第 24 卷第 5 期
2004 年 9 月

环 境 科 学 学 报
ACTA SCIENTIAE CIRCUMSTANTIAE

Vol. 24, No. 5
Sep., 2004

文章编号:0253-2468(2004)05-0789-07　　中图分类号:P592　　文献标识码:A

# 增江流域河流颗粒有机碳的来源、含量变化及输出通量

陶　贞[1,2],高全洲[*,2],姚冠荣[2],沈承德[1],邬俏钧[2],吴志才[2],刘冠超[3]

(1. 中国科学院广州地球化学研究所　510640;2. 中山大学地理科学学院,广州　510275;3. 广东省水文局麒麟咀水文站,增城　511300)

**摘要**:对华南增江径流进行了 1 个水文年度的 15 次等时段采样,分析了河流悬移质中主要生源元素(C、N、H)的含量,并估算了不同物源的贡献. 结果表明,增江悬移质中的有机碳以水生藻类的贡献为主,土壤侵蚀来源的有机碳在悬移质粗粒组中的份额平均为 37.24 %,在细粒组中仅占 11.11 %. 增江流域颗粒有机碳的输出通量为 $0.83\times10^{6}$ g·km$^{-2}$·a$^{-1}$,其中来自土壤的颗粒有机碳通量为 $0.22\times10^{6}$ g·km$^{-2}$·a$^{-1}$.

**关键词**:碳氮比;河流碳通量;颗粒有机碳;土壤侵蚀;自源有机碳;季风湿热流域

# The sources, seasonal variation and transported fluxes of the riverine particulate organic carbon of the Zengjiang River, Southern China

TAO Zhen[1,2], GAO Quanzhou[2], YAO Guanrong[2], SHEN Chengde[1], WU Qiaojun[2], WU Zhicai[2], LIU Guanchao[3] (1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640; 2. School of Geographical Sciences, Zhongshan (Sun Yat-sen) University), Guangzhou 510275; 3. Qilinzui Hydrometric Station, Hydrological Bureau of Guangdong Province, Zengcheng 511300)

**Abstract**: The transfer of carbon from land to sea via rivers represents a major link in the global carbon cycle. The Zengjiang River drainage, a second-classed tributary of the Zhujiang (Pearl) River drainage, lies in the subtropical monsoon area, southern China, with the Tropic of Cancer through it. Suspended sediments had been collected for four weeks from the Zengjiang River and represent for a whole hydrological year. The main biogenic elements, including carbon, nitrogen and hydrogen were analyzed, and two major potential contributions from soil organic matter and aquatic algae were estimated. The research results indicated that the organic carbon in the suspended sediments originates mainly from primary production, and that from the soil organic carbon represented only 37.24 % for the coarse sediments and even less 11.11 % for the fine sediments. The transported particulate organic carbon flux in the Zengjiang River drainage amounts to $0.83\times10^{6}$ g·km$^{-2}$·a$^{-1}$, in which that comes from soil erosion processes is $0.22\times10^{6}$ g·km$^{-2}$·a$^{-1}$.

**Keywords**: C/N; carbon flux; particulate organic carbon; soil erosion; autochthonous organic carbon; monsoon humid tropical drainage

河流的碳输出过程构成全球碳循环的一个重要环节[1]. 河流碳通量自陆地指向海洋,是单向的,在数量上与"海洋-大气"间的净碳通量[2]、使用化石燃料排放的碳通量[3]、森林火灾形成的碳通量等处在同一数量级[4]. 河流碳通量受流域内人类活动主导的各种地表过程的制约,对区域性和全球性气候变化的响应也很敏感,在冰期-间冰期的时间尺度上,与全球气候系统发生藕合[5]. 在季风型的湿热山地丘陵区,流域侵蚀动力(径流量)与生物量在时间上同步增减,且季节之间相差悬殊. 这些流域在河流碳通量方面与非季风流域具有不同特

**收稿日期**:2003-09-30;**修订日期**:2003-12-30
**基金项目**:国家自然科学基金(40143012);广东省自然科学基金(031548)资助项目
**作者简介**:陶　贞 (1965—),女,讲师 (在职博士研究生);　*联系通讯人:eesgqz@zsu.edu.cn

点[6~10]. 本文研究了地处典型湿热季风区的增江流域河流颗粒有机碳(POC)的来源及其含量的时序变化特征,并对流域输出通量作了初步估算.

