

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 14 期 Vol.32 No.14 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 14 期

2012 年 7 月 (半月刊)

目 次

海滨沙地砂引草对沙埋的生长和生理适应对策.....	王 进,周瑞莲,赵哈林,等 (4291)
外源 K ⁺ 和水杨酸在缓解融雪剂对油松幼苗生长抑制中的效应与机理 ...	张 莹,李法云,严 霞,等 (4300)
钱塘江中游流域不同空间尺度环境因子对底栖动物群落的影响.....	张 勇,刘朔孺,于海燕,等 (4309)
贡嘎山东坡非飞行小型兽类物种多样性的垂直分布格局.....	吴永杰,杨奇森,夏 霖,等 (4318)
基于斑块的红树林空间演变机理分析方法.....	李春干,刘素青,范航清,等 (4329)
亚热带六种天然林树种细根养分异质性.....	熊德成,黄锦学,杨智杰,等 (4343)
浙江省植被 NDVI 动态及其对气候的响应	何 月,樊高峰,张小伟,等 (4352)
亚热带 6 种天然林树种细根呼吸异质性.....	郑金兴,熊德成,黄锦学,等 (4363)
亚高山/高山森林土壤有机层氨氧化细菌和氨氧化古菌丰度特征	王 奥,吴福忠,何振华,等 (4371)
耕作方式对紫色水稻土轻组有机碳的影响.....	张军科,江长胜,郝庆菊,等 (4379)
火烧对长期封育草地土壤碳固持效应的影响.....	何念鹏,韩兴国,于贵瑞,等 (4388)
闽江河口潮汐湿地二氧化碳和甲烷排放化学计量比.....	王维奇,曾从盛,仝 川,等 (4396)
2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的分布特征及其来源	刘庆霞,黄小平,张 霞,等 (4403)
新疆冷泉沉积物葡萄糖利用细菌群落多样性的稳定同位素标记分析.....	楚 敏,王 芸,曾 军,等 (4413)
土壤微生物群落多样性解析法:从培养到非培养.....	刘国华,叶正芳,吴为中 (4421)
伊洛河河岸带生态系统草本植物功能群划分	郭屹立,卢训令,丁圣彦 (4434)
濒危植物蒙古扁桃不同地理种群遗传多样性的 ISSR 分析	张 杰,王 佳,李浩宇,等 (4443)
强潮区较高纬度移植红树植物秋茄的生理生态特性.....	郑春芳,仇建标,刘伟成,等 (4453)
冬季高温对白三叶越冬和适应春季“倒春寒”的影响	周瑞莲,赵 梅,王 进,等 (4462)
中亚热带细柄阿丁枫和米槠群落细根的生产和死亡动态.....	黄锦学,凌 华,杨智杰,等 (4472)
欧美杨水分利用效率相关基因 <i>PdEPF1</i> 的克隆及表达	郭 鹏,金 华,尹伟伦,等 (4481)
再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用.....	缪丽华,王 媛,高 岩,等 (4488)
无致病力青枯雷尔氏菌对烟草根系土壤微生物脂肪酸生态学特性的影响.....	郑雪芳,刘 波,蓝江林,等 (4496)
基于更新和同化策略相结合的遥感信息与水稻生长模型耦合技术的研究.....	王 航,朱 艳,马孟莉,等 (4505)
温度和体重对克氏双锯鱼仔鱼代谢率的影响.....	叶 乐,杨圣云,刘 敏,等 (4516)
夏季西南印度洋叶绿素 a 分布特征.....	洪丽莎,王春生,周亚东,等 (4525)
大沽排污河生态修复河道水质综合评价及生物毒性影响.....	王 敏,唐景春,朱文英,等 (4535)
李肖叶甲成虫数量及三维空间格局动态.....	汪文俊,林雪飞,邹运鼎,等 (4544)
专论与综述	
基于景观格局的城市热岛研究进展	陈爱莲,孙然好,陈利顶 (4553)
沉积物质量评价“三元法”及其在近海中的应用	吴 斌,宋金明,李学刚,等 (4566)
问题讨论	
中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策	胡新军,张 敏,余俊锋,等 (4575)
研究简报	
稻秸蓝藻混合厌氧发酵沼液及其化学物质对尖孢镰刀菌西瓜专化型生长的影响.....	刘爱民,徐双锁,蔡 欣,等 (4585)
佛山市农田生态系统的生态损益.....	叶延琼,章家恩,秦 钟,等 (4593)



封面图说: 噶龙山南坡的高山湖泊——喜马拉雅山南坡的噶龙山光照强烈、雨量充沛,尽管是海拔 4500 多米的高寒地区,山上的草甸依然泛着诱人的翠绿色,冰川和雪山的融水汇集在山梁的低洼处形成了一个又一个的高山湖泊,由于基底的差别和水深的不同,使得纯净清澈的冰雪融水在湖里呈现出不同的颜色,湖面或兰或绿,颜色或深或浅,犹如一块块通透透明的翡翠镶嵌在绿色的绒布之中。兰天下面,白云落在山间,通往墨脱的公路像丝带一样随随便便地缠绕着,一幅美丽的自然生态画卷就这样呈现在你的面前。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201107111028

刘庆霞, 黄小平, 张霞, 张凌, 叶丰. 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, 2012, 32(14): 4403-4412.

Liu Q X, Huang X P, Zhang X, Zhang L, Ye F. Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(14): 4403-4412.

2010 年夏季珠江口海域颗粒有机碳的 分布特征及其来源

刘庆霞^{1,2}, 黄小平^{1,*}, 张霞¹, 张凌¹, 叶丰^{1,2}

(1. 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 于 2010 年 8 月对珠江口海域 20 个站位的颗粒有机碳 (POC) 进行采样, 分析了 POC 的空间分布特征, 讨论了 POC 与环境因子之间的关系, 并利用碳稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 分析了 POC 的来源及其贡献率。结果显示, 研究区域 POC 的浓度范围 98.5—1929.8 $\mu\text{g/L}$, 平均浓度 541.9 $\mu\text{g/L}$, 空间分布总体呈现自北部海域向中部海域逐渐降低, 中部海域至南部海域又逐渐升高, 底层大于表层的特点。总悬浮颗粒物、叶绿素 a、水动力是影响 POC 空间分布的重要原因。研究区域总悬浮颗粒物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围 -27.05‰—-21.03‰, 平均为 -24.57‰, 反映出珠江口海域颗粒有机碳为陆源和水生源混合来源, 其分布呈现沿盐度梯度自口门内向口门外逐渐递增, 底层高于表层的特点。陆源输入和海洋生物生产是影响 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布的主要原因。运用二元混合模型计算得知, 珠江口北部和中部海域 POC 以陆源有机碳为主, 贡献率平均为 64%; 南部海域 POC 以水生源有机碳为主, 贡献率平均为 68%。与 20 多年前相比, POC 的分布特征与来源已经发生了改变, 珠江口海域含沙量减少与营养盐含量增加可能是导致 POC 组成发生变化的主要原因。

