

北江流域有机碳侵蚀通量的初步研究

高全洲^{1,2}, 沈承德², 孙彦敏², 易惟熙² (1. 中山大学地理学系, 广州 510275, E-mail: eesgqz@zsu.edu.cn; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要:选取北江的河口站断面, 对径流进行了 5 个季节的采样分析. 结果表明, 北江径流中颗粒有机碳含量随总悬浮物含量的变化而同步变化; 溶解有机碳含量与总悬浮物含量之间有时表现微弱的正相关, 有时表现微弱的负相关. 随着水体总悬浮物含量的增加, 总悬浮物中有机碳的质量分数呈对数趋势降低. 洪峰时期径流对有机碳的搬运是全年总搬运量的主要部分, 这种现象对于溶解有机碳更为显著. 初步估算, 北江流域的有机碳侵蚀通量为 $10.01 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中以颗粒有机碳为主, 达到 $6.54 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 溶解有机碳的侵蚀通量为 $3.47 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 北江流域有机碳侵蚀通量的总量和组成特点与多数季风流域具有更大的一致性.

关键词:全球碳循环; 有机碳; 侵蚀通量; 总悬浮物; 北江流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)02-07-0012

A Preliminary Study on the Organic Carbon Weathering Fluxes in Beijiang River Drainage

Gao Quanzhou^{1,2}, Shen Chengde², Sun Yanmin², Yi Weixi² (1. Department of Geography, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China E-mail: eesgqz@zsu.edu.cn; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640)

Abstract: Riverine water samples were collected from Hekou hydrometric station of Beijiang River in five hydrological seasons. The samples were analyzed of their organic carbon and total suspended substance, which demonstrated that the concentrations of particulate organic carbon (POC) changed synchronically with the concentrations of total suspended substance (TSS) in riverine water. The correlation between the concentrations of TSS and dissolved organic carbon (DOC), however, is sometimes positive and sometimes negative, and the correlation is not so notable as that between TSS and POC. With the concentration of total suspended substances increasing, the quality partition of organic carbon in total suspended substance decreased in a logarithm tendency. The transportation of organic carbon, especially of DOC, mainly takes place in flood peak periods. The weathering flux of organic carbon in Beijiang River drainage basin is about $10.01 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, which is constituted by $6.54 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ of POC and $3.47 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ of DOC. This pattern of organic carbon weathering flux in Beijiang drainage basin is consistent with that of most of the monsoon drainage basins.

Key words: global carbon cycle; organic carbon; weathering flux; total suspended substance; Beijiang River drainage basin

外流水系连结地球上 2 大有机碳库, 陆地生态系统和海洋. 河川径流对陆地有机质的输运过程构成全球碳循环的一个重要环节^[1]. 径流输运的有机碳来源于陆地的侵蚀产物, 即机械侵蚀产生的颗粒有机碳 (Particulate Organic Carbon, POC) 和化学侵蚀产生的溶解有机碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC). 据研究, 全球每年经河流搬运入海的有机碳总量约为 $0.45 \times 10^{15} \text{ g}$, 大致相当于全球陆地生态系统净初级

生产量的 1% ~ 2%, 其中 60% 为 DOC, 40% 为 POC^[2,3]. 而我国河流每年向海洋输运的有机碳总量约为 $0.07 \times 10^{15} \text{ g}$, 占我国植被净初级生产量的 3% 左右^[4].

基金项目: 中国科学院资源与生态环境研究重点项目 (KZ952-J1-402); 国家自然科学基金 (49901002); 广东省自然科学基金 (984131) 和有机地球化学国家重点实验室开放基金共同资助项目

作者简介: 高全洲 (1965 ~), 男, 安徽太和人, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境地球化学和地貌学.

收稿日期: 2000-03-10

近年来的研究表明,季风流域独特的气候条件和水文过程决定了其在河流碳组成方面与非季风流域具有不同特点^[5~8].季风流域水热同季,侵蚀动力(径流量)与生物量增长在时间上也表现为同步,且季节之间相差悬殊.

