

# 春季长江口颗粒有机碳年际分布变化及其影响因素分析

李倩<sup>1,3</sup>, 张珊珊<sup>1</sup>, 线薇薇<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋生态与环境科学重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 根据 2013—2016 年春季(5 月)长江口及其邻近海域 4 个航次环境综合调查数据, 探讨春季长江口水体颗粒有机碳(POC)时空分布特征及其环境影响因素。结果显示: 2013—2016 年春季长江口 POC 浓度范围为 0.22~16.99 mg/L, 均值为 1.80 mg/L, 总水域 POC 年际间变化显著, 底层浓度高于表层。从口门区、近岸区和近海区三个子水域来看, 除近岸底层 POC 浓度处于高值, 年际差异不显著之外, 其余水域的表、底层均存在空间变异和年际差异。POC 浓度在口门附近偏南部水域达到高值, 后沿长江冲淡水(CDW)方向降低, 低值区位于近海底层, 但表层 POC 在近海水域 123°E 附近出现次高值。POC 浓度与盐度之间具有显著负相关关系, 且相关性逐年递减; POC 浓度与总悬浮物浓度(TSM)呈显著正相关, 底层相关性高于表层; 近海区表层 POC 与叶绿素 *a* 正相关关系极显著, 二者高值区均分布在 123°E 附近。入海径流量与长江口春季 POC 浓度呈现出截然相反的年际变化趋势, 径流对有机碳的稀释作用高于其输入作用。长江口春季 POC 主要以碎屑源为主, 其分布与有机碳源、海水的稀释作用、悬浮物运动等多种因素有关, 高浊水体中悬浮物影响显著, 陆源有机碳对 POC 的影响在长江口近海水域有所弱化, 而浮游植物对 POC 的贡献凸显。

**关键词:** 长江口; 颗粒有机碳(POC); 时空分布; 影响因素; 春季

中图分类号: P734 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)01-0032-12

DOI: 10.11759/hyhx20200612001

进入 21 世纪以来, 人类社会快速发展与地球环境不断恶化之间的矛盾日益突出, 关于全球变化的研究已经成为全世界科学家的焦点, 其中碳的生物地球化学循环至关重要<sup>[1]</sup>。海洋是地球上最大的碳库, 全球各大河流每年经由河口向近海水域输送的有机碳总量为 0.38 Gt, 颗粒有机碳(POC)和溶解有机碳(DOC)分别约占 45%和 55%<sup>[2]</sup>。河口是有机碳迁移、埋藏和再矿化的主要通道和场所, 具有较高的有机碳沉积速率及高碳汇效应潜力, 在全球碳的生物地球化学循环中有着重要作用, 已引起学者的广泛研究<sup>[3]</sup>。国外在有机碳的研究上有着长时间和大尺度的研究经验, 对密西西比河、墨西哥湾、塞纳河<sup>[4]</sup>等大河河口和海湾的研究十分成熟, 国内在许多大中河口体系<sup>[5-6]</sup>及陆架边缘海<sup>[7]</sup>都开展了系统多面的研究, 内容包括有机碳通量、来源、迁移转化、时空分布特征及其影响因素等方面。

长江口作为环太平洋第一大河的入海口, 是一个典型的高浊河口, 径潮流交汇导致泥沙悬浮与沉积, 盐淡水交锋发生物质与能量交换, POC 的迁移过程受

到潮汐、季风、上升流、浮游植物生长等各种物理化学生物作用影响, 加之长江流域及长三角地区经济的快速发展、城市化进程的加快, 人类活动(如农业生产、水土保持和水利建设)的增强使得河流流域、潮感湿地和近海水域的水文、生物、物化条件等产生诸多变化, 进而对水体携带的物质也产生了必然影响, 河口及近海的生态环境面临许多挑战, 探究水体中 POC 在长江河口的迁移转化、时空分布及影响因素是理解全球碳循环过程的一个关键问题<sup>[8]</sup>。

过去的四十年来, 特别是在三峡工程建成之后, 长江口及其毗邻海域水体及沉积物<sup>[9]</sup>中的 POC 状况受到国内外众多专家的关注和研究。蔡德陵<sup>[10]</sup>最早用 1981 年的碳同位素数据研究长江口和东海中 POC 的来源和运移, 指出枯水期和洪水期优势碳源

收稿日期: 2020-06-12; 修回日期: 2020-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31872568)

[Foundation: National Nature Science Foundation of China, No. 31872568]

作者简介: 李倩(1996-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事海洋环境化学研究, 电话: 15588641637, E-mail: adorableharper@163.com; 线薇薇(1969-), 女, 通信作者, 研究员, E-mail: wxwian@qdio.ac.cn

的区别;吴莹等<sup>[11]</sup>基于长江口徐六泾站的观测结果探讨了 POC 的季节输送规律及三峡截流前后其入海通量的变化,后又用木质素<sup>[12]</sup>、氨基酸<sup>[13]</sup>等标志物来反映 POC 在长江口及其邻近海域的季节变化;高磊等<sup>[14]</sup>在长江和邻近东海陆架的两个航次调查表明 POC 的分布和变化主要受与悬浮颗粒物有关的过程控制。诸多研究涉及日变化、月变化和季度变化的观察分析,但进行连续多年平行调查的研究较少。本文依据 2013—2016 年连续四年间长江口春季有机碳的调查资料,探讨近些年长江口表、底层水体中 POC 的时空分布和环境影响因素以及年际间入海径流量和河口 POC 的变化关系,这一过程的研究为深入认识长江口及邻近东海陆架 POC 的迁移分布规律及其环境演变指示等方面提供数据支持和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查站位设置

于 2013 年(5 月 13—21 日)、2014 年(5 月 6—14 日)、2015 年(5 月 5—8 日)及 2016 年(4 月 27 日—5 月 1 日)春季对长江口及其邻近海域(30°45'N—32°N, 121°E—123°20'E)完成 4 个航次综合调查。自南向北共设置 6 个断面,涵盖 40 个站位,在实际采样过程中会根据海况限制对站位进行合理增删。由于不同水域间的水文动力学条件、地形地貌及环境要素明显不同,本文依据盐度(S)和总悬浮物(TSM)浓度的分布特征将调查海域分成口门区、近岸区及近海区 3 个子水域(见图 1),其中阴影处为最大浑浊带(TMZ)范围<sup>[15]</sup>,主要分布于近岸区。

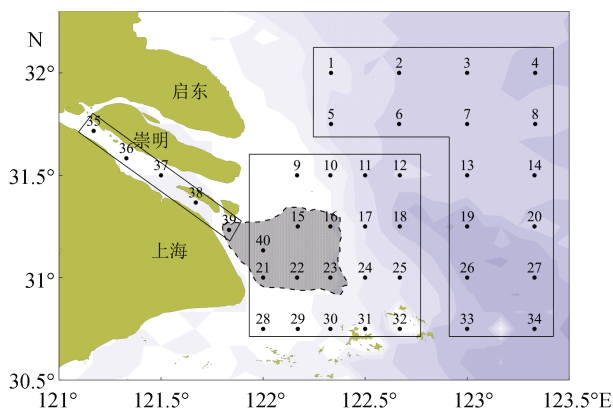


图 1 长江口水域调查站位

Fig. 1 Location of sampling stations in the Yangtze River Estuary

### 1.2 采样与测定方法

根据《海洋调查规范》(GB12763-2007)完成各站位水样采集,现场使用 Niskin 采水器采取表、底层水样,并用 Sea-Bird-25 CTD 同步测定温、盐、深三项指标。采集上来的海水立即用 0.7 μm 孔径的 Whatman GF/F 玻璃纤维膜(在马弗炉中 450 °C 预灼烧 6 h 后称重)进行负压抽滤,过滤体积视水体浑浊程度而定。所得滤膜对折后用锡纸包裹,编号置于 -20 °C 冰箱冷冻保存,用于测定 POC、TSM 及叶绿素 *a*(Chl-*a*)。