关键词: 颗粒有机碳; 空间分布; $\delta^{13}\text{C}$; 来源; 珠江口海域

Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010

LIU Qingxia^{1,2}, HUANG Xiaoping^{1,*}, ZHANG Xia¹, ZHANG Ling¹, YE Feng^{1,2}

1 State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Particulate organic carbon (POC) is one of the main forms of carbon and plays an important role in aquatic ecosystems and global carbon cycling. Marine and terrestrial ecosystems are the two important carbon pools for the estuaries on earth, so the investigation on the POC in estuaries is dramatically practical for the research of global carbon cycling. Generally, the POC in estuaries can be classified into two categories by its source (terrestrial input and marine organism production). Stable carbon isotope ($\delta^{13}\text{C}$) and C/N are the two recommendatory methods for measuring and analyzing the source of organic carbon, and the precision of stable carbon isotope method ($\delta^{13}\text{C}$) is better than that of C/N method because of the stability of $\delta^{13}\text{C}$. The present study aimed to investigate the distribution of POC and its sources in the Pearl River Estuary in summer through the POC measurements of 20 sites in August, 2010. The results showed that the

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCXZ-YW-Q07); 国家自然科学基金项目 (41076069, 40776086); 广东省 908 专项 (GD908-JC-06)

收稿日期: 2011-07-11; **修订日期:** 2012-01-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xphuang@scsio.ac.cn

concentrations of POC ranged from 98.5 to 1929.8 $\mu\text{g/L}$ (the average of 541.9 $\mu\text{g/L}$), and the concentrations decreased with the salinity gradient in the northern and middle part of the Pearl River Estuary and then increased from the middle part to the southern part of the Pearl River Estuary, and the concentrations of POC in the bottom waters layers were higher than those in the surface water layers. The total suspended matter (TSM), chlorophyll *a* and hydrodynamics were the major factors that influenced the POC spatial distribution, and the $\delta^{13}\text{C}$ values of TSM increased with the salinity gradient and varied from -27.05‰ to -21.03‰ (the average of -24.57‰), and the values in the bottom water layers were higher than those in the surface water layers. Our results showed that the terrestrial input and marine phytoplankton production contributed to the POC together in the Pearl River Estuary. According to the analysis of binary mixture model, most POC in the northern and middle part of the Pearl River Estuary was subject to the terrestrial organic carbon, which accounted for 50% to 88% (the average of 64%) of the total POC. In contrast, the marine organic carbon was the main contributor to the POC in the southern part of the Pearl River estuary, and it accounted for 50% to 89% (the average of 68%) of the total POC. Compared with two decades ago, the distribution and source of POC varied significantly, which is mainly due to the decrement of sediment discharge and increment of nutrient inputs into the Pearl River estuary. We predict that the sediment discharge rate of the Pearl River will decrease gradually with the construction of more large reservoirs, and then the contribution of terrestrial organic carbon to the POC in the Pearl River estuary will be decreasingly.

Key Words: particulate organic carbon; spatial distribution; stable isotope of carbon; source; the Pearl River Estuary

碳是生命活动能流物流中最重要的元素,几乎所有的生物地球化学循环过程都与它有关,颗粒有机碳(POC)是碳在水体中的主要存在形式之一,在水生生态系统和全球碳循环中发挥着重要作用^[1]。海洋和陆地生态系统是地球上两个重要的碳库,河口作为两大碳库相互作用的交界处,其颗粒有机碳的研究成为研究全球碳循环的重要环节。河口颗粒有机碳按来源可分为两大类,即陆源输入和海洋生物生产^[2]。有关有机物的物源分析方法主要有碳稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$)法和 C/N 法^[3-5],其中由于 $\delta^{13}\text{C}$ 比较稳定,不易改变,因此 $\delta^{13}\text{C}$ 法准确性高于 C/N 法^[6-7]。近年来,国内外对应用碳稳定同位素判断河口区 POC 的来源已开展了一些研究,如 Middeburg 等^[5]研究了 Schelde 河口悬浮颗粒物和沉积物中的有机碳来源,得出 POC 主要来源于内部生产,沉积物中有机碳则主要来源于陆源有机碳的输入;Zhang 等^[8]重点讨论了长江口悬浮颗粒物的碳、氮稳定同位素比值,发现盐度范围在 0—25 区域的 POC 主要由陆源输入(包括河流和盐沼),盐度范围在 25—30 区域的海洋来源有机碳对 POC 贡献较大;Cai 等^[9]对黄河口区悬浮颗粒物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布特征进行了讨论,应用物料平衡方程分别得出了陆源和海源有机碳对黄河口 POC 的贡献,并指出离河口距离越远,陆源有机碳对河口 POC 的贡献越小。目前,国内应用碳稳定同位素法对河口 POC 物源的研究主要集中在长江口和黄河口等区域^[8-9],对珠江流域悬浮颗粒物的 $\delta^{13}\text{C}$ 研究主要集中在东江、西江、北江等淡水区域^[10],而对咸淡水交汇的珠江口伶仃洋海域则未有报道。

20 世纪 80 年代末,蔡艳雅等^[11]对珠江口春季的溶解有机碳、颗粒有机碳和沉积物中的有机碳的含量、分布特征及其与几种环境要素的关系进行了探讨,得出珠江口悬浮颗粒物主要是由无机颗粒物组成的;陈绍勇等^[12]运用逐步回归法对珠江口丰水期的 POC 与环境因子的关系进行分析,得出珠江口 POC 主要来源于河流的输入,海洋浮游植物的初级生产不足以对颗粒有机碳的分布产生影响;陈金斯等^[13]对珠江口丰水期和枯水期的 POC 浓度变化和分布特征进行了讨论,并运用 C/N 法得出珠江口 POC 主要是由陆源输入。但上述研究均未涉及珠江口伶仃洋海域悬浮颗粒物 $\delta^{13}\text{C}$ 的研究。

随着珠江流域上游水库的修建及森林覆盖率的提高,珠江流域入海泥沙自 20 世纪 80 年代以来呈显著下降趋势^[14-15],这导致珠江口海域悬浮颗粒物浓度及其分布发生较大的变化。此外,在过去的 20 多年间,由于农业活动、工业生产、生活废水及海水养殖等使得珠江口海域接纳了大量的营养盐,导致珠江口海域浮游植物大量繁殖^[16-17]。珠江口海域含沙量和营养盐含量的改变均有可能导致 POC 组成发生改变。本文依据珠江口

海域总悬浮颗粒物的 POC 和 $\delta^{13}\text{C}$ 及其相关的环境因素,讨论珠江口海域 POC 的空间分布特征及其来源,为深入认识河口区碳的源与汇及其生物地球化学循环过程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样方法

2010 年 8 月 13 日至 18 日对珠江口伶仃洋海域进行了大规模的生态环境调查(图 1)。布设了 3 个纵断面 20 个采样点,其中 A 断面位于珠江口伶仃洋海域中部,从虎门延伸至万山群岛,为径潮混合断面;B 断面位于伶仃洋西部近入海口门处,受陆地径流输入影响显著;C 断面位于伶仃洋东部,受潮流影响显著,一定程度上反映海洋动力的影响。

每个站位均按表、中、底 3 层分层采集水样,用 YSI 85 型水质监测仪现场测定每层的温度和盐度。采集到的海水样品使用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜(0.7 μm ,直径 47 mm,预先在 450 $^{\circ}\text{C}$ 下灼烧过 6 h)进行抽滤,水样抽滤完毕后,以少量的去离子水对滤膜进行洗盐,用于叶绿素 a、POC 和 $\delta^{13}\text{C}$ 测定。所有样品均置于 -20°C 冰柜中保存至分析。

