

珠江口水体有机碳的季节性变化

郭威^{1,2}, 叶丰¹, 连忠廉³, 贾国东¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 国家海洋局南海环境监测中心, 广东 广州 510300

摘要: 调查了珠江口不同季节颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)含量的分布特征, 结合碳氮比值(C/N)、叶绿素 a(Chl a)含量、溶解氧(dissolved oxygen, DO)含量等水化学参数, 探讨了珠江口 POC、DOC 来源、输送方式及混合行为的季节性变化。结果表明, 珠江口水体 POC 可能主要受到水体自生浮游植物有机碳输入的影响, DOC 可能主要来自于河流输送的陆源有机碳。在降雨量较大的 5 月份, POC 来自自生浮游植物有机碳的贡献相对减小。降雨量同样较大的 8 月份 DOC 来自河流输送的陆源有机碳的贡献增加。不同季节珠江口水体总有机碳中的 DOC 一直高于 POC。珠江口 POC、DOC 含量受到淡水与海水混合进程的影响, 淡水与海水的混合效应可能是从出虎门进入伶仃洋的低盐度区(盐度 1‰~5‰的水体)开始延伸至外海。微生物的降解作用可能对 POC 和 DOC 在出虎门之前的下降趋势产生了重要影响, 而微生物对新鲜的浮游植物有机碳的利用、以及浮游植物生产量的降低和颗粒物絮凝沉降作用则可能是 POC 在出虎门后下降幅度大于 DOC 的重要原因。

关键词: 颗粒有机碳; 溶解有机碳; 有机碳含量; 不同季节; 珠江口

中图分类号: P734.4⁺3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5470(2016)04-0040-11

Seasonal changes of organic carbon in the Pearl River estuary

GUO Wei^{1,2}, YE Feng¹, LIAN Zhonglian³, JIA Guodong¹

1. Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. South China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China

Abstract: Seasonal distributions of particulate organic carbon (POC) and dissolved organic carbon (DOC) concentrations, as well as their sources, transports and mixing behaviors, in the Pearl River estuary (PRE) are reported in this paper. Samples were collected in November 2013, and in February, May and August 2014. The results suggest that the sources of POC were mainly in situ aquatic phytoplankton, and the source of DOC was mainly input from terrigenous organic carbon. However, aquatic phytoplankton might have contributed less to POC in May than in other months due to intensified erosion by high rainfall during May, and terrigenous organic carbon contribution to DOC increased in August. DOC was always the main portion, i.e., higher than POC, in the total organic carbon. The conservative mixing process of riverine and marine organic carbon occurred from the low salinity zone (salinity of 1‰~5‰) near the Humen Outlet to the open sea area out of the PRE. Biological degradation may have played an important role in reducing POC and DOC concentrations in the upper reach of the

收稿日期: 2015-08-18; 修订日期: 2015-09-27。林强编辑

基金项目: 国家自然科学基金(41276072、41306102)

作者简介: 郭威(1988—), 男, 湖北省洪湖市人, 博士研究生。从事河口水体不同形态碳的地球化学特征研究。E-mail: guowei@ieecas.cn

通信作者: 贾国东。E-mail: jiagd@gig.ac.cn

Received date: 2015-08-18; **Revised date:** 2015-09-27. Editor: LIN Qiang

Foundation item: Natural Science Foundation of China (41276072 and 41306102)

Corresponding author: JIA Guodong. E-mail: jiagd@gig.ac.cn

Humen Outlet. Preferential consumption of fresh phytoplankton organic carbon, reduction of phytoplankton production, and flocculation and sinking of particulate matter might have collectively resulted in the much more reduction of POC than DOC in the upper reach.

Key words: Particulate organic carbon; dissolved organic carbon; mixing behavior; seasonal; Pear River estuary

河流及其河口是连接陆地和海洋的纽带, 陆地表面大约有87%的面积通过河流及其河口与海岸相连(Hedges et al, 1997; Ludwig et al, 1998)。河流每年向海洋输送的有机碳(溶解有机碳和颗粒有机碳)达到0.36~0.8Gt, 占河流总有机碳输送的47%~68%左右(Bauer et al, 2011)。河流向海洋输送的有机质主要通过河口(Bianchi et al, 2011), 河口碳循环发生于陆地和海洋交界处, 被认为是全球碳循环和碳收支的重要组成部分(Cole et al, 2007; Bianchi et al, 2011; Bauer et al, 2013)。

河口水体中很大一部分的有机碳主要以颗粒有机碳颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)和溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)的形式存在, 它们主要来源于陆地、海洋的输送, 以及河口的原地生产(Cole et al, 2007)。但是由于河口环境的不同, 其有机质的来源、特征及地球化学行为可能并不相同。例如长江口(Thurman, 1985)和黄河口(Liu et al, 2006; Wu et al, 2007)有机质的分布主要受到陆源输入的影响, 而美国东海岸的约克河口和帕克河口有机质的分布主要受水生自源有机质输入的影响(Peterson et al, 1994; Raymond et al, 2001)。另外, 河口处在海陆相互作用的耦合带上, 水体生产力水平, 复杂的水动力状况, 生物地球化学过程, 微生物作用和光氧化作用等也会对河口有机质的特征与分布产生影响(Blair et al, 2004)。

从20世纪80年代开始, 中国科学院南海海洋研究所的一些学者就开始对珠江口POC、DOC进行了相关研究, 例如, 王丽君等(1984)对1982年6—7月份南海东北部海区的DOC分布情况进行了调查, 分析了DOC的分布与深度盐度和叶绿素a之间的关系。陈金斯等(1988)对1986年5月(丰水期)和11月(枯水期)POC的性质来源和分布规律进行了研究, 其结果表明珠江口POC由北向南, 由东向西逐渐递减, 丰水期浓度高于枯水期, POC/PON(particulate organic nitrogen, 颗粒物有机氮)的结果表明POC的来源可能主要是陆源。蔡艳雅等(1990)对1987年3月份珠江口水域中的DOC、POC及表层沉积物中有机碳的含量分布变化特征进行了研究, 其结果表明DOC和POC分布都是西部沿岸较高, 由河口向海减少, 这一采样时期珠江口有机碳主要来自河流。陈绍

勇等(1990)对1987年6月珠江口POC的分布进行了调查, 应用逐步回归法对POC与其他水化学参数(pH、盐度、化学需氧量、硝酸盐含量)之间的相互关系进行了研究, 其结果也认为珠江口POC可能主要来源于河流的输入, 海洋浮游植物的初级生产还不足以影响POC的分布。综合这些研究来看, 20世纪80年代的珠江口水体有机碳可能主要来自于河流的输送, 而珠江流域河流水体中有机碳受控于降雨影响的土壤侵蚀作用, 其主要来自陆源有机碳的输入(高全洲等, 2001; Gao et al, 2002; 魏秀国, 2003)。

与20多年前相比, 珠江口水域环境在最近10~20年出现了变化, 主要是90年代以后, 珠江流域修建的大型水库拦截了大量的入海泥沙和悬浮颗粒物, 导致陆源输入珠江口的有机碳浓度减小(戴世宝等, 2007; Zhang et al, 2008), 另外农业活动、工业生产、生活废水以及海水养殖使得珠江口营养盐输入增加, 促进了浮游植物的生长(He et al, 2010; 刘庆霞等, 2012)。这些条件可能使珠江口有机碳的来源在最近10年发生了变化。例如, He等(2010)报道了2007年4月从东江流域至伶仃洋外南海水域POC、DOC含量分布情况的调查结果, 发现浮游植物有机碳的输入可能占据了珠江口上游广州河段POC来源的很大部分, 随着盐度的升高, 珠江口上游的广州河段、中游的虎门附近和下游靠近南海水域DOC和POC的来源可能也发生了变化。刘庆霞等(2012)报道了2010年夏季珠江口POC的分布情况, 通过二元混合模式计算得出珠江口北部和中部的POC主要以陆源有机碳为主, 其贡献率为64%, 但是到南部海域, POC主要以水生源有机碳为主, 其贡献率为68%。可以看出, 近几年来对珠江口有机碳分布进行的调查主要集中在某一个季节的POC或DOC上, 与之相比, 系统的对珠江口不同盐度和季节变化的POC、DOC含量分布研究相对较少。另外, 研究也显示, 在珠江口水域, 特别是低盐度区, 存在显著的DOC、POC含量亏损现象, 其原因可能与微生物的降解作用有关(Dai et al, 2006, 2008; He et al, 2010)。POC和DOC在河口中的这种行为可能影响其向海洋的输送。

