

秋季长江口水体颗粒有机碳年际变化及影响因素分析*

邢建伟^{1,2} 线薇薇¹ 沈志良¹ 绳秀珍²

(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 青岛 266071;

2. 中国海洋大学 海水养殖教育部重点实验室 青岛 266003)

提要 根据 2007—2012 年长江口及其邻近海域 4 个航次(11 月)调查资料,探讨了长江口秋季颗粒有机碳(POC)时空分布特征;结合长江口环境要素和陆源输入(径流、输沙),分析了秋季 POC 分布的主要影响因素。结果表明:(1) 2007—2012 年秋季长江口 POC 浓度范围为 0.03—16.95mg/L,均值 2.30mg/L,底层 POC 浓度高于表层。长江口表层 POC 浓度存在显著的年际变化特征。(2) 长江口区 POC 分布呈现沿长江径流入海方向降低的趋势,高值区出现在口门附近偏南部水域。口门内和近岸水域 POC 显著高于近海水域。口门水域 POC 年际间相对稳定,近岸和近海水域年际变化显著。(3) 长江口 POC 分布与盐度呈非保守性变化,悬浮物是 POC 分布的主要控制因素,多数年份 POC 与叶绿素 *a* 相关程度较弱。(4) 河口来水来沙量对 POC 浓度具有较强的制约性,径流的主要影响区域在口门内和近岸区,输沙的主要影响区域在最大浑浊带和长江口北部水域。(5) 入海输沙量与长江口水域 POC 相关性最强。咸淡水交汇引起的悬浮物沉积和沉积物的再悬浮强度决定口门内水域 POC 浓度,浑浊度较高的近岸水体 POC 对陆源输入泥沙的依赖性较强,长江口外侧海域初级生产力水平成为 POC 浓度的重要影响因素。

关键词 颗粒有机碳(POC); 年际变化; 影响因素; 秋季; 长江口

中图分类号 X145 **doi:** 10.11693/hyhz20130900121

作为全球碳循环的重要一环,海洋碳循环一直是国内外研究的热点(张乃星等, 2006)。相对于开阔大洋,陆架边缘海虽然仅占全球海洋面积的 7.6%,但对海洋初级生产力的贡献却高达 30%。其中,河口作为陆架边缘海的重要组成部分,输送和产生大量的有机碳(张龙军等, 2005)。迄今,陆架边缘海在全球碳循环中的作用尚未完全清楚,而正确认识河口区有机碳的行为,有助于揭示陆架边缘海对全球有机碳循环的重要性(Raymond *et al.*, 2001)。

颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)是海洋有机碳的重要组成部分,在河口有机碳的生物地球化学循环中扮演着极其重要的角色(刘庆霞等,

2012)。河口 POC 来源非常复杂,主要包括天然陆源有机物的输入、工农业生产及生活排污产生的颗粒物释放、河口浮游生物初级生产以及次级生产带来的各种有机碎屑等(Eatherall *et al.*, 1998)。国外对河口 POC 的研究始于 20 世纪 60 年代,目前在 POC 生物地球化学动力过程研究上取得了一系列成果(Cai *et al.*, 1988; Goni *et al.*, 2005; Stramska, 2010)。我国 POC 研究起步较晚,但在河口 POC 的来源(张龙军等, 2005; 刘庆霞等, 2012)、组成(刘文臣等, 1997; 张乃星等, 2006)、迁移转化(张乃星等, 2006)以及通量(Cauwet *et al.*, 1993)研究上进展迅速。

长江是我国第一大河,年平均入海径流量达

*国家自然科学基金面上项目, 31272663 号, 41176138 号; 国务院三峡工程建设委员会资助项目, JJ2012-2013 号。邢建伟, 硕士研究生, E-mail: beyond0695@163.com

通讯作者: 线薇薇, E-mail: wwxian@qdio.ac.cn

收稿日期: 2013-09-04, 收修改稿日期: 2013-12-10

9240 亿立方米, 输沙量 4.86 亿吨, 入海泥沙大部分在河口附近沉降、堆积, 部分细颗粒泥沙沿长江冲淡水扩展方向输送至河口外侧海域, 长江入海物质通量直接影响河口水体环境特征(沈焕庭等, 2011)。20 世纪 80 年代以来, 众多学者对长江口附近水域 POC 进行了研究(Milliman *et al*, 1984; 谢肖勃等, 1992; Cauwet *et al*, 1993; 黄自强等, 1997; Wu *et al*, 2003; 宋晓红等, 2007; Zhang *et al*, 2007; 林晶等, 2009; 熊林芳等, 2010), 提出某一个时间点长江口 POC 的空间分布、季节变化等, 但对长江口 POC 年际间变化特征的研究尚未见报道, 这可能是由于缺乏系统的、多年的 POC 数据所致。近年来, 伴随着长江流域一系列水利工程的兴建, 特别是三峡工程蓄水运行后, 长江的入海水沙通量发生了较大的变化(翟世奎等, 2008)。此外, 长江沿岸工农业和三角洲经济的迅猛发展使得有机物的排放日益增多(陈吉余等, 2003), 这些因素都将会对长江口水域 POC 的浓度和生物地球化学过程产生一定的影响。本文根据 2007—2012 年长江口秋季 POC 调查资料, 探讨长江口及其邻近海域 POC 年际变化及其影响因素, 并根据多年数据, 解析 POC 时空分布与河口来水来沙的关系, 进一步阐明长江口海域 POC 时空变化的受控因素, 为丰富长江口有机碳研究资料、探讨河口区有机碳的行为提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 站位设置