将滤膜样品取出冷冻干燥 24 h 之后置于干燥器中,待恒重后称重,用重量差值法测定所过滤 TSM 的质量,并除以过滤体积计算 TSM 浓度;称重后的膜样放置在蒸发皿上,在密闭的干燥器中用浓盐酸熏蒸 24 h 以去除样品中的无机碳,再将酸化后的膜样于 60 °C 的烘箱中低温烘干 24 h,最后用德国 Elemental Analyzer Vario EL cube 型元素分析仪测定样品中碳的质量分数(POC%),用 TSM 浓度乘以 POC% 计算 POC 浓度;Chl-*a* 样品的测定采用丙酮萃取荧光法,经 90% 丙酮萃取后取上清液用 Turner-Designs-Model 10 荧光光度计测定。

### 1.3 数据处理方法

本文使用 IBM SPSS 21.0 软件完成对数据的方差分析、非参数检验、Pearson 相关性分析(双尾检验),RStudio 进行 Mann-Kendall 检验,用 Origin 9.4 软件绘制箱线图、折线图和参数间的回归分析图,并使用 Surfer 16.3 软件作平面分布图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 POC 时空分布

2013—2016 年数据分析结果显示(表 1),在调查年份春季长江口水域 POC 的质量浓度变化范围为 0.22~16.99 mg/L,均值为 1.80 mg/L,低于 2007、2009、2011 和 2012 年秋季同调查水域调查结果<sup>[16]</sup>(2.30 mg/L)。其中,表层 POC 的浓度范围为 0.29~8.22 mg/L,均值为 1.60 mg/L,底层浓度范围为 0.22~16.99 mg/L,变化范围较大,均值为 2.03 mg/L。总水域表、底层年际间波动显著,表层水体 POC 由 2013 年显著升高至 2014 年达到最高值,至 2015 年稍有下降,之后显著下降到 2016 年并达到最低水平;底层年际变化趋势同表层相似。

表 1 2013—2016 年春季长江口不同区域 POC 浓度/(mg/L)

Tab. 1 Particulate organic carbon (POC) concentrations in different regions of the Yangtze River Estuary in spring 2013–2016 (Unit: mg/L)

水域	水层	2013		2014		2015		2016	
		平均值±S.D.	范围	平均值±S.D.	范围	平均值±S.D.	范围	平均值±S.D.	范围
总水域	表层	1.37±1.11 <sup>a, b</sup>	0.49~5.55	2.28±1.97 <sup>c</sup>	1.00~8.22	1.77±1.41 <sup>a, c</sup>	0.60~5.53	0.95±0.59 <sup>b</sup>	0.29~2.59
	底层	2.09±3.47 <sup>a</sup>	0.36~16.99	2.22±1.52 <sup>b</sup>	0.94~6.03	2.55±2.52 <sup>b</sup>	0.65~11.54	1.29±1.93 <sup>a</sup>	0.22~10.51
口门区	表层	1.43±0.23 <sup>a, b</sup>	1.16~1.80	3.50±2.15 <sup>a</sup>	2.27~7.32	2.65±0.26 <sup>a</sup>	2.35~3.01	1.05±0.35 <sup>b</sup>	0.75~1.64
	底层	1.64±0.28 <sup>a</sup>	1.17~1.89	3.60±1.00 <sup>b</sup>	2.85~5.14	3.09±0.91 <sup>a, b</sup>	2.53~4.71	1.44±0.36 <sup>a</sup>	1.08~1.96
近岸区	表层	1.41±1.48 <sup>a</sup>	0.49~5.55	2.91±2.37 <sup>b</sup>	1.04~8.22	2.28±1.72 <sup>a, b</sup>	0.67~5.53	1.08±0.74 <sup>a</sup>	0.29~2.59
	底层	3.18±4.60	0.45~16.99	2.63±1.79	0.94~6.03	3.70±3.34	1.07~11.54	2.16±2.70	0.34~10.51
近海区	表层	1.28±0.62 <sup>a, b</sup>	0.59~2.64	1.19±0.19 <sup>a</sup>	1.00~1.63	0.82±0.21 <sup>b, c</sup>	0.60~1.30	0.76±0.40 <sup>c</sup>	0.30~1.68
	底层	0.63±0.23 <sup>a</sup>	0.36~1.12	1.40±0.76 <sup>b</sup>	0.97~3.93	1.10±0.28 <sup>b</sup>	0.65~1.48	0.37±0.16 <sup>a</sup>	0.22~0.77

注: S.D.代表标准偏差, 同一行中不同的上标字母表示年际间差异显著( $P < 0.05$ )

垂直分布上, 底层水体的 POC 平均浓度高于表层, 这一特征在口门区和近岸区十分明显, 但在近海区出现底层低于表层的现象(2013、2016 年), 与金海燕 2001 年春季的调查结果相一致<sup>[7]</sup>, 且口门区和近岸区的 POC 值明显高于近海区, 说明水域之间存在空间分布差异。各水域还存有显著的年际变异, 但近岸区的底层 POC 浓度多年处于高值, 年际变化并不剧烈, 根据杨海飞<sup>[17]</sup>的研究推测此特征与水体悬沙浓度受水动力主导有关, 口门尤其是 TMZ 区底部水动力条件复杂, 潮流动力对底层泥沙具有剪切作用, 下层水体及沉积物反复沉降—再悬浮, 造成 POC 浓度常年保持较高水平。

结合平面分布(图 2), 多年来表层 POC 浓度在口门区外南部 TMZ 或洋山港附近增至最高值, 而后沿长江冲淡水(CDW)扩展方向(春、夏两季在 122°10'~122°30'E 之间转向东北)逐渐减小, 但于调查水域的东北方向又有小幅回升, 在 123°E 附近的近海水域再次出现次高值, 甚至 2016 年出现多个次高值区(图 2e)。底层 POC 浓度在口门外呈舌状分布, 随离岸距离增大、海水入侵而减小, 表、底层的浓度差距也随之减小, 但 2014 年在东北部出现次高峰(图 2b)。

## 2.2 POC 时空分布影响因素

长江口水动力条件多元化, 物理化学环境复杂多变, 不同水域之间的多种环境因子变化梯度大, 以及春季伴随着人类活动影响和浮游动植物的现场生产等, 诸多因素将在 POC 由河流至河口迁移转化的过程中直接或间接地影响其浓度与分布。本文根据 2013~2016 年春季长江口水域的综合调查数据, 对表