珠江口处于典型的亚热带季风气候区, 季节性的气候变化对POC和DOC的来源和输入方式以及河

口行为的影响尚缺乏详细的调查研究。目前尚不清楚,河口区POC和DOC的性质与来源是否随不同季节环境的变化而存在相应的变化。本文通过珠江口不同季节POC和DOC的分布特征,结合一些水化学参数初步探讨珠江口有机碳来源及其季节变化,以及POC、DOC在珠江口水体中的地球化学行为,以为珠江口区域有机碳循环的研究提供新的认识和数据支持。

1 样品采集与分析

1.1 采样

分四个航次对珠江口水体进行了采样,时间跨度为一年,每3个月进行一次采样,采样的时间分别为2013年11月、2014年2月、2014年5月和2014年8月。采样点布局如图(图1),采样点水深在5.3~28m,利用有机玻璃采水器获取了表层水样(距水面0.5m),用于POC分析的水样现场立即经孔径为0.7 μm (直径25mm)的玻璃纤维滤膜(GF/F)过滤,获取的滤膜用锡箔纸包好立即冷冻保存(-20 $^{\circ}\text{C}$),带回实验室进行下一步分析。DOC分析的水样现场立即经孔径为0.7 μm (直径47mm)的玻璃纤维滤膜(GF/F)过滤,过滤后的水样装入聚乙烯瓶冷冻保存(-20 $^{\circ}\text{C}$),带回实验室进行下一步分析。5月和8月正处在该区域雨季,最外两个点表层水体受淡水的影响盐度较低,不能代表海洋水体,因此收集了这两点的下层较高盐度水体,相关调查数据如表1。

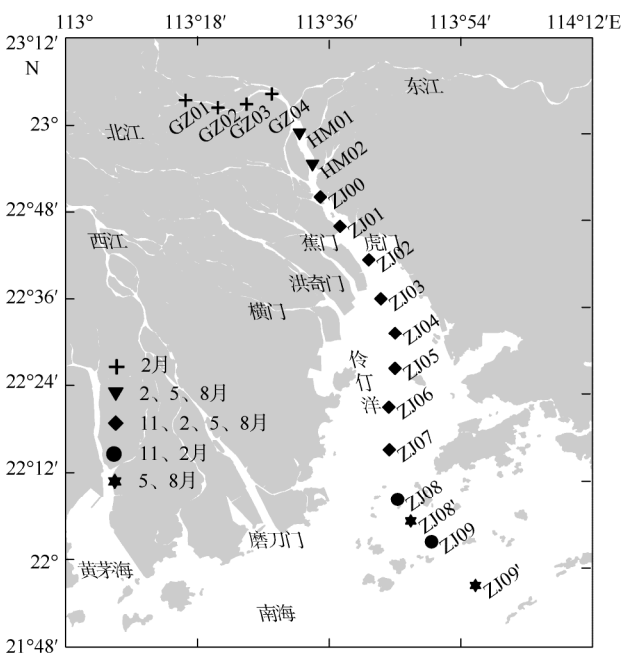


图1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Pearl River estuary

1.2 总悬浮物(TSS)含量分析

将直径为47mm的玻璃纤维滤膜(GF/F, 0.7 μm)预先灼烧后称重,在过滤器中加入滤膜连接真空泵过滤一定量的水样后,40 $^{\circ}\text{C}$ 烘干再次称重,过滤前与过滤后两次称得的重量之差再除以相应的过滤水体积即为悬浮物含量(TSS,单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

1.3 叶绿素a(Chl a)和溶解氧(DO)含量分析

盐度和温度通过mini-CTD(Valeport mini CTD, UK)现场测定。水样溶解氧(DO)含量通过现场滴定得到,滴定的方法为Winkler碘量法。叶绿素a(Chl a)采用荧光法测定,将0.5L水样加入 MgCO_3 悬浮液,悬浮物过滤于GF/F滤膜(直径25mm,孔径0.7 μm)上,然后用丙酮萃取滤膜上的Chl a,使用分光光度计(METASH, UV8000, CHN)测定Chl a含量。

1.4 颗粒有机碳(POC)和颗粒氮(PN)含量分析

POC的CN含量的测试用的是德国Elementar公司的CHNOS元素分析仪(Vario EL Cube)。其前处理方法为:将过滤一定体积水样后的GF/F玻璃纤维滤膜(直径25mm,孔径0.7 μm)冷冻干燥;用浓盐酸的酸蒸气酸化约12h,然后用去离子水冲洗滤膜去除盐酸,放入烘箱中低温(40 $^{\circ}\text{C}$)烘干;最后将烘干后的样品包入锡舟中上机测试,获得悬浮颗粒物中的有机碳和氮元素(POC和PN)百分含量。每升水中的POC含量则通过公式 $\rho(\text{POC})=\text{TSM}\times\text{POC}\%$ 计算得出。

1.5 DOC含量分析

DOC含量利用高温催化氧化法在岛津TOC总有机碳分析仪上进行测定。标准溶液为邻苯二甲酸氢钾,检出限为 $4\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,测定相对标准偏差小于2%。

1.6 珠江径流调查和统计分析

在相关网站上获取北江石角站和东江博罗站2013年11月—2014年8月的径流数据(数据来源于全国雨水情信息网和珠江水文局, <http://xxfb.hydroinfo.gov.cn>和<http://www.zwsw.gov.cn>)。用Joinpoint Regression Program软件(Version 4.1.1.3, Statistical Research and Applications Branch, National Cancer Institute, <http://srab.cancer.gov/joinpoint/>)对POC、DOC含量随盐度的变化情况做了分段的线性回归分析。

2 结果

2.1 POC、DOC含量分布特征

POC含量在盐度接近于0的水中含量较高($1.2\sim 2.68\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),在进入河口水体后(盐度大于1‰)明显处于较低的水平,大部分样品小于 $1\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表1,图2),且随着盐度的升高有逐渐降低的趋势。DOC含量的变化与POC类似,在盐度接近于0的水