## 1 流域概况

增江是珠江的二级支流,全长 203 km,干流总落差 484 m. 下游的麒麟咀水文站控制流域面积 2866 $km^2$,占流域总面积(3160 $km^2$)的 91 %. 流域内基岩以燕山期花岗岩为主,地表覆盖着较深厚的红色风化壳. 地貌类型以中、低山地和丘陵为主. 土壤以湿润铁铝土为主,局部有山地常湿润铁铝土和潜育土-水耕人为土分布. 北回归线横穿流域,年均气温 21.6 ℃,年均降水量为 2188 mm(麻榨站,海拔 20 m). 森林覆盖率平均达 50 %左右. 耕地占流域总面积的 8.7 %,其中水田占 70 %,旱地占 30 %. 除龙门以下的极少沿河地段出现轻度的水土流失现象外,流域范围内绝大部分地区无水土流失现象[11]. 麒麟咀水文站年均径流量为 $3.82\times10^9$ $m^3$,其中汛期(4~9 月)流量占 83.3 %. 天堂山水库是流域内一座大型蓄水工程,总库容 $2.43\times10^8$ $m^3$,蓄水面积 12 $km^2$,集雨面积 461 $km^2$;流域内还分布着 17 处中小型蓄水工程(图 1).

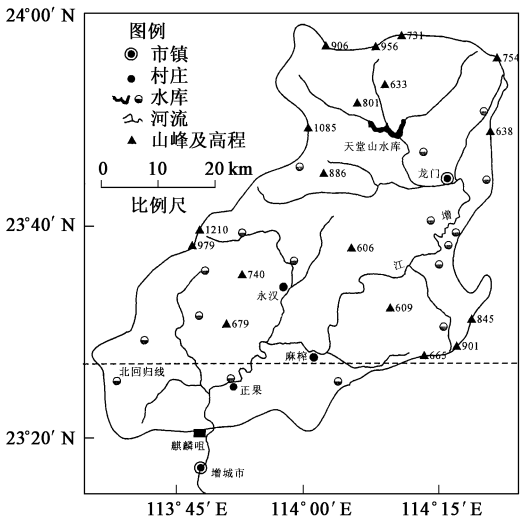



**图 1 增江流域示意图**

Fig. 1 The sketch of the Zengjiang River drainage

## 2 实验方法

选取麒麟咀水文站为采样断面(平水期水面宽约 20 m,中泓水深约 5 m),中泓水面以下 0.50 m 处为采样点. 每隔 4 周采样一次,从 2002-01-27~2003-02-22,共采样 15 次. 用普通塑料桶盛装水样(约 90 L). 将水样在实验室静置 24 h 之后,用孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维微孔滤膜低压抽滤. 待过滤结束后,收集桶底的自然沉淀颗粒物(粗粒组)和滤膜上的颗粒物(细粒组),剔除肉眼可察的植物残屑后,分别在 50 ℃的恒温箱中烘干. 用感量为 0.1 mg 的分析天平衡重,经玛瑙钵研磨均一后备用. 同时,在几个代表性的采样时期,用网筛捞取河流表层漂浮的藻团(未经过滤处理),与河流悬移质同样处理分析.

称取 100.0 mg 样品,用浓 HCl 烟雾熏 1 h 后在样品中加入 50 mL(1 mol $L^{-1}$)的 KCl 溶液,经超声波处理 30 min,以 3000 r $min^{-1}$ 离心 20 min,除去上清液. 用蒸馏水冲洗 3 次,同样离心处理. 这样就除去了样品中微量的碳酸盐和主要的 $NH_4^+$. 最后在 50 ℃的恒温箱中烘24 h.

用德国 Vario 公司出品的 EL CHNS-O 型元素分析仪测出有机碳(POC)、有机氮(PON)、有机氢(POH)含量(%). 测试重复 3 次,误差在 5 %以内.

