

广东省北江流域河流有机碳浓度历史重建

罗 艳^{1,2,3}, 刘 申^{1,3,4}, 傅声雷¹, 王春林², 周国逸^{1,*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 广东省气候中心, 广州 510080;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要:根据河流颗粒有机碳浓度(C_{POC})、溶解有机碳浓度(C_{DOC})与河流总悬浮物含量(C_{TSS})和流量(Q)的关系, 构建广东省北江流域河流有机碳浓度估算模型分别为: $C_{\text{POC}} = 0.0195 \times C_{\text{TSS}} + 0.0589$ 和 $C_{\text{DOC}} = 0.0047 \times C_{\text{TSS}} + 0.0027 \times Q + 0.9087$ 。由上述模型重建了北江流域河流有机碳浓度变化历史, 结果发现, 北江流域河流有机碳主要以颗粒有机碳形式存在; 年内分布表现为汛期高于平水期; 年际变化多样, 但总体上均表现出下降趋势; 空间分布上表现为自上游往下有机碳浓度有所下降, 但在三水站有所回升。

关键词:颗粒有机碳; 溶解有机碳; 历史重建; 北江流域

文章编号: 1000-0933(2009)07-4005-11 中图分类号: P592 文献标识码: A

Reconstruction of the historical change of organic carbon concentrations in Beijiang River Drainage, Guangdong Province

LUO Yan^{1,2,3}, LIU Shen^{1,3,4}, FU Sheng-Lei¹, WANG Chun-Lin², ZHOU Guo-Yi^{1,*}

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080, China

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

4 Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 4005 ~ 4015.

Abstract: Based on correlations between current organic carbon concentrations, sediment concentrations (C_{TSS}) and runoff depth (Q), the estimating models for particulate organic carbon concentrations (C_{POC}) and dissolved organic carbon concentrations (C_{DOC}) in Beijiang River Drainage, Guangdong Province were reconstructed as $C_{\text{POC}} = 0.0195 \times C_{\text{TSS}} + 0.0589$ and $C_{\text{DOC}} = 0.0047 \times C_{\text{TSS}} + 0.0027 \times Q + 0.9087$, respectively. The results of organic carbon reconstruction indicated that the major form of organic carbon in Beijiang River Drainage was POC. For intra-annual distribution, the concentrations of DOC and POC in all hydrological stations investigated were the highest in flood period. Downward trends were detected in general for inter-annual dynamics. For spatial distribution, the concentrations of DOC and POC decreased from upper reaches to lower reaches except for Sanshui where the concentrations of DOC and POC started to increase.

Key Words: particulate organic carbon; dissolved organic carbon; historical reconstruction; Beijiang River Drainage

河流中的有机碳对陆地生态系统的变化具有重要的指示作用。河流有机碳主要来自对土壤有机质侵蚀, 与陆地生态系统的变化关系非常密切; 毁林开荒、大规模的机械耕作加大了土壤的侵蚀速率, 导致大量土壤有机质被淋溶、冲刷进入河流和湖泊, 并最终汇入海洋; 工业排废、富营养化和酸雨等现代环境问题所造成的影

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (30725006); 国家自然科学基金重点项目 (40730102)

收稿日期: 2008-04-21; **修订日期:** 2009-02-12

致谢: 感谢广东省水文局提供的流量、含沙量和总悬浮物资料。

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gyzhou@scib.ac.cn

响也在很大程度上增加了河流碳通量^[1,2]。因此,可以根据河流中的有机碳变化推断陆地生态系统的变化。河流碳循环研究可能是解决“碳失汇”问题的一个突破口。有研究证实,一系列潜在汇,包括由农用地土壤进入河流并最终沉积在浅海的沉积物中的有机碳,占了“碳失汇”的很大比例^[3,4]。每年来自河流的 $3.4 \times 10^{15} \sim 4.7 \times 10^{15} \text{ g}$ 碳可能结合到深海沉积物中^[5],河流中碳储量最多可达 $0.9 \times 10^{15} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[6]。总之开展河流有机碳历史动态变化的研究,是全球碳循环研究的关键一环,对人类活动造成的环境变化具有重要的指示意义。