分别于 2007、2009、2011 和 2012 年 11 月完成长江口及其邻近海域 4 个航次综合调查。调查区域位于 30°45′—32°00′N, 121°10′—123°20′E 之间, 共设置东西方向 6 个断面, 40 个站位。根据盐度和总悬浮物(total suspended matter, TSM)的分布情况, 将调查区域划分为 3 个水域: 口门内、近岸区和近海区(图 1)。口门内包括 35—39 号站, 水体盐度较低(<5), 浑浊度较高; 近岸区包括 9—12、15—18、21—25、28—32 以及 40 号站, 中等盐度(5—20), 水体浑浊度最高, 为最大浑浊带的主要分布区(沈焕庭等, 2001); 近海区包括 1—8、13—14、19—20、26—27、33—34 号站, 盐度相对较高(>20), 透明度最大。

1.2 采样与测定方法

现场利用 Niskin 采水器分别采集表层(0—1m)和底层(距海底 2m)水样后, 立即用孔径为 0.7 μ m 的 Whatman GF/F 玻璃纤维膜(直径 25mm、450°C 预灼

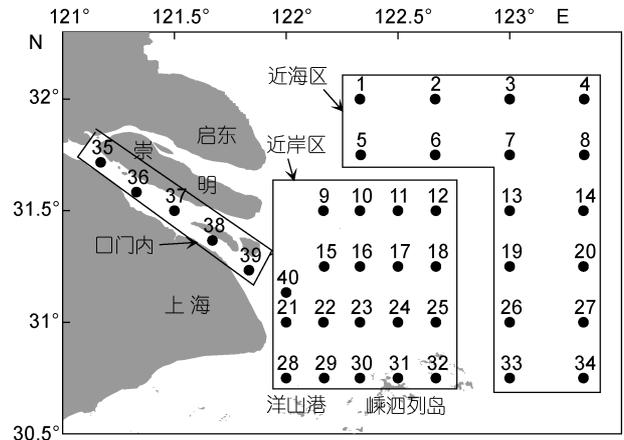


图 1 长江口调查站位图

Fig.1 Sampling stations in the Changjiang (Yangtze) River estuary

烧 6h)负压抽滤, 根据水样的浑浊程度过滤体积在 80—300mL 之间。所得滤膜用锡纸包好置于 -20°C 冰箱中保存, 用于测定 TSM、POC 和叶绿素 *a*。各测站利用 Sea-Bird-25 CTD 同步测定水深、温度和盐度。

过滤得到的 GF/F 膜经冷冻干燥 24h 后置于干燥器中恒重后称重, 减去空白膜的质量, 即得到 TSM 的净重, 然后除以过滤水样的体积, 计算 TSM 的浓度。称重后的膜样置于密闭的干燥器中用浓盐酸熏蒸 24h, 以除去样品中的无机碳, 再将膜样在 50°C 条件下烘 24h, 干燥器中恒重后使用德国 Elementar 公司生产的 Vario EL III 型元素分析仪测定 POC 的含量。用乙酰苯磺胺(ACET)做标样, 氧化炉温度 950°C, 还原炉温度 500°C, 每个样品做两个平行样取平均值, 每 10 个样品做一次空白测试, 平行样品测定误差 1%。叶绿素 *a* 样品经 90%丙酮萃取, 用 Turner-Designs-Model 10 荧光光度计测定。

1.3 数据处理方法

使用 SPSS 16.0 软件进行方差分析和非参数检验以及 Pearson 相关性分析和双尾显著性检验, 使用 Surfer 8.0 软件绘制平面分布图, 使用 Origin 8.0 软件绘制含量变化图和相关关系图。

2 结果与讨论

2.1 POC 分布及年际变化

2.1.1 POC 浓度 2007—2012 年秋季长江口 POC 浓度范围为 0.03—16.95mg/L, 均值 2.30mg/L。其中, 表层 POC 浓度范围在 0.14—9.65mg/L 之间, 均值为 1.84mg/L, 底层 POC 浓度在 0.03—16.95mg/L 之间, 均值 2.76mg/L(表 1)。各个年份底层 POC 浓度均高于

表 1 2007—2012 年秋季长江口各年度 POC 的浓度
Tab.1 POC concentration in the Changjiang River estuary in autumn 2007—2012

参数	POC 浓度(mg/L)				
	2007 年	2009 年	2011 年	2012 年	
表层	范围	0.48—7.74	0.15—5.44	0.14—6.77	0.29—9.65
	均值±标准差	3.00±1.98 ^a	1.58±1.53 ^b	0.90±1.12 ^c	2.13±2.53 ^b
底层	范围	0.03—16.94	0.20—6.79	0.19—11.17	0.28—16.95
	均值±标准差	3.78±3.53 ^a	2.16±1.85 ^a	1.41±2.52 ^b	3.60±4.18 ^a

同一行中不同的上标字母表示年际间差异显著($P < 0.05$)

表层,与金海燕等(2005)的研究结果相同。相对表层而言,底层 POC 浓度的变化范围较大。

2007—2012 年长江口水域 POC 浓度年际间显著波动(表 1)。表层水体 POC 在 2007 年最高,2009 年显著下降,2011 年降至最低水平,2012 年又显著回升。底层与表层的变化趋势大体相同,2011 年底层水体 POC 浓度显著低于其它年份,但 2007、2009 和 2012 年间底层水体 POC 差异不显著。可以看出,2007—2012 年间长江口表层 POC 浓度年际变化幅度较大,底层水体 POC 年际间相对稳定。