## 3 结果与讨论

### 3.1 悬移质中主要生源元素含量及其随时间、粒径的变化特征

随水文过程的变化,增江河流悬移质浓度(TSS)也发生明显变化,且增江径流中悬移质浓度与其中有机碳的质量分数($W_{POC}$)之间呈反相关关系(图 2). 从图 2 还可以看出,在粗粒

组和细粒组中这种反相关关系的形式不同. 在细粒组中,随着 TSS 的增加, $W_{POC}$ 呈指数趋势下降,且相关性较好);而在粗粒组中,随着 TSS 的增加, $W_{POC}$ 呈线性趋势下降,且斜率较小,相关性也不显著.

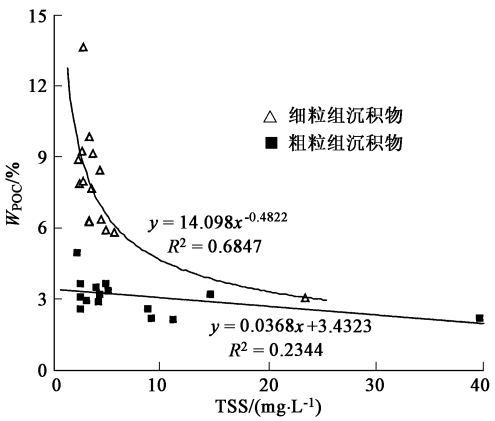



**图 2　增江悬移质浓度(TSS)与其所含有机碳质量分数之间的关系**

Fig. 2　The relationship between the concentrations of total suspended sediment (TSS) and the mass portion of organic carbon in the TSS in the Zengjiang River

有机碳的质量分数是河流悬移质的一项重要环境地球化学属性,可以反映流域侵蚀环境的性质. 在不同的流域(或地理区域),随着侵蚀强度的增加, $W_{POC}$ 呈指数趋势下降[9]. 导致这种现象产生的原因有:第 1,随着流域侵蚀强度的增加,被扰动的土壤层厚度加大,侵蚀输出物中矿物的成分增加,对有机碳起到稀释作用,这种情况在一些高混浊河流中表现最为明显[12];第 2,在湖泊或在流速和缓的河段,随着悬移质含量的增加,水体透光深度锐减,导至浮游生物的生产量下降,根据二元混合模式,这种现象将导致悬移质中有机碳含量的减少. 本项研究表明,同一流域不同水文过程的河流悬移质浓度和其有机碳的质量分数之间也呈反相关关系.

在流域间的"TSS-$W_{POC}$"关系图上,数据点集中在 TSS 的中间数值部分,而向两端逐渐变稀疏[9],大体上符合正态分布,这表明流域侵蚀强度的极端情况(非常强烈或非常微弱的侵蚀)是少见的. 而在本文的"TSS-$W_{POC}$"时间序列关系图上,多数数值集中在低值区,高值区较少,这与增江平水期持续时间长,而洪峰次数少且持续时间短的事实相吻合.

增江河流悬移质中生源要素含量在时间序列上的演化趋势较为一致(图 3),并且粗、细粒

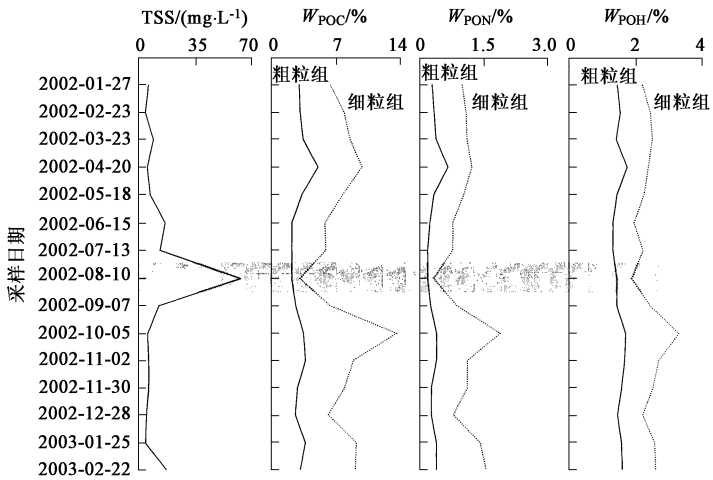



**图 3　增江悬移质浓度和主要生源元素含量的时序演化特征**

Fig. 3　The temporal variation of some biogenic elements and the total suspended sediment concentration in the Zengjiang River

