋势

Fig. 2 Variation trend of median grain size of salt marsh in Nanhui

### 3.2 盐沼有机质分布特征

NH-1 孔潮坪层段(图3)粒度自上向下增粗,各层段之间粒度差异较大( $M_z$  为平均粒径)。w(POC)为 0.12%~0.61%, 平均值为 0.29%。w(POC)自上向下呈降低趋势, NH-1 高、中潮坪层段 w(POC)差异较小, 低潮坪层段出现较大幅度的波动。w(TN)为 0.020%~0.071%, 平均值为 0.039%。各层段 w(TN)与 w(POC)呈现相似变化趋势。 $\delta^{13}C$  为 -26.4‰~ -23.7‰, 平均值为 -24.7‰。高、中潮坪层段  $\delta^{13}C$  波动幅度明显大于低潮坪层段, 低潮坪层段  $\delta^{13}C$  明显高于高、中潮坪层段。w(POC)/w(TN)为 5.4~15.9, 平均值为 8.9。高潮坪层段 w(POC)/w(TN)波动范围较小, 向下中、低潮坪层段波动幅度变大, 且数值增大。

NH-2 孔潮坪层段(图 3)粒度自上向下增粗, 高、中潮坪层段粒度差异较小。w(POC)为 0.098%~0.56%, 平均值约为 0.30%。w(TN)为 0.021%~0.083%, 平均值为 0.045%。w(POC)与 w(TN)深度变化趋势较一致, 除个别层位含量较高, 高潮坪较中、低潮坪层段含量波动范围较小, 向下含量呈降低趋势。 $\delta^{13}C$  为 -25.8‰~ -22.9‰, 平均为 -24.2‰。高、中、低潮坪层段  $\delta^{13}C$  波动范围较大, 但各层段  $\delta^{13}C$  平均差异小。w(POC)/w(TN)为 4.9~15.5, 平均为 7.7。高、中潮坪层段 w(POC)/w(TN)差异小, 低潮坪层段波动幅度变大。

NH-3 孔潮坪层段(图 3)粒度自上向下增粗, 高、中、低潮坪层段粒度波动范围大。w(POC)为 0.11%~0.75%, 平均值为 0.26%。w(TN)为 0.019%~0.091%, 平均值为 0.039%。w(POC)与 w(TN)在高、中潮坪较低潮坪层段变化幅度大。低潮坪层段除个别较上下层段含量高, w(POC)与 w(TN)向下含量成降低趋势。 $\delta^{13}C$  为 -25.4‰~ -23.1‰, 平均为 -24.3‰。各层段  $\delta^{13}C$

向下呈增大趋势。w(POC)/w(TN)为 4.7~13.3, 平均值为 7.6。自上向下高、中潮坪层段 w(POC)/w(TN)呈减小趋势, 低潮坪层段较高、中潮坪层段 w(POC)/w(TN)增大。

NH-4 孔潮坪层段(图 3)粒度自上向下增粗, 但不同层段之间平均粒径差异不大。w(POC)为 0.084%~0.66%, 平均值为 0.26%。w(TN)为 0.020%~0.074%, 平均值为 0.038%。w(POC)与 w(TN)中潮坪层段较高、低潮坪层段波动幅度大。低潮坪层段 190~191 cm、205~207 cm, w(POC)、w(TN)较上、下层位波动幅度增大。 $\delta^{13}C$  为 -24.9‰~ -22.4‰, 平均为 -23.9‰。高、中、低潮坪层段  $\delta^{13}C$  差异较小。w(POC)/w(TN)为 4.1~12.5, 平均值为 7.7。中潮坪层段 w(POC)/w(TN), 较高、低潮坪层段高。

### 3.3 盐沼有机质变化趋势

南汇钻孔柱样潮坪层段 w(POC)、w(TN)自西向东呈现较一致的变化趋势(图 4)。高潮坪层段, w(POC)平均值自西向东呈先降低后升高再降低趋势, w(TN)平均值自西向东呈逐渐降低趋势。NH-1~NH-3 孔高潮坪层段 w(POC)、w(TN)平均值差异较小。中潮坪层段, 不同钻孔之间 w(POC)、w(TN)平均值差异不大。低潮坪层段, w(POC)、w(TN)平均值自西向东呈现先升高后降低再升高的趋势。NH-1~NH-3 孔潮坪层段 w(POC)、w(TN)自上向下呈现降低趋势, NH-4 孔中、低潮坪层段出现 w(POC)、w(TN)较高的峰值。