表 1 调查站点及主要的测试结果

Tab. 1 Samples and bulk properties

| 采样时间 | 样品编号 | 层次 | 站点水深/m | 温度/ | 盐度/‰ | DO | Chl a | TSS | POC | DOC | C/N | TSS 中 C 含量/% |
|----------------|------|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|--------------|
| 2013 年 11 月 | ZJ00 | 表层 | 15.5 | 20.4 | 2.35 | 6.33 | 14.80 | 13.33 | 0.76 | 1.67 | 5.7 | 5.70 |
| | ZJ01 | 表层 | 4.5 | 22.0 | 5.04 | 5.60 | 8.11 | 14.63 | 0.62 | 1.97 | 6.2 | 4.33 |
| | ZJ02 | 表层 | 6.7 | 21.8 | 4.91 | 8.57 | 2.84 | 10.63 | 0.49 | 1.31 | 8.0 | 4.26 |
| | ZJ03 | 表层 | 7.0 | 22.1 | 5.88 | 8.73 | 5.58 | 18.00 | 0.63 | 0.84 | 9.1 | 3.58 |
| | ZJ04 | 表层 | 5.3 | 20.8 | 14.70 | 8.04 | 1.59 | 13.63 | 0.43 | 1.16 | 8.1 | 3.18 |
| | ZJ05 | 表层 | 7.5 | 20.3 | 17.61 | 8.56 | 0.90 | 51.57 | 0.49 | 0.71 | 6.0 | 0.97 |
| | ZJ06 | 表层 | 6.0 | 20.4 | 22.10 | 9.33 | 1.36 | 36.63 | 0.43 | 0.91 | 4.4 | 1.18 |
| | ZJ07 | 表层 | 6.9 | 21.8 | 19.75 | 9.38 | 2.94 | 16.40 | 0.42 | 1.04 | 6.5 | 2.58 |
| | ZJ08 | 表层 | 9.0 | 22.5 | 18.45 | 8.85 | 2.02 | 16.80 | 0.41 | 0.73 | 6.2 | 2.48 |
| ZJ09 | 表层 | 16.5 | 22.1 | 32.05 | 8.16 | 1.37 | 18.80 | 0.28 | 0.92 | 7.1 | 1.47 | |
| 2014 年 2 月 | GZ01 | 表层 | 5.3 | 17.4 | 0.10 | 5.36 | 21.35 | 31.00 | 2.56 | 3.21 | 4.9 | 8.26 |
| | GZ02 | 表层 | 5.4 | 17.4 | 0.20 | 4.63 | 24.48 | 34.50 | 2.37 | 2.94 | 5.5 | 6.86 |
| | GZ03 | 表层 | 5.2 | 17.3 | 0.20 | 3.81 | 21.05 | 37.00 | 2.68 | 3.58 | 6.0 | 7.24 |
| | GZ04 | 表层 | 5.4 | 17.6 | 0.80 | 2.35 | 23.33 | 46.00 | 2.45 | 2.68 | 5.5 | 5.34 |
| | HM01 | 表层 | 8.5 | 16.2 | 3.18 | 4.22 | 3.38 | 9.78 | 0.70 | 1.88 | 7.0 | 7.14 |
| | HM02 | 表层 | 9.5 | 16.3 | 4.08 | 5.16 | 1.82 | 12.00 | 0.77 | 2.52 | 5.8 | 6.41 |
| | ZJ00 | 表层 | 13.5 | 16.1 | 5.51 | 6.25 | 2.38 | 14.67 | 0.74 | 2.42 | 3.5 | 5.07 |
| | ZJ01 | 表层 | 15.5 | 16.5 | 9.30 | 7.31 | 1.00 | 11.50 | 0.52 | 1.94 | 6.5 | 4.56 |
| | ZJ02 | 表层 | 5.3 | 18.2 | 13.75 | 7.47 | 2.29 | 5.80 | 0.44 | 1.97 | 4.7 | 7.53 |
| ZJ03 | 表层 | 8.0 | 17.0 | 10.05 | 9.25 | 4.68 | 10.20 | 0.65 | 1.59 | 7.2 | 6.41 | |
| ZJ04 | 表层 | 7.5 | 17.4 | 22.70 | 9.74 | 11.30 | 24.00 | 1.12 | 1.04 | 5.6 | 4.67 | |
| ZJ05 | 表层 | 6.0 | 17.7 | 17.95 | 9.99 | 8.21 | 12.44 | 0.82 | 1.29 | 5.5 | 6.62 | |
| ZJ06 | 表层 | 6.9 | 18.0 | 19.80 | 9.74 | 8.08 | 11.11 | 0.90 | 1.06 | 5.3 | 8.12 | |
| ZJ07 | 表层 | 9.0 | 18.4 | 27.70 | 9.17 | 4.21 | 7.20 | 0.72 | 0.90 | 6.9 | 9.95 | |
| ZJ08 | 表层 | 7.0 | 17.3 | 25.70 | 8.48 | 2.63 | 20.00 | 0.48 | 1.00 | 4.2 | 2.42 | |
| ZJ09 | 表层 | 16.5 | 16.6 | 33.30 | 8.69 | 1.48 | 4.60 | 0.45 | 0.75 | 8.03 | 9.78 | |
| 2014 年 5 月 | HM01 | 表层 | 12.5 | 24.1 | 0.10 | 3.63 | 7.82 | 55.3 | 2.73 | 2.29 | 5.5 | 4.94 |
| | HM02 | 表层 | 6.5 | 24.0 | 0.10 | 3.63 | 5.43 | 24.0 | 1.28 | 2.18 | 4.5 | 5.33 |
| | ZJ00 | 表层 | 11.5 | 24.1 | 0.10 | 3.55 | 3.19 | 20.5 | 1.14 | 2.33 | 4.6 | 5.55 |
| | ZJ01 | 表层 | 7.5 | 24.0 | 0.27 | 4.02 | 4.58 | 29.0 | 1.20 | 1.98 | 5.0 | 4.14 |
| | ZJ02 | 表层 | 7.5 | 25.4 | 1.55 | 5.60 | 3.64 | 31.0 | 0.91 | 1.08 | 5.0 | 2.94 |
| | ZJ03 | 表层 | 8.1 | 25.5 | 3.24 | 6.39 | 2.83 | 31.0 | 0.75 | 0.92 | 5.9 | 2.41 |
| | ZJ04 | 表层 | 7.0 | 25.5 | 5.95 | 5.48 | 1.05 | 42.5 | 0.78 | 1.07 | 3.5 | 1.83 |
| | ZJ05 | 表层 | 9.7 | 25.8 | 4.50 | 6.54 | 2.15 | 19.5 | 0.67 | 0.85 | 2.1 | 3.46 |
| | ZJ06 | 表层 | 7.0 | 25.9 | 4.20 | 5.99 | 2.33 | 23.5 | 0.68 | 1.23 | 7.0 | 2.89 |
| ZJ07 | 表层 | 5.9 | 26.5 | 9.35 | 6.94 | 1.51 | 40.0 | 0.78 | 1.18 | 4.3 | 1.94 | |
| ZJ08' | 表层 | 9.5 | 26.3 | 12.52 | 7.49 | 4.46 | 12.0 | 0.51 | 0.66 | 4.0 | 4.29 | |
| | 底层 | | 25.4 | 19.00 | 6.70 | 4.25 | 22.4 | 0.50 | 0.71 | 3.9 | 2.23 | |
| ZJ09' | 表层 | 21.5 | 26.3 | 15.20 | 7.88 | 5.05 | 13.6 | 0.63 | 0.52 | 5.4 | 4.64 | |
| | 底层 | | 24.8 | 30.10 | 6.46 | 1.58 | 25.2 | 0.38 | 0.55 | 4.9 | 1.5 | |
| 2014 年 8 月 | HM01 | 表层 | 10.5 | 31.9 | 0.1 | 7.49 | 30.1 | 19.7 | 1.39 | 3.10 | 6.2 | 7.03 |
| | HM02 | 表层 | 6.3 | 31.3 | 0.11 | 6.74 | 40.4 | 39.2 | 2.47 | 2.80 | 6.9 | 6.30 |
| | ZJ00 | 表层 | 16.5 | 31.4 | 0.1 | 4.73 | 35.1 | 27.8 | 1.93 | 2.53 | 4.0 | 6.93 |
| | ZJ01 | 表层 | 12.5 | 31.1 | 0.11 | 5.53 | 31.0 | 20.2 | 1.75 | 3.37 | 4.4 | 8.67 |
| | ZJ02 | 表层 | 7.0 | 31.1 | 2.05 | 4.77 | 8.1 | 18.7 | 0.67 | 2.16 | 2.8 | 3.57 |
| | ZJ03 | 表层 | 4.0 | 31.3 | 2.71 | 5.48 | 6.0 | 14.6 | 0.59 | 2.32 | 2.4 | 4.05 |
| | ZJ04 | 表层 | 7.4 | 30.5 | 3.15 | 5.87 | 3.7 | 16.2 | 0.49 | 2.84 | 4.1 | 3.05 |
| | ZJ05 | 表层 | 7.0 | 30.4 | 3.85 | 6.19 | 4.2 | 11.1 | 0.54 | 3.42 | 2.5 | 4.83 |
| | ZJ06 | 表层 | 6.0 | 30.4 | 3.36 | 6.46 | 3.3 | 7.6 | 0.44 | 2.15 | 2.9 | 5.78 |
| ZJ07 | 表层 | 6.4 | 30.9 | 9.15 | 6.78 | 5.9 | 9.6 | 0.56 | 2.92 | 3.0 | 5.82 | |
| ZJ08' | 表层 | 14.5 | 29.9 | 12.13 | 7.33 | 3.7 | 7.4 | 0.48 | 2.36 | 3.0 | 6.45 | |
| | 底层 | | 28.0 | 22.13 | 4.47 | 2.9 | 14.4 | 0.39 | 1.55 | 2.4 | 2.73 | |
| ZJ09' | 表层 | 28.0 | 30.1 | 16.36 | 7.17 | 5.7 | 10.2 | 0.78 | 2.34 | 3.4 | 7.65 | |
| | 底层 | | 27.1 | 30.69 | 6.03 | 2.2 | 15.4 | 0.38 | 1.34 | 5.9 | 2.48 | |