层和底层 POC 浓度与 S、TSM 以及 Chl-*a* 等环境指数进行相关性分析, 分别探讨各水域不同物理化学条件和初级生产力对春季 POC 分布的影响以及河流输送颗粒态有机碳及近海初级生产的变化情况。

### 2.2.1 POC 与 TSM 的关系

水体中的 POC 一般分为陆源输入和海源自生, 存在形式既包括悬浮的有机颗粒和碎屑, 又有通过吸附在泥沙或生物质等颗粒上输送的有机部分, 悬浮物是其直接组成和携带者, 从径流到近海悬浮/沉积等动力过程不断进行, POC 必然随 TSM 浓度发生改变。表 2 显示底层 TSM 普遍高于表层的浓度, 且底层变化范围更大, 与 POC 调查结果相似。历年来长江口表、层水域 POC 与 TSM 之间均存在极显著的线性正相关关系(表 3), 其中底层水域的相关性逐年递增, TSM 对底层 POC 的影响逐渐增强, 但表层在 2016 年降至最低, 推测与 2016 年大量的浮游植物活动相关。图 3 可见, 底层 POC 与 TSM 浓度的正相关程度高于表层。由于表层 POC 中活体成分相对较多, 其浓度分布不仅与吸附/解吸相关, 也与生物活动及其限制条件有关, 底层受潮汐动力、水团混合等影响悬浮和沉积活动格外活跃, 高浓度 TSM 对 POC 的影响更直接显著, 与 POC 的相关性更强, 辅证了长江口 POC 受悬浮颗粒物动力学控制的结论<sup>[14]</sup>。

由获得的回归方程可知(图 3), 春季长江口高浊度水域的表、底层 POC%可分别视为常数 0.9%和 1%, 与 2012 年<sup>[18]</sup>春季的计算结果(0.9%)相近, 均高于冬季(0.4%)。图 4 通过非线性拟合得到春季长江口表层 POC%与 TSM 的回归方程, 同宋晓红<sup>[19]</sup>等人的数据趋势一致。拟合曲线符合逻辑斯蒂增长模型, 根据斜

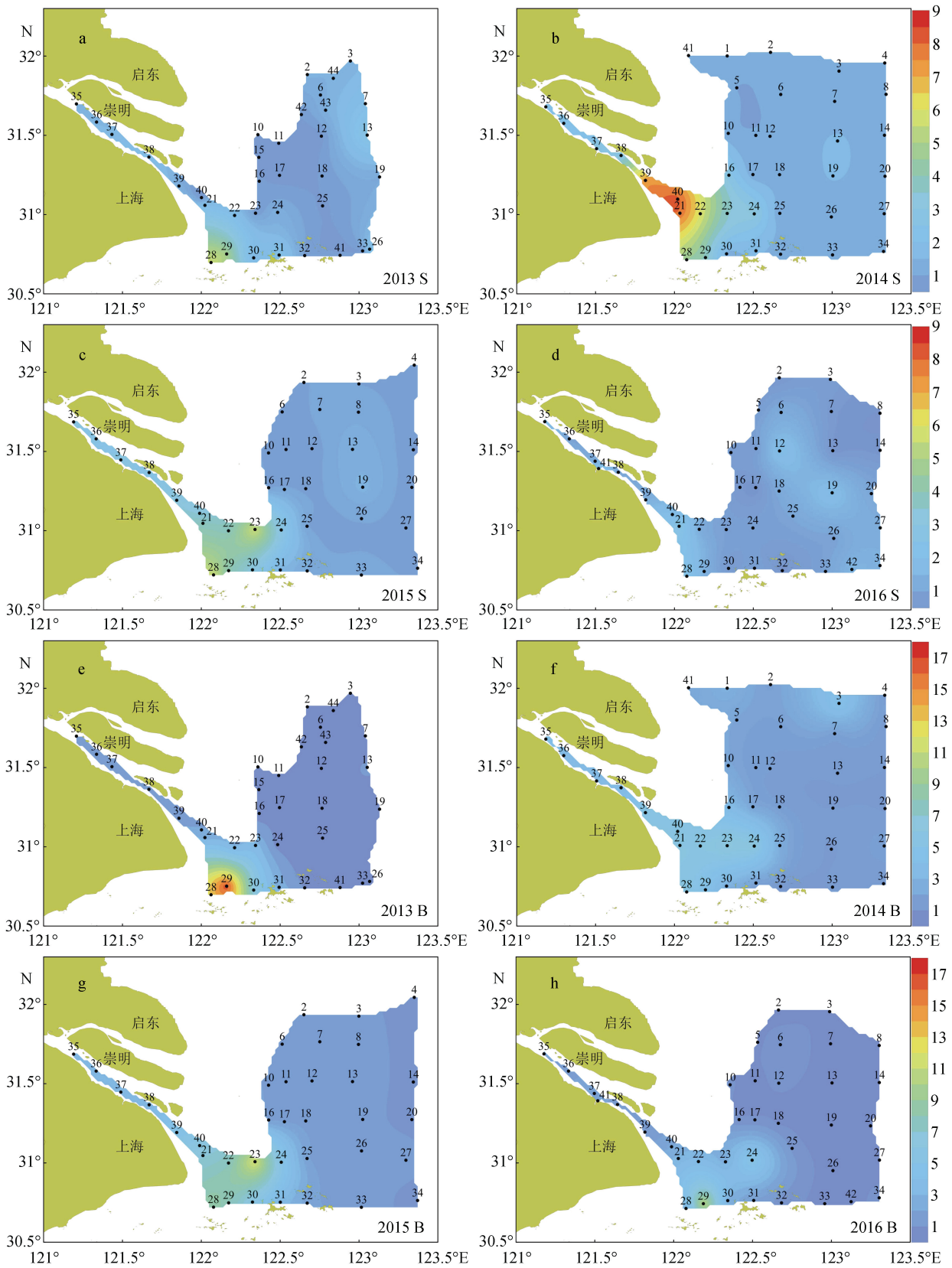


图2 2013—2016年春季长江口 POC 浓度/(mg/L)平面分布(S: 表层, B: 底层)

Fig. 2 Horizontal distributions of particulate organic carbon (POC) concentration (mg/L) in the Yangtze River Estuary in spring 2013–2016 (S: surface, B: bottom)

表 2 2013—2016 年春季长江口 S 及 TSM 浓度/(mg/L)

Tab. 2 Salinity and total suspended matter concentrations (mg/L) in the Yangtze River Estuary in spring 2013–2016

参数	水层	2013		2014		2015		2016	
		平均值±S.D.	范围	平均值±S.D.	范围	平均值±S.D.	范围	平均值±S.D.	范围
S	表层	/	/	21.25±10.90	0.16~32.15	20.91±10.11	0.16~31.54	20.00±11.46	0.13~31.15
	底层	/	/	24.68±12.32	0.16~33.39	24.86±11.95	0.16~33.30	25.05±11.82	0.13~34.39
TSM	表层	45.62±117.94	0.55~2.64	118.49±212.06	1.44~819.07	100.86±144.71	0.83~544.87	39.72±55.49	0.38~209.53
	底层	109.30±261.72	2.38~1200.87	93.52±133.40	1.05~517.60	159.82±259.04	1.63~1093.13	90.58±161.98	1.28~764.73