1 研究区概况

北江流域为珠江流域的重要组成部分,地处南亚热带季风气候区,面积 46,710 km²,年径流总量 51 × 10⁹ m³,流域面积和径流总量分别占珠江水系的 10.3 % 和 15.2 %^[9].季风气候导致的高温多雨和湿热同季的环境特征使北江流域成为北半球中低纬度带少有的生物量高产地区之一,生物地球化学过程非常强烈.另一方面,境内多山地丘陵,地形起伏大,加之人口密度大和长期的耕作农业历史,使得流域内表土的机械剥蚀作用也较为强烈.

初步研究表明,北江径流中 POC 含量在不同季节均高于 DOC 含量;汛期水体的 DOC、POC 含量均大于非汛期;总悬浮物(Total Suspended Substance, TSS)中有机碳的质量分数随 TSS 含量的增加而降低^[10]. 本文将对进一步的研究结果作出分析,对北江流域的有机碳侵蚀通量作出初步估算,并与相关流域的研究结果进行对比.

2 研究方法

2.1 样品采集

选取北江的河口水文站(三水市河口镇)作为采样断面.因为河口站基本位于潮流影响的上界,同时,控制的流域面积接近最大.每个采样断面采用左、中、右 3 条垂线,每条垂线选取 3 个采样点,分别位于水面以下 0.5 m 处、1/2 水深处和河底以上 0.5 m 处(图 1).分别于 1997-07-24(水位 6.0 m,珠江基面,下同)、10-21(水位 2.0 m)和 1998-02-24(水位 0.3 m)、04-21(水位 0.45 m)、1998-07-23(水位 2.5 m,仅分析 TSS 和 DOC 含量)进行了 5 次采样.每个水样由 2 个部分组成,即用容积为 6 L 的塑料桶盛装(大样)和用容积为 120 ml 的带磨口瓶塞的棕

色玻璃瓶盛装(小样).

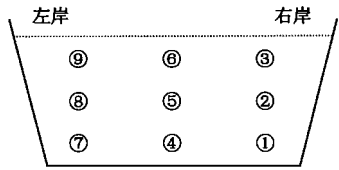


图 1 采样点的布设示意图
(数字对应表 1 中样品编号的尾数)

Fig. 1 Sketch of sampling sites

2.2 过滤与分析

采样当天用杭州新华纸业有限公司出品的双圈牌定性滤纸(中速,标准代号:Q/ XHJ301 7-1996)对小样进行过滤.过滤前,先用不少于样品体积的纯净水冲洗滤纸.实验证明,经过处理的滤纸对测定结果基本无污染影响.滤液在 2 ℃ 的条件下保存,次日进行有机碳含量测试.用孔径为 0.45 μm 的醋酸纤维微孔滤膜对大样进行低压抽滤,将获得的颗粒物在 50 ℃ 的恒温箱中烘干,用感量为 1 mg 的 TG729B 型号的电光分析天平称重,求得水体 TSS 含量,然后对颗粒物进行有机碳含量测定.

用 Tekmar 公司出产的 Phoenix8000 型 TOC 分析仪测定小样滤液的有机碳含量,测定值为样品的 DOC 和部分细 POC 含量之和,可以近似看作样品的 DOC 含量*.方法精度可以达到小数点后两位有效数字.

用“硫酸-重铬酸钾法”^[11]测定烘干颗粒物中有机碳的含量,换算出水体 POC 含量.步骤概述如下:称样品置于三角瓶内,加重铬酸钾-硫酸溶液在电热板上消化,用经标定的 FeSO₄ 溶液滴定,同时测定平行空白实验所消耗的 FeSO₄ 量,依此计算样品的有机碳含量.方法精

* 在河流化学研究中,通常用孔径为 0.45 μm 的玻璃纤维或银质微孔滤膜,将颗粒物与溶解物进行分离.我们选用普通的定性滤纸替代微孔滤膜.经过多种方法的反复测试,我们发现所用滤纸的孔径介于 0.5 ~ 1.0 μm 之间.据 J. Probst(即本文参考文献[12],[19]的作者之一)函告,河流中悬浮物在这个粒径段的含量恰好很少,故可以将本文过滤处理的小样中 TOC 的含量近似看作 DOC 含量.

度为 3 %.

DOC 和 POC 含量之和为水体的总有机碳
(Total Organic Carbon ,TOC) 含量 .

3 结果和讨论

分析结果列于表 1 .

