

# 2015 年秋季长江口有机碳的分布特征及其影响因素

张珊珊<sup>1,2</sup>, 线薇薇<sup>1,3</sup>, 梁 翠<sup>1</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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:**依据 2015 年 11 月对长江口及其邻近海域的综合调查, 分析了秋季长江口颗粒有机碳 (POC) 和溶解有机碳 (DOC) 的分布特征及其与环境因子的关系。结果表明: 2015 年秋季长江口 POC 的质量浓度为 0.65 ~ 8.25 mg/L, 均值为 1.34 mg/L, 整体呈现近岸高、远岸低, 表层低、底层高的分布趋势; DOC 的质量浓度为 0.77 ~ 2.69 mg/L, 均值为 1.49 mg/L, 整体表现为近岸高、远岸低, 表层高、底层低的变化特征。有机碳与总悬浮颗粒物 (TSM) 的线性回归关系表明, 陆源输入对 POC 含量分布贡献很大; 有机碳和盐度 (S) 的极显著相关性说明, S 对有机碳的影响主要体现在海水对有机碳的稀释作用及促进 POC 向 DOC 转化两个方面; DOC 与 COD 的显著相关性, 揭示了 DOC 的来源与长江径流和河口沿岸工农业排污输入密切相关。

**关键词:**颗粒有机碳 (POC); 溶解有机碳 (DOC); 分布特征; 环境影响因子; 长江口

**中图分类号:** X145; P734      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-6336(2018)01-0055-07

## Distribution characteristics of total organic carbon and influence factors in the Yangtze River Estuary in autumn 2015

ZHANG Shan-shan<sup>1,2</sup>, XIAN Wei-wei<sup>1,3</sup>, LIANG Cui<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Based on the data from the comprehensive survey in the Yangtze River estuary and its adjacent waters in November 2015, the distribution characteristics of the particulate organic carbon (POC) and dissolved organic carbon (DOC) and their relationship with environmental factors were analyzed. Results suggested that the concentrations of POC in the Yangtze River estuary ranged from 0.65 to 8.25 mg/L, with an average of 1.34 mg/L. POC concentration decreased seaward, with its highest value occurring in the coastal zones, and, vertically, the POC concentration in bottom layer was higher than in the surface. DOC concentration ranged from 0.77 to 2.69 mg/L, with a mean value of 1.49 mg/L. Similar to POC, DOC also showed higher concentrations in coastal zones and lower in outer sea in horizontal distribution, while, DOC concentration was higher in the surface than in the bottom in vertical distribution, which was opposite to POC. POC had a positive relationship with total suspended matter (TSM), which indicated a profound impact by terrestrial inputs on the POC distribution. The significant correlation between organic carbon and salinity indicated that the effect of salinity on organic carbon was enhanced by the conversion of POC to DOC and the

收稿日期: 2017-01-10, 修订日期: 2017-04-13

基金项目: 国家自然科学基金委-山东省联合基金项目 (U1606404); 国家自然科学基金面上项目 (31272663, 41176138); 国务院三峡工程建设委员会资助项目 (JJ 2015-011)

作者简介: 张珊珊 (1992-), 女, 山东莱芜人, 硕士, 主要研究方向为海洋环境化学, E-mail: dream\_zhss@163.com

通讯作者: 线薇薇 (1969-), 女, 研究员, E-mail: wxian@qdio.ac.cn

dilution of organic carbon by seawater. The strong correlation between DOC and COD indicated that DOC and oxygen-demanding organic carbon had the same source in some degree, part of DOC might originate from the runoff and sewage discharge along the river.

**Key words:** particulate organic carbon (POC); dissolved organic carbon (DOC); distribution characteristics; environmental factors; Yangtze River estuary