注: S.D.代表标准偏差; /代表数据缺失

表 3 2013—2016 年春季长江口 POC 与环境因子的相关关系

Tab. 3 Correlation of POC and environment factors in spring 2013—2016

参数	水层	2013	2014	2015	2016
S	表层	/	-0.698**	-0.588**	-0.450**
	底层	/	-0.538**	-0.427*	-0.371*
TSM	表层	0.804**	0.892**	0.952**	0.671**
	底层	0.854**	0.891**	0.921**	0.977**
Chl- <i>a</i>	表层	0.132	-0.181	-0.152	0.194
	底层	/	0.038	-0.071	0.119

注: \*代表有显著相关性,  $P < 0.05$ (双尾); \*\*代表有极显著相关性,  $P < 0.01$ (双尾); /代表数据缺失

率变化将其以  $TSM = 22 \text{ mg/L}$  为界分为对数期( $TSM < 22 \text{ mg/L}$ )和稳定期( $TSM > 22 \text{ mg/L}$ )。对数期 POC%随 TSM 增大呈指数型减小, 说明在低浊度水域 POC 和 TSM 并不具有相关性( $R^2 = 0.0049$ ), TSM 在较窄的变化范围内, 其有机和无机组分所占比例的跨度极大, 影响因素更为复杂, 今后还需要进一步做多元

探讨。如粒径大小和生物活动作用, 由于悬浮物主要由无机泥沙矿物和有机颗粒(碎屑及生物部分)等成分组成, 在输运过程中, TSM 浓度和粒径变化对 POC 的相对含量也会产生影响<sup>[20]</sup>。水体中有机碳的聚集很大程度上受矿物颗粒吸附作用控制, 特别是比表面积大、具有负电荷的细粒级粘土矿物<sup>[21]</sup>, 经过 TMZ 的“过滤器”<sup>[22]</sup>作用之后, 泥沙沉降, TSM 浓度及粒径在近海附近的水域迅速减小, 水体透光度增加, 组分以浮游生物为主; 稳定期 TSM 浓度较高, POC%降至稳定水平, 代表站点位于口门区、南部洋山港附近及 TMZ 范围内, 其中 POC%在 TMZ 的平均值为 2.56%, 与 Uncles<sup>[23]</sup>等人对潮汐河口 TMZ 的 POC%计算结果(2%)相近, 他认为造成 TMZ 区域如此低值的原因是悬浮物上的异养细菌对 POC 的呼吸消耗。除此之外, 在拦门沙附近的 TSM 浓度高值区, 悬浮颗粒物粒径大, 水体浊度高, 浮游植物生产力贡献低, 加之大量的粗颗粒泥沙吸附 POC 能力有限, POC 质量分数被无机矿物颗粒所稀释而平稳处于低值。

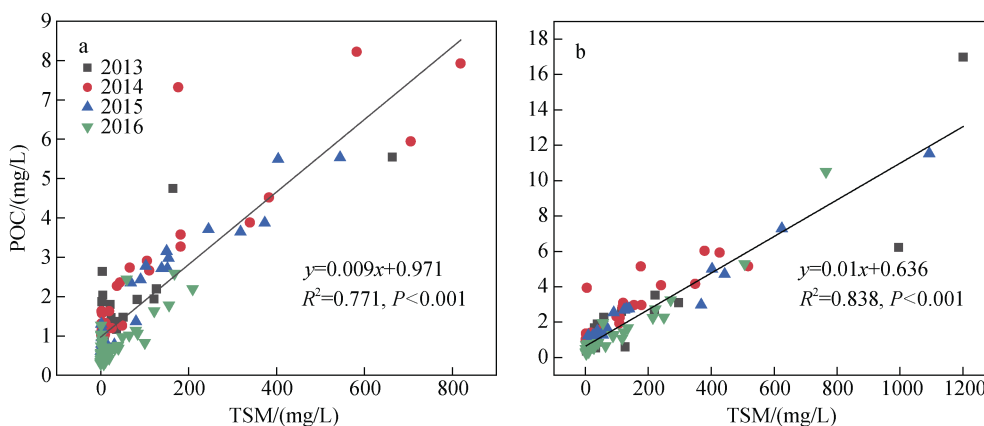


图 3 春季长江口 POC 与 TSM 的变化关系(a: 表层, b: 底层)

Fig. 3 Regression relationships between POC and total suspended matter (TSM) in the Yangtze River Estuary in spring (a: surface, b: bottom)

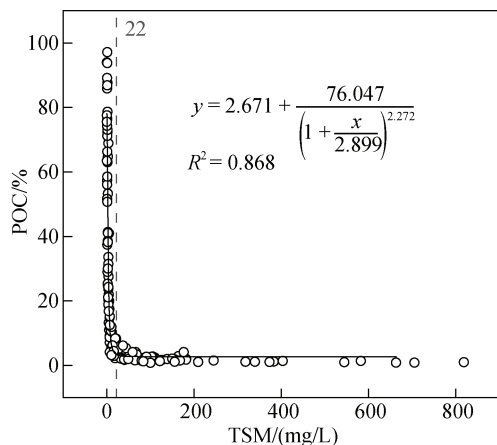


图 4 春季长江口表层 POC%与 TSM 的变化关系

Fig. 4 Regression relationship between POC% and TSM in the surface layer of Yangtze River Estuary in spring

### 2.2.2 POC 与盐度的关系

河口区盐淡水交锋，泥沙进入盐水，颗粒间会因表面的电学作用而相互吸引絮凝成团，同时盐度的增加亦将伴随着大量海水对陆源 POC 的稀释作用，因此盐度梯度的剧烈变化对 POC 分布影响极大。表 2 显示调查水域的盐度在 0.13~34.39 之间变化，表层盐度逐年递减，而底层盐度逐年递增，受 CDW 影响明显可见底层高于表层。由表 3 的相关性分析可知，2013—2016 年春季长江口表层 POC 与 S 均呈极显著的负相关性，底层 POC 与 S 亦具有显著负相关关系，同张珊珊<sup>[24]</sup>的计算结果一致。

结合图 5 发现二者的相关性逐年减小，2014 年表层相关性最高(图 5a)，与 TSM 的年际影响变化相反(表 3)，随着河口 TSM 影响的逐年增强，盐度对 POC 的作用相对减弱。观察到不同水域的盐度梯度较大，POC 的离散程度高，数据点分散，因此分盐度区间探讨其影响，图 5(g)、(h)综合多年表、底层数据表明，在水体由低盐度向高盐度海水过渡的过程中：当表层  $S < 7$ ，底层  $S < 10$  时，POC 浓度随 S 的增加缓慢上升；表层  $7 < S < 9$ ，底层  $10 < S < 15$  时，POC 达到最大浓度水平，底层峰值浓度较表层浓度变幅小，对应 S 范围宽。说明低盐区海水稀释较弱，复杂的水动力作用更强烈，颗粒物在水流驱动下做悬浮沉降、再悬浮再沉降的周期性运动<sup>[15]</sup>，使 POC 在底层具有较长的停留时间，近岸沉积物再悬浮是其重要碳源<sup>[12]</sup>；当表层  $S > 9$ ，底层  $S > 15$  时，POC 浓度随 S 下降而迅速降低，此时海水的稀释作用高于输入作用<sup>[25]</sup>，尤以底层格外显著，应是受高盐海水从底层楔入的影响，