1.2 样品处理与分析

先将滤膜样品解冻并烘干,用电子天平称量得到悬浮颗粒物与膜的总重量后,减去空白膜的重量,得到总悬浮颗粒物(TSM)的重量。然后将滤膜置于密闭干燥器内经浓盐酸熏蒸 12 h 以去除无机碳后,然后低温烘干 24 h。将处理好的膜片置于同位素比率质谱仪(Delta V advantage 型, Finnigan 公司)同时测定 POC 含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 的值。为保证测试结果的准确性,每测试 10 个样品后插测 1 个标准样,分析精密度 $\delta^{13}\text{C} < 0.10\text{‰}$ 。

1.3 数据处理

POC 与环境因子的相关性分析采用 Pearson 相关性系数,即乘积距相关系数,反映两组数据之间的线性相关程度。所有数据的统计分析借助 SPSS 15.0、SIGMAPLOT VERSION 10.0 和 SURFER 9.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 POC 的浓度值及其水平分布特征

珠江口海域夏季 POC 浓度范围 98.5—1929.8 $\mu\text{g/L}$,平均浓度 541.9 $\mu\text{g/L}$ 。陈金斯等^[13]1986 年 6 月测得的 POC 平均浓度约为 650.0 $\mu\text{g/L}$,蔡艳雅等^[11]1987 年 3 月测得的 POC 平均浓度约为 762.0 $\mu\text{g/L}$,均高于本文所测得的数据。从表 1 可以看出,本次调查的 POC 浓度低于长江口,略高于渤海湾,远高于南海海域。

由图 2 可以看出,表层和底层的 POC 浓度变化幅度都较大,表层 POC 浓度范围为 98.5—951.1 $\mu\text{g/L}$,底层 POC 浓度范围 135.2—1929.8 $\mu\text{g/L}$,总体而言,底层高于表层。表层和底层的 POC 水平分布趋势相似,呈现自北部海域(虎门至内伶仃岛)向中部海域(内伶仃岛至大屿山附近)逐渐降低,中部海域至南部海域(大屿山附近至万山群岛附近)又逐渐升高的特点,高值区出现在虎门和西部各入海口门附近以及南部海域。

由于海水的稀释作用(图 2 的盐度分布),TSM 浓度呈现自河口内向河口外逐渐减小的趋势。对比 POC 与 TSM 的平面分布可以发现,在河口北部和中部海域,POC 与 TSM 表底层的分布趋势一致,但在南部海域分布趋势却正相反(图 2)。珠江口叶绿素 a 在北部和中部海域的浓度较低,高值区主要位于河口南部海域(图 2)。

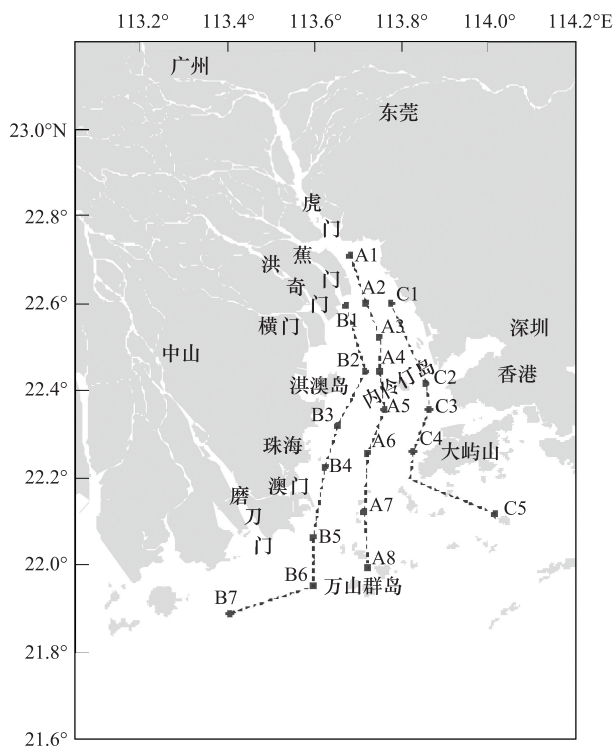


图 1 研究区域及采样站位

Fig. 1 Study area and sampling stations

表 1 不同海区的 POC 含量

Table 1 POC concentrations in different seas

海区 Areas	颗粒有机碳浓度 The concentrations of POC / (μg/L)	平均值 The average values of POC / (μg/L)	文献来源 References	备注 Remarks
珠江口 (2010) Pearl River Estuary (2010)	98.5—1929.8	541.9	本文 This paper	珠江口伶仃洋海域数据 The data of Lingdingyang Estuary
珠江口 (1987) Pearl River Estuary (1987)	421.0—1382.0	762.0	[11]	珠江口伶仃洋海域数据 The data of Lingdingyang Estuary
珠江口 (1986) Pearl River Estuary (1986)	174.6—2196.0	650.0	[13]	珠江口伶仃洋海域数据 The data of Lingdingyang Estuary
长江口及其邻近海域 Changjiang River Estuary and adjacent waters	109.0—3815.0	—	[18]	
渤海湾 Bohai Bay	155.9—1363.1	429.5	[19]	
南海北部 Northern South China Sea	19.0—54.0	—	[20]	

2.2 POC 的垂直剖面分布特征

为了进一步了解 POC 的垂向分布特征,在研究区域分 A、B、C 三个断面对 POC 的垂直分布情况进行分析,图 3 即为利用表、中、底 3 层资料分别得出的 POC 与盐度的各断面垂直分布图。

由于河口径流主要从表面向海运动,外海高盐水自东南方向从底层侵入河口^[21],因此从图 3 可以看出,随着水深由浅至深,盐度呈逐渐上升趋势,受珠江冲淡水 and 外海高盐水的影响,水体的层化现象主要出现在南部海域。A 断面 POC 垂向分布比较均匀,各层 POC 浓度变化幅度较小;B 断面的 POC 垂向分布不均匀,底层浓度大于表层浓度;C 断面 POC 在河口南部海域垂向分布变化幅度较大,底层浓度高于表层浓度,在中层(约 10 m 处)出现分层现象,与水体的层化现象一致。

2.3 POC 的 δ¹³C 值分布特征

珠江口海域夏季悬浮颗粒物的 δ¹³C 值的变化范围-27.05‰—-21.03‰,平均为-24.57‰。表层 δ¹³C 值变化范围为-27.05‰—-21.03‰,底层 δ¹³C 值变化范围为-27.08‰—-21.93‰,表层值略低于底层值。从图 4 可以看出,表层和底层的 δ¹³C 的分布趋势相似,均呈现沿着盐度梯度自口门内向口门外递增的趋势,至东南海域达到最高值。这与国内一些河口悬浮颗粒物的 δ¹³C 分布规律相一致,例如长江口^[8]悬浮颗粒物的 δ¹³C 值随着盐度的增加从-28‰增大至-21‰,黄河口^[9]悬浮颗粒物的 δ¹³C 值随着盐度的增加从-28‰增大至-25‰。

珠江口海域 POC 的陆源输入主要是 C3 (δ¹³C 值为-28‰)、C4 (δ¹³C 值为-11‰) 植物碎屑与土壤有机质^[10]。珠江流域 C3 植物比较丰富,C4 植物比较贫乏,珠江水体悬浮物与土壤有机质的 δ¹³C 值均比较接近 C3 植物的 δ¹³C 值^[10],因此 C4 植物对该区域有机物的贡献可以忽略不计^[22-23],陆源来源 δ¹³C 的端元值拟定为-28‰,而珠江口海域有机碳的水生源 δ¹³C 端元值为-20.5‰^[22],可以看出珠江口海域 POC 为陆源和海洋生物生产混合来源。