随着近年来全球工业化和社会经济的快速发展,大气中 CO<sub>2</sub> 等温室气体急剧增加引起全球变暖趋势日益显著,人类每年排入大气中的 CO<sub>2</sub> 以 C 计约为  $5.5 \times 10^9$  t,其中大约有  $2.0 \times 10^9$  t 被海洋吸收,占总排放量的 35%<sup>[1]</sup>。海洋作为地球上最大的碳库,不仅是大气中 CO<sub>2</sub> 的源,同时也是碳汇,对缓和气候变化以及调控大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的稳定起到重要作用。目前全球碳循环研究已经成为国际地学的主要研究课题<sup>[2]</sup>,在国际地圈与生物圈计划 (IGBP) 的许多重大国际合作项目中均涉及到全球碳的海洋生物地球化学循环。其中,海洋中有机碳 (total organic carbon, TOC), 主要分为颗粒有机碳 (particulate organic carbon, POC) 和溶解有机碳 (dissolved organic carbon, DOC) 两类,是海洋生命的支撑者和海洋碳循环的主要参与者<sup>[3]</sup>。到目前为止,关于海洋有机碳的研究主要集中在海水有机碳的通量、来源、分布、传输和转化等生物化学过程方面。

河口作为陆地生态系统和海洋生态系统的结合地带,环境多变、性质独特,受盐度及水动力条件影响,是物质和能量交换最为频繁、影响最为显著的区域。同时,该区域水体存留时间短,咸、淡水性质发生变化,各类物质交换发生速率快,是有机碳物质循环最复杂的水体之一<sup>[4]</sup>。此外,河口作为陆架边缘海的重要组成部分,是海洋向陆地的过渡带,对全球碳循环尤其是碳的生物地球化学循环发挥着极其重要的作用<sup>[5]</sup>。因此,正确认识河口有机碳的形态及其迁移转化过程,可以为揭示陆架边缘海对全球有机碳循环提供重要参考。

长江口作为世界第三大河的入海口,不仅是河流入海泥沙、生源要素及污染物的归宿,也是人类活动最为频繁、环境变化影响最为深远的地区,同时也是全球变化研究和海洋地质科学的前沿领域之一<sup>[6]</sup>。长江口及其邻近海域的碳循环状况一直都受到国内外专家的广泛关注,Milliman 等<sup>[7]</sup>在 80 年代初就对长江口 POC 通量作了研

究,揭示长江每年大约输运 1200 万 t 颗粒有机碳入海;林晶等<sup>[8]</sup>通过对长江口 DOC 与盐度的相关性研究,得到该区域 DOC 受水文结构控制;邢建伟等<sup>[9]</sup>对冬、春季长江口 POC 的季节分布和输运特征进行深入研究,并结合 POC/Chl *a* 比值测算出有机碎屑是调查水域 POC 的主要来源和存在形式。上述研究均单独对 POC 或 DOC 展开分析,但将 POC 与 DOC 结合在一起探讨河口环境因素对总有机碳影响的研究较少,本文依据 2015 年 11 月长江口秋季有机碳最新调查资料,探讨近期长江口及其邻近海域有机碳的空间分布规律及其与河口环境因子的关系,为深入研究陆架边缘海有机碳的生物地球化学循环提供的数据支持和参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 站位分布

2015 年 11 月初租用“浙嵊渔”号调查船对长江口及其邻近海域进行综合调查,调查区域为 30°45'N ~ 32°00'N, 121°10'E ~ 123°30'E 海域,自西向东涵盖 8 个断面,共计 40 个站位(图 1)。依据调查海域盐度 (*S*) 和总悬浮物 (TSM) 的变化特征将该海域分成 3 个水域<sup>[10]</sup>,分别是口门区、近岸区和近海区。其中盐度较低 ( $S < 5$ )、浊度较高的海域是口门区,包括 35、36、37、38、39 号站;中等盐度 ( $5 < S < 25$ )、浊度最高的近岸区是最大浑浊带的主要分布区,包括 9、10、11、12、15、16、17、18、21、22、23、24、25、28、29、30、31、32、40 号站;近海区盐度较高 ( $S > 25$ )、浊度最低,包括 1、2、3、4、5、6、7、8、13、14、19、20、26、27、33、34 号站。

### 1.2 样品采集与测定

根据《海洋调查规范》(GB12763-2007),现场用 Niskin 采水器分层采取水样,采集的海水立即用 Whatman GF/F 玻璃纤维膜(450℃预灼烧 6 h,称重)进行负压抽滤,每个样品做两个平行样,各样品过滤水样体积在 80 ~ 300 mL 之间不等(视水体浑浊程度而定)。所得滤膜用锡纸包好置于