谢肖勃等(1992)于 1985 年 11 月在长江口相同测区得到的表层 POC 浓度范围为 0.51—1.38mg/L,平均值 0.82mg/L,底层 POC 浓度在 0.39—2.50mg/L 间,平均值 0.97mg/L。与之相比,2007—2012 年长江口 POC 变异范围显著增大,2011 年与其均值较为接近,其它年份均明显偏高。除长江来水来沙的影响之外,近几十年长江流域工农业发展引起的污染物的排放增加也可能对其有一定的影响(陈吉余等, 2003),造成长江口水域 POC 浓度变化。宋晓红等(2007)在长江口相同测区获得的 2004 年表、底层 POC 均值分别为 3.81mg/L 和 9.09mg/L,高于本文研究结果。可以看出,长江口 POC 浓度年际间表现为一定程度的波动状态。

2.1.2 POC 空间分布 图 2 显示各调查航次表层和底层水体 POC 空间分布。可以看出,秋季长江口区表、底层 POC 的平面分布具有很强的规律性:大致呈现出沿长江径流入海方向浓度逐渐降低的趋势,南部和西南部浓度较高,北部和东北部浓度较低。年际间 POC 的平面分布总趋势基本保持一致。POC 高值区在口门外呈舌状分布,并向东北方向延展。

表 2 给出了 2007—2012 年长江口各子区域表、底层 POC 浓度均值及年际间差异显著性检验结果。长江口不同区域 POC 浓度存在空间变异:口门内表层 POC 浓度与近岸区相比高低不一,近岸区底层 POC 浓度大多高于口门内。非参数检验结果显示,口

门内和近岸区 POC 浓度差异未达到显著性水平($P > 0.05$),但二者浓度均显著高于近海区($P < 0.05$)。这进一步说明从口门到近岸水域,POC 浓度存在一定程度的空间变异,而从近岸到外海水域,随离岸距离的增加,长江口 POC 浓度显著降低。近岸区表层与底层 POC 浓度相差较大,口门内次之,而近海区相差最小。

林晶等(2009)的研究表明长江口最大浑浊带水域 POC 含量高于外海;程君等(2011)根据东海大面调查资料,发现长江口水域存在 POC 高值区,外海水域含量较低,与本研究结果一致。受长江径流输送的悬浮颗粒物影响,长江口近岸水域 POC 含量最高(谢肖勃等, 1992; 黄自强等, 1997; 刘文臣等, 1997),离岸较远的深水区随着长江径流影响的减弱,水体外源输入的 POC 减少,呈现由表层向底层衰减的趋势,并由外源输入向生物生产转化(Wu *et al.*, 2003)。

由表 2 的差异显著性检验结果可以看出长江口各区域 POC 浓度年际差异的不同趋势。口门内和近岸区 POC 浓度年际间数值波动范围较大,尤以底层更为明显,近海区波动范围较小。口门内 2011 年 POC 平均浓度最低,但与 2007 年和 2009 年差异不显著,近岸和近海区 2011 年显著低于 2007 年。与口门内相比,近岸和近海区年际间变化更为剧烈。2012 年口门内 POC 浓度迅速回升至 2007 年的水平,并显著超过 2009 年和 2011 年,但近岸和近海区仅回升至 2009 年水平,显著低于 2007 年的最高浓度。综上,口门内由于径流可以完全覆盖,外源输入充分,POC 含量年际间变化程度较小;随着离岸距离的增加,外源输入量减少,POC 来源趋于复杂,近岸和近海水域 POC 浓度年际间变异趋于显著。