3 讨论

3.1 POC 空间分布的主要影响因素及其来源分析

夏季珠江径流量大,西江、北江、东江的输沙量分别占珠江三角洲地区总输沙量的 86%、3.3%、9.2%^[24],大量泥沙携带陆源有机质输入河口。此外,受海洋动力影响,海洋高盐水从东南海域涌向河口内部^[21]。在陆地径流输入和海水入侵相互作用下,TSM 浓度沿盐度梯度自河口西北方向至东南方向逐渐递减,δ¹³C 值沿盐度梯度自河口西北方向至东南方向逐渐递增。δ¹³C 最低值位于虎门附近的 A1 站位(-27.08‰),与陆源端元值相近(-28‰),最高值位于东南海域的 C5 站位(-21.03‰),与水生源端元值(-20.5‰)相近,说明珠江口

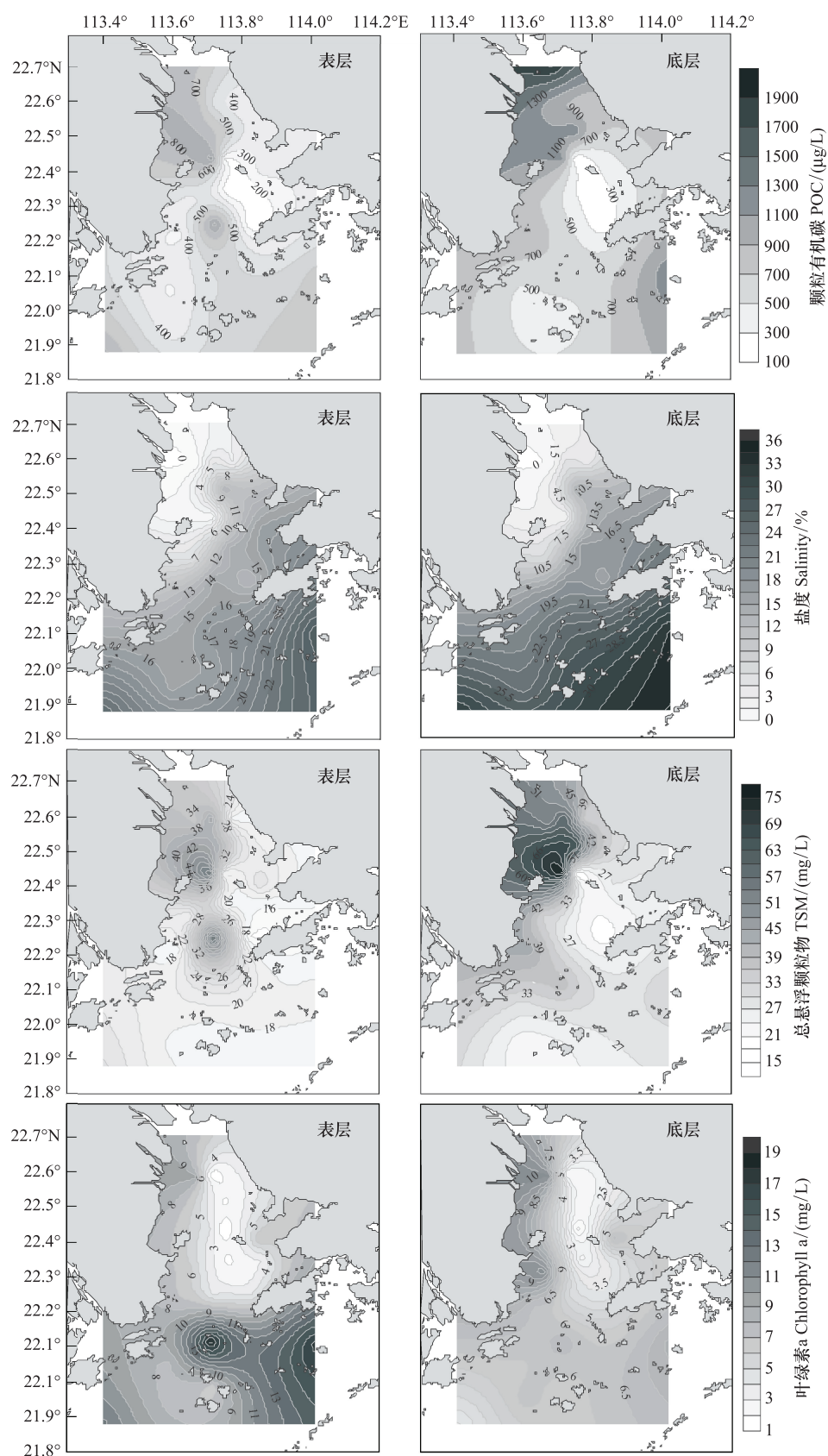


图2 2010年8月珠江口海域POC、盐度、TSM及叶绿素a的水平分布

Fig. 2 Horizontal distribution of POC, salinity, TSM and Chlorophyll a at the surface and bottom water layers of the Pearl River estuary in August 2010

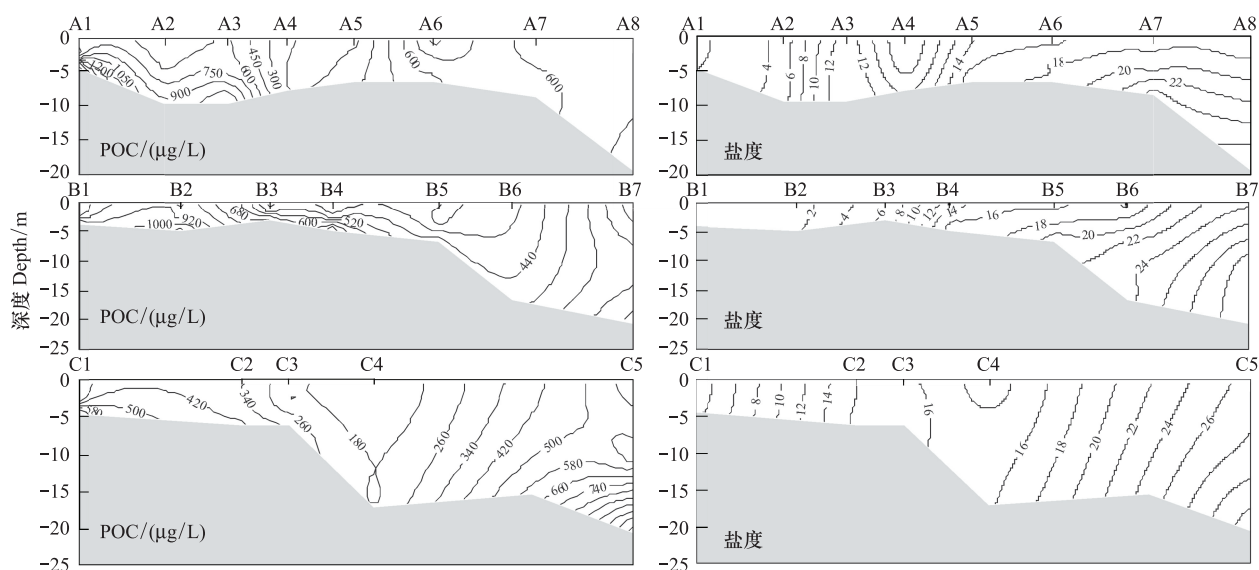
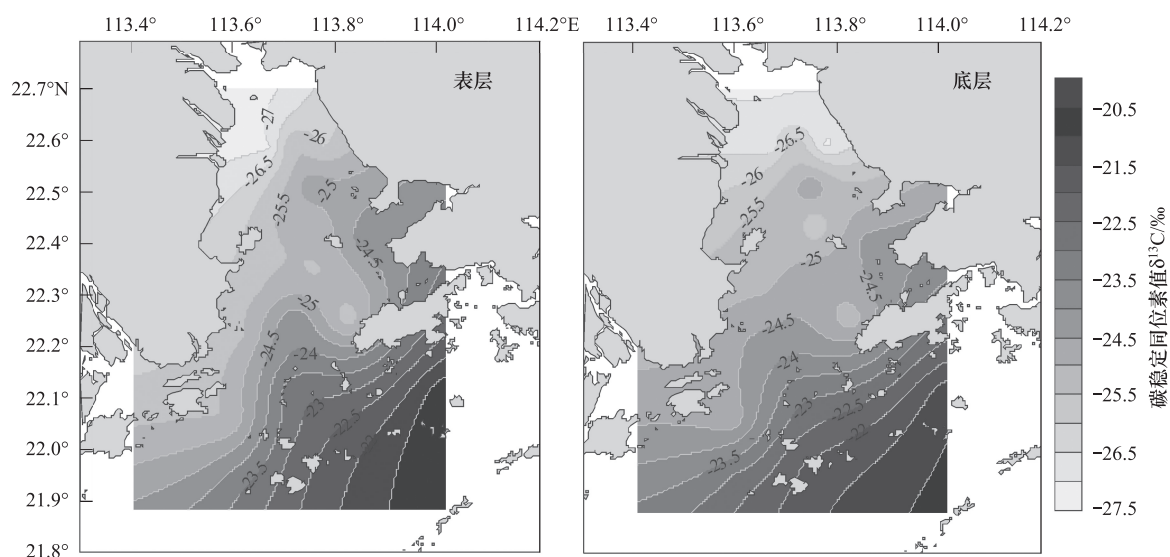