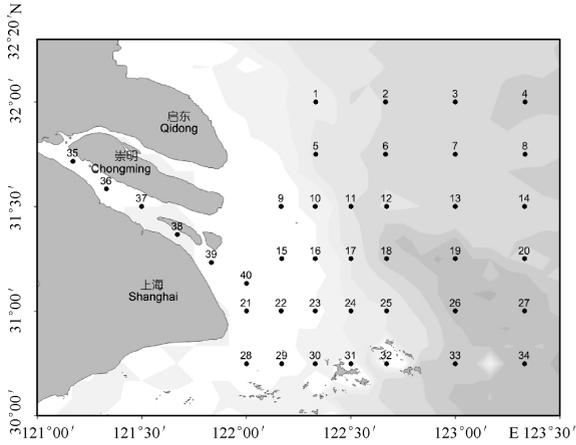


图 1 长江口调查站位

Fig. 1 Sampling stations in the Yangtze River estuary

-20℃ 下冷冻保存,用于测定 POC;弃掉最先滤出的大约 200 mL 过滤水样,然后将过滤后的水样移至 60 mL 的棕色玻璃瓶(450℃ 预灼烧 6 h)中,并滴加 2 滴饱和氯化汞溶液固定后,置于 4℃ 保存,用于测定 DOC。各站位用 Sea-Bird-25 CTD 同步测定深度、温度(*T*)、盐度(*S*)等水文指标,并依据《海洋监测规范》(GB17378. 4-2007)进行总悬浮颗粒物(TSM)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、营养盐等水化环境指标的取样及监测分析。

POC 的测定<sup>[10]</sup>:将保存的滤膜冷冻干燥 24 h 之后置于干燥器中,待恒重后称重,用差值法测定过滤水体中 TSM 质量,并计算 TSM 浓度;为除去样品中的无机碳,将称重后的膜样放于洁净的蒸发皿中,后置于装有浓盐酸的干燥器中熏蒸 24 h;将经酸化后的膜样在 60℃ 的烘箱中烘 48 h,后置于干燥皿中,待恒重后用锡膜包裹,用 Elemental Analyzer Vario EL cube 型元素分析仪测定膜上碳元素的质量百分含量(POC%),测定标准偏差

≤0.1%。然后利用 TSM 浓度乘以 POC% 即得 POC 浓度。

DOC 的测定:采用世界上广泛应用的高温催化氧化法,利用岛津 TOC-V<sub>CPH</sub> 型总有机碳分析仪测定,利用邻苯二甲酸氢钾做标准溶液,检出限为 4 μg/L,测定相对标准偏差小于 2%。此方法不仅可以氧化低分子有机物,还能高效的氧化不溶性或含有高分子状的难分解有机物,被证明是氧化水体中有机物最充分的方法<sup>[11]</sup>。

Chl *a* 样品经 90% 丙酮萃取后取上清液,依据 GB/T12763. 6-2007 用 Turner-Designs-Model 10 荧光光度计测定<sup>[12]</sup>。COD 样品解冻后采用碱性高锰酸钾法测定,DO 用碘量法在采样后现场测定,参照 GB17378. 4-2007。

## 2 结果与讨论

### 2.1 有机碳含量及分布规律

#### 2.1.1 POC 含量及分布

2015 年秋季调查显示(表 1),长江口及其邻近海域 POC 的质量浓度为 0.65 ~ 8.25 mg/L,均值为 1.34 mg/L。其中,表层 POC 的浓度范围为 0.65 ~ 3.49 mg/L,均值为 1.13 mg/L。由图 2a 可以看出,表层 POC 高值区主要集中在口门南部的最大浑浊区及洋山港附近,而后随离岸距离的增加 POC 浓度迅速降低,整体呈现出近岸高、远岸低的分布趋势。底层 POC 浓度为 0.66 ~ 8.25 mg/L,均值为 1.55 mg/L,与表层相比,底层 POC 分布趋势同表层基本一致,但高值范围有所增大(图 2b)。同时,底层 POC 平均浓度略高于表层,但两者差异未达到显著性水平( $P > 0.05$ ),且底层变幅较表层更大,与金海燕等<sup>[13]</sup>结论一致。

表 1 2015 年秋季长江口有机碳浓度(mg/L)

Tab. 1 The concentrations of POC and DOC in the Yangtze River estuary in autumn 2015(mg/L)