表 1 北江径流中有机碳和总悬浮物含量/ mg· L⁻¹

Table 1 Contents of OT and TSS in Beijiang Rever Drainage

年-月-日 水位/ m	样品编号	TSS	DOC	颗粒物中有 机碳含量/ %	POC	TOC
1997-07-24 6.0	1 HK-1	323.18	5.45	1.94	6.26	11.71
	1 HK-2	913.81	4.11	1.93	17.61	21.72
	1 HK-3	1019.86	8.56	1.95	19.86	28.41
	1 HK-4	928.70	4.21	1.94	18.05	22.27
	1 HK-5	539.22	4.39	2.00	10.78	15.17
	1 HK-6	62.14	3.26	2.10	1.31	4.57
	1 HK-7	716.88	5.32	2.05	14.72	20.04
	1 HK-8	236.15	4.35	1.94	4.57	8.92
	1 HK-9	83.99	3.43	1.88	1.58	5.01
1997-10-21 2.0	2 HK-1	215.52	1.67	1.76	3.79	5.46
	2 HK-2	160.04	1.72	1.72	2.75	4.47
	2 HK-3	24.91	1.52	3.26	0.81	2.33
	2 HK-4	170.16	2.63	1.84	3.13	5.76
	2 HK-5	128.25	2.60	1.93	2.48	5.07
	2 HK-6	11.09	3.44	4.74	0.53	3.97
	2 HK-7	144.25	2.76	1.93	2.78	5.54
	2 HK-8	87.19	3.05	2.04	1.78	4.83
	2 HK-9	27.94	2.81	3.18	0.89	3.70
1998-02-24 0.3	3 HK-1	77.65	0.80	2.78	2.16	2.96
	3 HK-2	52.45	1.20	3.00	1.57	2.78
	3 HK-3	47.59	1.04	2.46	1.17	2.21
	3 HK-4	60.69	0.82	2.30	1.40	2.22
	3 HK-5	58.44	0.67	2.55	1.49	2.16
	3 HK-6	58.25	0.79	2.18	1.27	2.06
	3 HK-7	66.67	0.79	2.16	1.44	2.23
	3 HK-8	61.54	0.87	2.50	1.54	2.40
	3 HK-9	63.60	0.77	1.92	1.22	2.00
1998-04-24 0.45	4 HK-1	31.99	0.97	2.80	0.90	1.87
	4 HK-2	29.44	1.08	3.06	0.90	1.98
	4 HK-3	17.87	0.96	3.62	0.65	1.61
	4 HK-4	24.55	0.86	3.12	0.77	1.62
	4 HK-5	23.28	0.86	2.99	0.70	1.55
	4 HK-6	18.76	0.92	3.16	0.59	1.51
	4 HK-7	76.00	0.84	2.54	1.93	2.78
	4 HK-8	18.81	0.83	3.29	0.62	1.44
	4 HK-9	12.56	0.89	3.51	0.44	1.33
1998-07-23 2.5	5 HK-4	34.50	0.96			
	5 HK-5	27.46	0.94			
	5 HK-6	15.27	0.69			

3.1 水体有机碳的断面构成和季节变化

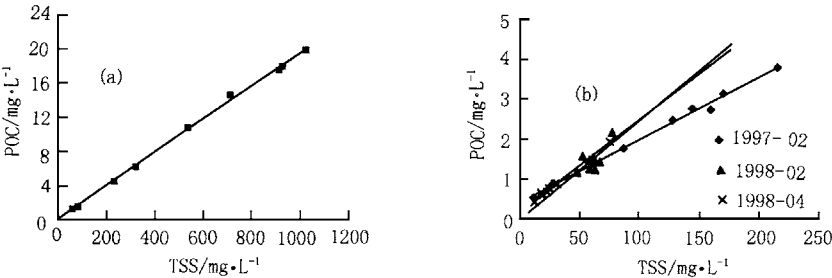
河流中的颗粒状有机质主要来源于流域土

壤侵蚀产物以及植物残体和水体微生物^[12]. POC 在断面上的分布与 TSS 的分布密切相关. 河口站断面在高水位(1997-07, 6.0 m)和中间水位(1997-10, 2.0 m)时,各采样点之间的水体 TSS 含量相差悬殊,水体呈现明显的分层现象,即“上层清澈,下层混浊”的分布模式.但在高水位期,由于 TSS 含量较大且温度较高的西江水体自右航道混入北江表层水体,使北江右航道水体呈现上层混浊底层较清澈的相反的分层现象(1HK-1、1HK-2 和 1HK-3).低水位期(1998-02, 0.3 m)和回升水位期(1998-04, 0.45 m),河口站断面水体分层现象不明显,混合较为均匀.