图3 2010年8月珠江口海域各断面POC和盐度的垂直分布

Fig. 3 Vertical distribution of POC and salinity in the Pearl River estuary in August 2010

图4 2010年8月珠江口海域TSM的 $\delta^{13}\text{C}$ 的水平分布Fig. 4 Horizontal distribution of $\delta^{13}\text{C}$ of TSM at the surface and bottom water layers of the Pearl River estuary in August 2010

口门附近的POC可能主要由陆源输入贡献,而远离河口的东南海域则主要由海洋生物生产贡献。

为了探讨陆源和水生来源有机碳对珠江口POC的贡献率,本文依据以下二元混合端元模型^[9]计算陆源和水生源有机碳在珠江口颗粒有机碳中贡献率。

$$f_l = \frac{\delta^{13}\text{C}_m - \delta^{13}\text{C}_t}{\delta^{13}\text{C}_m - \delta^{13}\text{C}_i} \times 100\%$$

式中, f_l 代表陆源有机碳对POC的贡献率,水生来源有机碳对POC的贡献率为 $f_m = 1 - f_l$ 。 $\delta^{13}\text{C}_m$ 代表水生端元 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-20.5‰), $\delta^{13}\text{C}_i$ 代表陆源端元 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-28‰), $\delta^{13}\text{C}$ 代表样品值。

由图5可以看出,表层和底层的陆源有机碳对河口POC的贡献率均沿口门内向口门外逐渐减小,而水生来源有机碳则正相反。在珠江口北部和中部海域,陆源有机碳对POC的贡献占主要地位,其贡献率范围为50%—88%,平均为64%,最高值位于虎门附近的A1站位,贡献率平均为88%;在河口南部海域,水生来源有机

碳对 POC 的贡献占主要地位,其贡献率范围为 50%—89%,平均为 68%,最高值位于东南海域的 C5 站位,贡献率平均为 89%。

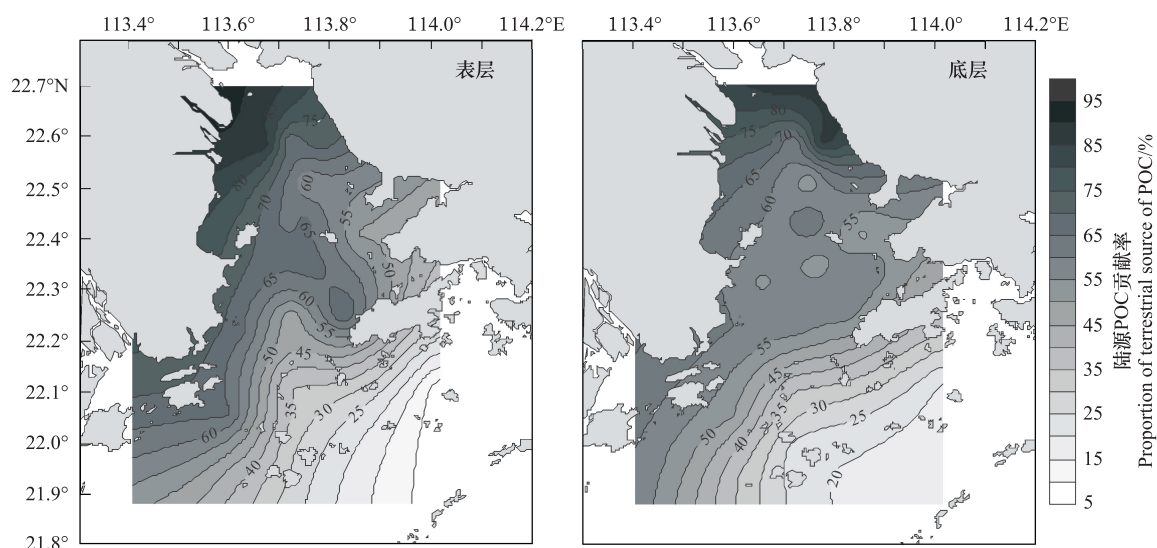


图 5 2010 年 8 月珠江口海域陆源 POC 贡献率 (f_i)

Fig. 5 Proportion of terrestrial source of POC at the surface and bottom water layers of the Pearl River estuary in August 2010

由前面的分析已知,夏季珠江口北部和中部海域 POC 和 TSM 浓度分布趋势一致,自口门内向口门外逐渐减小,叶绿素 a 浓度普遍较低;而南部海域 POC 和叶绿素 a 浓度较高,TSM 浓度较低(图 2)。对 POC 与 TSM 进行相关性分析,其结果显示,河口北部和中部海域的 POC 与 TSM 呈现极显著正相关关系,远高于河口南部海域的 POC 与 TSM 的相关性(图 6),说明河口北部和中部海域的 POC 浓度主要受 TSM 的浓度和来源控制^[25-26],而河口南部海域的 TSM 对 POC 的分布影响则较弱。这个结果与前面应用 $\delta^{13}\text{C}$ 判断珠江口 POC 的来源所得的结果相符。