CDW 的扩展势力沿垂直方向减弱。POC 随盐度的变化表明，河口 POC 浓度不会完全随着盐度的增加而降低，盐淡水混合过程中海水的稀释作用并不会一直处于主导地位，水动力和碳源的变化叠加生物作用对不同碳的形态、转化和分配有很大影响。

### 2.2.3 POC 与浮游植物的关系

长江淡水源源不断地输入为河口及毗邻海域提供了大量的营养物质，使长江口地区拥有着丰富的生物资源，河口生态系统成为生产力最高的生态系统之一，金海燕<sup>[7]</sup>的研究表明上层的 POC 除了陆源有机碳，生物活动是其主要来源。调查海区表层平均水温在春季回升至 17.0℃，层化明显有利于浮游植物生长，对 POC 的影响不容忽视。Chl-*a* 可以作为表征浮游植物现存量的指标以及影响初级生产的重要因子，表 3 显示总水域表底层 POC 与 Chl-*a* 的相关系数均没有达到显著性水平( $P < 0.05$ )，但现场生产受水体温度、浊度和营养盐限制，具有水域及水层差异，由于口门内及底层水域透光性差对光合作用的弱化，本研究分别对近岸区、近海区两个子水域表层 POC 与 Chl-*a* 的相关关系进行计算，结果表明二者在近岸区呈现微弱负相关( $R = -0.045$ ,  $P < 0.709$ )，而在近海水域存有极显著正相关关系( $R = 0.472$ ,  $P < 0.0001$ )。结合调查海区的叶绿素等值线分布(图 6)可以看出，春季表层叶绿素 *a* 在口门附近处于低值，最低值为 0.07 μg/L，这是由于在 CDW 携带的悬沙影响下，入海口水体浊若黄汤，湍流和高浑浊度限制了光合作用，初级生产受到抑制；在 123°E 附近存在 1~2 个明显的封闭高值区，与表层 POC 位于近海的高值区吻合，相对应的，低值区位于 TMZ 处，毗连外海水域悬浮物浓度低，透明度渐次增高，加之春季富含营养盐的冲淡水外扩<sup>[26]</sup>，浮游植物的生长繁殖得以促进。

本文采用 POC/Chl-*a* 比值来量化浮游植物对总颗粒有机碳的贡献，当比值在 20~200 时表明有机碳主要由浮游植物贡献；POC/Chl-*a* > 200 时则表明有机碎屑为 POC 主要来源<sup>[27-28]</sup>。本研究中表层 POC/Chl-*a* 值在 68~25 694 之间，均值为 2 771，说明春季长江口表层颗粒碳的主要来源和存在形式为有机碎屑。由图 7 可见，多年 POC/Chl-*a* 均与 TSM 呈极显著正相关，即高浊度水域 POC 普遍以有机碎屑形式存在，低浊度水域则更倾向于浮游植物贡献，相比其他年份这一现象在 2016 年格外显著，应是由于该年度 TSM 浓度低，浮游植物量较高。以上表明，春季长江

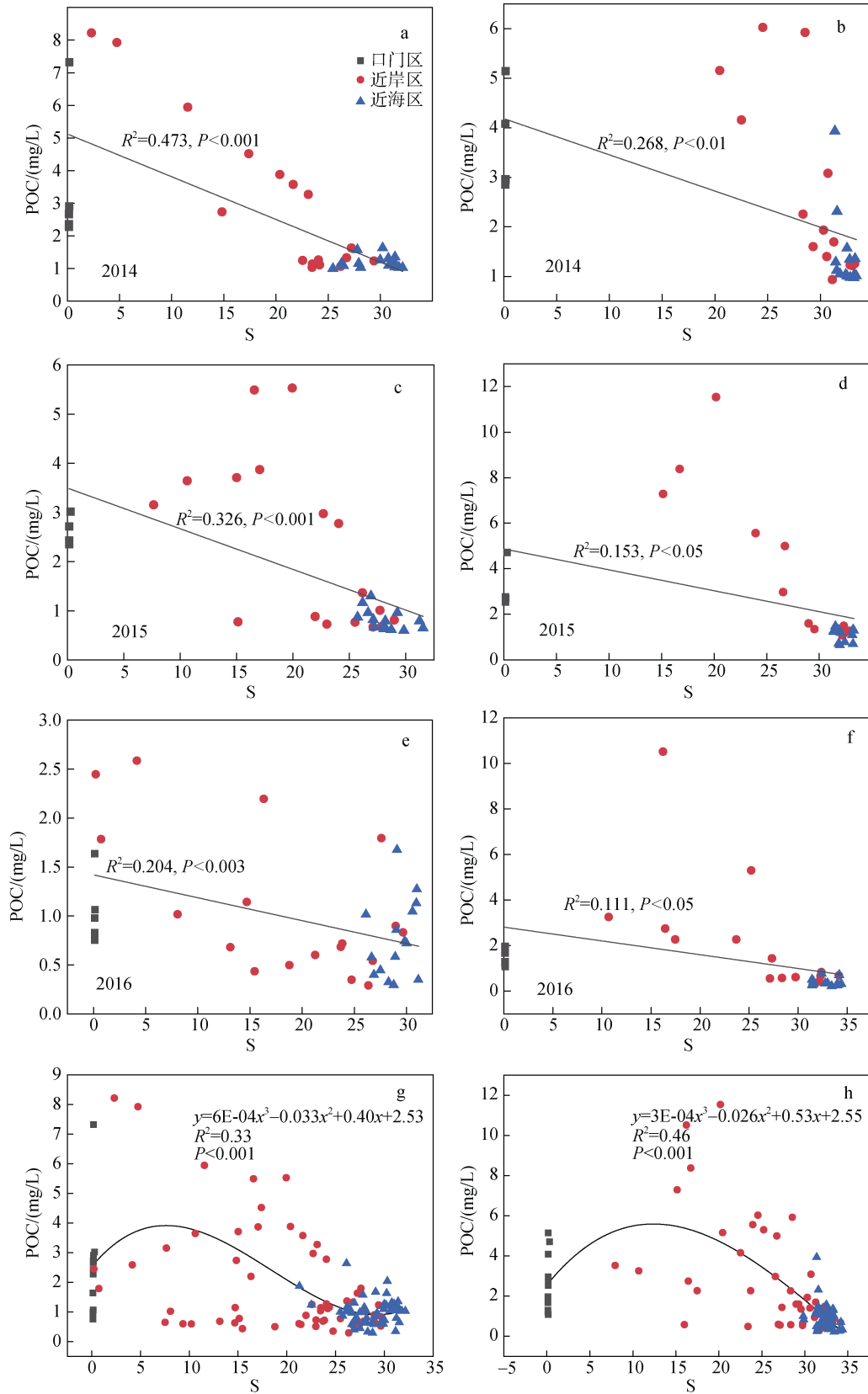


图 5 春季长江口 POC 与 S 的变化关系(a, c, e, g: 表层; b, d, f, h: 底层)

Fig. 5 Regression relationships between POC and salinity in the Yangtze River Estuary in spring (a, c, e, g: surface; b, d, f, h: bottom)