在同一采样时期,水体 POC 含量随 TSS

含量的变化而发生同步变化,两者之间呈显著的正相关关系(图 2),反映了河流中 POC 以土壤侵蚀来源为主.而 DOC 含量与 TSS 含量之间的关系较为复杂.随着水文季节的变化,DOC 含量与 TSS 含量之间有时表现为正相关(如 1997-07,图 3a),有时表现为负相关(随后的 3 次采样,图 3b),并且相关性较微弱.事实上, TSS 颗粒对水体溶解有机质有时表现为吸附作用^[13],而有时却表现为河床底泥和 TSS 向水体释放溶解有机质的过程^[14].显然,吸附与释放过程取决于水体和 TSS 颗粒的性质,随季节和水文过程而变化.

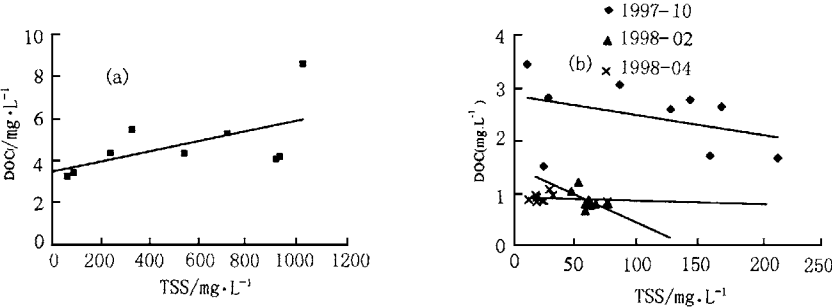
3.2 径流有机碳的季节性变化



(a) 1997-07 的样品及线性拟合曲线 (b) 后来的 3 次样品及线性拟合曲线,详见图例.为了突出显示,将(b)中 1998-02(斜率最大的)和 1998-04(斜率较大的)的 2 条拟合曲线分别向前、向后延伸了若干单位.

图 2 不同季节北江水体 POC 与 TSS 之间的关系

Fig. 2 Relationship between POC and TSS of Beijiang riverine water during different seasons



(a)、(b) 的含义和被延伸的拟合曲线同图 2 注释

图 3 不同季节北江水体 DOC 与 TSS 之间的关系

Fig. 3 Relationship between DOC and TSS of Beijiang riverine water during different seasons

将同一次采样的 9 个样品进行算术平均,得到径流有机碳的季节变化情况(表 2).由表 2 可以看出,在 5 个采样季节之间,河口站水体 TSS 含量发生了约 80 倍(1HK-3/4HK-9)的变化,相应地,水体 POC 含量也发生了约 45 倍

(1HK-3/4HK-9)的变化.汛期洪峰时水体 TSS 和 POC 的含量最大.洪峰时期,由于流域机械侵蚀强度大,径流携带大量 TSS,水体 POC 含量的平均值为 $10.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;中间水位水体 POC 含量的平均值为 $2.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;低水位时

水体 POC 含量的平均值为 $1.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;回升水位时(1998-04,0.45 m),水体 POC 含量最低,为 $0.83\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

水体 DOC 的含量与流域生态系统的化学侵蚀过程密切相关,随气温和降水量以及水文过程的变化而变化.1997 年汛期高水位,水体 DOC 含量的平均值为 $4.79\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;中间水位水体 DOC 含量的平均值为 $2.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;低水位时水体 DOC 含量的平均值为 $0.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;到回升水位时(1998-04,0.45 m),水体 DOC 含量最低,为 $0.91\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2).而到 1998-07(非洪峰过境),水体 DOC 含量的平均值为 $0.86\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,远低于 1997 年同时期(洪峰过境)的数值($4.79\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).显然,水文过程的差异亦即流域侵蚀动力的变化是造成径流 DOC