南汇钻孔柱样潮坪层段  $\delta^{13}C$  介于 -26.4‰~ -22.4‰, 平均为 -24.9‰~ -24.2‰, 与长江口悬浮颗粒物  $\delta^{13}C$  较一致<sup>[6-8]</sup>, 较长江上、中、下游颗粒有机质  $\delta^{13}C$ <sup>[5]</sup> 分别偏大约 0.1‰、0.9‰、1.2‰。钻孔柱样潮坪层段间  $\delta^{13}C$  平均差异较小, 反映南汇柱样有机质来源相对稳定。单一钻孔柱样不同深度  $\delta^{13}C$  自上向下呈增大的趋势, 且垂向波动频繁。高、中、低潮坪层段  $\delta^{13}C$  平均自西向东呈现升高后降低再升高趋势(图 5)。NH-1 孔中潮坪层段较高潮坪层段  $\delta^{13}C$  平均低。NH-2、NH-3 孔高、中、低潮坪层段  $\delta^{13}C$  平均差异较小, 反映物质来源差异较小。NH-4 孔高、中潮坪层段  $\delta^{13}C$  平均无差异。整体上, 南汇柱样  $\delta^{13}C$  自西向东呈增大趋势。

## 4 讨论

### 4.1 盐沼有机质分布的制约因素

对南汇柱样 w(POC)及 w(TN)与平均粒径作相关

分析,  $w(\text{POC})$ 及  $w(\text{TN})$ 与平均粒径呈负相关关系。由此反映出柱样有机质组分与细颗粒相关程度较高, 进一步将南汇钻孔柱样沉积物划分粒径区间后与  $w(\text{POC})$ 、 $w(\text{TN})$ 分别作相关分析(表 3), 结果显示, 南汇柱样潮坪层段有机质与粒径 $<16 \mu\text{m}$  的细颗粒相关

程度较高, 相关系数均大于 0.53, 有机质与沉积物在  $16\sim 32 \mu\text{m}$  粒径区间相关性出现转折, 相关程度降低, 在 $>32 \mu\text{m}$  粒径区间, 有机质与沉积物粒径区间呈现负相关关系。以上结果表明长江三角洲南翼盐沼有机质主要赋存于细颗粒物( $<16 \mu\text{m}$ )。