我国关于河流有机碳的研究始于 20 世纪 80 年代,主要在集中于长江、黄河和珠江等^[7-20]。但上述研究观测年限短(多数为 1~2a),均不能反映河流中有机碳的长期动态变化。另一方面,20 世纪 50 年代中期我国水文系统就开始监测以水化学为主的江河水体质量,积累了长期的水化学相关资料。由于河流中的有机碳会对河流的生物和化学过程造成重要影响^[21],因此通过历史监测的水化学相关资料,有可能重新构建河流的有机碳浓度时间序列。本研究通过分析影响有机碳浓度的影响因子,建立了广东省北江流域河流有机碳浓度估算模型,重建并分析了该流域有机碳浓度的时空动态。

1 研究地概况

北江是珠江流域第二大水系,流域面积 46710 km^2 ,位于东经 $111^\circ 45' \sim 114^\circ 50'$ 、北纬 $23^\circ 10' \sim 25^\circ 42'$ 之间,其中 91.8% (42900 km^2) 在广东省境内,其余属江西、湖南两省。干流河长 468 km (从源头至三水河口),总落差 305 m,河道平均比降为 0.254%^[22] (图 1)。

北江流域地处亚热带季风气候区,多年平均气温在 $18.8 \sim 21.6^\circ \text{C}$ 之间;多年平均降雨量为 1787.5 mm;年度降雨集中于汛期(4~9 月份),其降雨量约占全年降雨量的 80%;多年平均径流量为 510 亿 m^3 ,人均占有水量 7108 m^3 ,为全国人均占有量的 2 倍多;北江属少沙河流,年平均径流含沙量 $0.139 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[23-25]。

2 采样及测定方法

(1) 采样 每个水样由两部分组成,分别用容积为 6000 ml 的大塑料桶(大样)和容积为 120 ml 的棕色磨口玻璃瓶(小样)盛装,采样频率为每季度 1 次(注:高全洲等^[15]和魏秀国^[16]的采样是按照水深进行分层采样,而本人的采样则结合实际情况及历史资料两方面考虑,只采了表层下 0.5 m 处水样)。

(2) 预处理 小样为采样当天用定性滤纸过滤,然后冷藏待测(用于分析 DOC)。

大样为用孔径为 $0.45 \mu\text{m}$ 的醋酸纤维微孔滤膜进行过滤。具体操作如下:将口径略大于滤膜的布氏漏斗固定在与真空抽滤器相连的大型三角瓶上,将微孔滤膜置于布氏漏斗中,对大样进行抽滤。抽滤完毕,用不锈钢小铲将称沉淀在滤膜上的颗粒物轻轻刮下,放在蒸发皿中,用蒸馏水将微孔滤膜冲洗干净(注:应使冲洗液流入蒸发皿)。将蒸发皿放置在不超过 50°C 的烘箱内烘干,称重(用于分析 POC)。

(3) 样品指标测定 DOC 浓度依照高全洲等^[15]和魏秀国^[16]使用 Tekmar 公司生产的 Phoenix8000 型 TOC 分析仪测定;本人使用岛津公司生产的 TOC-V 分析仪测定。

POC 浓度依照高全洲等^[15]使用硫酸-重铬酸钾法测定;魏秀国^[16]采用高温燃烧法测定;本人使用岛津公司生产的 TOC-V 分析仪测定。

3 有机碳浓度重建依据

河流有机碳包括溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)和颗粒有机碳(particulate organic carbon, POC)。DOC 和 POC 可划分为外源和自生两大类。其中,外源的 DOC 主要来自于土壤有机质的降解产物和人类生产、生活的排废物;自生的 DOC 源于河流浮游植物;外源的 POC 来源于土壤侵蚀、陆生植物的种子、叶和茎等,以及人类生产生活的排废物;自生 POC 来自浮游生物和河床底泥的释放物^[2,14]。河流 DOC 浓度与流域生态系统的化学侵蚀过程密切相关,随气温、降水量以及水文过程的变化而变化^[15]。河流 POC 浓度则主要受河流中的颗粒物及其有机碳含量影响。