水层	有机碳	总海域		口门内		近岸区		近海区	
		平均值±S. D.	范围						
表层	POC	1.13±0.81	0.65 ~ 3.49	1.72±0.32	1.27 ~ 1.96	1.37±1.01	0.68 ~ 3.49	0.98±0.08	0.65 ~ 0.98
	DOC	1.55±0.36	0.77 ~ 2.69	1.77±0.39	1.30 ~ 2.25	1.59±0.44	0.77 ~ 2.69	1.46±0.16	1.17 ~ 1.73
底层	POC	1.55±1.64	0.66 ~ 8.25	2.86±0.45	2.23 ~ 3.26	2.16±2.11	0.68 ~ 8.25	0.73±0.06	0.66 ~ 0.86
	DOC	1.43±0.33	0.81 ~ 2.34	1.56±0.22	1.28 ~ 1.82	1.57±0.33	1.15 ~ 2.34	1.27±0.24	0.81 ~ 1.70

注: S. D. 代表标准偏差

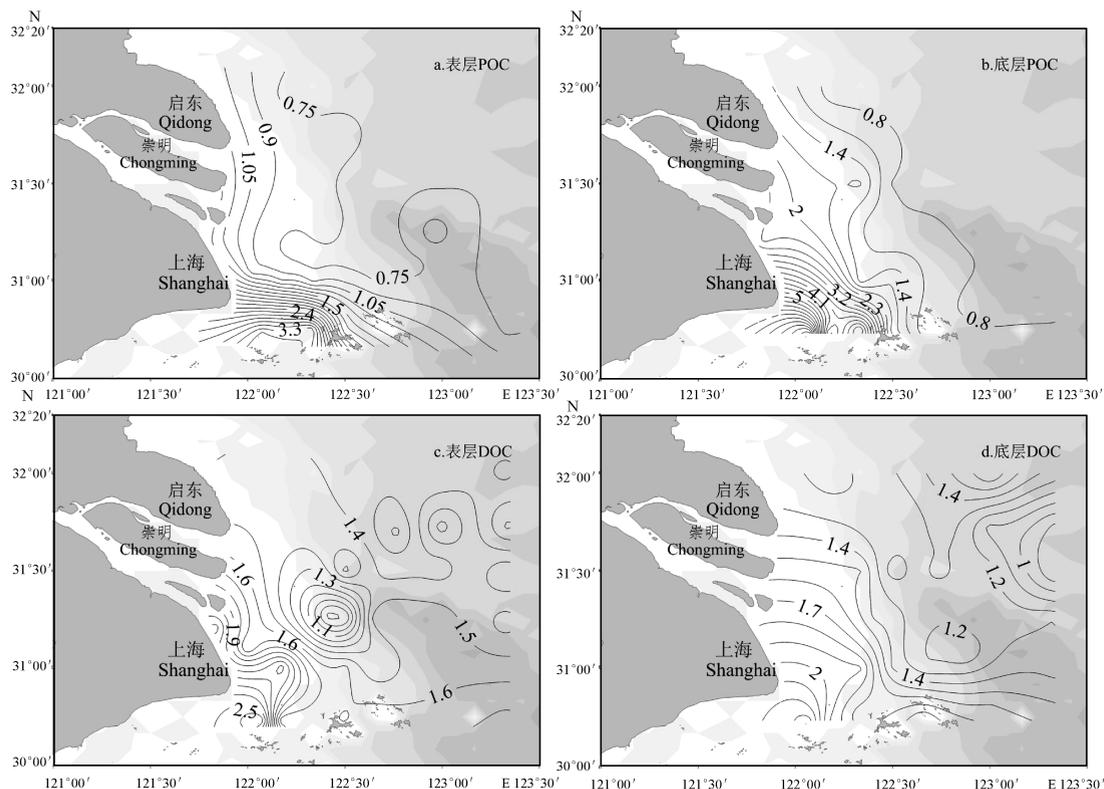


图2 2015年秋季有机碳的平面分布(mg/L)

Fig. 2 Distribution features of POC and DOC in autumn 2015 (mg/L)

宋晓红等<sup>[14]</sup>对三峡截流后该海域秋季(2004年11~12月)表、底层POC的测定均值分别为3.81 mg/L和9.09 mg/L,远高于本文测定结果;邢建伟<sup>[9]</sup>统计2007~2012年长江口同区域秋季表、底层POC浓度均值分别是1.84 mg/L、2.76 mg/L,略高于本文结果,但底层含量高于表层的趋势与其一致。推测近年来POC浓度不断降低的原因可能与长江径流输沙量的减少有关。