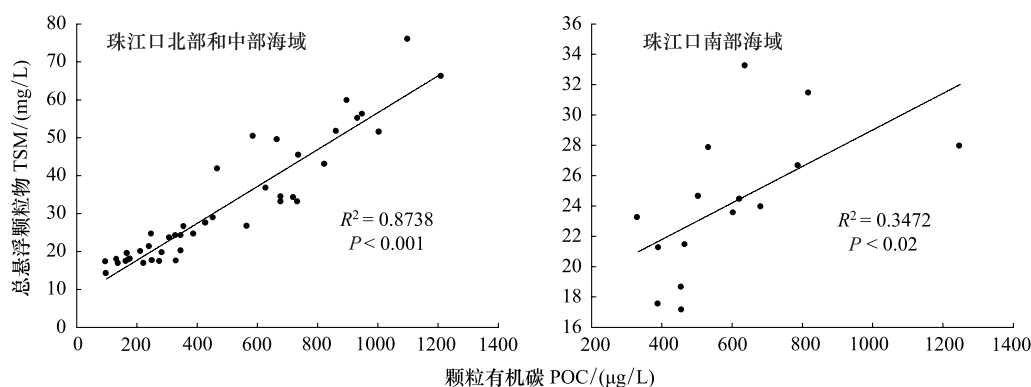


图 6 POC 与 TSM 的相关关系

Fig. 6 Correlations between concentrations of POC and TSM

夏季珠江径流量大,大量泥沙携带陆源有机物输入河口,使得河口入海口门附近水体的 TSM 浓度较高。有研究显示^[27],水体中 TSM 浓度过高,水体的透光性会变差,植物的光合作用会受到抑制,造成叶绿素 a 浓度较低。叶绿素 a 是浮游植物进行光合作用的主要色素,同时也是表征海洋浮游植物生物量的一个重要指标,在一定程度上反映了水域初级生产者通过光合作用生产有机碳的能力^[28],叶绿素 a 浓度越高,意味着浮游植物初级生产力越高,产生的 POC 量也越高,叶绿素 a 浓度越低,产生的 POC 量也越低。因此,在河口北部和中部海域,由于 TSM 主要来源于陆源,浓度较高,抑制了浮游植物的光合作用,导致 TSM 中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值普遍较

低,POC 主要来源于陆源有机物的贡献,使得 TSM 与 POC 相关性较好。随着海水稀释作用的加强,TSM 浓度由北向南逐渐减小,加上海洋高盐水的侵入作用,南部海域主要受潮流控制^[21,29]。在珠江口南部海域,由于 TSM 浓度较小,水体浊度变小,光照和温度适宜,营养盐补充充足,促进了浮游植物的繁殖,使得真光层水柱中的叶绿素 a 浓度较高^[30],海洋生物生产的 POC 量增加,导致 TSM 中 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加,水生源有机碳对 POC 的贡献比重逐渐增加,由于海水稀释和海洋生物生产等多重因素的影响,POC 与 TSM 的相关性相对较低。因此,珠江口北部和中部海域的 POC 分布主要由陆源输入的悬浮颗粒物控制,而南部海域的海洋生物生产对 POC 分布的影响较大。

珠江口径流由于科氏力的影响,向右偏沿岸运行,而海水从东南海域底层入侵河口东部^[21],Mao 等^[29]研究也显示,珠江口西部主要受淡水控制,东部主要受海洋高盐水影响。B 断面位于河口西部海域,毗邻蕉门、洪奇沥、横门和磨刀门等入海口门,受陆源影响较大。夏季由于降水丰富,珠江径流携带含有大量有机物的泥沙通过西部口门流入珠江口海域,使得 B 断面各层 POC、TSM 的浓度都很高,且垂向分布不均匀,底层浓度大于表层浓度。陆地径流离开口门进入珠江口海域后,由于水流扩散,挟沙能力降低,泥沙的絮凝沉积作用使其沉降到底层水体中,再加上潮流冲刷引起的沉积物再悬浮,使得底层水体的浊度大于表层^[31],造成底层 POC 浓度大于表层。A 断面和 C 断面受陆地径流影响较小,水深较浅,水体混合比较均匀,除了东南海域因海水侵入作用出现盐度和 POC 分层现象外,其余海域水体 POC 垂向分布比较均匀,变化幅度不大。

可见,珠江口海域 POC 的空间分布主要受总悬浮颗粒物、叶绿素 a 和水动力条件的影响。

3.2 近 20a 来 POC 来源的变化

陈绍勇等^[12]和陈金斯等^[13]曾经指出珠江口海域颗粒有机碳主要来自陆源输入,海洋浮游植物的初级生产不足以对颗粒有机碳的分布产生影响,但本文却得出珠江口海域北部和中部海域的 POC 分布主要由陆源来源有机碳(64%)控制,河口南部海域的 POC 分布则主要由海洋浮游植物初级生产(68%)控制,因此,与 20 多年前相比,珠江口海域的 POC 分布特征与来源已经发生了改变。有研究显示^[14-15],珠江流域入海泥沙从 1950 年代到 1980 年代呈显著上升的趋势,但随着珠江流域各大型水库的修建,自 1980 年代至 2000 年代珠江流域入海泥沙呈显著下降趋势,水库建设是入海泥沙减少的主要原因。截至 2005 年,珠江流域的水库总库容已达 $650 \times 10^8 \text{ m}^3$,占多年平均入海径流量的 22.7%,水库的拦沙作用使入海泥沙的大量减少,河口悬浮颗粒物浓度降低^[14],导致陆源来源有机碳输入量减少,这可能是本次调查所测得 POC 浓度低于蔡艳雅等^[11]和陈金斯等^[13]所测得的 POC 浓度的主要原因。

此外,在过去的 20 多年间,由于农业施肥、工业生产、生活废水及其渔场网箱养殖等使得珠江口海域的营养盐含量呈显著上升趋势^[16]。Huang^[17]等研究也显示,在过去的 20 多年里,由于农业活动、生活排放、海水养殖等原因,珠江口海域的营养盐含量一直维持在一个较高的水平,使得南部海域赤潮发生的频率不断增加。珠江口北部和中部海域由于受陆源影响较大,虽然富含营养盐,但水体浊度较大,抑制了浮游植物的光和作用^[27],因此陆源输入仍是 POC 的主要来源;由于入海泥沙量减少,使得到达珠江口南部海域的悬浮颗粒物更少,水体透明度增大,加上营养盐含量丰富,极大的促进了浮游植物的繁殖^[30],提高了海洋初级生产力,因此海洋生物生产可能已成为 POC 的主要来源。

总起来说,珠江口海域含沙量减少与营养盐含量增加可能是导致 POC 组成发生变化的主要原因,而且随着后续大型水库的逐渐建成,珠江流域的输沙量将会进一步减少^[14],陆源来源有机碳对珠江口海域 POC 分布的控制也可能会继续减弱。

4 结论

(1) POC 的空间分布总体呈现北部海域向中部海域逐渐降低,中部海域至南部海域又逐渐升高,底层大于表层的特点。总悬浮颗粒物、叶绿素 a、水动力是影响 POC 空间分布的重要原因。

(2) 悬浮颗粒物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布呈现沿盐度梯度自口门内向口门外逐渐递增,底层大于表层的特点。陆源输入和海洋生物生产是影响 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布的主要原因。

(3) 珠江口北部和中部海域 POC 以陆源来源有机碳为主,贡献率平均为 64%;珠江口南部海域 POC 以水生来源有机碳为主,贡献率平均为 68%。

(4) 与 20 多年前相比,POC 的分布特征与来源已经发生了改变,珠江口海域含沙量减少与营养盐含量增加可能是导致 POC 组成发生变化的主要原因。

致谢:感谢中国林业科学研究院稳定同位素质谱分析实验室在样品测定过程中给予的帮助。

References:

- [1] Chen P Q, Huang Y, Yu G R. Carbon Cycle of the Earth System. Beijing: Science Press, 2004: 314-330.
- [2] Zhang N X, Song J M, He Z P. Biogeochemical mechanism of particulate organic carbon (POC) variations in seawaters. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7): 2328-2338.
- [3] Andres J E, Greenway A M, Dennis P F. Combined carbon isotope and C/N ratios as indicators of source and fate of organic matter in a poorly flushed, tropical estuary: Hunts Bay, Kingston Harbour, Jamaica. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46(5): 743-756.
- [4] McCallister S L, Bauer J E, Canuel E A. Bioreactivity of estuarine dissolved organic matter: a combined geochemical and microbiological approach. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1): 94-100.
- [5] Middelburg J J, Nieuwenhuize J. Carbon and nitrogen stable isotopes in suspended matter and sediments from the Schelde Estuary. *Marine Chemistry*, 1998, 60(3/4): 217-225.
- [6] Thornton S F, McManus 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. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1994, 38(3): 219-233.
- [7] Wu Y, Zhang J, Zhang Z F, Ren J L, Cao J P. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate matter in the Changjiang River. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 546-552.
- [8] Zhang J, Wu Y, Jennerjahn T C, Ittekkot V, He Q. 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*, 2007, 106(1/2): 111-126.
- [9] Cai D L, Cai A Z. Geochemical studies on organic carbon isotope of the Huanghe River (Yellow River) Estuary. *Science in China (Series B)*, 1994, 37(8): 1001-1015.
- [10] Wei X G, Shen C D, Sun Y M, Yi W X. The study of stable carbon isotope composition of riverine suspended matter and soil erosion of the Pearl River Drainage Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(1): 151-157.
- [11] Cai Y Y, Han W Y. Study on organic carbon in the Pearl River Estuary. *Marine Environmental Science*, 1990, 9(2): 8-13.
- [12] Chen S Y, Zheng Z G, Zheng J L, Lin Z Q. Relationships between suspended particles of organic carbon and environmental factors in Zhujiang River Estuary. *Journal of Tropical Oceanography*, 1990, 9(2): 54-57.
- [13] Chen J S, Li Y F, Hong H S. A study on suspended particulate matter in the Zhujiang River Estuarine area II. Origin, distribution and transport of particulate organic carbon and nitrogen. *Tropic Oceanology*, 1988, 7(3): 90-98.
- [14] Dai S B, Yang S L, Cai A M. Variation of sediment discharge of the Pearl River Basin from 1955 to 2005. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(5): 545-554.
- [15] Zhang S R, Lu X X, Higgitt D L, Chen C T A, Han J T, Sun H G. Recent changes of water discharge and sediment load in the Zhujiang (Pearl River) Basin, China. *Global and Planetary Change*, 2008, 60(3/4): 365-380.
- [16] Ma Y, Wei W, Xia H Y, Yu B, Wang D, Ma Y, Wang L. History change and influence factor of nutrient in Lingdingyang sea area of Zhujiang River Estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 31(2): 69-77.
- [17] Huang X P, Huang L M, Yue W Z. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 2003, 47(1/6): 30-36.
- [18] Jin H Y, Lin Y A, Chen J F, Jin M M. Analysis of driving factors and distribution of particulate organic carbon in the Huanghai Sea and the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(5): 46-53.
- [19] Hu L M, Deng S G, Guo Z G, Liu Y. Distribution and source of particulate organic carbon in the Bohai Bay and its Adjacent Bohai Sea, China. *Environmental Science*, 2009, 30(1): 39-46.
- [20] Huang J J, Wang S M, Chen Y L. Biogeochemical controls on distributions and fluxes of dissolved and particulate organic carbon in the Northern South China Sea. *Deep Sea Research Part II: Tropical Studies in Oceanography*, 2007, 54(14/15): 1486-1503.
- [21] Zhao H T. The Evolution of the Pearl River Estuaries. Beijing: Ocean Press, 1990: 140-161.

- [22] Hu J F, Peng P A, Jia G D, Mai B X, Zhang G. Distribution and sources of organic carbon, nitrogen and their isotopes in sediments of the subtropical Pearl River estuary and adjacent shelf, Southern China. *Marine Chemistry*, 2006, 98(2/4): 274-285.
- [23] Jia G D, Peng P A. Temporal and spatial variations in signatures of sedimented organic matter in Lingding Bay (Pearl estuary), southern China. *Marine Chemistry*, 2003, 82(1/2): 47-54.
- [24] Luo X L, Yang Q S, Jia L W, Peng J X, Chen Y T, Luo Z R, Yang G R. River-Bed Evolution of the Pearl River Delta Network. Guangzhou: Zhongshan (Sun Yat-sen), University Press, 2002: 210-215.
- [25] Ni H G, Lu F H, Luo X L, Tian H Y, Zeng E Y. Riverine inputs of total organic carbon and suspended particulate matter from the Pearl River Delta to the coastal ocean off South China. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56(6): 1150-1157.
- [26] Zhang S, Gan W B, Ittekkot V. Organic matter in large turbid rivers: the Huanghe and its estuary. *Marine Chemistry*, 1992, 38(1/2): 53-68.
- [27] Zhang J, Liu S M, Xu H, Yu Z G, Lai S Q, Zhang H, Geng G Y, Chen J F. Riverine sources and estuarine fates of particulate organic carbon from North China in late summer. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, 46(3): 439-448.
- [28] Zheng G X, Song J M, Dai J C, Wang Y M. Distributions of chlorophyll-a and carbon fixed strength of phytoplankton in autumn of the southern Huanghai Sea waters. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(3): 109-118.
- [29] Mao Q W, Shi P, Yin K D, Gan J P, Qi Y Q. Tides and tidal currents in the Pearl River Estuary. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(16): 1797-1808.
- [30] Yin K D, Harrison P J. Nitrogen over enrichment in subtropical Pearl River estuarine coastal waters: possible causes and consequences. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1435-1442.
- [31] Tian X P. A study on turbidity maximum in Lingdingyang Estuary of the Pearl River. *Tropic Oceanology*, 1986, 5(2): 27-35.