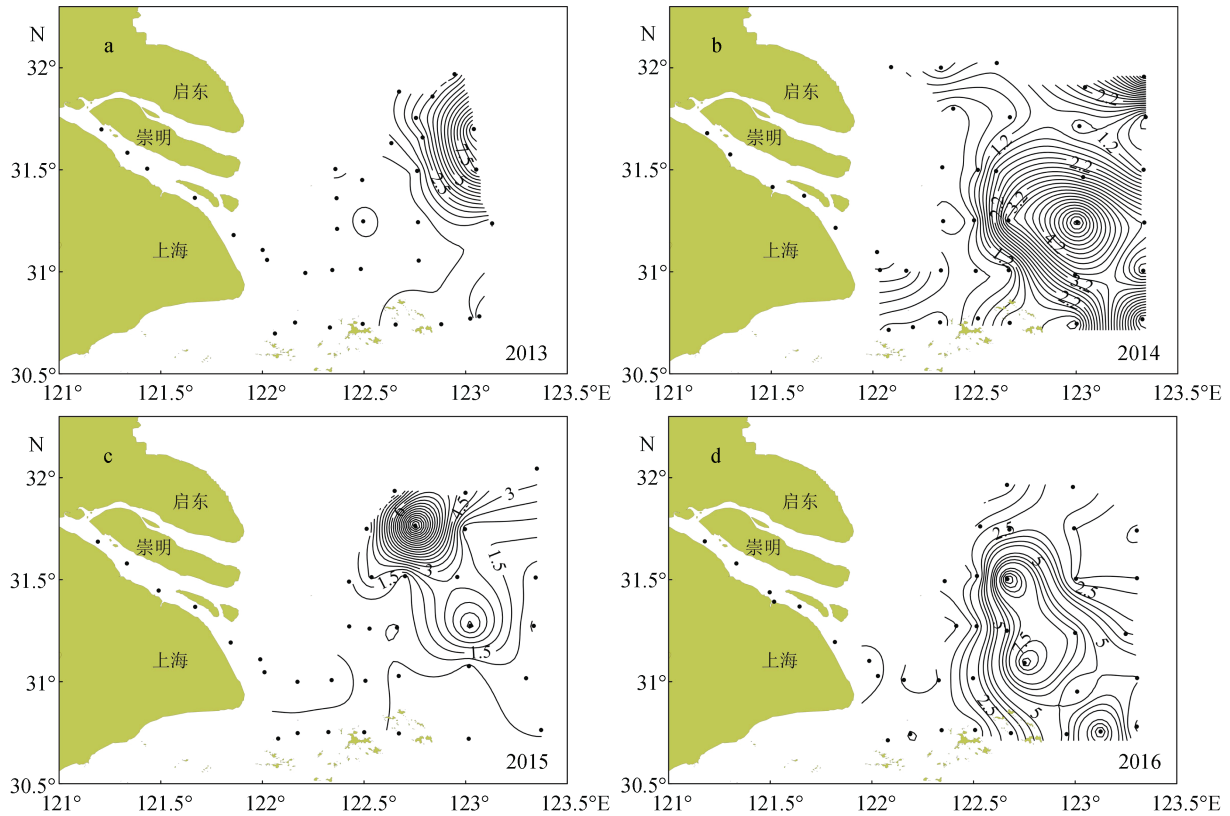


图 6 2013—2016 年春季长江口表层 Chl-a 浓度/(mg/L)平面分布

Fig. 6 Horizontal distributions of Chl-a concentration (mg/L) in the Yangtze River Estuary in spring 2013—2016

口 POC 主要以碎屑源为主，但陆源有机碳对 POC 的影响在经过近岸水域之后有所弱化，浮游植物对 POC 的贡献在长江口近海水域凸显。生物源除浮游植物贡献外，还有细菌碳和浮游动物碳<sup>[29]</sup>，很难定量区分<sup>[30]</sup>，仍需要深入研究。

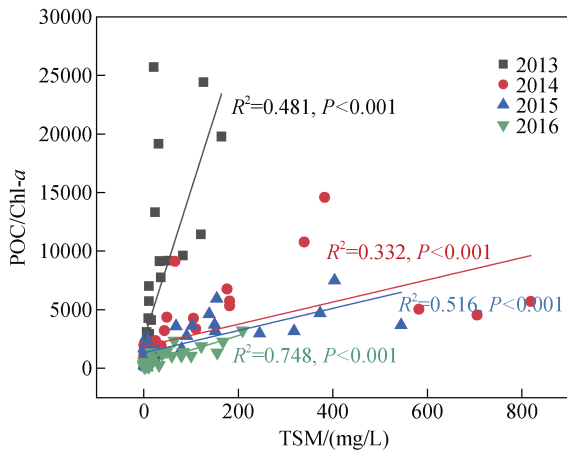


图 7 春季长江口表层 POC/Chl-a 与 TSM 的关系

Fig. 7 Relationship between POC/Chl-a and TSM in the surface layer of Yangtze River Estuary in spring

### 2.3 入海径流量与 POC 的关系

以径流和输沙为迁移载体，长江口陆源有机碳的浓度变化必然会受到上游输水输沙影响。CDW 在河口的影响范围主要在水体表层，本研究将口门内吴淞口以上站位(35, 36, 37)测得的表层 POC 作为入海 POC 浓度，并考虑到水流的滞留时间，选取 4 月份长江大通水文站径流量为对照参数，从其年际变化规律中探查春季长江口水域 POC 与长江径流输入的关系。结果如图 8，入海口径流量及 POC 含量随年份呈现波动状变化，对其进行 Mann—Kendall 检验发现这种年际变化并不存在显著的上升或下降趋势，此外，观察到 2014 年春季(枯水)和 2016 年春季(丰水)分别对应入海 POC 量的最高值和最低值，春季长江口入海径流量与 POC 浓度呈现出截然相反的年际变化趋势，即入海径流量高的年份其对应的 POC 浓度则越低，同张昀哲<sup>[31]</sup>对 2009~2018 年长江口营养盐与径流量的年际变化分析一致，但邢建伟<sup>[16]</sup>对相同水域洪水季(7—10 月)的调查结果表明长江口表层 POC 浓度与其来水来沙量年际间变化趋势基本一



致,这说明春季与秋季的径流作用不同。

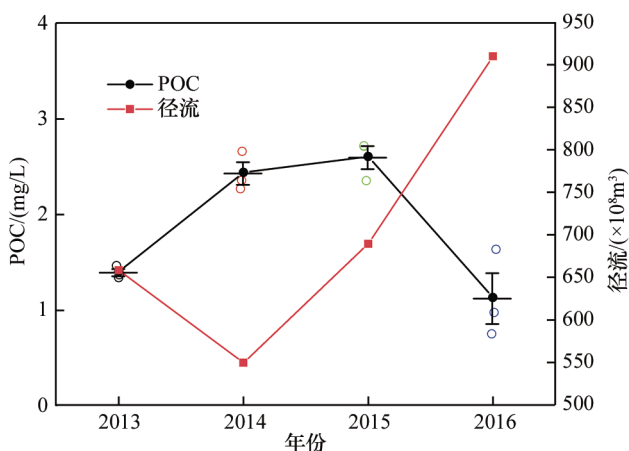


图8 2013—2016年春季长江口入海径流量与表层POC的年际变化

Fig. 8 Interannual changes in runoff and surface POC in the Yangtze River Estuary in spring 2013–2016