河流总悬浮物(total suspended solids, TSS)是水质常规观测指标,北江流域各水质监测站点对其都有相当长时间的监测。从来源和性质看,TSS 与 DOC 以及 POC 都具有密切的关系。因此,可根据 TSS 浓度资料,重建 POC 和 DOC 浓度时间序列。河流含沙量是水体颗粒物含量的表征参数,可以看作是 TSS 的不同表

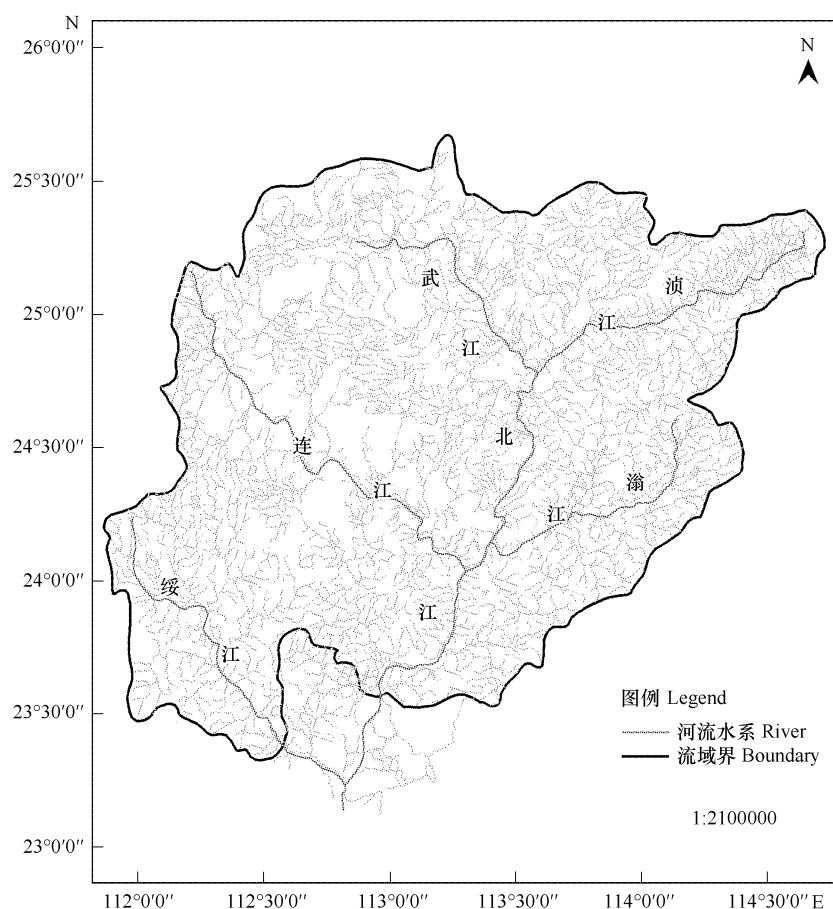


图1 北江流域水系图

Fig. 1 Water system of Beijiang River Drainage

述。因为:(1)从概念上看,水质中的悬浮物是指水样通过孔径为 $0.45\mu\text{m}$ 的滤膜,截留在滤膜上并于 $103 \sim 105^\circ\text{C}$ 烘干至恒重的固体物质;含沙量则是指每立方米水中所含泥沙的重量。(2)从测定方法看,含沙量和悬浮物都经过过滤、烘干、称重等步骤,所不同的是,过滤悬浮物样品是采用 $0.45\mu\text{m}$ 的滤膜,而过滤含沙量样品采用普通滤纸(孔径介于 $0.5 \sim 1\mu\text{m}$ 之间)。据 J. Probst 研究发现,河流中悬浮物在这个粒径段含量很少^[15],这意味着悬浮物和含沙量由于过滤方法产生的差异会很小。为分析由于测定方法上的差异造成的 TSS 和含沙量的差异,本研究分析了石角站(1989 ~ 2004 年) TSS 和含沙量之间关系。