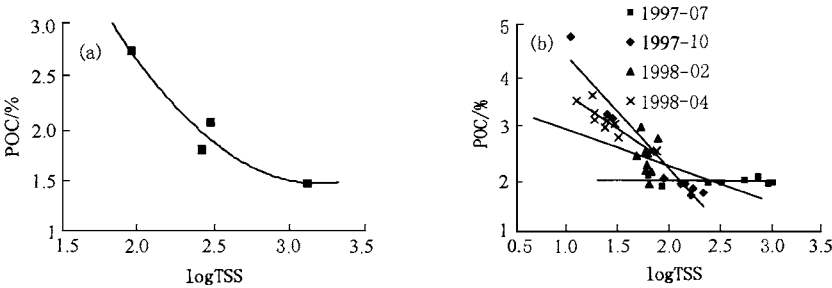
表 2 采样断面总悬浮物和有机碳含量的平均值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

年-月-日	TSS	POC	DOC	TOC	POC %
1997-07-24	535.56	10.53	4.79	15.32	1.97
1997-10-21	107.78	2.11	2.47	4.58	2.49
1998-02-24	60.76	1.47	0.86	2.33	2.43
1998-04-24	28.14	0.83	0.91	1.74	3.12
1998-07-24	25.74		0.86		

含量差异的主要原因之一.

3.3 总悬浮物中有机碳含量的季节变化

颗粒中有机碳的质量分数(POC%)是 TSS 的一个重要性质,可以根据这种性质来判断 TSS 的来源,含量相似则可能反映来源一致;含量波动范围大则说明 TSS 具有不同的来源^[5].由图 4(b)可以看出,河口站断面上不同季节 TSS 的性质存在较大差别.但前 4 个采样季节 TSS 的有机碳含量与 TSS 含量之间呈现负相关关系(图 4a),这与在其他河流研究中得出的结论相吻合^[2,3,12].关于 TSS 含量和 POC%之间的这种反向关系,可以用下述机制作解释:随着 TSS 含量的增加,河水的透光性减弱,水体中自生有机体的产量下降,由于土壤侵蚀来源的颗粒中有机碳含量较河流生物量(干颗粒)的有机碳含量低,水体 POC 被更多的土壤矿物所稀释,故 POC%随 TSS 的增加而下降.另外,关于“ $\text{POC}\%\sim\log\text{TSS}$ ”之间的负相关关系(图 4a)也可以用土壤剖面中有机碳含量的变化来解释:土壤剖面自上而下有机碳含量呈对数减少,随着侵蚀模数的增大,侵蚀影响到的土壤剖面深度加大,故随水流汇入河道中的泥沙中有机碳的相对比例也变小^[12].



(a)代表4个季节样品的算术平均值;(b)将4个季节的样品分别显示.(a)中拟合曲线的方程为 $\text{POC}\% = 0.83 \times (\log\text{TSS})^2 - 5.35 \times \log\text{TSS} + 10.01$ ($R^2 = 0.9406$);(b)中拟合曲线按斜率绝对值的大小排列,依此对应1997-10、1998-04、1998-02和1997-07的样品.

图 4 不同季节北江水体 TSS 中有机碳含量与 TSS 含量之间的关系

Fig.4 Relationship between OT(from TSS)and TSS of Beijiang riverine water during different seasons

3.4 流域有机碳侵蚀通量的组成特点

根据 1979~1988 年 10 年的水文资料,河口站在与本项研究有关的 4 次采样期,对应的

流量分别为 $5100\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (6.0 m)、 $1300\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (2.0 m)、 $185\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (0.3 m)和 $240\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (0.45 m).据此推算出 4 次采样期间北江径流

的有机碳输运通量(表 3)。

表 3 北江径流河口站断面的有机碳输运通量/ $10^3\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$

Table 3 Flow fluxes of OT from Beijiang estuary			
年-月-日	DOC	POC	TOC
1997-07-24	53.70	24.43	78.13
1997-10-21	2.74	3.21	5.95
1998-02-24	0.27	0.16	0.43
1998-04-24	0.20	0.22	0.42