注: DO、总悬浮物含量(total suspended solids, TSS)、POC、DOC 含量单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Chl a 含量单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

体中含量也较高(1.98~3.58mg·L⁻¹),而在进入河口后含量下降(0.52~3.42mg·L⁻¹),且随着盐度升高也逐渐降低(图2)。从季节变化上来看,POC含量在4个季节没有明显的变化,而DOC含量在8月份相对

高于其他月份(图2)。各个季节DOC含量均高于POC含量,在2月和8月进入河口后POC含量下降迅速,而DOC含量下降缓慢,5月DOC和POC下降的幅度相差不大(图2)。

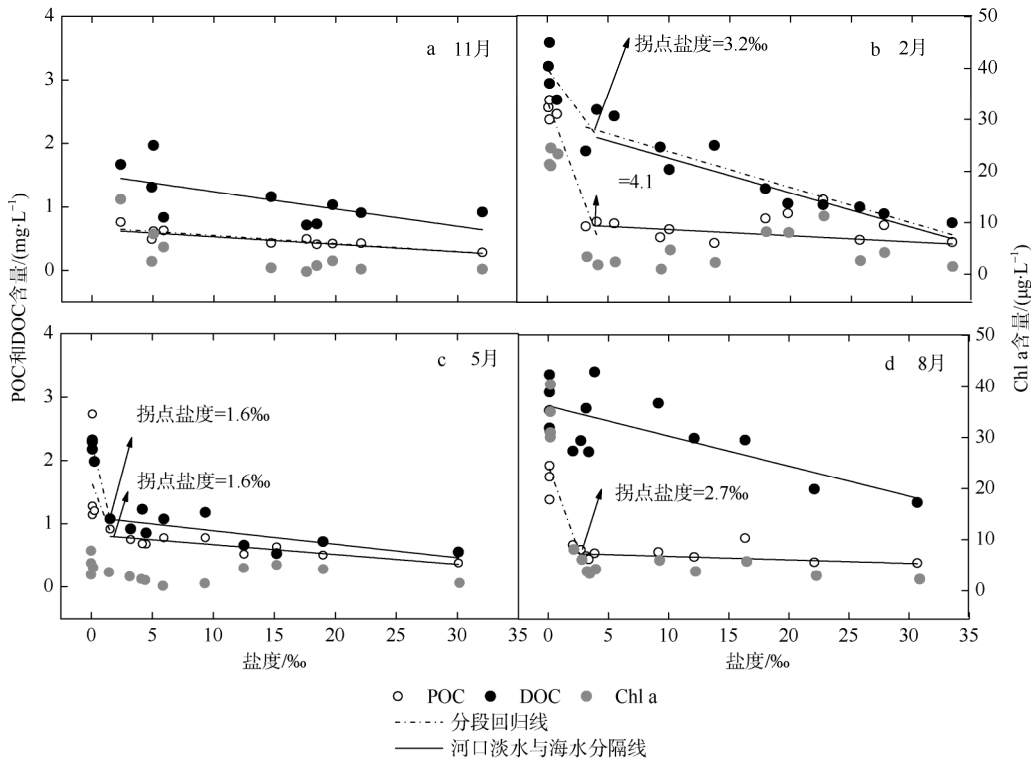


图2 不同季节POC、DOC含量与Chl a随盐度的变化以及POC、DOC含量与盐度的分段线性回归分析

Fig. 2 Distributions of POC, DOC and Chl a concentrations with salinity and piecewise regression analysis of POC and DOC distributions

2.2 TSS含量和C/N的分布特征

TSS含量范围为4.6~55.3mg·L⁻¹,随季节变化没有明显的差异,TSS在淡水端元的含量高(大于20mg·L⁻¹),进入河口后,除5月TSS相对较高以外,大部分样品TSS稳定在5~20mg·L⁻¹(图3a)。在河流水体中(盐度

接近0),TSS含量与POC含量存在一定正相关关系(图3a)。河口水体POC和TSS相对稳定。珠江口颗粒物POC/TN的比值范围为2.1~9.1,平均5.1±1.6(表1)。4个季节C/N没有明显的变化规律。在河口水体中POC百分含量随着TSS含量的增加对数递减(图3b)。

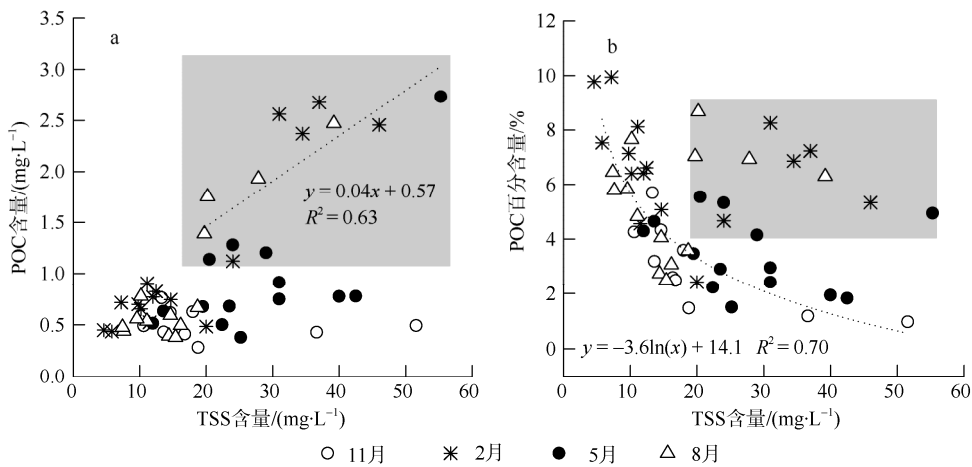


图3 珠江口不同季节TSS与POC含量之间的关系(a)及POC百分含量与TSS的关系(b)

阴影部分指淡水样品

Fig. 3 Correlation of POC and TSS (a), and correlation of POC (%) and TSS in PRE (b). Data points in the gray area represent freshwater samples