组之间的演化趋势存在一定差别. 在粗粒组中, POC,PON,POH 随 TSS 的变化不明显, 而细粒组中, 呈现较为明显的反相关关系. 在洪峰过境时期(第 8 次采样), TSS 猛增, 而 POC,PON,POH 相对明显降低(图 3 中的阴影部分). 根据现场观测, 在第 10 次采样时, 河流中的藻类较其它采样时期更为繁茂, 在图 3 中表现为 POC、PON、POH 的一个峰值.

3.2 悬移质的有机 C/N 与 TSS 之间的关系及其随时间、粒径的变化特征

河流和河口区水体有机质主要有 4 方面的潜在来源:土壤侵蚀产物、水体浮游植物、水生维管束植物、人类污染排放物[13]. 不同来源的水体有机质具有不同的碳氮比(C/N, 摩尔比). 例如, 土壤腐殖质 C/N 的平均值为 21.2; 河流淡水浮游植物的 C/N 介于 4～10 之间[14]. 因此, 在一定程度上 C/N 可以指示河流有机质的物源及不同物源的混合比例[15～17]. 一般地说, C/N 介于 4～12 之间, 表明河流悬移质中的有机质主要源于河流水生植物; C/N 大于 12, 则表明颗粒物中的有机质主要来源于土壤腐殖质的侵蚀产物[8].

增江麒麟咀以上流域没有城市分布, 且少有大规模的厂矿企业, 耕地面积较少, 可以忽略污染排放和化肥的贡献; 而在不同时期的沿程观察表明, 增江水体维管束植物也十分稀少. 因此, 将水体颗粒有机碳的潜在来源限定在土壤侵蚀产物和藻类两个方面.

增江水体悬移质粗、细粒组的物源组成存在明显差异(见图 4a), 这种差异是各种物源混合比例的不同所造成的. 从总体上看, 悬移质中粗颗粒的 C/N 变化于 9.06～13.79 之间, 平均为 11.25; 细颗粒的 C/N 变化于 6.84～10.78 之间, 平均为 8.74, 两者只有部分重叠. 随侵蚀强度的加强(图 4a 中 TSS 的增加), C/N 也升高, 并且在粗颗粒中这种升高趋势更为明显.

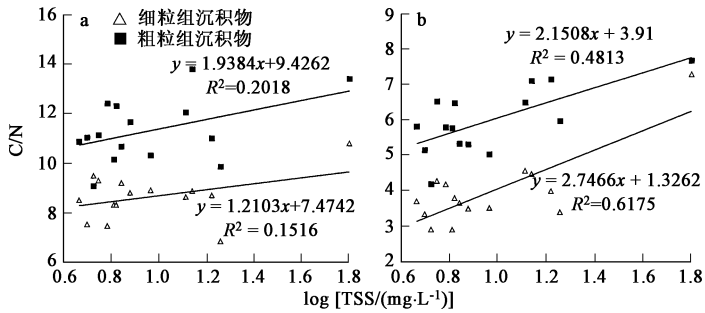



**图 4 增江悬移质浓度与 C/N、H/C 之间的关系**

Fig. 4 The relationship between the concentrations of total suspended sediment and (a) the ratio of carbon to nitrogen, and (b) the ratio of hydrogen to carbon

沉积有机质的 H/C(原子数)通常用于指示油气和第四纪沉积物中有机质的来源和后生演化阶段, 而很少用于现代河流悬移质的研究. 增江河流悬移质的有机 H/C 也反映了与 C/N 相似的规律(图 4b). 粗颗粒的 H/C 变化于 0.35～0.64 之间, 平均为 0.5; 细颗粒的 H/C 变化于 0.24～0.61 之间, 平均为 0.33, 删除个别异常点后, 两者也只有部分重叠. 随侵蚀强度的增加, H/C 升高.