吴莹等<sup>[32]</sup>曾指出在世界大多数河流中, POC由C3植物和相关的土壤有机质组成。相比汛期丰水,春季降水量少而沿江抽引水量高<sup>[33]</sup>,为引江冲淤及农业用水的高峰期,河水流量小且流速较慢,停留时间长,对土壤的冲刷力较小,加之流域范围内生产力低、植物量少,继而导致了春季和洪季在来水量、有机物冲刷量等方面存在差异,径流对有机碳的稀释作用明显高于其输入作用。

### 3 结论

(1) 2013—2016年春季长江口POC浓度范围为0.22~16.99 mg/L,均值为1.80 mg/L,整体年际变化显著,底层浓度高于表层;各水域间存在空间变异及年际差异,但近岸区底层POC浓度多年处于高值,年际变化不显著;POC浓度在口门附近偏南部水域达到高值,后沿CDW方向降低,低值区位于近海底层,但表层POC在近海水域123°E附近出现次高值。

(2) POC浓度与盐度之间具有负相关关系,二者相关性逐年递减,近岸沉积物再悬浮是该水域重要碳源,近海水域海水稀释作用高于陆源输入作用;TSM与POC呈显著正相关,高浊和低浊水体的相关性不同,影响因素也不同,悬浮物的浓度及粒径变化极大地影响了长江口及东海陆架悬浮物中POC的浓度和在TSM中的比例,此外生物作用在最大浑浊带对其也有很大影响;近海水域表层POC与Chl-*a*有极显著正相关关系,且表层叶绿素*a*在123°E

附近的高值区与POC位于近海的次高值区吻合。春季长江口POC主要以碎屑源为主,但陆源有机碳对POC的影响在长江口近海水域有所弱化,浮游植物对POC的贡献凸显。

(3) 春季长江口入海径流量与POC浓度呈现出截然相反的年际变化趋势,径流对有机碳的稀释作用高于其输入作用,其变化关系与秋季不同。

#### 参考文献:

- [1] Song J, Qu B, Li X, et al. Carbon sinks/sources in the Yellow and East China Seas—Air-sea interface exchange, dissolution in seawater, and burial in sediments[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(11): 1583-1593.
- [2] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(1): 23-41.
- [3] 姚鹏, 于志刚, 郭志刚. 大河影响下的边缘海沉积有机碳输运与埋藏及再矿化研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(1): 157-164.  
Yao Peng, Yu Zhigang, Guo Zhigang. Research progress in transport, burial and remineralization of organic carbon at large river dominated ocean margins[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(1): 157-164.
- [4] Thibault A, Derenne S, Parlanti E, et al. Dynamics of organic matter in the Seine Estuary (France): Bulk and structural approaches[J]. *Marine Chemistry*, 2019, 212: 108-119.
- [5] 于文涛, 邹立, 文梅, 等. 双台子河口水体有机碳分布特征研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(2): 101-108, 126.  
Yu Wentao, Zou Li, Wen Mei, et al. Distribution of organic carbon in the estuary of the Shuangtaizi River[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(2): 101-108, 126.
- [6] Ren C, Yuan H, Song J, et al. The use of amino sugars for assessing seasonal dynamics of particulate organic matter in the Yangtze River estuary[J]. *Marine Chemistry*, 2020, 220: 103763.
- [7] 金海燕, 林以安, 陈建芳, 等. 黄海、东海颗粒有机碳的分布特征及其影响因子分析[J]. *海洋学报*, 2005, 27(5): 46-53.  
Jin Haiyan, Lin Yi'an, Chen Jianfang, et al. Analysis of driving factors and distribution of particulate organic carbon in the Huanghai Sea and the East China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27(5): 46-53.
- [8] Ronald, Benner. What happens to terrestrial organic matter in the ocean?[J]. *Marine Chemistry*, 2004, 92(1-4): 307-310.

- [9] Li Dong, Yao Peng, Bianchi T S, et al. Organic carbon cycling in sediments of the Changjiang Estuary and adjacent shelf: Implication for the influence of Three Gorges Dam[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 139: 409-419.
- [10] 蔡德陵, Tan F C, Edmond J M, 等. 长江口区有机碳同位素地球化学[J]. *地球化学*, 1992(3): 305-312.  
Cai Deling, Tan F C, Edmond J M, et al. Organic carbon isotope geochemistry of the Changjiang (Yangtze River) Estuary[J]. *Geochimica*, 1992(3): 305-312.
- [11] 林晶, 吴莹, 张经, 等. 长江有机碳通量的季节变化及三峡工程对其影响[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(2): 246-249.  
Lin Jing, Wu Ying, Zhang Jing, et al. Seasonal variation of organic carbon fluxes in the Yangtze River and influence of Three-Gorges engineering[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(2): 246-249.
- [12] 邵锡斌, 吴莹, 胡俊, 等. 颗粒态有机物在长江口及其邻近海域的夏季分布和影响因素初析[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(6): 1288-1294.  
Shao Xibin, Wu Ying, Hu Jun, et al. Spatial variability of particulate organic matter in the Changjiang River Estuary and adjacent regions in summer[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica Supplement*, 2014, 45(6): 1288-1294.
- [13] Wu Ying, Liu Zongguang, Hu Jun, et al. Seasonal dynamics of particulate organic matter in the Changjiang Estuary and adjacent coastal waters illustrated by amino acid enantiomers[J]. *Journal of Marine Systems*, 2016, 154: 57-65.
- [14] Zhao Lingbin, Gao Lei. Dynamics of dissolved and particulate organic matter in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and the adjacent East China Sea shelf[J]. *Journal of Marine Systems*, 2019, 198: 103188.
- [15] 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带[M]. 北京: 海洋出版社, 2001, 39-83.  
Shen Huanting, Pan Ding'an. Turbidity maximum in the Changjiang Estuary[M]. Beijing: Ocean Press, 2001, 39-83.
- [16] 邢建伟, 线薇薇, 沈志良, 等. 秋季长江口水体颗粒有机碳年际变化及影响因素分析[J]. *海洋与湖沼*, 2014(5): 964-972.  
Xing Jianwei, Xian Weiwei, Shen Zhiliang, et al. Interannual variation of particulate organic carbon and its influencing factors in Changjiang river estuary in autumn. *Oceanologia et Limnologia Sinica Supplement*, 2014(5): 964-972.
- [17] 杨海飞, 张志林, 李伯昌. 长江口—杭州湾悬沙浓度的空间分布特征研究[J]. *上海国土资源*, 2019, 40(2): 70-74.  
Yang Haifei, Zhang Zhilin, Li Bochang. Study of the spatial pattern of suspended sediment concentration in the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay[J]. *Shanghai Land & Resources*, 2019, 40(2): 70-74.
- [18] 邢建伟, 线薇薇, 绳秀珍. 春、冬季长江口颗粒有机碳的时空分布及输运特征[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(9): 2380-2386.  
Xing Jianwei, Xian Weiwei, Sheng Xiuzhen. Spatial-temporal distribution and transportation of particulate organic carbon in the Yangtze River Estuary in spring and winter 2012. *China Environmental Science*, 2014, 34(9): 2380-2386.
- [19] 宋晓红, 石学法, 蔡德陵, 等. 三峡截流后长江口秋季 TSM、POC 和 PN 的分布特征[J]. *海洋科学进展*, 2007, 25(2): 168-177.  
Song Xiaohong, Shi Xuefa, Cai Deling, et al. Distributions of TSM, POC and PN in the Changjiang Estuary area in autumn after the river closure at Three Gorges[J]. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(2): 168-177.
- [20] 高永强, 高磊, 朱礼鑫, 等. 长江口及其邻近海域悬浮颗粒物浓度和粒径的时空变化特征[J]. *海洋学报*, 2018, 40(3): 62-73.  
Gao Yongqiang, Gao Lei, Zhu Lixin, et al. Spatio temporal variations in concentration and size of suspended particulate matter in the Changjiang(Yangtze River) Estuary and its adjacent sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(3): 62-73.
- [21] 章伟艳, 金海燕, 张富元, 等. 长江口—杭州湾及其邻近海域不同粒级沉积有机碳分布特征[J]. *地球科学进展*, 2009, 24(11): 32-39.  
Zhang Weiyan, Jin Haiyan, Zhang Fuyuan, et al. Organic carbon distribution in the Yangtze River Estuary-Hangzhou Bay and its adjacent sea area[J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(11): 32-39.
- [22] 林晶, 吴莹, 张经, 等. 最大浑浊带对长江口有机碳分布的影响初探[J]. *海峡科学*, 2009, 25 (6): 151-152, 160.  
Lin Jing, Wu Ying, Zhang Jing, et al. The effect of the maximum turbidity zone on the distribution of organic carbon in the Yangtze River[J]. *Straits Science*, 2009, 25 (6): 151-152, 160.
- [23] Uncles R J, Frickers P E, Easton A E, et al. Concentrations of suspended particulate organic carbon in the tidal Yorkshire Ouse River and Humber Estuary[J]. *Science of The Total Environment*, 2000, 251-252(1): 233-242.
- [24] 张珊珊, 线薇薇, 梁翠. 2015 年秋季长江口有机碳的分布特征及其影响因素[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(1): 55-61.  
Zhang Shanshan, Xian Weiwei, Liang Cui. Distribution characteristics of total organic carbon and influence factors in the Yangtze River Estuary in Autumn 2015[J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(1): 55-61.