由表 3 可以看出,北江流域在洪峰时期径流对有机质的搬运量占据全年的主要部分,尤其是溶解有机质更是这样.一般地说,径流所携带的各种离子与 TSS 随着水文季节的变化会发生 3 种情况的变化.一种情况是随着流量的增加水体所携带的溶解物和 TSS 浓度变大;另一种情况是随着流量的增加水体所携带的溶解物和 TSS 浓度变小;第三种情况是溶解物和 TSS 含量对水文季节变化的响应不明显而保持相对稳定的浓度.前一种情况可称之为“冲刷效应”,即流域内的泛滥河床和冲积平原在历经了枯水期较为干燥的氧化环境后积蓄了大量的可供搬运的富含有机物和可溶物的细粒物质,随着汛期的到来被径流冲刷进入河流,从而使河流中所携带的溶解物和 TSS 浓度变大.第二种情况可称之为“稀释效应”,即水体所携带的溶解物和 TSS 随着流量的增加,其浓度减小,尽管物质的输移总量不变或者加大.

对于不同流域和不同种类的水体携带物,上述各种效应的作用不同.例如,在亚马逊河流域, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 等离子对稀释效应的响应较为明显,而 SiO_2 (溶胶)、 Mg^{2+} 和 Cl^- 等对稀释效应的响应就不太强烈^[15].对于世界上的许多河流,DOC 含量对冲刷效应的响应较为明显^[16].至于 POC 含量,由于它直接随河流 TSS 含量的变化而发生同步变化,因此,在全球的大多数流域冲刷效应对 POC 含量的作用也是明显的.

由上述的分析可知(表 3),北江流域有机碳对冲刷效应响应强烈.

珠江流域夏、秋、冬、春 4 个季节径流占全

年径流总量的百分比分别为 42%~57%、18%~25%、6%~9%、16%~30%^[9].据此粗略估算出北江流域的有机碳侵蚀通量为:

溶解有机碳侵蚀通量(F_{DOC}): $3.47 \times 10^6 \text{g}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;

颗粒有机碳侵蚀通量(F_{POC}): $6.54 \times 10^6 \text{g}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;

总有机碳侵蚀通量(F_{TOC}): $10.01 \times 10^6 \text{g}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$;

$$F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}=0.53$$

这个估算结果与对珠江水系的主体西江流域的估算结果非常接近*,只是西江流域的 POC 侵蚀通量($8.30 \times 10^6 \text{g}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)大于北江流域;而西江流域的 DOC 侵蚀通量($1.88 \times 10^6 \text{g}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)小于北江流域;TOC 侵蚀通量两者相当.与全球外流河的平均状况(F_{DOC} 为 $2.04 \times 10^6 \text{g}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, F_{POC} 为 $1.65 \times 10^6 \text{g}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, F_{TOC} 为 $3.69 \times 10^6 \text{g}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $F_{\text{DOC}}/F_{\text{POC}}=1.24$)相比^[12],北江流域突出的特征在于较高的 POC 及 TOC 侵蚀通量,而 DOC 的侵蚀通量略高于全球外流域的平均状况.

北江流域有机碳侵蚀通量的组成特点与季风区河流(如长江^[17]、黄河^[5]和恒河-普拉马普特拉河^[6]等)具有更多的一致性,而非季风区河流(如亚马逊河^[18]、扎伊尔河^[19]和巴拉那河^[20]等)相差较大.

4 结论

外流水系对陆地生态系统有机质的侵蚀输运过程构成全球碳循环的一个重要环节.流域有机碳的侵蚀通量与流域自然环境的性质密切相关,季风流域独特的气候条件和水文过程决定了其在河流碳组成方面与非季风流域具有不同特点.北江径流中的有机碳含量随水文动力过程的增强而加大,对“冲刷效应”响应明显,

* 高全洲.珠江流域河流碳通量初步研究.中国科学院广州地球化学研究所博士后研究报告,1998.

在洪峰过境时期径流对有机碳的搬运量占全年的主要部分,对于 DOC 这种现象更明显.北江流域的有机碳侵蚀通量以 POC 为主,达 $6.54 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$;而 DOC 的侵蚀通量为 $3.47 \times 10^6 \text{ g} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,DOC 侵蚀通量与 POC 侵蚀通量的比值为 0.53,反映了流域内机械剥蚀强度大于化学侵蚀强度.北江流域有机碳侵蚀通量的总量和组成特点与季风流域具有更多的一致性.而与非季风流域的差别较大.