2.2 POC 分布影响因素

2.2.1 POC 与河口环境要素的关系 河口环境条件复杂多变,多种环境要素对 POC 分布产生直接或间接的影响(张龙军等, 2005)。根据 2007—2012 年长

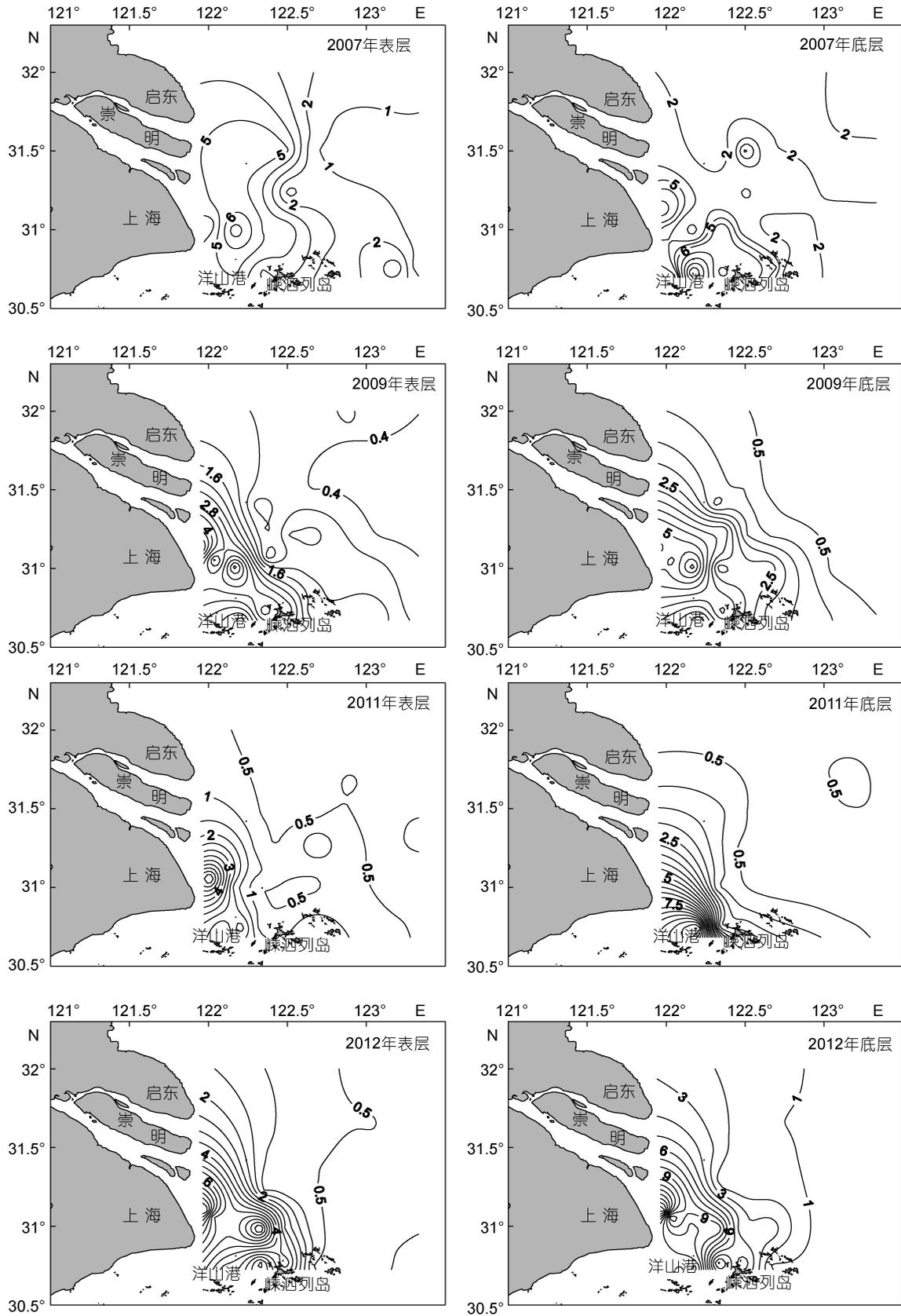


图 2 2007—2012 秋季长江口 POC 平面分布

Fig.2 Horizontal distribution of POC in the Changjiang River estuary in autumn 2007—2012

表 2 2007—2012 年秋季长江口不同区域 POC 浓度

Tab.2 POC concentration in different regions of the Changjiang River estuary in autumn 2007—2012

参数	POC(平均值±标准差, mg/L)				
	2007	2009	2011	2012	
口门内	表层	3.27±1.33 ^{a, b}	2.00±1.78 ^a	1.06±0.30 ^a	4.87±2.76 ^b
	底层	3.70±1.82 ^{a, b}	2.46±1.83 ^a	1.72±1.29 ^a	5.99±2.34 ^b
近岸区	表层	3.85±1.97 ^a	1.76±1.64 ^{b, c}	1.28±1.53 ^b	2.69±2.62 ^c
	底层	4.80±4.29 ^a	2.68±1.86 ^{a, b}	2.01±3.34 ^b	5.26±4.87 ^a
近海区	表层	1.22±1.04 ^a	0.71±0.46 ^{a, b}	0.39±0.21 ^b	0.44±0.15 ^b
	底层	1.95±1.52 ^a	0.44±0.26 ^{b, c}	0.35±0.10 ^b	0.61±0.28 ^c

同一行中不同的上标字母表示年际间差异显著($P < 0.05$)

江口综合调查数据, 分析了 POC 与盐度、TSM 以及叶绿素 *a* 的相关关系, 分别探讨物理环境、沉积环境和初级生产对 POC 分布的影响。

2007—2012 年秋季长江口表层 POC 与盐度均呈负相关关系(表 3), 其中尤以 2012 年最为显著。长江口 POC 随盐度呈非保守性变化, 即 POC 浓度随盐度增加并不是单纯的下降趋势(图 3a): 在盐度 < 7 时, 随盐度的增加, POC 浓度缓慢增大; 在 $7 < \text{盐度} < 12$ 时, POC 浓度维持在较高水平, 但离散程度亦较大; 盐度 > 12 , POC 浓度随着盐度的升高逐渐降低。Uncles 等(2000)也发现 Humber 河口 POC 通常在盐淡水两端的含量较低, 在盐度介于 2—6 时出现最高值, 而在盐度大于 5 时, 又随着盐度的升高而逐渐降低, 与本文结果相似。盐度指示陆地径流对海域的影响程度, 盐度越大代表水动力条件中径流的影响越大。综上, 长江口 POC 分布不完全受海水稀释作用的影响, 河口区复杂的水动力条件及其他因素对 POC 的分布也具有重要影响(金海燕等, 2005)。

表 3 2007—2012 年秋季长江口 POC 与环境因子的相关关系

Tab.3 Correlation of POC and environment factors in autumn 2007—2012

参数	相关系数 <i>R</i>				
	2007	2009	2011	2012	
盐度	表层	-0.274	-0.460*	-0.387*	-0.719**
	底层	0.555**	0.484**	0.529**	0.945**
TSM	表层	0.649**	0.659**	0.987**	0.970**
	底层	-0.020	-0.046	0.025	0.669**