### 2.1.2 DOC含量及分布

2015年秋季调查水域DOC的质量浓度为0.77~2.69 mg/L,均值为1.49 mg/L。其中,表层DOC的浓度范围为0.77~2.69 mg/L,均值为1.55 mg/L;底层DOC浓度范围介于0.81~1.43 mg/L之间,均值为1.43 mg/L(表1)。

表层DOC高值区集中在口门南部的最大浑浊区(图2c),整体来看,DOC分布随离岸距离增加由西南向东北呈梯度下降,表现为近岸高、远岸低的趋势,值得注意的是在调查区域的中部(31°15'N~31°30'N,122°15'E~122°30'E附近)却出现了等值线密集的涡状低值区。底层DOC的分布大致遵循随离岸距离的增加浓度呈梯度下降的趋势(图2d)。调查水域表层和底层DOC平均浓

度无显著性差异( $P>0.05$ ),但与POC不同的是,DOC垂直分布整体呈现表层含量略高于底层的趋势。

与长江口历史研究对比;谢肖勃<sup>[15]</sup>等调查得到80年代中期(1985年11月)该海域DOC均值含量表层为2.62 mg/L,底层为1.95 mg/L,表、底层含量均高于本研究,但表层含量高于底层的趋势一致;邢建伟<sup>[10]</sup>等研究显示2012年同期该海域表层DOC均值为1.54 mg/L,底层为1.69 mg/L,与本研究结果相差不大,表明近3a秋季DOC变化较为稳定。

## 2.2 有机碳影响因素

### 2.2.1 有机碳与河口环境因子的相关性分析

长江口及其邻近海域地形复杂、环境变化多样,且终年处于动态和周期性循环之中,有机碳的浓度和分布特征与如此复杂的环境因素关系密切。因此,本研究依据长江口2015年秋季综合调查数据,分析探讨环境因子中总悬浮颗粒物(TSM)、叶绿素a(Chl a)、pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)和盐度(S)与有机碳的相关关系,进一步阐明秋季长江口有机碳分布的影响因素。

表 2 2015 年秋季长江口有机碳与环境因子的相关关系

Tab.2 The correlation between POC/DOC and environmental factors in the Yangtze River estuary in autumn 2015

种类	水层	TSM	Chl <i>a</i>	pH	DO	COD	S
POC	表层	0.975 **	0.155	-0.379 *	0.300	0.346	-0.469 **
	底层	0.449 *	-0.054	-0.252	0.596 **	0.675 **	-0.871 **
DOC	表层	0.213	0.137	-0.327	0.217	0.411 *	-0.369 *
	底层	0.259	0.050	-0.145	0.380 *	0.365 *	-0.383 *

注: \* 代表有显著的相关性( $P < 0.05$ ); \*\* 代表有极显著的相关性( $P < 0.01$ )

由表 2 分析可知,表、底层 POC 和 DOC 与环境因子的相关性存在差异。表、底层 POC 浓度均与 TSM 间呈现显著性正相关,与 S 呈现极显著性负相关。此外,表层 POC 还与 pH 呈显著性负相关,底层 POC 与 DO 和 COD 呈现极显著性正相关。表、底层 DOC 浓度均与 COD 呈显著性正相关,与 S 呈显著负相关。Chl *a* 是浮游植物进行光合作用的主要色素,同时也是表征浮游植物生产量和生产能力的一个重要指标<sup>[16]</sup>,POC 与 Chl *a* 的相关性也从侧面反映出浮游植物现场生产对 POC 贡献的大小。然而本研究中 Chl *a* 与表层 POC 呈现不显著的正相关关系、与底层 POC 呈现微弱的负相关关系,推测现场生产不是影响 POC 来源的主要因素;Chl *a* 与表、底层 DOC 均呈微弱的正相关关系可以推测现场初级生产对 DOC 有一定的贡献,但不是主要来源<sup>[16]</sup>。因此,本文着重探讨 TSM、S 和 COD 对有机碳的影响。