从图2可以看出,总体上,TSS 和含沙量数值非常接近。进行成对 t 检验发现,石角站的 TSS 和含沙量之间无显著差异($p > 0.05$)。因此,可以接受采用含沙量资料代替 TSS 资料进行有机碳浓度重建。此外在监测年限、频度等方面含沙量资料都优于 TSS。基于上述理由,本研究利用含沙量资料代替 TSS 浓度参数,结合流量资料重建北江流域有机碳浓度时间序列。下面分别介绍 POC 浓度和 DOC 浓度重建方法和依据。

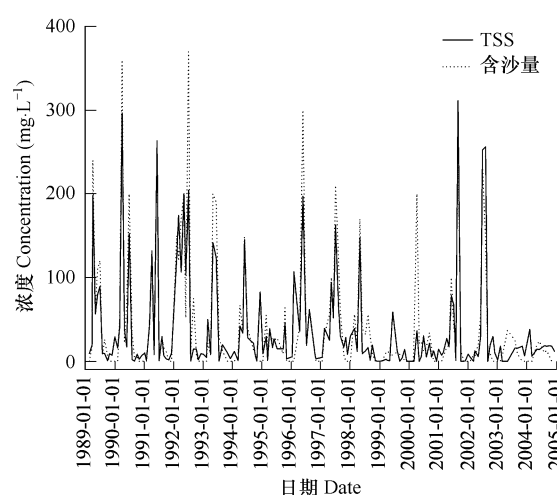


图2 TSS 和含沙量对比

Fig. 2 Comparison of TSS concentrations and sediment concentrations

3.1 POC 浓度时间序列重建

河流中的 POC 浓度是由河流中 TSS 的浓度以及 TSS 中有机碳的质量分数(POC%)所决定。即:

$$C_{\text{POC}} = C_{\text{TSS}} \times \text{POC}\% \quad (1)$$

式中, C_{POC} 为 POC 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), C_{TSS} 为 TSS 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

一般而言, C_{TSS} 越高, POC 浓度越高,但随着土壤侵蚀模数增加, C_{TSS} 增加,有机颗粒物被更多地矿物质所稀释(即 POC% 减少),POC 浓度会有所下降;随着 C_{TSS} 增加,外源有机颗粒物有所增加,但由于河水透光性减弱,自生有机颗粒物产量下降^[17]。季节对 POC 浓度也会产生影响,汛期水体生产力高,河流的 TSS 中,自源成分所占比例较平水期高^[17]。由于北江河流中的 POC 以土壤侵蚀为主要来源,自生 POC 所占比例很小,POC 浓度和 TSS 浓度之间呈显著的线性正相关关系(R 在 0.9 以上)^[15]。全球河流悬移质中 POC% 含量平均约为 6%,变化范围在 0.3% ~ 10% 之间^[26]。随着水文状况和季节不同,POC% 也会有所改变。如北江三水站的 POC% 含量在 0.3% ~ 5% 之间变化^[15]。对 C_{TSS} 和 POC% 两个因子做了主成份分析发现, C_{TSS} 的贡献率更高,达到 55%。考虑到数据的可获取性,并借鉴前人的研究成果,本研究利用 C_{TSS} 和 C_{POC} 的线性显著相关关系,建立了 POC 浓度估算模型。