如上分析, 假设增江水体有机质仅为流域土壤侵蚀和水生藻类两种物源的混合, 则颗粒有机质中来自土壤侵蚀的成分的计算可表述为:

$$A_{\text{sample}} = B_{\text{soil}} \times A_{\text{soil}} + (1 - B_{\text{soil}}) \times A_{\text{alga}} \quad (1)$$

式中, $A$ 为 C/N, $B$ 为物源的贡献率, 下标 soil 和 alga 分别表示土壤有机质和水生藻类.

取 $A_{soil}$ = 20.69(广东境内与增江流域纬度相当的 50 个丘陵区湿润铁铝土样品的平均值[18]);$A_{alga}$ = 6.13(取 7 个增江水体藻类样品的平均值). 计算结果见图 5.

由图 5 可以看出,增江河流悬移质粗粒组中的有机碳来自土壤成分的平均值为 37.24 %,变化范围为 55.16 %～21.12 %;细粒组中的有机碳来自土壤成分的平均值为 11.11 %,变化范围为 33.53 %～5.12 %. 可见,增江河流悬移质中的有机碳以河流自源碳为主,土壤有机碳只是在个别采样时期的粗粒组中所占分额过半. 无论是粗粒组还是细粒组,在洪峰过境时都表现为土壤来源的份额增加;在枯水期,都表现为土壤来源的份额明显减少.

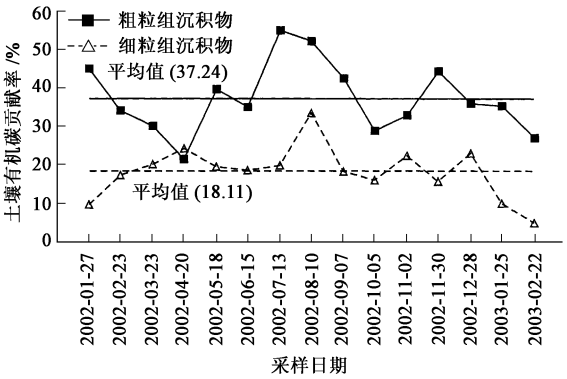



**图 5　增江悬移质 POC 中土壤来源贡献量的变化特征**

Fig. 5　The seasonal variation of the contribution from soil organic carbon of POC in total suspended sediment

较高份额的水体自源有机碳成份与山区河流较大的水流速度之间存在矛盾,因为自源有机碳的产量只能来自流速较为和缓的水域. 事实上,增江流域中上游天堂山(大型)水库和其他较多的中小型蓄水工程(图 1)为水体自源成分的增加提供了充足水域. 这些蓄水工程拦截了上游来沙,降低了水体中土壤有机碳的份额;另一方面,通过提高水体的光透深度,也提高了水体自源有机碳的产量. 研究表明,在广东省境内的主要水库中发现有 142 种藻类,其种以绿藻和硅藻为主,并且增江所在的东江流域藻类丰度较高[19]. 干流上的一些大坝壅高了河流水面(如正果电站,图 1),降低了水流速度,也有利于水体藻类的生长.

应当指出,上述计算结果是相当概略的. 因为河流颗粒有机碳的物源比较复杂,并且水生藻类的 C/N 也存在一个变化范围(4～10 之间). 然而,流域间的对比分析表明,上述估算结果仍具有较大的合理性,如 Meybeck 等的研究发现,Loire 河中颗粒有机碳有 60 %来自自源有机碳[20],就可以和本项研究进行对比. 用上述计算方法对西江径流悬移质中土壤有机碳贡献率的估算结果显示,汛期(1997-07)为 85.95 %、平水位(1997-10)为 69.26 %,低水位(1998-01)为 41.45 %[21]. 珠江口近百年来沉积物中陆源有机碳的份额也仅是略大于水生有机碳的份额,并且年代越接近现代陆源有机碳的份额越高,这与流域内逐渐加强的土壤侵蚀过程有关[22]. 增江流域为珠江流域的一部分,目前流域范围内的水土流失现象轻微,尤其是近 20 多年来的水土保持工作成效显著. 在本项研究采样期间,河流悬移质浓度的平均值仅为 12.53 mg·L$^{-1}$(有记录以来,年输沙量最大的 1968 年,悬移质平均浓度为 76.56 mg·L$^{-1}$),与珠江流域的其它支流对比,增江是一条相当清澈的河流.