TSM: 总悬浮物; **示显著水平 $P < 0.01$ (双尾), 极显著相关; *表示显著水平 $P < 0.05$ (双尾), 显著相关

长江径流携带大量颗粒有机物进入河口, 悬浮物是陆源输入 POC 的主要载体。本研究结果表明, 长江口 POC 与 TSM 间存在极为显著的正相关关系, 底

层的相关程度高于表层(图 3c, 3d)。计算结果显示, 各年度 POC 均与 TSM 呈显著的线性正相关(表 3), 与众多学者的研究结果相同(Cauwet *et al.*, 1993; Murrell *et al.*, 2000; 金海燕等, 2005; 梁成菊等, 2010), 表明 TSM 是影响 POC 分布的一个重要因素(Zhu *et al.*, 2006)。底层 POC 与 TSM 的相关系数高于表层, 可能是由于咸淡水交汇引起悬浮物大量沉降和风浪扰动引起底层有机物再悬浮的缘故(秦蕴珊等, 1989; Hoshika *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2006; 程君等, 2011)。由图 3c, 3d 还可以看出, 当 TSM 浓度较低时, POC 离散性较大, 尤其在表层水体, 表明在 TSM 较低水体, POC 与其相关性较差, 这在透明度较高的黄海和东海北部得到证实(熊林芳等, 2010)。因此, TSM 是长江口水体 POC 分布的重要影响因素, TSM 浓度越高的水域二者相关性越强, 随 TSM 浓度降低, TSM 对 POC 影响程度减弱。

除外源输入外, 初级生产也是 POC 的重要来源之一(叶翔等, 2009)。海洋真光层的浮游植物通过光合作用将无机碳转化为有生命的 POC, 即初级生产过程对海洋 POC 具有一定的贡献。叶绿素 *a* 是表征浮游植物现存量的重要指标, 在一定程度上反映了水域的初级生产力水平(李超伦等, 2005)。本研究结果显示, POC 与叶绿素 *a* 的总体相关关系未达到显著性水平(图 3b)。不同年度调查结果显示, POC 仅在 2012 年秋季与叶绿素 *a* 表现为显著的正相关关系, 其它年份相关性均较弱(表 3)。已有的研究结果显示, 东海水域 POC 与叶绿素 *a* 呈显著的线性正相关(程君等, 2011), 黄东海浮游植物生产是 POC 的主要来源(吴家林等, 2012)。也有研究发现 POC 与叶绿素 *a* 的相关性较差(刘占飞等, 2000; 石晓勇等, 2011)。本研究水域属于河口区域, 冲淡水覆盖面广, 水体较为浑浊, 严重制约了浮游植物的光合作用(Cauwet *et al.*,

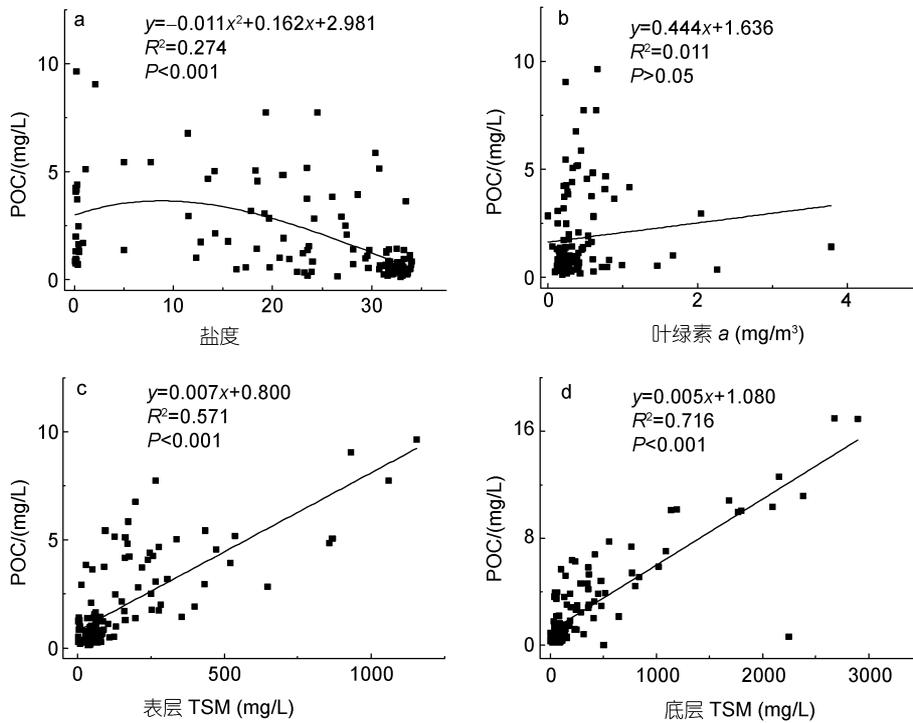


图 3 秋季长江口 POC 与环境因子的关系

Fig.3 Regression relationship between POC and environmental factors in the Changjiang River estuary in autumn

1993), 相对弱化了浮游植物生产对 POC 的贡献。随着离岸距离的增加, 水体透明度变大, 特别是在远离口门的东部外测海域, 初级生产成为 POC 的一个重要来源(Wu *et al*, 2003; 金海燕等, 2005)。

2.2.2 POC 与河口来水来沙的关系 长江陆源输入(主要包括径流和泥沙)为河口及其邻近海区提供了大量生源要素, 对维持河口地区较高的生产力水平发挥着重要作用, 因此, 有机碳浓度变化必然受到长江口来水来沙的影响。考虑到陆源输入由大通站进入河口后存在一定程度的迟滞和累积效应, 结合本研究的调查时间均为秋季 11 月初, 选择大通站洪季(7—10 月)入海径流量和输沙量作为影响因素, 考察长江口水域 POC 与陆源输入的关系(图 4)。可以看出, 河口来水来沙量年际间呈波动状态, 长江口表层 POC 浓度与其年际间变化趋势基本一致。这说明河口来水来沙量对 POC 浓度具有一定程度的制约性。入海泥沙中大量的有机质通过径流裹挟作用运输至河口甚至外部海域, 从而影响河口 POC 浓度分布。长江口 POC 浓度的年际间变化与入海径流量和泥沙量密切相关。