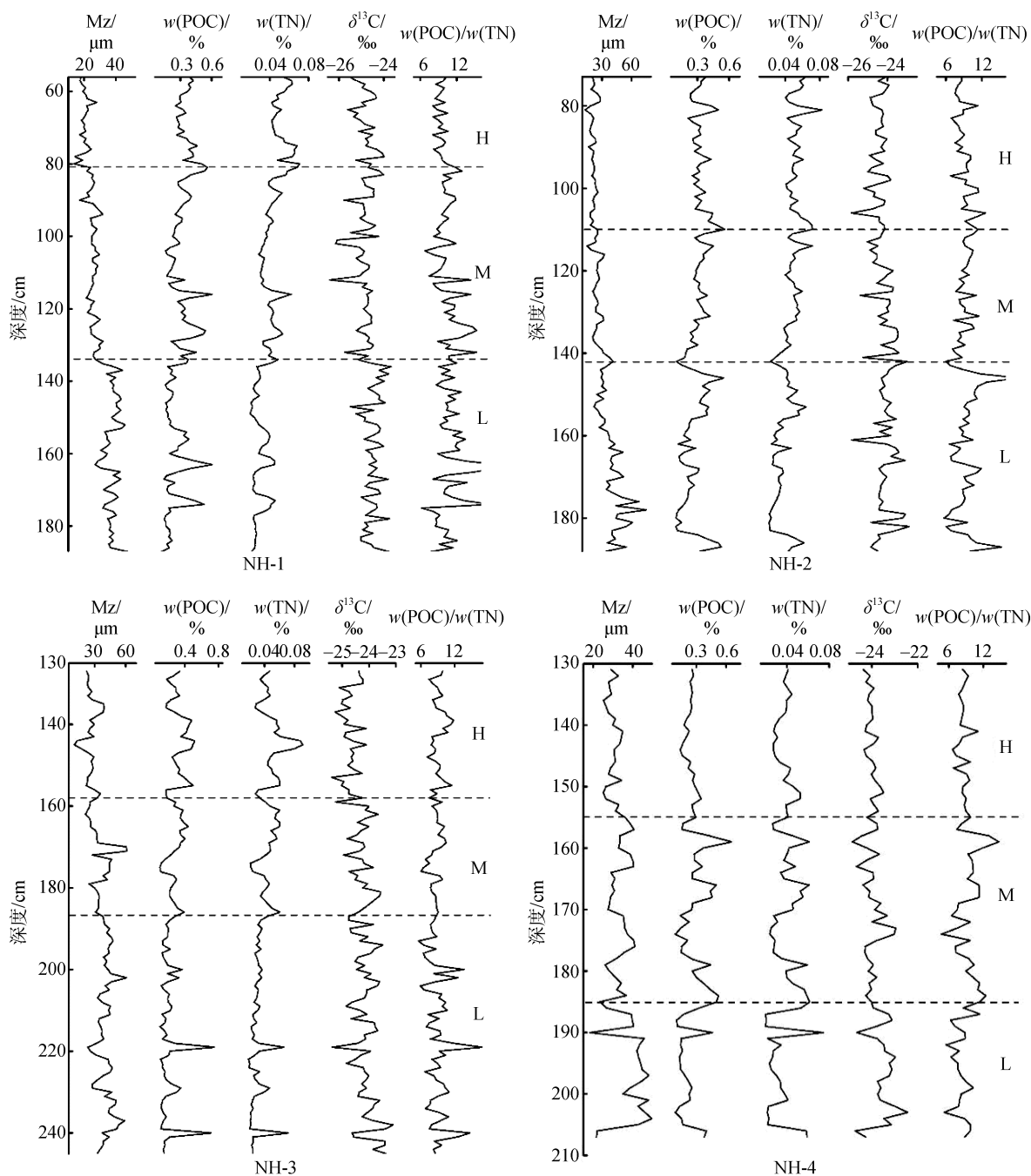


图 3 南汇柱样潮坪层段平均粒径及有机质参数深度变化

Fig. 3 Variation of mean grain size and organic parameters with depth in the salt marsh of Nanhui

据前文可知 NH-2~NH-4 大致沉积年代为 1949—1985 年。有机质与细颗粒物主要赋存于细颗粒中,

据图 4, NH-3 孔  $w(\text{POC})$ 、 $w(\text{TN})$ 除高潮坪层段  $w(\text{POC})$  呈升高趋势外, 中、低潮坪层段均比 NH-2 孔对应层

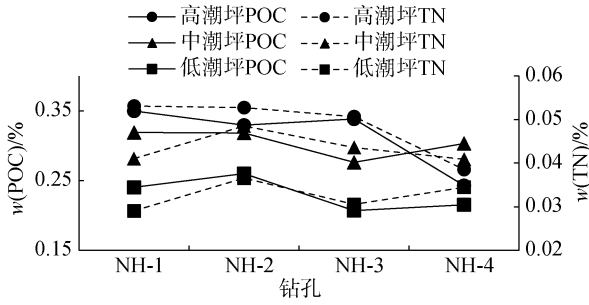


图 4 南汇柱样不同钻孔潮坪层段  $w(\text{POC})$  及  $w(\text{TN})$  变化趋势

Fig. 4 Variation of  $w(\text{POC})$  and  $w(\text{TN})$  with different cores in the salt marsh of Nanhui

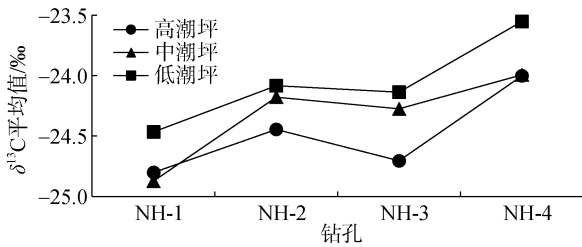


图 5 南汇柱样不同钻孔潮坪层段  $\delta^{13}\text{C}$  平均值

Fig. 5 The mean value of  $\delta^{13}\text{C}$  with different cores in the salt marsh of Nanhui

段含量降低。这一趋势反映出流域输沙组成存在较大的变化, 其中 NH-3 孔潮坪层段粗颗粒含量较

NH-2 孔对应层段高(图 2、表 2), 与这一时期长江入海泥沙偏粗趋势较一致<sup>[25]</sup>。

NH-3 孔中、低潮坪层段  $w(\text{POC})$ 、 $w(\text{TN})$  较 NH-2 孔对应层段降低, 与 NH-3 孔中、低潮坪层段较 NH-2 孔对应层段中值粒径增粗的趋势较一致(图 2), 反映流域输沙增粗导致有机质含量降低。NH-4 孔不同层段间有机质含量差异缩小(图 4)与 NH-4 孔潮坪层段中值粒径差异缩小(图 2)呈一致的趋势。NH-4 孔不同层段间  $w(\text{POC})$ 、 $w(\text{TN})$  差异减小(图 4), 高、中潮坪层段中值粒径、 $\delta^{13}\text{C}$  差异较小也说明物质组成趋向均一化, 反映围垦影响有机质分布, 改变潮坪发育进程。受围垦影响, 潮流到达围垦区后, 由于海塘的屏障作用, 潮流反向回流致表层泥沙重新悬浮, 悬浮泥沙浓度升高, 使沉积物组成趋向均一化, 物质组成差异减小。

#### 4.2 盐沼有机质来源

海岸带地区有机质组成受陆海相互作用影响, 有机质组成反映陆海相混合特征<sup>[31]</sup>, 海岸带地区颗粒有机质沉积层序可反映流域内自然与人类活动<sup>[32]</sup>。陆生植物、淡水藻类及海洋藻类等植物不同的光合作用过程及无机碳来源, 导致不同种类植物碳稳定同位素组成差异较大<sup>[31, 33-34]</sup>。

表 3 南汇柱样潮坪层段  $w(\text{POC})$ 、 $w(\text{TN})$  与粒径分级相关分析

Tab. 3 Pearson correlation coefficient between  $w(\text{POC})$ ,  $w(\text{TN})$  and grain size classification