### 2.2.2 POC 与总悬浮颗粒物(TSM)

TSM 是长江径流输送陆源颗粒有机物的主要载体。本研究结果表明,长江口 POC 与 TSM 间呈现显著的线性正相关关系(图 3),表明 TSM 浓度是影响 POC 含量及分布的一个重要因素<sup>[17]</sup>,暗示了长江陆源输入的颗粒物是该水域 POC 的重要来源之一。由此推断,近年来 POC 浓度不断降低的原因与长江径流输沙量的减少有关。利用线性拟合得到的回归方程表明,表层 POC 与 TSM 的相关关系( $R^2 = 0.949$ )明显高于底层( $R^2 = 0.202$ ),说明底层可能受长江口复杂的水动力环境、底栖生物扰动及沉积物再悬浮等作用的综合影响<sup>[18]</sup>。总体来看,调查水域中 TSM 含量越高,POC 浓度越大,表明陆源输入对 POC 的影响很大,TSM 的吸附、解析及再悬浮等行为也是影响水体 POC 分布的重要因素。

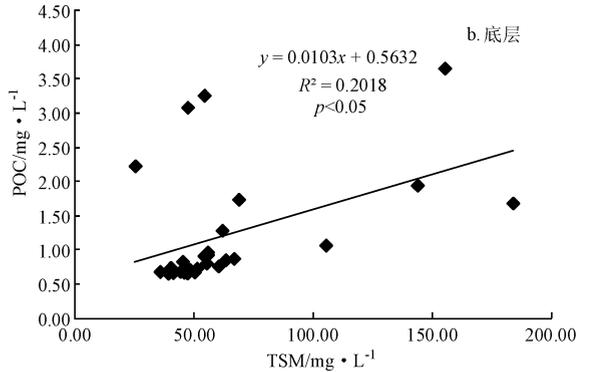
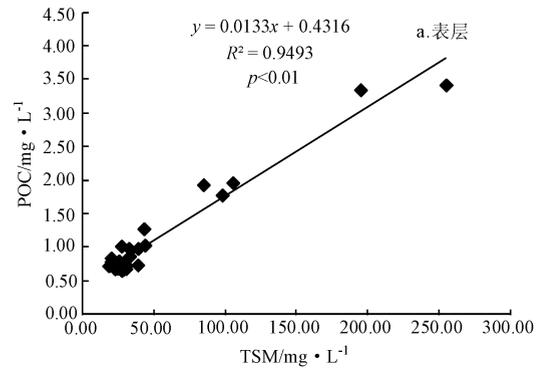


图 3 POC 与 TSM 的线性关系

Fig. 3 Correlation between POC and TSM in different layers

### 2.2.3 POC、DOC 与盐度(S)

水体盐度在河口处发生剧烈的变化。一般说来,海水稀释作用导致河口淡咸水混合过程中有机碳含量和盐度呈良好的线性关系<sup>[19]</sup>。张向上等<sup>[11]</sup>研究表明:影响 POC 随盐度变化的因素主要是由 POC 的吸附-解吸、DOC 的絮凝沉降以及悬浮颗粒物本身的絮凝沉降决定的。DOC 与盐度的关系则常用于评价有机质由陆地向海洋运输过程中是否具有保守行为。一般来讲,河水的 DOC 浓度较高,在河口区域 DOC 与盐度呈良好线性负相关关系,这种保守性稀释行为是咸淡水的均匀混合造成的<sup>[11]</sup>。

由图 4 a、图 4 b 可见,本次调查表、底层 POC 与盐度均呈现极显著负相关,与以往关于 2007 ~ 2012 年秋季长江口表层 POC 与盐度均呈负相关关系的研究<sup>[9]</sup>结果一致,与表层 POC 随盐度的升高浓度缓慢降低不同,底层 POC 与盐度呈现出线性降低的趋势,尤其在  $S < 30$  的区域内,随盐度的上升 POC 出现直线下降趋势,说明此时海水的稀释作用对 POC 浓度的影响占据主导地位<sup>[14]</sup>。调查水域表、底层 POC 的分布受咸、淡水团物理混合控制作用十分明显,体现了典型的随盐度增加,