3.1.1 模型建立

由于三水站有 3 个水文年 72 次采样的实测纪录^[15,16],因此,根据三水站 TSS 和 POC 的相关性(图 3),建立线性回归模型如下:

$$\begin{aligned} C_{\text{POC}} &= 0.0195 \times C_{\text{TSS}} + 0.0589 \\ r &= 0.998, n = 72, p < 0.01 \end{aligned} \quad (2)$$

3.1.2 模型检验

北江流域其他水文站由于测定数据偏少,不适合直接用于建模。为了验证该模型能否直接应用于三水站之外的站点以及是否适用于不同水文状况下的 POC 观测,本研究将其应用于西江高要站($112^{\circ}28'E, 23^{\circ}03'$)的观测结果^[27],并分别分析了洪水前、中、后期实测 POC 浓度与根据模型拟合所得的 POC 浓度的关系,结果如图 4 所示。

从图 4 和表 1 可以看出,在非汛期,二者拟合程度非常好;在洪水期间(flood-1 至 flood-6),拟合 POC 浓度较实测值高;在洪水期末期(flood-6),二者的数值又趋于接近;而在洪水过后,二者又出现较大差异。这可能是因为在洪水期间地表径流加强,地表侵蚀加剧,大量的土壤矿物进入河流体系,导致 TSS 的 POC% 较非汛期低;洪水过后,进入秋季,陆地植被生产力低,由土壤侵蚀所产生的 TSS 中 POC% 未获得有效补充而始终处于较低水平,使得河流 POC 也处于较低水平。总体上,拟合值与实测值相关性较好,基本能反映 POC 浓度的平均变化情况。但是对于像洪水等极端天气条件下 POC 浓度存在估计偏高的问题,这可能是由于模型未能考虑到不同季节和水文条件下由土壤侵蚀产生的 TSS 中 POC% 变化所造成,有待进一步的研究工作加以改进。

基于上述模型,考虑到含沙量和 TSS 从性质和来源的一致性,本研究利用含沙量历史资料,重建了北江流域小古篆、长坝、犁市、高道、石角、三水共 6 个站的 POC 浓度时间序列,结果将在下一部分详细介绍。

3.2 DOC 浓度时间序列重建

DOC 浓度受气候、流域水文以及水质状况等影响。气候对河流 DOC 浓度具有显著影响^[28]。Thurman 估算了不同气候带河流 DOC 平均浓度以及浓度范围($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$),其结果是:北极和高山环境:2(1-5);泰加林:10(8-25);寒温带:3(2-8);暖温带:7(3-15);干旱地区:3(2-10);湿热带:6(2-15);流入沼泽和湿地的河流:25(5-60)^[29]。降水和径流量也是影响 DOC 浓度变化的重要因素^[26,30]。降水形成的地表漫流和侧向淋溶将流域土壤表层的水溶性有机碳携入河道,增加了河流中 DOC 的输入量,但同时也在某种程度上稀释了河水 DOC