综上所述,对增江径流悬移质中有机碳物源的估算是比较合理的.

### 3.3　流域颗粒有机碳的输出通量

根据麒麟咀站 1954～2002 年的水文记录,求得该站逐月平均流量过程线(图 6 所示曲线). 为减少偶然误差,将 15 组增江水体的有机碳含量(粗、细粒组区别对待)数据进行 3 次滑动平均,舍弃首尾两项,得到 13 组水体的有机碳含量数据(图 6 中的两组柱状数据),分别代表每次采样前后 2 周时段内增江水体颗粒有机碳的平均含量($\rho$, g·m$^{-3}$). 在逐月平均流量过程线上读出对应采样日期的流量($Q$, m$^3$·s$^{-1}$),用下式计算出增江流域颗粒有机碳的年输出

总量($M$, $10^6$ g):

$$M = \lambda \cdot \sum_{i}^{13} \rho_i \cdot Q_i \quad (2)$$

式中,$\lambda$ 为一个与时间长度(取决于采样频次)有关的常数,对于本次研究 $\lambda$ = 2.4258. 流域单位面积的 POC 输出量为输出通量,计算结果见表 1.

表 1 增江流域颗粒有机碳年输出总量及输出通量

Table 1 The total output and transported flux of the particulate organic carbon

| 样品 | 输出量/$10^6$ g | | |
|---|---|---|---|
| | 总量 | 源于土壤侵蚀 | 源于河流藻类 |
| 粗粒 POC | 1081.28 | 402.67 | 678.61 |
| 细粒 POC | 1301.11 | 235.63 | 1065.48 |
| 总 POC | 2382.39 | 638.30 | 1744.09 |
| 样品 | 输出通量/$10^6$ g·km$^{-2}$·a$^{-1}$ | | |
| | 总量 | 源于土壤侵蚀 | 源于河流藻类 |
| 总 POC | 0.83 | 0.22 | 0.61 |

在全球范围内,河流颗粒有机碳的输出量直接取决于河流悬移质的输出量,而后者又与流域地貌特征、河网密度和降水量等因素密切相关[9]. 而对于某一特定流域河流颗粒有机碳的输出量而言,只随降水量的变化而变化. 华南地区河流的径流量主要取决于降水量. 由图 6 可以看出,增江流域各个时段输出的粗和细粒组的 POC 总量与该时段的径流量呈显著正相关关系:

$$M_{细} = 1.072Q - 23.561 \quad (R^2 = 0.953,\ P < 0.01,\ n = 13) \quad (3)$$

$$M_{粗} = 1.0582Q - 38.883 \quad (R^2 = 0.87,\ P < 0.01,\ n = 13) \quad (4)$$

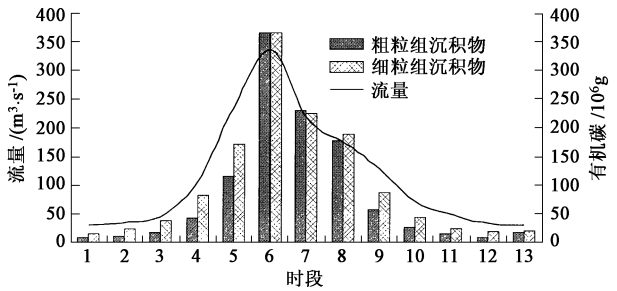



图 6 各时段增江流域河流颗粒有机碳的输出量

Fig. 6 The output ( $\times 10^6$ g(C)) of the particulate organic carbon during different sampling periods

## 4 结论

增江悬移质中主要生源元素含量随悬移质浓度的变化而呈反相关关系,这种响应过程随悬移质粒径的减小而愈加敏感. C/N 和 H/C 表明,增江河流悬移质中的有机碳主要来源于水体藻类的生物量,并且在细粒组中这种现象更加明显. 根据估算,增江河流悬移质粗粒组中的有机碳平均有 37.24 %来自土壤侵蚀;细粒组中的有机碳来自土壤成分的平均值为 11.11 %. 在洪峰过境时河流搬运的悬移质中土壤来源的有机碳份额增加;而枯水期,藻类来源的份额增加. 增江流域颗粒有机碳的输出通量为 0.83 $\times 10^6$ g·km$^{-2}$·a$^{-1}$,其中来自土壤侵蚀过程的颗粒有机碳输出通量为 0.22 $\times 10^6$ g·km$^{-2}$·a$^{-1}$,其余都来自水生藻类的贡献.