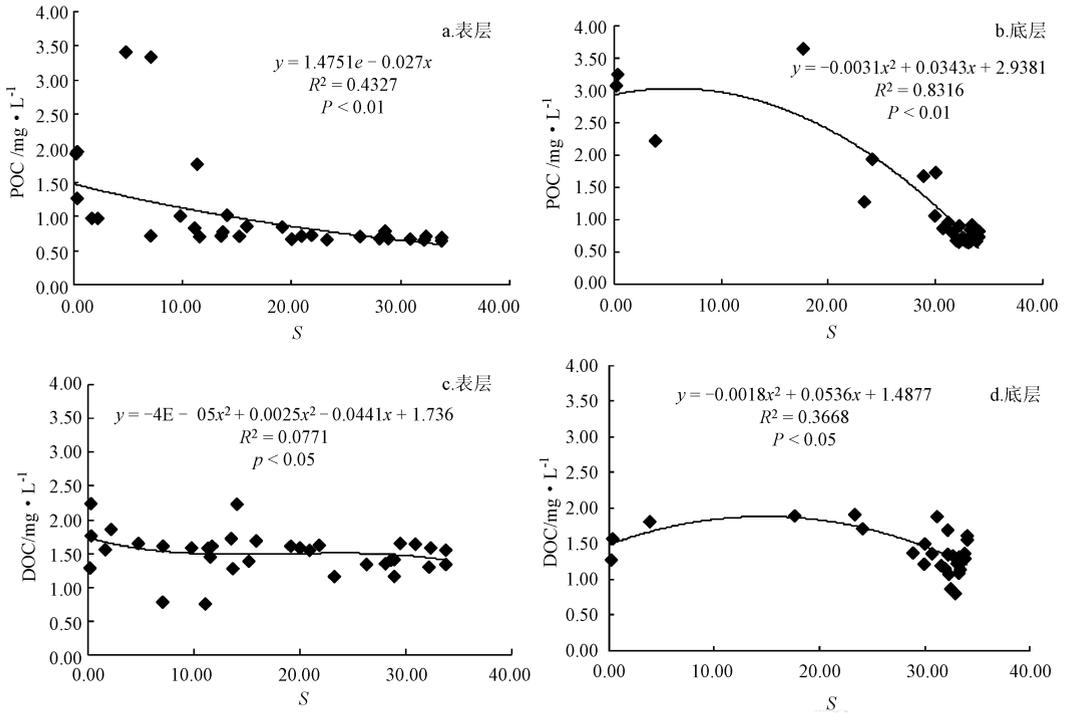


图4 POC、DOC与盐度的相关关系

Fig. 4 Correlation between POC/DOC and S in different layers

河流陆源输入物质被低浓度的外海水稀释的过程。图4 c、图4 d显示了DOC与盐度间的回归关系,从图中可以看出,DOC随盐度的变化更趋复杂。具体表现为,表层,在 $S < 10$ 及 $S > 30$ 的区域,DOC随盐度的上升而下降,表明DOC主要受到海水稀释作用的影响;当 $10 < S < 20$ 时,DOC变化幅度不大,而此区域恰好是最大浑浊区,研究发现,在最大浑浊带(TMZ)水域DOC和POC之间存在着相互的转化<sup>[4]</sup>,在细菌分解的作用下,POC是DOC的一个源<sup>[19]</sup>,结合表层POC在该区域( $10 < S < 20$ )的减少可以推测,POC向DOC的转化可能是导致该区域DOC随着盐度的上升浓度变化不大的一个重要因素。在底层,当 $S < 20$ 时,DOC随盐度的上升而增大,主要原因可能是该区域位于水动力变化复杂的最大浑浊区,表层淡水与底层盐水之间的涡动扩散,以及较大的风浪加剧了底部沉积物的再悬浮及有机质分解转化作用。而当 $S > 20$ 时,DOC又随盐度上升呈现保守性下降的趋势,暗示海水稀释作用在此区域占据主导地位。综上表明,长江口水域有机碳与盐度的关系非常复杂,且在不同的水层表现各异。在河口咸淡水混合过程中,影响POC随盐度变化的因素主要是海水稀释作用,影响DOC随盐度变化的主要因素分别为颗粒态向溶解态转化和海水的

稀释作用。

#### 2.2.4 DOC与化学需氧量(COD)

COD是一种间接表征水体受有机质污染程度的指标,COD越大,表明水体受有机污染物的污染程度越重,可用来客观反映水体受有机污染物污染程度<sup>[9]</sup>。因此,结合同一时期的COD和DOC数据可以更好地指示调查海区的污染程度。由表2可以看出,2015年秋季调查中DOC与COD达到了显著性正相关水平,这在一定程度上表明调查海区的DOC与耗氧有机物具有同源性。而已有的研究表明河口的耗氧有机物主要来自于河流径流、陆源排污以及水上交通等途径。因此亦可推断,长江口水域DOC与径流和河口沿岸工农业排污的输入密切相关。