参考文献:

- [1] 陈泮勤, 黄耀, 于贵瑞. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004: 314-330.
- [2] 张乃星, 宋金明, 贺志鹏. 海水颗粒有机碳 (POC) 变化的生物地球化学机制. *生态学报*, 2006, 26(7): 2328-2339.
- [7] 吴莹, 张经, 张再峰, 任景玲, 曹建平. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 546-552.
- [10] 魏秀国, 沈承德, 孙彦敏, 易惟熙. 珠江水体悬浮物碳稳定同位素组成与流域土壤侵蚀研究. *沉积学报*, 2008, 26(1): 151-157.
- [11] 蔡艳雅, 韩舞鹰. 珠江口有机碳的研究. *海洋环境科学*, 1990, 9(2): 8-13.
- [12] 陈绍勇, 郑泽广, 郑建禄, 林植青. 珠江口悬浮颗粒有机碳与环境因子的关系. *热带海洋学报*, 1990, 9(2): 54-57.
- [13] 陈金斯, 李永飞, 洪华生. 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. *热带海洋*, 1988, 7(3): 90-98.
- [14] 戴仕宝, 杨世伦, 蔡爱民. 51 年来珠江流域输沙量的变化. *地理学报*, 2007, 62(5): 545-554.
- [16] 马媛, 魏巍, 夏华永, 于斌, 王迪, 马玉, 王亮. 珠江口伶仃洋海域营养盐的历史变化及影响因素研究. *海洋学报*, 2009, 31(2): 70-77.
- [18] 金海燕, 林以安, 陈建芳, 金明明. 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*, 2005, 27(5): 46-53.
- [19] 胡利民, 邓声贵, 郭志刚, 刘勇. 夏季渤海湾及邻近海域颗粒有机碳的分布与物源分析. *环境科学*, 2009, 30(1): 39-46.
- [21] 赵焕庭. 珠江河口演变. 北京: 海洋出版社, 1990: 140-161.
- [24] 罗宪林, 杨清书, 贾良文, 彭钜新, 陈耀泰, 罗章仁, 杨干然. 珠江三角洲网河河床演变. 广州: 中山大学出版社, 2002: 200-220.
- [28] 郑国侠, 宋金明, 戴纪翠, 王益鸣. 南黄海秋季叶绿素 a 的分布特征与浮游植物的固碳强度. *海洋学报*, 2006, 28(3): 109-118.
- [31] 田向平. 珠江河口伶仃洋最大混浊带研究. *热带海洋*, 1986, 5(2): 27-35.

CONTENTS

Growth and physiological adaptation of <i>Messerschmidia sibirica</i> to sand burial on coastal sandy	WANG Jin, ZHOU Ruilian, ZHAO Halin, et al (4291)
Alleviation effect and mechanism of exogenous potassium nitrate and salicylic acid on the growth inhibition of <i>Pinus tabulaeformis</i> seedlings induced by deicing salts	ZHANG Ying, LI Fayun, YAN Xia, et al (4300)
Influence of different spatial-scale factors on stream macroinvertebrate assemblages in the middle section of Qiantang River Basin	ZHANG Yong, LIU Shuoru, YU Haiyan, et al (4309)
Species diversity and distribution pattern of non-volant small mammals along the elevational gradient on eastern slope of Gongga Mountain	WU Yongjie, YANG Qisen, XIA Lin, et al (4318)
A patch-based method for mechanism analysis on spatial dynamics of mangrove distribution	LI Chungan, LIU Suqing, FAN Huangqing, et al (4329)
Nutrient heterogeneity in fine roots of six subtropical natural tree species	XIONG Decheng, HUANG Jinxue, YANG Zhijie, et al (4343)
Variation of vegetation NDVI and its response to climate change in Zhejiang Province	HE Yue, FAN Gaofeng, ZHANG Xiaowei, et al (4352)
Heterogeneity in fine root respiration of six subtropical tree species	ZHENG Jinxing, XIONG Decheng, HUANG Jinxue, et al (4363)
Characteristics of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea abundance in soil organic layer under the subalpine/alpine forest	WANG Ao, WU Fuzhong, HE Zhenhua, et al (4371)
Effect of tillage systems on light fraction carbon in a purple paddy soil	ZHANG Junke, JIANG Changsheng, HAO Qingju, et al (4379)
Effects of prescribed fire on carbon sequestration of long-term grazing-excluded grasslands in Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui, et al (4388)
Stoichiometry of carbon dioxide and methane emissions in Minjiang River estuarine tidal wetland	WANG Weiqi, ZENG Congsheng, TONG Chuan, et al (4396)
Distribution and sources of particulate organic carbon in the Pearl River Estuary in summer 2010	LIU Qingxia, HUANG Xiaoping, ZHANG Xia, et al (4403)
The glucose-utilizing bacterial diversity in the cold spring sediment of Shawan, Xinjiang, based on stable isotope probing	CHU Min, WANG Yun, ZENG Jun, et al (4413)
Culture-dependent and culture-independent approaches to studying soil microbial diversity	LIU Guohua, YE Zhengfang, WU Weizhong (4421)
The classification of plant functional types based on the dominant herbaceous species in the riparian zone ecosystems in the Yiluo River	GUO Yili, LU Xunling, DING Shengyan (4434)
Genetic diversity of different eco-geographical populations in endangered plant <i>Prunus mongolica</i> by ISSR Markers	ZHANG Jie, WANG Jia, LI Haoyu, ZHANG Huirong, et al (4443)
Ecophysiological characteristics of higher-latitude transplanted mangrove <i>Kandelia candel</i> in strong tidal range area	ZHENG Chunfang, QIU Jianbiao, LIU Weicheng, et al (4453)
The effect of artificial warming during winter on white clover (<i>Trifolium repens</i> Linn): overwintering and adaptation to coldness in late spring	ZHOU Ruilian, ZHAO Mei, WANG Jin, et al (4462)
Estimating fine root production and mortality in subtropical <i>Altingia grilipes</i> and <i>Castanopsis carlesii</i> forests	HUANG Jinxue, LING Hua, YANG Zhijie, et al (4472)
The cloning and expression of WUE-related gene (<i>PdEPF1</i>) in <i>Populus deltoides</i> × <i>Populus nigra</i>	GUO Peng, JIN Hua, YIN Weilun, et al (4481)
The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of <i>Thalia dealbata</i> to seedling of several aquatic plants	MIAO Lihua, WANG Yuan, GAO Yan, et al (4488)
Effect of the avirulent strain of <i>Ralstonia solanacearum</i> on the ecological characteristics of microorganism fatty acids in the rhizosphere of tobacco	ZHENG Xuefang, LIU Bo, LAN Jianglin, et al (4496)
Coupling remotely sensed information with a rice growth model by combining updating and assimilation strategies	WANG Hang, ZHU Yan, MA Mengli, et al (4505)
Effects of water temperature and body weight on metabolic rates of Yellowtail clownfish <i>Amphiprion clarkii</i> (Pisces: Perciformes) during larval development	YE Le, YANG Shengyun, LIU Min, et al (4516)
The distribution of chlorophyll a in the Southwestern Indian Ocean in summer	HONG Lisha, WANG Chunsheng, ZHOU Yadong, et al (4525)
Evaluation of the effects of ecological remediation on the water quality and biological toxicity of Dagou Drainage River in Tianjin	WANG Min, TANG Jingchun, ZHU Wenyong, et al (4535)
Quantitative dynamics of adult population and 3-D spatial pattern of <i>Ceoporus variabilis</i> (Baly)	WANG Wenjun, LIN Xuefei, ZOU Yunding, et al (4544)
Review and Monograph	
Studies on urban heat island from a landscape pattern view: a review	CHEN Ailian, SUN Ranhao, CHEN Liding (4553)
Sediment quality triad and its application in coastal ecosystems in recent years	WU Bin, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (4566)
Discussion	
Food waste management in China: status, problems and solutions	HU Xinjun, ZHANG Min, YU Junfeng, et al (4575)
Scientific Note	
Effects of microchemical substances in anaerobic fermented liquid from rice straw and cyanobacteria on <i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>niveum</i> growth	LIU Aimin, XU Shuangsoo, CAI Xin, et al (4585)
Ecological benefit-loss analysis of agricultural ecosystem in Foshan City, China	YE Yanqiong, ZHANG Jiaen, QIN Zhong, et al (4593)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 14 期 (2012 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 14 (July, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元