- [25] 叶君, 姚鹏, 徐亚宏, 等. 长江口盐度梯度下不同形态碳的分布、来源与混合行为[J]. 海洋学报, 2019, 41(4): 15-26.  
Ye Jun, Yao Peng, Xu Yahong, et al. Distribution, source and mixing behavior of different carbon species along a salinity gradient in the Changjiang Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(4): 15-26.
- [26] 周伟华, 袁翔城, 霍文毅, 等. 长江口邻域叶绿素 *a* 和初级生产力的分布[J]. 海洋学报, 2004, 26(3): 143-150.  
Zhou Weihua, Yuan Xiangcheng, Huo Wenyi, et al. Distribution of chlorophyll *a* and primary productivity in the adjacent sea area of Changjiang River Estuary[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(3): 143-150.
- [27] Cifuentes L A, Sharp J H, Marilyn L F, et al. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware Estuary[J]. Limnology and Oceanography, 1988, 33(5): 1102-1115.
- [28] Cunha L C D, Léon Serve, Gadel F, et al. Lignin-derived phenolic compounds in the particulate organic matter of a French Mediterranean river: seasonal and spatial variations[J]. Organic Geochemistry, 2001, 32(2): 305-320.
- [29] Shen Zhiliang, Yang Heming, Liu Qun. Particulate organic carbon and its composition in Jiaozhou Bay[M]// Studies of the biogeochemistry of typical estuaries and bays in China. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2020: 227-235.
- [30] Parsons T R. Particulate organic carbon in the sea[M]// Riley J P, Skirrow G. Chemical Oceanography Vol.2. London: Academic Press, 1975: 365-385.
- [31] 张昀哲, 李保. 长江口徐六泾断面近 10 年水质变化分析[J]. 水利水电快报, 2019(10): 49-53.  
Zhang Yunzhe, Li Bao. Analysis of water quality changes in Xuliujing section of Yangtze River estuary in recent 10 years[J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019(10): 49-53.
- [32] Wu Ying, Dittmar T, Ludwischowski K U, et al. Tracing suspended organic nitrogen from the Yangtze River catchment into the East China Sea[J]. Marine Chemistry, 2007, 107(3): 367-377.
- [33] 张二凤, 陈西庆. 长江大通-河口段枯季的径流量变化[J]. 地理学报, 2003, 58(2): 231-238.  
Zhang Erfeng, Chen Xiqing. Changes of water discharge between Datong and the Changjiang Estuary during the dry season[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(2): 231-238.

# Interannual distribution of particulate organic carbon and its influencing factors in the Yangtze River Estuary in spring

LI Qian<sup>1, 3</sup>, ZHANG Shan-shan<sup>1</sup>, XIAN Wei-wei<sup>1, 2</sup>

(1. The Key Laboratory of Marine Ecology and Environment Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Received:** Jun. 12, 2020

**Key words:** Yangtze River Estuary; particulate organic carbon (POC); interannual distribution; influencing factors; spring

**Abstract:** Based on a comprehensive survey of surface and bottom water samples from four spring voyages from 2013 to 2016, in this paper, we discuss the temporal and spatial distribution characteristics of particulate organic carbon (POC) in the Yangtze River Estuary and its adjacent waters and analyze its environmental impact factors. The results show that from 2013 to 2016 in spring, the POC concentration in the Yangtze River Estuary ranged from 0.22 to 16.99 mg/L, with an average of 1.80 mg/L, and it had a significant overall annual variation and a higher bottom layer concentration than surface layer concentration. Spatial variability and interannual differences were observed between different waters (entrance area, nearshore area, and offshore area) except for the bottom layer of the nearshore area with a high POC concentration. The POC concentration was high in the southern waters near the entrance area, and then decreased in the direction of the Changjiang Diluted Water (CDW), with the second highest surface POC concentration in the offshore waters near 123°E. POC and salinity were found to be negatively correlated and decreased each year. There is a significant positive correlation between POC and total suspended matter (TSM), which is higher in the bottom layer than in the surface layer. In addition, there is a highly significant positive correlation between surface POC and chlorophyll *a* in offshore areas, with their high-value areas coinciding around 123°E. In contrast to autumn, the interannual variation between the runoff and POC concentration into the Yangtze River Estuary presents a diametrically opposite trend, which indicates that the dilution effect of runoff on organic carbon is higher than the effect of its input. The POC of the Yangtze River estuary in spring was determined to be derived from detrital sources, with its distribution in spring mainly affected by factors such as the organic carbon sources, seawater dilution, and movement of suspended matter. Highly concentrated suspended matter has a particularly significant influence on the POC concentration. As the impact of terrestrial input on POC was found to gradually weaken from the mouth of the estuary to the adjacent waters, the contribution of phytoplankton became prominent in the offshore area.

(本文编辑: 赵卫红)