粒级/ $\mu\text{m}$	相关系数							
	$w(\text{POC})$				$w(\text{TN})$			
	NH-1	NH-2	NH-3	NH-4	NH-1	NH-2	NH-3	NH-4
<2	0.55	0.58	0.66	0.59	0.79	0.80	0.82	0.77
2~4	0.56	0.53	0.63	0.61	0.80	0.78	0.79	0.77
4~8	0.58	0.56	0.67	0.59	0.79	0.80	0.81	0.74
8~16	0.56	0.56	0.67	0.62	0.79	0.78	0.77	0.75
16~32	0.33	0.30	0.47	0.39	0.48	0.39	0.53	0.46
32~62.5	-0.55	-0.54	-0.65	-0.63	-0.81	-0.78	-0.77	-0.75
>62.5	-0.51	-0.52	-0.57	-0.41	-0.69	-0.70	-0.67	-0.52
平均粒径	-0.57	-0.52	-0.56	-0.53	-0.78	-0.72	-0.66	-0.68

注: 以上数据均在 0.01 级别(双尾), 相关性显著。

在自然界, 植物光合作用合成有机质过程中都倾向选择原子质量较轻的  $^{12}\text{C}$ <sup>[31]</sup>。由于光合作用路径和无机碳来源的差异, 会产生不同的同位素分馏效应。因此, 不同植物类型  $\delta^{13}\text{C}$  具有较大差异, 典型陆生 C3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  为  $-28\text{‰} \sim -26\text{‰}$ , 均值约为  $-27\text{‰}$ <sup>[34]</sup>。C4 植物  $\delta^{13}\text{C}$  均值约为  $-14\text{‰}$ <sup>[35]</sup>。海洋藻类  $\delta^{13}\text{C}$  为

$-22\text{‰} \sim -20\text{‰}$ <sup>[36]</sup>, 而且海岸带地区海洋藻类与典型 C3 植物  $\delta^{13}\text{C}$  有约 7‰ 的差异<sup>[34, 37]</sup>。淡水浮游植物  $\delta^{13}\text{C}$  介于  $-42\text{‰} \sim -24\text{‰}$ , 平均约为  $-30\text{‰}$ <sup>[38]</sup>。淡水浮游植物  $\delta^{13}\text{C}$  与典型陆相 C3 植物差异较小。盐沼植物地下根系深度约 20~30 cm<sup>[13]</sup>, 本文所取样品均为 40 cm 以下沉积柱样, 且潮坪层段基本无植物根系。另外,

南汇地区自 1985 年开始采用生物促淤方式,在海堤外侧种植芦苇和互花米草<sup>[39]</sup>,而 NH-1~NH-4 孔位于八五塘(1985 年)内侧。

$\delta^{13}\text{C}$  相对稳定,受到环境因素影响较小<sup>[33-34, 40-41]</sup>,因而可利用  $\delta^{13}\text{C}$  区分有机质的来源。结合盐沼复杂的沉积环境,利用  $\delta^{13}\text{C}$  探究盐沼地层有机质来源。利用两端元混合模型<sup>[7, 12, 42-43]</sup>:  $X=X_l F_l+X_m F_m$  反映盐沼潮坪层段海陆相有机质的比例,其中  $X$  表示  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $F_l$ 、 $F_m$  分别指示陆源相及海相有机质比例( $F_l+F_m=1$ )。长江流域 C3 植物广布, C4 植被比例相对较小,长江淡水浮游植物对悬浮颗粒物有机质贡献偏低<sup>[5]</sup>。因此,陆相端元  $X_l$  取 $-27\text{‰}$ <sup>[34]</sup>,由于海陆相典型植物  $\delta^{13}\text{C}$  有约 7‰ 差异,海相端元  $X_m$  取 $-20\text{‰}$ 。将南汇柱样  $\delta^{13}\text{C}$  输入计算后,利用潮坪不同层段平均值做讨论(图 6)。NH-1~NH-4 孔潮坪层段自陆向海,陆相有机质比例下降,海相有机质比例上升,但 NH-1~NH-4 孔潮坪层段陆相有机质比例均大于 50%(图 6),盐沼发育仍受控于长江入海泥沙。比较各钻孔柱样高、中、低潮坪层段可发现,低潮坪层段相对高、中潮坪层段陆相有机质比例低,海相有机质比例高。陆相有机质比例自陆向海呈现先降低后升高再降低的趋势,海相有机质比例变化趋势则相反。