为探讨长江径流量和输沙量的改变对长江口及其邻近海区 POC 的影响, 明确长江径流和输沙对长江口不同区域 POC 分布的影响范围和程度, 将各站位表层 POC 数据与相应年度洪季入海径流量和输沙

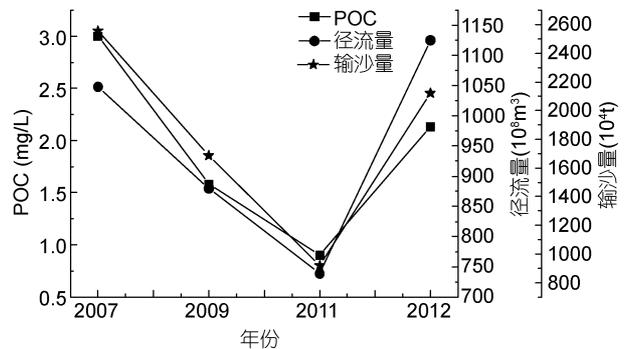


图 4 2007—2012 年秋季长江口表层 POC 与径流量、输沙量年际变化

Fig.4 Interannual variances of runoff, sediment discharges and POC in the Changjiang River estuary in autumn 2007—2012

量作相关性分析, 并将各个站位得到的 Pearson 相关系数绘制等值线图, 结果如图 5 所示。

由图 5a 可以看出, 长江口 POC 浓度与径流呈正相关关系的区域主要集中在口门内和近岸区, 其中在最大浑浊带分布区正相关程度最高, 凸显出长江径流对口门内和近岸区 POC 浓度的显著影响, 这也说明在该区域各种水体的交互作用中, 长江冲淡水占绝对优势; 而在调查海区的中部和外侧水域, POC 浓度与径流量呈现出了一定的负相关关系, 其中在东南部和东北部区域尤其显著, 表明长江冲淡水对

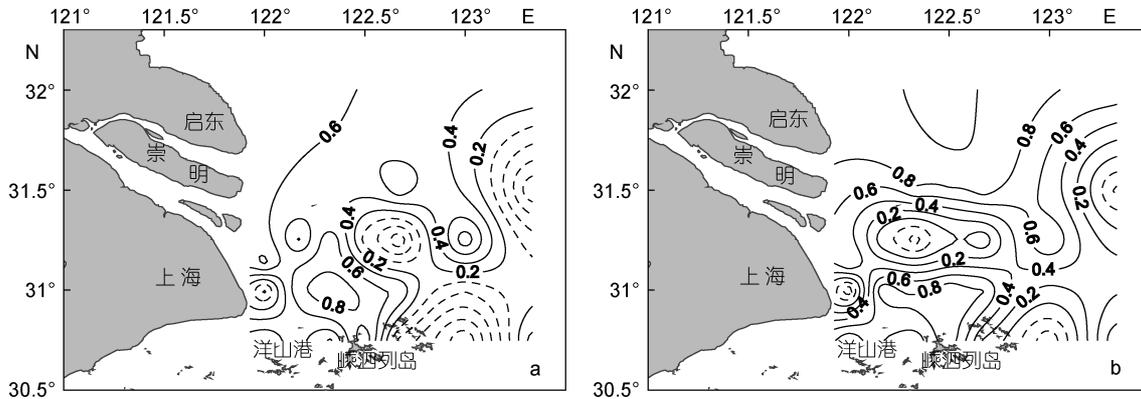


图 5 长江口秋季表层 POC 浓度与径流量和输沙量相关系数分布

Fig.5 Distribution of correlation index of surface POC concentration with runoff and sediment discharge in the Changjiang River estuary in autumn

a: 径流量; b: 输沙量; 实线表示正相关, 虚线表示负相关

该区域 POC 浓度的稀释作用强于输入作用。与径流相似, POC 与输沙量呈正相关的区域也集中在最大浑浊带和北部水域(图 5b), 这说明长江输沙量的增加可以显著增大以上区域 POC 的浓度; 调查海域东北和东南部 POC 与输沙量呈负相关关系, 表明该区域 POC 对陆源泥沙输入的依赖性减弱。

2.2.3 POC 影响因素综合分析 综合以上分析可以看出, POC 分布与河口环境要素以及来水来沙量呈不同程度的相关。在河口环境中, 各因子并不是孤立存在的, 为探讨以上因素对 POC 的综合作用, 将 2007—2012 年秋季长江口表层 POC 与径流量、输沙量、TSM 及叶绿素 *a* 进行多元分析, 结果见表 4。

可以看出, 多种因素共存情况下, 长江口整体水域 POC 浓度与输沙量相关性最强, 其次是径流量, 与 TSM 和叶绿素 *a* 相关性均未达到显著性水平 ($P > 0.05$), 其中与叶绿素 *a* 的相关性最弱。在单个影响因素分析中, POC 与 TSM 密切相关, 加入径流和输

沙后, TSM 对 POC 的影响被削弱。这是由于 TSM 本身首先受长江入海泥沙量的控制, 进而影响 POC 分布, 因此多元分析中代入输沙量后, POC 变化直接与其相关。这说明虽然其它因素如生物活动对调查水域 POC 有一定程度的贡献, 但陆源输入对 POC 的影响仍占绝对优势地位。洪季输沙量是秋季长江口水域 POC 分布变异的重要驱动因素。