2.3 Chl a 和 DO 含量

Chl a 在低盐度区含量较高, 特别是 2 月份和 8 月份, 盐度接近为 0 的水体 Chl a 含量大于 $20\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。进入河口后 Chl a 含量开始降低, 大部分样品 Chl a 含量在 $10\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下。Chl a 含量随盐度升高有逐渐降低的趋势, 该趋势与 POC 变化趋势相似(图 2), 且 Chl a 含量与 POC 在不同的季

节存在明显的正相关关系(表 2), DOC 含量与 Chl a 也存在一定正相关性, 但是这种相关性并没有 POC 明显, DOC 含量的变化趋势也与 Chl a 的变化存在一定差异。DO 含量显示出在低盐度区较低(小于 $8\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 高盐度区含量较高(大于 $8\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的特点(表 1)。POC、DOC 含量与 DO 存在一定的负相关关系(表 2)。

表 2 不同季节 POC、DOC 含量与 Chl a 之间的相关性

Tab. 2 Pearson's correlation coefficients between POC, DOC and Chl a in different months

| | 11月 | | | 2月 | | | 5月 | | | 8月 | | |
|-------|---------|---------|--------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|--------|--------|------|
| | POC | DOC | DO | POC | DOC | DO | POC | DOC | DO | POC | DOC | DO |
| Chl a | 0.88* | 0.73* | -0.75* | 0.97** | 0.65** | -0.55 | 0.71** | 0.46** | -0.38** | 0.98** | 0.46* | 0.01 |
| DO | -0.61** | -0.87** | | -0.66** | -0.84** | | -0.73** | -0.94** | | 0.01 | 0.32** | |

**表示显著水平, $p < 0.01$ (双尾), 极显著相关; *表示显著水平, $p < 0.05$ (双尾), 显著相关。

2.4 POC、DOC 分段线性回归分析的结果与混合模式

分段线性回归分析结果显示 2 月、5 月和 8 月的 POC、DOC 含量随盐度的变化情况可以分为两段线性关系。两段线性关系的拐点(交点)都在出虎门到伶仃洋的低盐度区(盐度为 $1\text{‰}\sim 5\text{‰}$)。前面一段线性关系(拐点之前, 从广州河段至虎门附近的低盐度区)显示 POC、DOC 含量随盐度增加有着急剧的下降趋势, 后面的一段线性关系(拐点之后, 虎门附近的低盐度水体到伶仃洋外)显示 POC、DOC 含量随盐度增加有着相对缓慢的降低趋势。11 月由于未采集到淡水样品, 仅显示出后一段线性关系(图 2)。另外, 2 月份 POC 和 DOC 的拐点分别为 HM01 和 HM02 点, 他们都相对靠近虎门。5 月份和 8 月份 POC 拐点分别为 ZJ02 点和 ZJ03 点, 5 月份 DOC 拐点也为 ZJ02 点, 它们移动到虎门以外的伶仃洋。

从分段回归的结果中也能看出 2 月和 8 月 DOC 含量从河流水体进入河口水体后下降的幅度小于 POC (图 2)。

分段线性回归分析的结果表明, 珠江口淡水与海水的混合效应可能是从拐点处开始的, 因此由拐点之后的线性关系可以推算海水与“淡水”的端元值(表 3)。需要说明的是, 这里“淡水”端元值指的是拐点处盐度对应的 POC、DOC 含量值; 海洋端元值则是将盐度外推为 34‰ 的 DOC、POC 含量值。河流水体与海洋水体相互混合的保守模式可以根据两端混合公式来确定: $\text{POC}_{\text{mix}} = f \times \text{POC}_s + (1-f) \times \text{POC}_r$ 。

其中 $f = S/S_s$ 。这里 POC_r 和 POC_s 即为“淡水”端元和海洋端元的 POC 含量, f 代表样品中海水所占的比例, S 和 S_s 分别为样品盐度、海水盐度(Mantoura et al, 1983)。

表 3 不同季节 POC 和 DOC 含量与盐度的线性关系及“淡水”与海水端元 POC 含量(POC_r 和 POC_s)和 DOC 含量(DOC_r 和 DOC_s)的取值

Tab. 3 Linear correlation of POC and DOC with salinity, and POC and DOC concentrations in “riverine” and marine end members

| 月份 | 海水盐度 / ‰ | POC 样品盐度 / ‰ | POC(y)与盐度(x)的线性关系 | $\text{POC}_r/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | $\text{POC}_s/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | DOC 样品盐度 / ‰ | DOC(y)与盐度(x)的线性关系 | $\text{DOC}_r/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ | $\text{DOC}_s/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$ |
|-----|-------------------|-----------------------|--|--|--|-----------------------|--|--|--|
| 11月 | 34 | 2.4 | $y = -0.013x + 0.68$ ($R^2=0.78$) (盐度 $> 2.4\text{‰}$) | 0.65 | 0.25 | 2.4 | $y = -0.027x + 1.51$ ($R^2=0.40$) (盐度 $> 2.4\text{‰}$) | 1.45 | 0.59 |
| 2月 | 34 | 4.1 | $y = -0.010x + 0.75$ ($R^2=0.74$) (盐度 $> 4.1\text{‰}$) | 0.71 | 0.42 | 3.2 | $y = -0.056x + 2.43$ ($R^2=0.84$) (盐度 $> 3.2\text{‰}$) | 2.25 | 0.53 |
| 5月 | 34 | 1.6 | $y = -0.016x + 0.82$ ($R^2=0.76$) (盐度 $> 1.6\text{‰}$) | 0.80 | 0.30 | 1.6 | $y = -0.021x + 1.11$ ($R^2=0.55$) (盐度 $> 1.6\text{‰}$) | 1.07 | 0.37 |
| 8月 | 34 | 2.7 | $y = -0.006x + 0.54$ ($R^2=0.57$) (盐度 $> 2.7\text{‰}$) | 0.53 | 0.36 | 0.1 | $y = -0.048x + 2.87$ ($R^2=0.55$) (盐度 $> 0.1\text{‰}$) | 2.87 | 1.25 |

3 讨论

3.1 珠江口水体有机碳来源

高全洲等(2001), Gao等(2002)调查了西江、北江(样品采自1997年7月—1998年4月), 魏秀国(2003)调查了西江、北江、东江河流(采样日期为2000年6月—2001年3月)POC的分布情况, 其结果都显示POC含量随着TSS含量的增加而增加, 丰水期TSS、POC含量显著高于平水期, POC%含量则随着TSS含量的增加而减小, 丰水期POC%含量低于平水期。POC与TSS含量的这些分布特征表明珠江流域河流POC主要来自陆源有机碳的输入。与TSS、POC含量在上述河流中丰水期和平水期存在明显变化不同的是, 它们在珠江口水体中表现的相对稳定。除了广州至虎门河段水体(盐度接近0)的POC与TSS有一定的正相关关系以外, 虎门至外海的河口水体中TSS与POC含量基本稳定, 且没有明显的正相关性(图3a)。虽然POC百分含量在珠江口河口水体中随着TSS含量的增加, 也呈现对数递减规律(图3b), 但TSS含量变化并没有上述河流中的变化大, 同时, 河口水体中的POC%含量也相对于高于这些河流水体。珠江口POC和TSS上述分布规律似乎表明, 随季节变化明显的陆源有机质输入可能并不是影响河口水体POC的主要因素。