### 3 结论

(1)2015年秋季长江口水域POC的质量浓度为0.65~8.25 mg/L,均值为1.34 mg/L。与历史同期水平相比,近年来有明显降低的趋势,原因是近年长江径流输沙量减少。高值区主要集中在最大浑浊区,随离岸距离的增加浓度逐渐降低,整体呈现近岸高、远岸低,表层低、底层高的分布特征。

(2)DOC的质量浓度为0.77~2.69 mg/L,均

值为 1.49 mg/L,近 3 a 同期监测结果相差不大。DOC 含量随离岸距离增加由西南向东北呈梯度下降,整体表现为近岸高、远岸低,表层高、底层低的分布特征。

(3) 有机碳与河口环境因子的相关分析表明, Chl *a* 不是影响秋季长江口有机碳含量分布的主要因素,总悬浮颗粒物(TSM)、盐度(*S*)和化学需氧量(COD)则对有机碳的贡献较大。分别指示陆源输入、河口咸淡水混合变化及沿岸工农业排污等均影响有机碳的含量分布。因长江口有机碳分布有明显的季节变化,本文仅对秋季作了研究,关于该海域有机碳季节变化规律有待进一步深入探讨。

### 参考文献:

- [1] CHEN C T A, ZHAI W D, DAI M H. Riverine input and air-sea CO<sub>2</sub> exchanges near the Changjiang (Yangtze River) estuary: status quo and implication on possible future changes in metabolic status [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28 (12): 1476-1482.
- [2] 李 宁. 长江口与胶州湾海水有机碳的分布、来源及与氮、磷的耦合关系[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所),2006.
- [3] 赵玉庭,梁生康,石晓勇,等. 春季黄海海域颗粒有机碳的分布特征及影响因素[J]. *中国海洋大学学报*, 2013, 43 (2): 48-54.
- [4] TIPPING E, MARKER A F H, BUTTERWICK C, et al. Organic carbon in the Humber river [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 194/195:345-355.
- [5] HARVEY H R, MANNINO A. The chemical composition and cycling of particulate and macromolecular dissolved organic matter in temperate estuaries as revealed by molecular organic tracers [J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(4):527-542.
- [6] ZHANG W Y, JIN H Y, YAO X Y, et al. Grain size composition and transport of sedimentary organic carbon in the Changjiang River (Yangtze River) Estuary and Hangzhou Bay and their adjacent waters [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34 (10): 46-56.
- [7] MILLIMAN J D, XIE Q C, YANG Z S. Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze River to the ocean [J]. *American Journal of Science*, 1984, 284(7):824-834.
- [8] 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(6):150-151,159.
- [9] 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, 45 (5): 964-972.
- [10] 邢建伟,线薇薇,绳秀珍. 2012 年长江口水域溶解有机碳分布特征及其与环境因子的关系[J]. *中国海洋大学学报*, 2014, 44(8):74-82.
- [11] 张向上. 黄河口有机碳的时空分布及影响因素研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2004.
- [12] 李 照,宋书群,李才文. 长江口及其邻近海域叶绿素 *a* 分布特征及其与低氧区形成的关系[J]. *海洋科学*, 2016, 40(2): 1-10.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 谢肖勃,戴敏英,苗 辉,等. 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[J]. *海洋科学集刊*, 1992, 33:131-137.
- [16] 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*, 2015, 45(2):101-108,126.
- [17] ZHU Z Y, ZHANG J, WU Y, et al. Bulk particulate organic carbon in the East China Sea: tidal influence and bottom transport [J]. *Progress in Oceanography*, 2006, 69(1):37-60.
- [18] 程 君,张传松,王海荣,等. 冬季黄东海颗粒有机碳的时空分布特征[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(1):25-29.
- [19] BELYAEV N A, PONYAEV M S, KIRIUTIN A M. Organic carbon in water, particulate matter, and upper layer of bottom sediments of the central part of the Kara Sea [J]. *Oceanology*, 2015, 55(4):508-520.