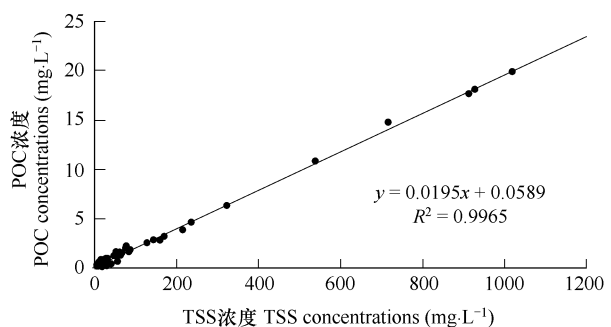


图3 三水站 TSS 浓度与 POC 浓度关系

Fig. 3 Relations between TSS concentrations and POC concentrations in Sanshui

含量^[30]。在多数情况下,特别是在流域土壤有机质含量较高的地区以及发生间歇性降水的情况下,前者的影响程度明显强于后者,导致 DOC 含量与流量呈正相关的一般关系;在两次降水之间,地下水(有机碳含量低)补给比例相应升高,DOC 含量随之下降,与此同时,土壤表层特别是常河流年浸水的湿地沼泽中水溶性有机碳大量积累,并在下次降水过程中被携入河道,形成与流量大体同步的含量峰^[30]。在洪水早期,随着大量径流造成的稀释效应,DOC 浓度迅速下降;中期由于土壤地下径流的补充,DOC 浓度出现升高,并出现峰值;峰值过后,由于土壤中可溶性有机质的匮乏,洪水流量的消减也未能改变 DOC 浓度锐降趋势^[27]。可见,降水量、降水频度和降水强度也是影响河流 DOC 浓度的一个重要因素。DOC 浓度与 TSS 之间也存在相关性,但是关系比较复杂,有时表现负相关,有时表现正相关。这可能是因为不同季节与水文条件下,TSS 对水体溶解性有机质有时表现出吸附作用,有时又表现为由 TSS 和底泥向水体释放溶解性有机质^[15,30,31]。综上所述,根据 DOC 浓度与流量变化,结合流量资料以及季节动态变化,通过回归分析,可以建立 DOC 浓度与 TSS 浓度以及流量的关系模型,从而重建 DOC 浓度的时间序列。

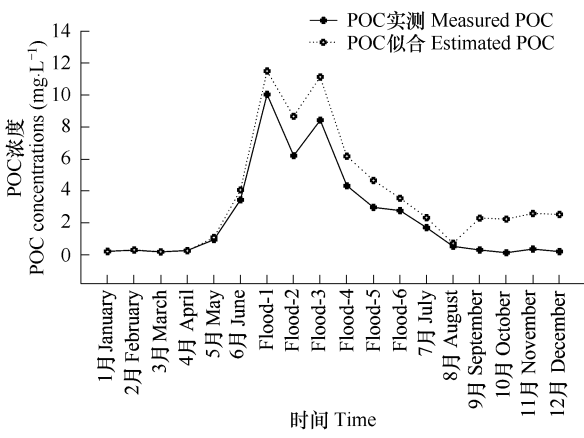


图4 2005年西江高要站 POC 浓度变化和模型拟合 POC 浓度变化对比

Fig. 4 Comparison of measured POC concentrations and estimated POC concentrations in Gaoyao, Xijiang River in 2005

flood-1、flood-2、flood-3、flood-4、flood-5 和 flood-6 指西江高要站 2005 年 6 月一场洪水由开始到结束的过程 flood-1、flood-2、flood-3、flood-4、flood-5 and flood-6 are shown the flood process in Gaoyao, Xijiang River during June, 2005; 下同 the same below

表 1 2005 年西江高要站 POC 浓度变化和模型拟合 POC 浓度误差分析

Table 1 Error analysis of measured POC concentrations and estimated POC concentrations in Gaoyao, Xijiang River in 2005				
时间 Time	POC 实测浓度 Measured POC concentrations (mg·L ⁻¹) (1)	POC 拟合 Estimated POC concentrations (mg·L ⁻¹) (2)	绝对误差 Absolute error (2) - (1)	相对误差 (%) Relative error [(2) - (1)] / (1) × 100
1 月 Jan.	0.22	0.20	-0.02	-8.70
2 月 Feb.	0.29	0.31	0.02	5.64
3 月 Mar.	0.18	0.19	0.01	5.52
4 月 Apr.	0.27	0.24	-0.03	-9.57
5 月 May	0.95	1.08	0.13	13.66
6 月 Jun.	3.44	4.06	0.62	18.13
flood-1	10.04	11.50	1.46	14.59
flood-2	6.21	8.66	2.46	39.57
flood-3	8.43	11.13	2.70	32.07
flood-4	4.32	6.17	1.85	42.71
flood-5	2.97	4.66	1.69	56.80
flood-6	2.77	3.54	0.77	27.96
7 月 Jul.	1.70	2.33	0.63	37.06
8 月 Aug.	0.53	0.72	0.19	35.62
9 月 Sep.	0.30	2.29	2.00	670.06
10 月 Oct.	0.13	2.23	2.10	1603.35
11 月 Nov.	0.36	2.59	2.23	616.59
12 月 Dec.	0.20	2.53	2.33	1175.68
年平均 Annual mean	5.31	6.98	1.67	31.56