有研究指出, 珠江口特别是上游水体由于受到陆源物质和人类活动带来的营养元素的输入, 使得水体富营养化趋势加强。富营养化首先刺激的便是浮游植物, 特别是藻类的生长。水体中Chl a含量是评估浮游植物生产量的重要指标, 与水体中浮游植物的种类和数量密切相关(Huot et al, 2007)。本研究调查的Chl a含量显示出低盐度区高, 高盐度区低的特点, 而且在河流水体中的含量显著高于河口水体。Chl a含量的这种分布规律恰好与POC相对应(图2), 呈现出明显的正相关关系(表2)。这表明水生浮游植物对POC含量具有重要的影响。珠江口水体颗粒物较低的C/N比值(2.1~9.1), 与浮游植物的C/N值接近(Meybeck, 1982), 也可能表明了浮游植物对于有机碳含量的影响。浮游植物有机碳输入的影响可能造成了珠江口上游的河流水体(盐度约为0)较高的POC含量和TSS含量(图3a)。尤其是2月和8月河流水体都具有较高的Chl a含量(图2)。5月份珠江口河流水体中的Chl a含量相对低于2月和8月, 但也表现出较高的POC和TSS含量(图2和3a),

可能表明5月份降雨量增大, 这一时期的河流水体能一定程度受到陆源有机碳输入的影响。河口水体(盐度大于1‰)中POC百分含量随TSS含量增加对数递减的规律可能表明河口自源有机碳受到了矿物质稀释作用的影响(Gao et al, 2002; 魏秀国, 2003)。

与POC相比, DOC与Chl a的相关性较差(表1), 且DOC与Chl a的变化也没有很好的一致性, 尤其是在2月和8月(图2)。DOC的这种变化规律似乎表明DOC受浮游植物输入的影响相对较小。在珠江流域河流系统中, 所有的东江水体和接近60%的北江水体都从虎门口输入伶仃洋, 因此虎门附近的水体主要接受来自东江和北江径流的输入(Fu et al, 2014)。He等(2010)调查的2007年4月东江下游水体(快进入广州至虎门河段)的DOC平均含量为 $2.47\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这一值接近于珠江口混合区(虎门至伶仃洋低盐度区)水体的DOC平均含量($2.51\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。Fu等(2014)调查2009年11月和2010年6月东江下游水体DOC平均含量分别为2.14和 $3.35\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这些值也接近于同期珠江口上游广州河段至虎门水体DOC平均含量(分别为2.48和 $3.07\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。张连凯等(2013)调查2012年4月东江和北江水体DOC含量分别为2.45和 $2.53\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 2012年7月为2.97和 $2.73\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。调查中珠江口虎门口附近水体(HM01、HM02)在不同季节DOC平均含量分别为2月 $2.20\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 5月为 $2.24\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 8月为 $2.95\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。这些值接近于其他研究调查的东江和北江河流水体的DOC含量。这可能表明了珠江上游河流水体中的DOC主要来自于东江和北江径流的输入, 而东江和北江河流水体中的DOC主要是来自于陆源有机碳(Fu et al, 2014)。因此, 珠江口上游的河流水体DOC可能更多地来自于河流输送的陆源有机碳。

3.2 珠江口水体有机碳来源和输送方式的季节变化

在珠江口水体中, POC含量在4个季节没有明显的变化, 但是POC/Chl a在5月(大于200)明显高于其他月份(大于20小于200)(图4a)。POC/Chl a比值可以表征非生命态POC对POC的贡献。Cifuentes等(1988)曾指出当POC/Chl a在20~200之间时, 表明POC主要来自水生浮游植物。当POC/Chl a大于200时则表明碎屑和降解的有机质对POC的贡献较大。珠江口POC/Chl a的分布规律可能表明, 5月份浮游植物有机碳输入对POC的影响减小, 其他月份浮游植物对POC的影响较大。这种有机碳输入模式的季节变化与北江流域相似。Chen等(2009)曾报道

北江流域在 4 月份自生有机碳输入减少, 而 8 月和 11 月浮游植物的生产率较高, 水体自生有机碳的贡献增加。从我们调查的北江和东江径流情况来看(图 5), 11 月与 2 月正处珠江流域的干季, 降雨量较少导致珠江口水体较平稳, 浊度低, 光照充足, 这些条件有利于浮游植物的生长。但是 5 月处于降水集中的前汛期, 正处于全年径流量较大时期, 其中石角和博罗

水文站记录的最高径流分别为 1900 和 $2100\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 。降雨量加大, 对陆源物质的冲刷作用较强, 带来了较多的陆源物质, 减小了浮游植物有机碳输入。8 月经流量也很大, 降雨量也很充足, 但可能由于处于盛夏高温期, 较高的营养盐含量和水温光照条件都有利于浮游植物的生长, 其贡献则可能掩盖了陆源的影响(Chen et al, 2009)。

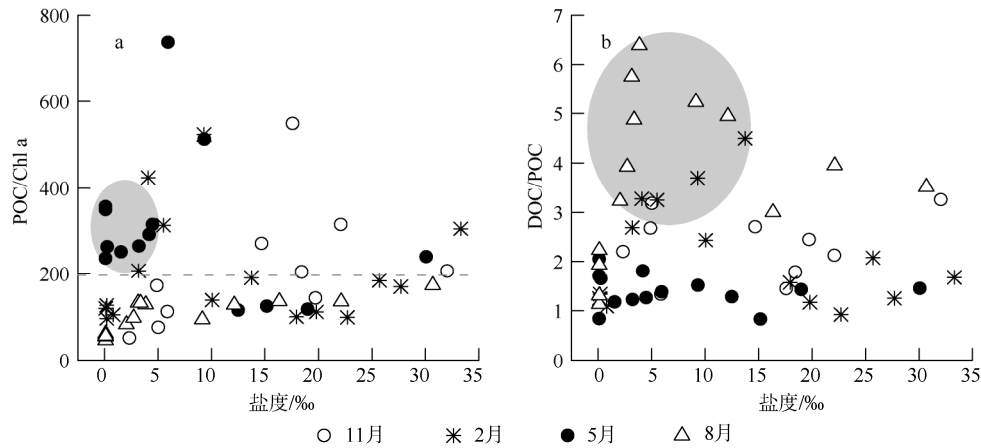


图 4 珠江口不同季节 POC/Chl a(a)以及 DOC/POC(b)

a 中阴影部分指 5 月样品; b 中阴影部分指 2 月和 8 月样品

Fig. 4 Distribution of DOC/POC (a) and DO contents (b) with salinity in different months

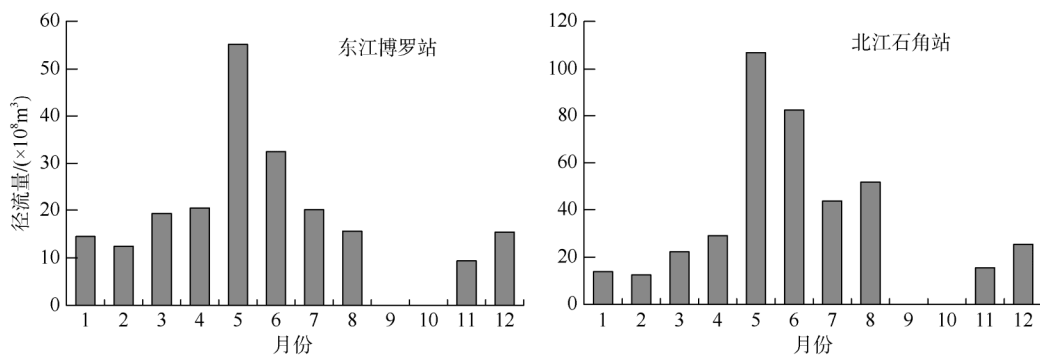


图 5 东江和北江 2013 年 11 月—2014 年 8 月每月径流量变化情况

Fig. 5 Monthly runoff from November 2013 to August 2014 in Dongjiang and Beijiang