长江口不同空间水域 POC 与影响因素的相关性存在差异: 口门内 POC 与径流和 TSM 存在显著的正相关, 近岸区主要受输沙量影响, 而近海区与叶绿素 *a* 的相关程度最高(表 4)。这说明长江口不同子水域由于环境背景条件差异, POC 分布的驱动因素存在变化。口门内水域, 咸淡水交汇引起的颗粒物沉积和再悬浮作用的强度决定水体 POC 浓度, 而浑浊度较高的近岸水体 POC 对陆源输入泥沙的依赖性最强, 长江口外侧海域初级生产力水平成为 POC 浓度的重要影响因素(Wu *et al.*, 2003)。

表 4 长江口秋季表层 POC 与各影响因素的相关程度

Tab.4 Correlation between surface POC and influencing factors in the Changjiang River estuary in autumn

区域	相关系数 <i>R</i>			
	径流量	输沙量	TSM	叶绿素 <i>a</i>
整体	0.828($P=0.172$)	0.980($P=0.020$)	0.692($P=0.308$)	0.400($P=0.600$)
口门内	0.971($P=0.029$)	0.764($P=0.236$)	0.957($P=0.043$)	0.300($P=0.700$)
近岸区	0.807($P=0.193$)	0.948($P=0.052$)	0.735($P=0.268$)	-0.140($P=0.860$)
近海区	0.355($P=0.645$)	0.732($P=0.268$)	0.283($P=0.717$)	0.994($P=0.006$)

3 结论

(1) 2007—2012 年秋季长江口 POC 浓度范围为

0.03—16.95mg/L, 均值 2.30mg/L, 底层浓度高于表层。表层 POC 浓度年际间变化较之底层更为显著。

(2) 长江口区 POC 平面分布呈沿长江径流入海

方向逐渐降低的趋势,南部和西南部浓度较高,北部和东北部浓度较低,高值区出现在口门附近偏南部水域,不同年份 POC 平面分布总趋势基本一致。口门内和近岸水域 POC 显著高于近海水域。与口门内水域相比,近岸和近海水域 POC 年际变化更为剧烈。

(3) 长江口 POC 分布与盐度呈显著的负相关关系,但随盐度呈非保守性变化。POC 与 TSM 间呈极显著的线性正相关关系,悬浮物是 POC 分布的重要影响因素。POC 与叶绿素 *a* 相关关系较弱,大多数年份 POC 与叶绿素相关关系不显著。

(4) 河口来水来沙量对 POC 分布具有一定程度的制约性。长江口 POC 年际变异趋势与入海径流和泥沙较为一致,径流的主要影响区域在口门内和近岸区,输沙的主要影响区域在最大浑浊带和长江口北部水域。

(5) 长江口水域 POC 浓度与入海输沙量相关性最强,径流次之,与 TSM 和叶绿素 *a* 的相关性均未达到显著性水平。长江口不同区域 POC 分布的影响因素存在差异:口门内水域,咸淡水混合引起的悬浮物沉积和沉积物再悬浮强度决定水体 POC 浓度,浑浊度较高的近岸水体 POC 对陆源输入泥沙的依赖性最强,长江口外侧海域初级生产力水平成为 POC 分布的重要影响因素。

参 考 文 献

石晓勇,张 婷,张传松等,2011. 黄海、东海颗粒有机碳的时空分布特征. 海洋环境科学, 30(1): 1—6

叶 翔,李 炎,黄邦钦等,2009. 台湾海峡南部夏季的颗粒有机碳. 海洋学报, 31(6): 87—99

刘文臣,王 荣,吉 鹏,1997. 东海颗粒有机碳的研究. 海洋与湖沼, 28(1): 39—43

刘占飞,彭兴跃,徐 立等,2000. 台湾海峡 1997 年夏季和 1998 年冬季两航次颗粒有机碳研究. 台湾海峡, 19(1): 95—101

刘庆霞,黄小平,张 霞等,2012. 2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源. 生态学报, 32(14): 4403—4412