3.2.1 模型建立

根据三水实测的 DOC 浓度以及同期的流量和 TSS 数据^[15,16],采用最小二乘法进行回归分析,建立模型

如下:

$$C_{\text{DOC}} = 0.0047 \times C_{\text{TSS}} + 0.0027 \times Q + 0.9087 \quad n=8, r=0.9611, p<0.05 \quad (2)$$

式中, C_{DOC} 为 DOC 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); C_{TSS} 为 TSS 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Q 为月径流深 (mm)。

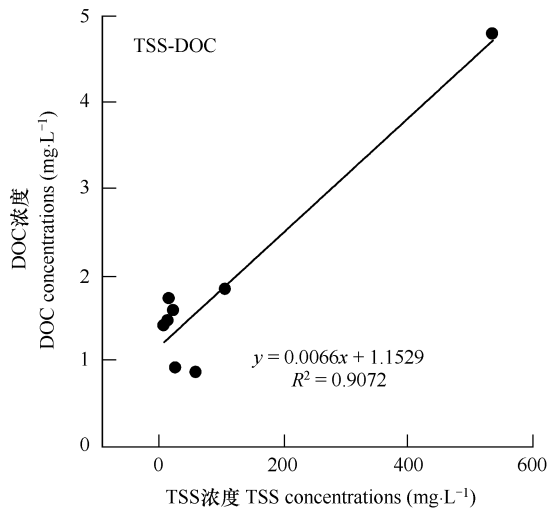


图5 三水站 DOC 浓度与 TSS 浓度关系

Fig. 5 Relations between concentrations of DOC and TSS

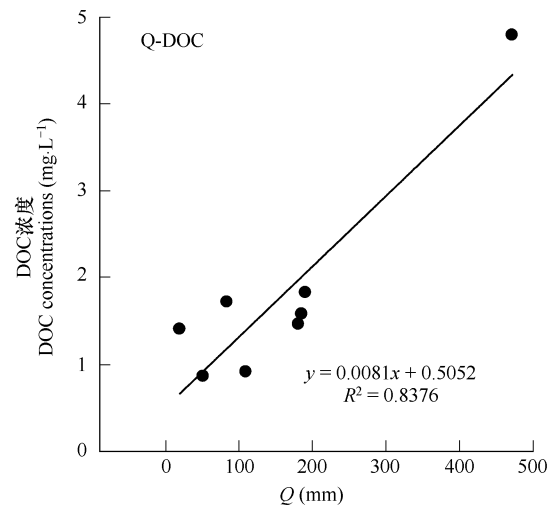


图6 三水站 DOC 浓度与径流深关系

Fig. 6 Relations between DOC concentrations and runoff depth

3.2.2 模型检验

为验证该模型在其他水文站的适应性,将该模型运用到高要站的观测结果^[27]中进行对比分析(图7)。

洪水前拟合值较实测值低;洪水期(flood-1至flood-6,图7),拟合值的波峰出现时间与实测值基本一致,数值上则较实测值大;洪水后,二者的数值比较接近。从图上看模拟的结果不是很理想。但根据误差分析(表2)和成对 t 检验($p>0.05$)看,二者差异并不显著。而且二者的变化规律基本相似,尤其是年平均值非常接近。造成这种差异的可能原因如下:(1)对 TSS 和 DOC 的关系处理简单化;(2)对流量与 DOC 关系处理简单化,同样的流量出现在洪水前和洪水后,其 DOC 浓度是不会一样的,因此同期的降水量、降水频度和降水强度也是必须考虑到因子,但由于相关资料缺乏有待下一步工作进行补充。考虑到数据条件以及本研究主要针对的是年平均值变化进行分析,因此可以接受该模型进行下一步的研究。