5 月 POC 的物源虽然明显不同于其他月份, 但其含量并未出现显著变化; 而 DOC 在 8 月表现出相对较高的含量。DOC 含量的季节变化与东江和北江河流相似, 在 7—8 月丰水期 DOC 含量达到了全年的最高值, 而其他平水期(2 月、4 月、11 月)DOC 含量则相对较低(Gao et al, 2002; 魏秀国, 2003)。丰水期河流水体中的 DOC 含量较高, 输入河口水体中的 DOC 含量也就相对较高。8 月 DOC 来自河流输送的陆源有机碳的贡献增加。

珠江口不同季节 DOC 含量相对高于 POC 含量, 在珠江口河流水体中, 不同季节 DOC/POC 都在 1~2

的范围内并没有明显的变化, 但是进入河口后 2 月和 8 月 DOC/POC 迅速的上升到 3~7(图 4b)。DOC/POC 比值的上升与 2 月和 8 月 DOC 含量进入河口下降相对较慢, 而 POC 进入河口水体后下降迅速有关。例如, 2 月河流水体 DOC 平均含量从 $3.10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 下降到 $1.88\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (HM01), 8 月 DOC 从 $2.95\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $2.16\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (ZJ02)。POC 含量在 2 月从 $2.52\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $0.70\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 8 月从 $1.88\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $0.67\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 2)。DOC 和 POC 在河口水体中表现出不同的下降趋势, 可能说明其在河口的地球化学行为有所不同。

3.3 POC 和 DOC 在珠江口水体中的地球化学行为
He 等(2010)曾分析了 2007 年 4 月珠江口 POC、DOC 含量的分布情况,认为珠江口淡水与海水的混合效应是从广州至虎门河段(盐度接近于 1‰)开始,在此基础上评估了 DOC 和 POC 在珠江口的混合行为。指出在珠江口的低盐度区(盐度 1‰~20‰)可能存在 DOC 的亏损现象。值得注意的是,He 等(2010)建立的混合模式中,河流端元 DOC 值的选择是以盐度接近于 1 的水体 DOC 含量作为河流端元值(约为 $3\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),但这一值相对高于这一时期东江下游河流水体的 DOC 含量($2.47\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。另外,从 He 等(2010)的数据可以看出,这一时期从广州河道到虎门的这段水域 POC 含量和 DOC 含量随盐度升高下降的趋势很明显,而出虎门之后(盐度为 3‰~5‰)到靠近南海的开阔水域水体 DOC 和 POC 含量随盐度的升高而下降的趋势则相对缓慢。

数据显示,5 月和 8 月降雨量较大,淡水的冲淡效应可能使这一时期 POC、DOC 含量下降的拐点移动到虎门以外的伶仃洋,而 2 月则更靠近虎门。从虎门附近的低盐度区至靠近南海的河口水体 POC 和 DOC 在混合线上波动,则表明这一区域水体 POC 和 DOC 含量主要受到河水和海水的混合影响。因此,珠江口淡水与海水的保守混合效应可能是从出虎门进入伶仃洋的低盐度区(盐度 1‰~5‰的水体)开始的。在此区域之上的较淡水体中则发生着比较活跃的有机碳矿化和含量降低的过程。微生物降解作用可能是这一区域 POC 和 DOC 含量的下降的一个重要原因。有研究认为珠江口低盐度区有机质含量较高,促进了微生物的生长,这一区域可能存在着微生物的降解作用消耗水体中的有机碳(Dai et al, 2006, 2008; He et al, 2010)。而珠江口溶解氧含量的分布表现出低盐度水体相对低于高盐度水体(表 1),可能表明微生物在低盐度区耗费了更多的氧气(丘耀文等, 1994)。除 8 月以外的几个季节里,珠江口水体溶解氧(DO)与 POC 和 DOC 的存在负相关关系(表 2),这可能表明有机质输入对于对微生物活性的影响(Sarma et al, 2014)。亚热带河口海区由于受温度、光照、高营养盐含量等因素影响,河口水体往往具有较高的初级生产力(高 Chl a 值),虽然浮游植物在光合作用中释放出大量氧气,但营养盐水平较高的海区,其耗氧负荷也较高(Dai et al, 2006)。当有

机质降解耗氧速度远大于生物作用生成氧气的速度时,可能会造成 DO 与 Chl a 呈现负相关(魏鹏等, 2009)。这可能是珠江口有些月份(11 月、2 月和 5 月)水体 DO 含量与 Chl a 含量负相关的原因(表 2)。当然水体中的溶解氧含量可能受控于多种因素(丘耀文等, 1994; 魏鹏等, 2009),8 月 DO 与 POC 和 DOC 关系并不明显可能与温度升高等条件对 DO 的影响有关。

POC 和 DOC 在广州河段至虎门附近(盐度为 1‰~4‰)都可能受到了微生物降解作用的影响。但是 DOC 主要来自于河流带来的陆源有机碳,而 POC 主要来自于水生的浮游植物有机碳,有研究显示微生物对新鲜的浮游植物有机碳的降解速率高于年龄较老的陆源碳(Raymond et al, 2001)。这可能是造成 POC 进入河口下降的幅度大于 DOC 的一个重要原因。POC 下降的幅度较大还可能与珠江口浮游植物生产量减少有关。广州至虎门段(盐度为 0)河流水体有机质的来源相对丰富,促进了水生浮游植物的生长(高 Chl a 含量 $20.65\pm 12.7\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $n=12$),浮游植物有机碳对 POC 贡献相对较大,进入河口(盐度大于 1)后浮游植物生物量相对较小(Chl a 迅速下降到 $0.9\sim 14.8\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$),其有机碳对 POC 贡献也相对减少。此外,颗粒物在咸淡水交界处的絮凝沉淀作用也可能是 POC 含量迅速降低的重要原因(Blair et al, 2004; Bianchi et al, 2011)。

4 结论

1) 珠江口水体 POC 可能主要受到水体自生浮游植物有机碳输入的影响,DOC 可能主要来自于河流输送的陆源有机碳。5 月,POC 来自自生浮游植物有机碳的贡献相对减小,8 月 DOC 来自河流输送的陆源有机碳的贡献增加。不同季节珠江口水体有机碳的输送主要以 DOC 为主。

2) 珠江口 POC 和 DOC 受到淡水与海水混合进程的影响,淡水与海水的混合效应可能是从出虎门进入伶仃洋的低盐度区(盐度 1‰~5‰的水体)开始延伸至外海。微生物的降解作用可能对 POC 和 DOC 在虎门进入伶仃洋的低盐度区的下降趋势产生了重要影响。微生物对新鲜的浮游植物有机碳的利用以及浮游植物生产量的降低和颗粒物絮凝沉降作用则可能是 POC 下降幅度大于 DOC 的重要原因。

参考文献(References)