李超伦,张 芳,申 欣等,2005. 胶州湾叶绿素的浓度、分布特征及其周年变化. 海洋与湖沼, 35(6): 499—506

吴家林,石晓勇,李克强等,2012. 夏季黄东海颗粒有机碳的分布特征. 中国海洋大学学报, 42(增刊): 150—156

沈焕庭,李九发,2011. 长江河口水沙输运. 北京: 海洋出版社, 95—104

沈焕庭,潘定安,2001. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 39

宋晓红,石学法,蔡德陵等,2007. 三峡截流后长江口秋季

TSM、POC 和 PN 的分布特征. 海洋科学进展, 25(2): 168—177

张乃星,宋金明,贺志鹏,2006. 海水颗粒有机碳(POC)变化的生物地球化学机制. 生态学报, 26(7): 2328—2339

张龙军,宫 萍,张向上,2005. 河口有机碳研究综述. 中国海洋大学学报, 35(5): 737—744

陈吉余,陈沈良,2003. 长江口生态环境变化及对河口治理的意见. 水利水电技术, 34(1): 19—25

林 晶,吴 莹,张 经等,2009. 最大浑浊带对长江口有机碳分布的影响初探. 海峡科学, 6: 150—152

金海燕,林以安,陈建芳等,2005. 黄海、东海颗粒有机碳的分布特征及其影响因子分析. 海洋学报, 27(5): 46—53

秦蕴珊,李 凡,徐善民等,1989. 南黄海海水中悬浮体的研究. 海洋与湖沼, 20(2): 101—112

黄自强,傅天宝,张远辉,1997. 东海水体中 POC 的分布特征. 台湾海峡, 16(2): 145—152

梁成菊,王江涛,谭丽菊,2010. 青岛近海夏季颗粒有机碳的分布特征. 海洋环境科学, 29(1): 12—16

程 君,石晓勇,张传松等,2011. 春季黄东海颗粒有机碳的分布特征. 环境科学, 32(9): 2505—2511

谢肖勃,戴敏英,苗 辉等,1992. 长江口区海水中溶解有机碳和颗粒有机碳的分布及变化的研究. 海洋科学集刊, 33: 131—137

翟世奎,孟 伟,于志刚等,2008. 三峡工程一期蓄水后的长江口海域环境. 北京: 科学出版社, 40—50

熊林芳,刘季花,白亚之等,2010. 南黄海与东海北部春季悬浮体颗粒有机碳分布. 海洋地质与第四纪地质, 30(3): 7—14

Cai D L, Tan F C, Edmond J M, 1988. Sources and transport of particulate organic carbon in the Amazon River and estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 26(1): 1—14

Cauwet G, Mackenzie F T, 1993. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yangtze and Yellow rivers (China). *Marine Chemistry*, 43(1/4): 235—246

Eatherall A, Naden P S, Cooper D M, 1998. Simulating carbon flux to the estuary: the first step. *Science of the Total Environment*, 210(1/6): 519—533

Goni M A, Cathey M W, Kim Y H *et al*, 2005. Fluxes and sources of suspended organic matter in an estuarine turbidity maximum region during low discharge conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63(4): 683—700

Hoshika A, Tanimoto T, Mishima Y *et al*, 2003. Variation of turbidity and particulate transport in the bottom layer of the East China Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(2): 443—455

Milliman J D, Xie Q C, Yang Z S, 1984. Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze River to the ocean. *American Journal of Science*, 284(7): 824—834

Murrell M C, Hollibaugh J T, 2000. Distribution and composition of dissolved and particulate organic carbon in northern San Francisco Bay during low flow conditions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51(1): 75—90

Raymond P A, Bauer J E, 2001. Use of ^{14}C and ^{13}C natural abundances for evaluating riverine, estuarine, and coastal DOC and POC sources and cycling: a review and synthesis.

- Organic Geochemistry, 32(4): 469—485
- Stramska M, 2010. The diffusive component of particulate organic carbon export in the North Atlantic estimated from SeaWiFS ocean color. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 57(2): 284—296
- Uncles R J, Frickers P E, Easton A E *et al*, 2000. Concentrations of suspended particulate organic carbon in the tidal Yorkshire Ouse River and Humber Estuary. *Science of the Total Environment*, 251: 233—242
- Wu Y, Zhang J, Li D J *et al*, 2003. Isotope variability of particulate organic matter at the PN section in the East China Sea. *Biogeochemistry*, 65(1): 31—49
- Zhang J, Wu Y, Jennerjahn T C *et al*, 2007. Distribution of organic matter in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and their stable carbon and nitrogen isotopic ratios: Implications for source discrimination and sedimentary dynamics. *Marine Chemistry*, 106(1/2): 111—126
- Zhu Z Y, Zhang J, Wu Y *et al*, 2006. Bulk particulate organic carbon in the East China Sea: tidal influence and bottom transport. *Progress in Oceanography*, 69(1): 37—60

INTERANNUAL VARIATION OF PARTICULATE ORGANIC CARBON AND ITS INFLUENCING FACTORS IN CHANGJIANG RIVER ESTUARY IN AUTUMN

XING Jian-Wei^{1,2}, XIAN Wei-Wei¹, SHEN Zhi-Liang¹, SHENG Xiu-Zhen²

(1. *Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071, China*; 2. *Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China*)

Abstract Using investigation data collected in the autumns in Nov. 2007, 2009, 2011, and 2012 in the Changjiang (Yangtze) River estuary and its adjacent waters, temporal and spatial distributions of particulate organic carbon (POC) and their interannual variations were studied. Relationships between POC and environmental factors, and the effects of runoff and sediment flux into the estuary were analyzed, to identify the factors controlling the POC distribution. Result shows that the interannual variation of POC concentration was larger at the surface than at the bottom. In the partitioning area of the estuary, POC concentration in the inner mouth remained relatively stable, while in the nearshore and offshore waters POC concentration showed remarkable interannual changes. The horizontal distribution of POC displayed a descending trend off river mouth. High-concentration POC occurred in the southern part of nearshore waters, and significantly higher within the mouth and in nearshore waters than in the offshore. In addition, POC concentration varied less interannually within month and nearshore than in offshore regions. Not all the POC distribution increased with salinity increase, showing a non-conservative behavior with salinity. POC was positively correlated significantly with total suspended matters and weakly with chlorophyll *a*. Runoff and sediment discharge were major factors controlling POC distribution in the areas proximal to estuary. The areas under the impact of runoff situated mainly within the mouth and nearshore zones, especially in the maximum turbidity zone (MTZ). The MTZ and the areas to the north in the estuary were directly under the impact of sediment discharge, causing high POC concentration. Other factors may also affect the POC concentration, e.g., deposition and resuspension of sediments within and near mouth regions, and primary productivity for the offshore.

Key words particulate organic carbon (POC); interannual variation; influencing factors; autumn; Changjiang River estuary