由前文可知,NH-2 孔位置处 1952 年左右被海水覆盖,1957 年以前李公塘(现为人民塘)外频繁的冲淤下<sup>[17]</sup>,滩地被海水淹没频率增大,导致 NH-2 孔潮坪各层段  $\delta^{13}\text{C}$  较 NH-1 孔增大(图 5),NH-2 孔潮坪层段陆相有机质比例较 NH-1 孔对应层段略有下降,海相有机质比例则相反(图 6)。NH-2~NH-4 孔沉积年代大致为 1949—1985 年,同时期长江水沙通量处于历史高位时期,同时期长江潮流界悬沙中值粒径偏粗<sup>[25]</sup>。据南汇东滩海塘建设年代、潮滩沉积速率<sup>[21-22]</sup>及人民塘位置推测,NH-2~NH-4 潮坪层段记录了这一时期的高入海泥沙通量。受此影响 NH-3 孔潮坪层段陆相有机质比例较 NH-2 孔对应层段略有升高,海相有机质比例则相反(图 6)。围垦、筑堤延长了滩地被海水淹没时间,海相有机质输入滩地机会增加,导致 NH-4 孔潮坪各层段  $\delta^{13}\text{C}$  较 NH-1~NH-3 孔对应层段呈现增大(图 5)。NH-4 孔潮坪层段海相有机质比例较 NH-1~NH-3 孔对应层段高,陆相有机质比例则相反(图 6),反映围垦改变盐沼发育进程。另外,NH-4 孔高、中潮坪层段有机质来源比例较一致(图 6)也反

映海塘的屏障作用上使 NH-4 孔高、中潮坪层段物质组成趋向均一化。

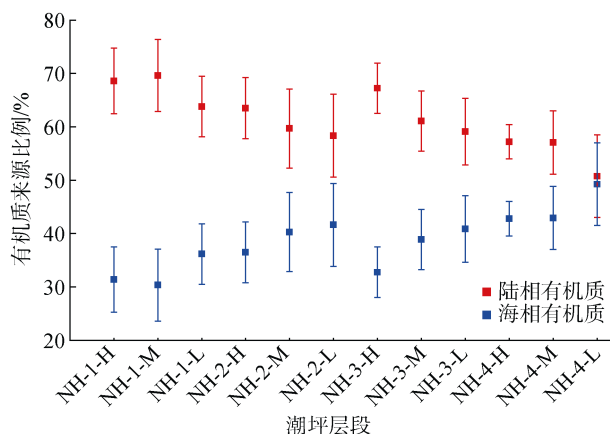


图 6 南汇柱样潮坪不同层段有机质来源比例

Fig. 6 Proportion of organic matter source in the salt marsh of Nanhui

$w(\text{POC})/w(\text{TN})$ 若能严格反映有机质来源,其与沉积有机碳  $\delta^{13}\text{C}$  应存在较好的负相关关系<sup>[7]</sup>。对盐沼潮坪层段沉积有机碳  $\delta^{13}\text{C}$  与  $w(\text{POC})/w(\text{TN})$  相关分析(图 7)显示, NH-1 孔柱样呈现不相关, NH-2~NH-4 孔柱样在  $P<0.01$  水平下呈较弱—中等负相关。因此,在海岸带地区利用  $w(\text{POC})/w(\text{TN})$  追踪物质来源时,仅能部分程度的反映物质来源,应谨慎使用  $w(\text{POC})/w(\text{TN})$  作为物源的指标。

## 5 结论

长江三角洲南翼 NH-1~NH-4 孔潮坪层段沉积物主要为粉砂,自上向下粒度增粗。NH-1~NH-4 孔潮坪层段自陆向海黏土含量降低,砂质含量上升,与潮坪发育时期长江入海泥沙粒度特征较一致。

盐沼潮坪层段有机质主要赋存于细颗粒物中,潮坪层段有机质含量整体呈现自表层向下降的趋势。受长江输沙偏粗的影响,有机质含量自陆向海降低。围垦活动增强导致潮坪不同层段物质组成趋向均一化,反映围垦活动影响有机质分布,改变潮坪发育进程。

盐沼柱样潮坪层段  $\delta^{13}\text{C}$ , 自陆向海呈增大趋势。长江三角洲南翼盐沼沉积物为陆海相有机质混合。整体上,自陆向海,陆相有机质比例下降,海相有机质比例上升,但长江入海泥沙仍主导盐沼发育。