- 蔡艳雅, 韩舞鹰, 1990. 珠江口有机碳的研究[J]. 海洋环境科学, 9(2): 8–13. CAI YANYA, HAN WUYING, 1990. A study on organic carbon in Zhujiang river estuary[J]. Marine Environmental Science, 9(2): 8–13 (in Chinese).
- 陈金斯, 李飞永, 洪华生, 1988. 珠江口海区悬浮颗粒物研究-II. 有机碳和氮的来源、分布和转移[J]. 热带海洋, 7(3): 90–98. CHEN JINSI, LI FEIYONG, HONG HUASHENG, 1988. A study on suspended particulate matter in the Zhujiang river estuarine area-II. Origin, distribution and transport of particulate organic carbon and nitrogen[J]. Tropic Oceanology, 7(3): 90–98 (in Chinese with English abstract).
- 陈绍勇, 郑泽广, 郑建禄, 等, 1990. 珠江口悬浮颗粒有机碳与环境因子的关系[J]. 热带海洋, 9(2): 54–57. CHEN SAHOYONG, ZHENG ZEGUANG, ZHENG JIANLU, et al, 1990. Relationships between suspended particles of organic carbon and environmental factors in Zhujiang river estuary[J]. Tropic Oceanology, 9(2): 54–57 (in Chinese with English abstract).
- 戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民, 2007. 51年来珠江流域输沙量的变化[J]. 地理学报, 62(5): 545–554. DAI SHIBAO, YANG SHILUN, CAI AIMIN, 2007. Variation of sediment discharge of the pear l river basin from 1955 to 2005[J]. Acta Geographica Sinica, 62(5): 545–554 (in Chinese with English abstract).
- 高全洲, 沈承德, 孙彦敏, 等, 2001. 北江流域有机碳侵蚀通量的初步研究[J]. 环境科学, 22(2): 12–18. GAO QUANZHOU, SHEN CHENGDE, SUN YANMIN, et al, 2001. A preliminary study on the organic carbon weathering fluxes in Bei-jiang river drainage[J]. Environmental Science, 22(2): 12–18 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. 生态学报, 32(14): 4403–4412. LIU QINGXIA, HUANG XIAOPING, ZHANG XIA, et al, 2012. Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010[J]. Acta Ecologica Sinica, 32(14): 4403–4412 (in Chinese with English abstract).
- 丘耀文, 王肇鼎, 1994. 珠江口伶仃洋水域溶解氧特征[J]. 热带海洋, 13(2): 99–102. QIU YAOWEN, WANG ZHAODING, 1994. Characteristics of dissolved oxygen in Lingdingyang waters of Zhujiang river Estuary[J]. Tropic Oceanology, 13(2): 99–102 (in Chinese with English abstract).
- 王丽君, 刘承松, 陈虹勋, 等, 1984. 南海东北部海区的溶解有机碳[J]. 热带海洋, 3(2): 1–6. WANG LIJUN, LIU CHENGSONG, CHEN HONGXUN, et al, 1984. Dissolved organic carbon in the northeastern waters of the South China Sea[J]. Tropic Oceanology, 3(2): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- 魏鹏, 黄良民, 冯佳和, 等, 2009. 珠江口广州海域 COD 与 DO 的分布特征及影响因素[J]. 生态环境学报, 18(5): 1631–1637. WEI PENG, HUANG LIANGMIN, FENG JIAHE, et al, 2009. Distribution characteristics of COD and DO and its influencing factors in the Guangzhou sea zone of the Pearl River Estuary[J]. Ecology and Environmental Sciences, 18(5): 1631–1637 (in Chinese with English abstract).
- 魏秀国, 2003. 珠江流域河流碳通量与流域侵蚀研究[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 38–50. WEI XIUGUO, 2003. Study on riverine carbon flux and erosion of Zhujiang (Pearl) river drainage basin[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 38–50 (in Chinese with English abstract).
- 张连凯, 覃小群, 杨慧, 等, 2013. 珠江流域河流碳输出通量及变化特征[J]. 环境科学, 34(8): 3025–3034. ZHANG LIANKAI, QIN XIAOQUN, YANG HUI, et al, 2013. Transported fluxes of the riverine carbon and seasonal variation in Pearl river basin[J]. Environmental Science, 34(8): 3025–3034 (in Chinese with English abstract).
- BAUER J E, BIANCHI T S, 2011. Dissolved organic carbon cycling and transformation[J]. Treatise on Estuarine and Coastal Science, 5: 7–67.
- BAUER J E, CAI WEIJUN, RAYMOND P A, et al, 2013. The changing carbon cycle of the coastal ocean[J]. Nature, 504(7478): 61–70.
- BIANCHI T S, BAUER J E, 2011. Particulate organic carbon cycling and transformation[J]. Treatise on Estuarine and Coastal Science, 5: 69–117.
- BLAIR N E, LEITHOLD E I, ALLER R C, 2004. From bedrock to burial: the evolution of particulate organic carbon across coupled watershed-continental margin systems[J]. Marine Chemistry, 92(1–4): 141–156.
- CHEN FAJIN, JIA GUODONG, 2009. Spatial and seasonal variations in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of particulate organic matter in a dam-controlled subtropical river[J]. River Research and Applications, 25(9): 1169–1176.
- CIFUENTES L A, SHARP J H, FOGEL M L, 1988. Stable carbon and nitrogen isotope biogeochemistry in the Delaware estuary[J]. Limnology and Oceanography, 33(5): 1102–1115.
- COLE J J, PRAIRIE Y T, CARACO N F, et al, 2007. Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. Ecosystems, 10(1): 172–185.
- DAI MINHAN, GUO XIANGHUI, ZHAI WEIDONG, et al, 2006. Oxygen depletion in the upper reach of the Pearl River estuary during a winter drought[J]. Marine Chemistry, 102(1–2): 159–169.
- DAI M, WANG L, GUO X, et al, 2008. Nitrification and inorganic nitrogen distribution in a large perturbed river/ estuarine system: the Pearl River Estuary, China[J]. Biogeosciences, 5(5): 1227–1244.
- FU YINGCHUN, TANG CONGGUO, LI JUN, et al, 2014. Sources and transport of organic carbon from the Dongjiang River to the Humen outlet of the Pearl River, southern China[J]. Journal of Geographical Sciences, 24(1): 143–158.
- GAO QUANZHOU, TAO ZHEN, SHEN CHENGDE, et al, 2002.

- Riverine organic carbon in the Xijiang River (South China): seasonal variation in content and flux budget[J]. *Environmental Geology*, 41(7): 826–832.
- HE BIYAN, DAI MINHAN, ZHAI WEIDONG, et al, 2010. Distribution, degradation and dynamics of dissolved organic carbon and its major compound classes in the Pearl River estuary, China[J]. *Marine Chemistry*, 119(1–4): 52–64.
- HEDGES J I, KEIL R G, BENNER R, 1997. What happens to terrestrial organic matter in the ocean[J]. *Organic Geochemistry*, 27(5–6): 195–212.
- HUOT Y, BABIN M, BRUYANT F, et al, 2007. Does chlorophyll a provide the best index of phytoplankton biomass for primary productivity studies[J]. *Biogeosciences Discuss*, 4(2): 707–745.
- LIU M, HUO L J, XU S Y, et al, 2006. Organic carbon and nitrogen stable isotopes in the intertidal sediments from the Yangtze Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 52(12): 1625–1633.
- LUDWIG W, PROBST J L, 1998. River sediment discharge to the oceans: present-day controls and global budgets[J]. *American Journal of Science*, 298(4): 265–295.
- MANTOURA R F C, WOODWARD E M S, 1983. Conservative behaviour of riverine dissolved organic carbon in the Severn estuary: chemical and geochemical implications[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(7): 1293–1309.
- MEYBECK M, 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers[J]. *American Journal of Science*, 282(4): 401–450.
- PETERSON B, FRY B, HULLAR M, et al, 1994. The distribution and stable carbon isotopic composition of dissolved organic carbon in estuaries[J]. *Estuaries*, 17(1): 111–121.
- 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[J]. *Organic Geochemistry*, 32(4): 469–485.
- SARMA V V S S, KRISHNA M S, PRASAD V R, et al, 2014. Distribution and sources of particulate organic matter in the Indian monsoonal estuaries during monsoon[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(11): 2095–2111.
- THURMAN E M, 1985. Amount of organic carbon in natural waters[M]//THURMAN E M. *Organic geochemistry of natural waters*. Netherlands: Springer, 1985: 7–65.
- WU Y, ZHANG J, LIU S M, et al, 2007. Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(1–2): 13–25.
- ZHANG SHURONG, LU XIXI, HIGGITE DL, et al, 2008. Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China[J]. *Global and Planetary Change*, 60(3–4): 365–380.