致谢:本项研究得到傅家谟院士和盛国英研究员的关心和支持.邢长平、姚东良同学和杨英、陈庆强博士等先后参加了采样工作.雷剑泉研究员、梁禹女士协助 DOC 分析;李志安博士、吕冬梅女士协助 POC 分析.张干博士给予多方面的帮助.谨致谢忱.

参考文献:

- 1 Degens E T, Kempe S, Spitey A. CO_2 : A biogeochemical portrait. In: Hutzinger C O ed. The Handbook of Environmental Chemical, Vol.1. Berlin: Springer Verlag, 1984.127 ~ 251.
- 2 Meybeck M, Jussieu P. C, N, P and S in rivers: from sources to global inputs. In: R. Wollast et al., Interactions of C, N, P, and S biogeochemical cycle and global change. Springer, 1993. 163 ~ 194.
- 3 Milliman J D, Meade R H. World wide delivery of river sediment to the oceans. J. Geol., 1983, **91**:1 ~ 21.
- 4 方精云,刘国华,徐崧龄.中国陆地生态系统的碳循环及其意义.见:温室气体浓度和排放监测及相关过程.王庚辰,温玉璞主编.北京:中国环境科学出版社,1996.129 ~ 139.
- 5 Zhang S, Gan W B, Ittekkot V. Organic matter in large turbid rivers: Huanghe and its estuary. Marine Chemistry, 1992, **38**(1/2):53 ~ 68.
- 6 Ittekkot V, Safiullah S, Mycke B et al. Seasonal variability and geochemical significance of organic matter in the River Ganges, Bangladesh. Nature, 1985, **317**:800 ~ 802.
- 7 Kao Shuh-Ji, Liu Kon-kee. Particulate organic carbon export form a subtropical mountainous river(Lanyang Hsi) in Taiwan. Limnol. Oceanogr., 1996, **41**(8):1749 ~ 1757.
- 8 Zhang J, Liu S M, Xu H et al. 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.
- 9 珠江志编纂委员会.珠江志.第一卷.广州:广东科技出版社,1991.150.
- 10 高全洲,沈承德,孙彦敏等.珠江马口站、河口站断面水体有机碳含量的季节变化.地球化学,1999, **28**(3):273 ~ 280.
- 11 李酉开.土壤有机质的测定.见:中国土壤学会农业化学委员会编.土壤农业化学常规分析方法.北京:科学出版社,1984.67 ~ 75.
- 12 Ludwig W, Probst J, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. Global Biogeochemistry Cycle, 1996, **10**(1):23 ~ 41.
- 13 王江涛,张正斌.海水中天然溶解有机物在固体颗粒上的吸附.青岛海洋大学,1998, **25**(4):687 ~ 631.
- 14 陶澍,梁涛,徐尚平等.伊春河河水溶解态有机碳含量和输出通量的时空变化.地理学报,1997, **52**(3):254 ~ 261.
- 15 Safiullah S, Mofizuddin M, Iqbal Ali S M et al. Biogeochemical cycles of carbon in the rivers of Bangladesh. In: Degens E T, Kempe S, Soliman S. Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers, Vol.2, Mitt Geol-Palaont Inst Univ Hamburg, SCOPE/ UNEP Sonderbd. 55, Universitat Hamburg, 1983.435 ~ 442.
- 16 Degens E T, Kempe S, Richey J E. Biogeochemistry of Major World Rivers. SCOPE Rep. 42. New York: John Wiley, 1991.356.
- 17 Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yangtze and Yellow Rivers (China). Marine Chemistry, 1993, **43**(3):235 ~ 246.
- 18 Richey J E, Hedge J I, Devol A H et al. Biogeochemistry of carbon in the Amazon River. Limnol Oceanogr, 1990, **32**(5):352 ~ 371.
- 19 Probst J L, Mortatti J, Tardy Y. Carbon river fluxes and weathering CO_2 consumption in Congo and Amazon river basins. Applied Geochemistry, 1994, **9**(1):1 ~ 13.
- 20 Deptris P J, Kempe S. Carbon dynamics and sources in the Parana River. Limnol. Oceanogr., 1993, **38**(2):382 ~ 395.