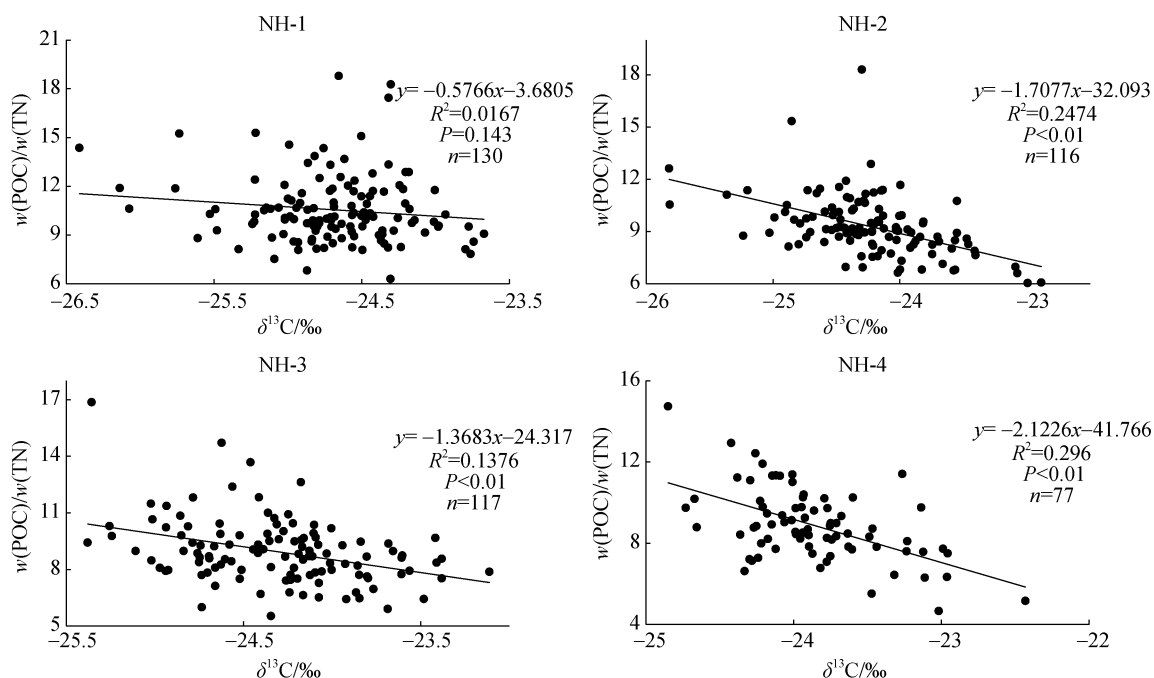


图7 NH-1~NH-4 孔潮坪层段  $w(\text{POC})/w(\text{TN})$ 与  $\delta^{13}\text{C}$  相关性分析

Fig. 7 Correlations between  $w(\text{POC})/w(\text{TN})$  ratios and  $\delta^{13}\text{C}$  values of core NH-1~NH-4 tidal flat

致谢: 本文在样品处理及实验阶段, 得到吴瑞明老师、张国森老师、崔莹老师等指导与帮助, 在此表示衷心感谢!

参考文献:

[1] 陈沈良, 张国安, 谷国传. 长江口南汇边滩的演变及其沉积动力机制[J]. 上海地质, 2003(4): 1-4.  
Chen Shenliang, Zhang Guoan, Gu Guochuan. Geomorphic evolution of Nanhui nearshore of the Yangtze Estuary and its sediment dynamic mechanism[J]. Shanghai Geology, 2003(4): 1-4.

[2] 虞志英, 楼飞. 长江口南汇嘴近岸海床近期演变分析: 兼论长江流域来沙量变化的影响[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 47-53.  
Yu Zhiying, Lou Fei. The evolvement characteristics of Nanhuizui foreland in the Changjiang Estuary, China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(3): 47-53.

[3] 杨颖, 徐韧. 近 30a 来长江口海域生态环境状况变化趋势分析[J]. 海洋科学, 2015, 39(10): 101-107.  
Yang Ying, Xu Ren. The environment variation trend in the Changjiang River Estuary in the past 30a[J]. Marine Sciences, 2015, 39(10): 101-107.

[4] Allen J R L, Pye K. Saltmarshes: Morphodynamics, Conservation, and Engineering Significance[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992.

[5] Wu Ying, Zhang Jing, Liu Sumei, et al. Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71(1): 13-25.

[6] 施光春. 长江口悬浮颗粒有机碳的稳定同位素[J].

海洋通报, 1993, 12(1): 51-55.

Shi Guangchun. Stable isotope of suspended particulate organic carbon in Yangtze Estuary and adjacent waters[J]. Marine Science Bulletin, 1993, 12(1): 51-55.

[7] 吴莹, 张经, 张再峰, 等. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 546-552.

Wu Ying, Zhang Jing, Zhang Zaifeng, et al. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate matter in the Changjiang River[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(5): 546-552.

[8] 余婕, 刘敏, 许世远, 等. 长江口潮滩有机质稳定碳同位素时空分布与来源分析[J]. 地理研究, 2008, 27(4): 847-854.

Yu Jie, Liu Min, Xu Shiyuan, et al. Temporal-spatial distribution of stable carbon isotope of organic matter and source analysis in the Changjiang Estuary[J]. Geographical Research, 2008, 27(4): 847-854.

[9] Liu M, Hou L J, Xu S Y, et al. Organic carbon and nitrogen stable isotopes in the intertidal sediments from the Yangtze Estuary, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2006, 52(12): 1625-1633.

[10] 许斐, 杨守业, 展望, 等. 三峡水库建设对长江下游颗粒有机碳通量及碳同位素组成的影响[J]. 地球化学, 2011, 40(2): 199-208.