**参考文献**:

[1] Degens E T, Kempe S, Richey J E. Biogeochemistry of Major World Rivers[M]. Chichester: Wiley & Sons, 1991: 323—397

[2] Siegenthaler U, Sarmiento J L. Atmospheric carbon dioxide and the ocean[J]. Nature, 1993, 365: 119—125

[3] Sarmiento J L, Sundquist E T. Revised budget for the oceanic uptake of anthropogenic carbon dioxide[J]. Nature, 1992, 356: 589—593

[4] Detwiler RP, Hall C A S. Tropical forests and the global carbon cycle[J]. Science, 1988, 239: 42—47

[5] Ludwig W, Amiotte—Suchet P, Munhoven G, *et al*. Atmospheric CO2 consumption by continental erosion: present-days controls and implications for the last glacial maximum[J]. Global and Planetary Change, 1998, 16/17(1—4): 107—120

[6] Kao S, Liu K. Particulate organic carbon export from a subtropical mountainous river (Lanyang Hsi) in Taiwan[J]. Limnol Oceanogr, 1996, 41(8): 1749—1757

[7] Richey J E, Hedges J I, Devol A H, *et al*. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River[J]. Limnol Oceanogr, 1990, 35(2): 352—371

[8] Meybeck M. Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers[J]. Am J Sci, 1982, 282(4): 401—450

[9] Ludwig W, Probst J L, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(1): 23—41

[10] Raymond P A, Bauer J E. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean[J]. Nature, 2001, 409: 497—500

[11] **珠江志编纂委员会. 珠江志(第一卷)**[M]. **广州**: **广东科技出版社**, 1991: 1—150

[12] Zhang S, Gan W B, Ittekkot V. Organic matter in large turbid rivers: Huanghe and its estuary[J]. Marine Chemistry, 1992, 38(1-2): 53—68

[13] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States[J]. Hydrological Processes, 2001, 15(7): 1301—1346

[14] Delwiche C C, Likens G E. Biological response to fossil fuel combustion products[A]//Stumm W. Global Chemical Cycles and Their Alterations by Man[C]. Berlin: Dahlem Konferenzen, 1977: 73—88

[15] Gupta L P, Subramanian V, Ittekkot V. Biogeochemistry of particulate organic matter transported by the Godavari River, India [J]. Biogeochemistry, 1997, 38(2): 103—128

[16] Sampei Y, Matsumoto E. C/N ratios in a sediment core from Nakaumi Lagoon, southwest Japan - usefulness as an organic source indicator[J]. Geochemical Journal, 2001, 35(3): 189—205

[17] Rostad C E, Leenheer J A, Daniel S R. Organic carbon and nitrogen content associated with colloids and suspended particles from the Mississippi River and some of its tributaries[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(11): 3218—3225

[18] **邢长平. 华南亚热带森林土壤**$^{14}$C **年龄及**$^{14}$C **示踪研究**[D]. **广州**: **中国科学院广州地球化学研究所**, 1998: 1—57

[19] **胡　韧, 林秋奇, 王朝晖, 韩博平. 广东省典型水库浮游植物组成与分布特征**[J]. **生态学报**, 2002, 22(11): 1939—1944

[20] Meybeck M, Cauwet G, Dessery S, *et al*. Nutrients (organic C, P, N, Si) in the eutrophic river Loire and its estuary[J]. Estuarine Coastal Shelf Science, 1988, 27(5): 595—624

[21] Quanzhou Gao, Zhen Tao, Meiqi Xie, *et al*. Effects of hydrological processes on the chemical composition of riverine suspended sediment in the Zhujiang River, China[J]. Hydrological Processes, 2003, 17(12): 2365—2373

[22] **贾国东, 彭平安, 傅家谟. 珠江口近百年来富营养化加剧的沉积记录**[J]. **第四纪研究**, 2002, 22(2): 158—165