Xu Fei, Yang Shouye, Zhan Wang, et al. Influence of the impoundment of the Three Gorges Reservoir on the



- flux and isotopic composition of particulate organic carbon in the lower Changjiang mainstream[J]. *Geochimica*, 2011, 40(2): 199-208.
- [11] Lampman G G, Caraco N F, Cole J J. Spatial and temporal patterns of nutrient concentration and export in the tidal Hudson River [J]. *Estuaries*, 1999, 22(2): 285-296.
- [12] 张凌, 陈繁荣, 殷克东, 等. 珠江口和邻近海域沉积有机质的来源及其沉积通量的时空变化[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(8): 875-881.  
Zhang Ling, Chen Fanrong, Yin Kedong, et al. Spatial and temporal variations of sedimentary organic matter origin and accumulation rate in the Pearl River Estuary and adjacent coastal waters of South China Sea[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(8): 875-881.
- [13] Chen Qingqiang, Gu Hequan, Zhou Juzhen, et al. Trends of soil organic matter turnover in the salt marsh of the Yangtze River estuary[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, 17(1): 101-113.
- [14] 陈庆强, 杨艳, 周菊珍, 等. 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*, 2012, 30(1): 128-136.  
Chen Qingqiang, Yang Yan, Zhou Juzhen, et al. Spatial differentiation of soil organic matter distribution and mineralization in the salt marsh of the Yangtze Estuary[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1): 128-136.
- [15] 陈吉余, 恽才兴, 徐海根, 等. 两千年来长江河口发育的模式[J]. *海洋学报*, 1979, 1(1): 103-111.  
Chen Jiyu, Yun Caixing, Xu Haigen, et al. The developmental mode of the Changjiang River Estuary during last 2000 years[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1979, 1(1): 103-111.
- [16] 王荣华. 上海大辞典[M]. 上海: 上海辞书出版社, 2007: 1-8.  
Wang Ronghua. *Shanghai Lexicographic*[M]. Shanghai: Shanghai Lexicographic Publishing House, 2007: 1-8.
- [17] 《南汇水利志》编纂委员会. 南汇水利志[M]. 北京: 方志出版社, 2011: 32-193.  
Nanhui Water Conservancy Compilation Committee. *Nanhui Water Conservancy Records*[M]. Beijing: Publishing House of Local Records, 2011: 32-193.
- [18] 左书华, 时连强. 南汇嘴潮滩沉积物粒度特征研究[J]. *水道港口*, 2008, 29(2): 88-93.  
Zuo Shuhua, Shi Lianqiang. Hydrodynamic explanation and characteristic of sediment granularity of Nanhuzui foreland in Changjiang Estuary[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2008, 29(2): 88-93.
- [19] 左书华, 李蓓, 杨华. 南汇嘴边滩地形演变及其分析[J]. *水道港口*, 2007, 28(2): 108-112.  
Zuo Shuhua, Li Bei, Yang Hua. Topography evolution and analysis of Nanhui nearshore[J]. *Journal of Waterway and Harbour*, 2007, 28(2): 108-112.
- [20] 中华人民共和国水利部. 中国河流泥沙公报 2011[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 1-18.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. *Chinese River Sediment Bulletin*, 2011[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2012: 1-18.
- [21] 李铁松, 李从先. 潮坪沉积与事件[J]. *科学通报*, 1993, 38(19): 1778-1782.  
Li Tiesong, Li Congxian. The intertidal sedimentation and event[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(19): 1778-1782.
- [22] 火苗, 范代读, 陆琦, 等. 长江口南汇边滩冲淤变化规律与机制[J]. *海洋学报*, 2010, 32(5): 41-51.  
Huo Miao, Fan Daidu, Lu Qi, et al. Decadal variations in the erosion/deposition pattern of Nanhui muddy bank and their mechanism in the Changjiang Delta[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(5): 41-51.
- [23] 应铭, 李九发, 万新宁, 等. 长江大通站输沙量时间序列分析研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(1): 83-87.  
Ying Ming, Li Jiufa, Wan Xinning, et al. Study on time series of sediment discharge at Datong station in the Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1): 83-87.
- [24] 府仁寿, 虞志英, 金鏐, 等. 长江水沙变化发展趋势[J]. *水利学报*, 2003, 34(11): 21-29.  
Fu Renshou, Yu Zhiying, Jin Miu, et al. Variation trend of runoff and sediment load in Yangtze River[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(11): 21-29.
- [25] 杨云平, 张明进, 樊咏阳, 等. 长江河口悬沙颗粒特征变化趋势及成因[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2016, 24(6): 1203-1218.  
Yang Yunping, Zhang Mingjin, Fan Yongyang, et al. Variation trend and causes of suspended sediment characteristic in Yangtze Estuary[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2016, 24(6): 1203-1218.
- [26] 周俊丽. 长江口湿地生态系统有机质的生物地球化学过程研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.  
Zhou Junli. Biogeochemical process of organic materials in the salt marsh of the Changjiang Estuary-Illustrated by the salt marsh in the Chongming Island[D]. Shanghai: East China Normal University, 2005.
- [27] 张一乙, 杨旸, 陈景东, 等. 悬沙组分对再悬浮过程响应的初步研究: 以长江口南槽口门为例[J]. *海洋科学*, 2016, 40(11): 129-137.  
Zhang Yiyi, Yang Yang, Chen Jingdong, et al. Preliminary study of the response of suspended sediment components to resuspension processes in the mouth of the South Channel, Changjiang River Estuary[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(11): 129-137.

- [28] 赵亚楠, 王张华, 吴绪旭, 等. 长江口现代潮滩沉积物粒度特征及其在沉积相识别中的应用[J]. 古地理学报, 2015, 17(3): 405-416.  
Zhao Yanan, Wang Zhanghua, Wu Xuxu, et al. Grain size distribution of modern tidal flat sediments at the Yangtze River mouth and its application to identification of sedimentary facies[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(3): 405-416.
- [29] 郭艳霞, 范代读, 赵娟. 潮坪层序的粒度特征与沉积相划分: 以杭州湾庵东浅滩为例[J]. 海洋地质动态, 2004, 20(5): 9-14.  
Guo Yanxia, Fan Daidu, Zhao Juan. Grain-size characteristics and their applications to the intertidal subfacies division: a case study from Andong tidal flats in the Hangzhou Bay[J]. *Marine Geology Letters*, 2004, 20(5): 9-14.
- [30] 杜吉净, 毛龙江, 张瑞, 等. 海州湾潮滩岩芯沉积物粒度特征及其环境意义[J]. 海洋湖沼通报, 2016(1): 88-96.  
Du Jijing, Mao Longjiang, Zhang Rui, et al. Grain size characteristics of core sediments and their environmental significance in tidal flat of Haizhou Bay[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2016(1): 88-96.
- [31] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States[J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7): 1301-1346.
- [32] Hedges J I, Clark W A, Quay P D, et al. Compositions and fluxes of particulate organic material in the Amazon River[J]. *Limnology & Oceanography*, 1986, 31(4): 717-738.
- [33] Hayes J M. Factors controlling  $^{13}\text{C}$  contents of sedimentary organic compounds: Principles and evidence[J]. *Marine Geology*, 1993, 113(1-2): 111-125.
- [34] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5-6): 213-250.
- [35] O'Leary M. Carbon isotopes in photosynthesis[J]. *Bioscience*, 1988, 38(5): 328-336.
- [36] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. *Chemical Geology*, 1994, 144(3-4): 289-302.
- [37] Prahl F G, Ertel J R, Goni M A, et al. Terrestrial organic carbon contributions to sediments on the Washington margin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(14): 3035-3048.
- [38] Thorp J H, Delong M D, Greenwood K S, et al. Isotopic analysis of three food web theories in constricted and floodplain regions of a large river[J]. *Oecologia*, 1998, 117(4): 551-563.
- [39] 刘瑜, 韩震. 基于遥感的长江口南汇潮滩植被群落时空动态变化[J]. 上海海洋大学学报, 2009, 18(5): 579-585.  
Liu Yu, Han Zhen. The study of spatial and temporal variations on vegetation communities in Nanhui tidal flat of Changjiang Estuary by using remote sensing[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2009, 18(5): 579-585.
- [40] Meyers P A, Eadie B J. Sources, degradation and recycling of organic matter associated with sinking particles in Lake Michigan[J]. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(1): 47-56.
- [41] Schelske C L, Hodell D A. Using carbon isotopes of bulk sedimentary organic matter to reconstruct the history of nutrient loading and eutrophication in Lake Erie[J]. *Limnology & Oceanography*, 1995, 40(5): 918-929.
- [42] Thornton S F, Mermanus J. Application of organic carbon and nitrogen stable isotope and C/N ratios as source indicators of organic matter provenance in estuarine systems: Evidence from the Tay Estuary, Scotland[J]. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, 1994, 38(3): 219-233.

# Source and distribution of organic matter in salt marsh buried in south flank of the Yangtze River Delta

YANG Qin-chuan, CHEN Qing-qiang, YAO Zhen-xing

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

**Received:** Jan. 27, 2018

**Key words:** salt marsh; organic matter; the Yangtze River Delta; reclamation

**Abstract:** Based on the determination of particulate organic carbon(POC)content, total nitrogen(TN)content, organic carbon isotope ratios( $\delta^{13}\text{C}$ ), and grain size with sediment drilling cores in the maximum siltation zone of the south flank of the Yangtze River Delta, the source and distribution of organic matter in salt marsh is investigated in this study. The results show that the distribution of organic matter in the salt marsh is controlled by the Yangtze River sediment load and reclamation. The organic matter is mainly concentrated in fine grain sediments. The coarse sediment from the Yangtze River results in the decline of  $w(\text{POC})$ , and  $w(\text{TN})$ . Reclamation leads to homogenization of material composition. The variation trend of  $\delta^{13}\text{C}$  value show increase from landward to seaward. The proportion of terrestrial organic matter decreases and marine organic matter increases from landward to seaward. The reclamation increases the chance of marine organic matter transportation into salt marsh. Although the influence of the Yangtze River on the development process of salt marsh has declined, the Yangtze River still controls the development process. This study reveals the impact of the Yangtze River sediment and human activity on salt marsh development and enriches the research of coastal zone.

(本文编辑: 刘珊珊)