4 有机碳浓度时间序列重建结果

分别根据公式(1)和公式(2),结合北江流域的含沙量和流量数据,计算了北江流域6个水文站的 POC 浓度和 DOC 浓度时间序列。结果表明:POC 浓度变动范围主要在 $1 \sim 10 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,DOC 浓度多在 $1 \sim 4 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,与全球 POC 及 DOC 的浓度范围^[4,32,33] 大致相仿。下面将详细介绍 POC 浓度和 DOC 浓度的年内和年际动态和空间分布。

4.1 年内动态

由于各水文站时间长度序列不一致,为比较各水文站 POC 浓度和 DOC 浓度年内动态差异,采用 1971 ~

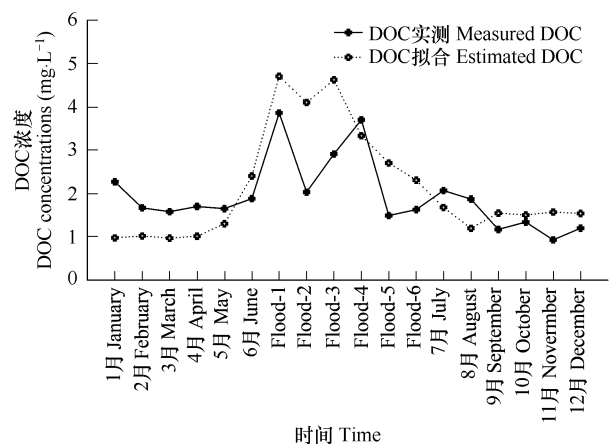


图7 西江高要站洪水前后 DOC 浓度变化和模型拟合 DOC 浓度变化对比

Fig. 7 Comparison of measured DOC concentrations and estimated DOC concentrations in Gaoyao, Xijiang River during flood process

2000 年的平均值进行比较,结果如图 7 所示。

表 2 2005 年西江高要站 DOC 浓度变化和模型拟合 DOC 浓度误差分析

Table 2 Error analysis of measured DOC concentrations and estimated DOC concentrations in Gaoyao, Xijiang River in 2005

时间 Time	DOC 实测浓度 Measured DOC concentrations ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (1)	DOC 拟合 Estimated DOC concentrations ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) (2)	绝对误差 Absolute error (2) - (1)	相对误差 (%) Relative error [(2) - (1)]/(1) $\times 100$
1 月 Jan.	2.27	0.98	-1.29	-57.00
2 月 Feb.	1.67	1.02	-0.65	-38.95
3 月 Mar.	1.58	0.97	-0.61	-38.54
4 月 Apr.	1.70	1.01	-0.69	-40.38
5 月 May	1.65	1.30	-0.35	-21.14
6 月 Jun.	1.88	2.40	0.52	27.81
flood-1	3.86	4.71	0.85	21.94
flood-2	2.03	4.10	2.07	101.96
flood-3	2.91	4.63	1.71	58.82
flood-4	3.70	3.33	-0.37	-9.96
flood-5	1.49	2.71	1.22	81.55
flood-6	1.63	2.31	0.68	41.71
7 月 Jul.	2.07	1.68	-0.39	-19.01
8 月 Aug.	1.87	1.20	-0.67	-35.93
9 月 Sep.	1.17	1.55	0.38	32.28
10 月 Oct.	1.34	1.50	0.16	12.18
11 月 Nov.	0.93	1.57	0.64	68.83
12 月 Dec.	1.20	1.54	0.34	28.30
年平均 Annual mean	2.53	3.38	0.85	33.81

从图 8 可以看出,各水文站 POC 浓度和 DOC 浓度均表现为汛期(4~9 月份)明显高于非汛期。但是多数水文站 POC 浓度具有双峰现象;而 DOC 浓度仅上游的小古莱、长坝和犁市站表现出明显的双峰现象,中下游

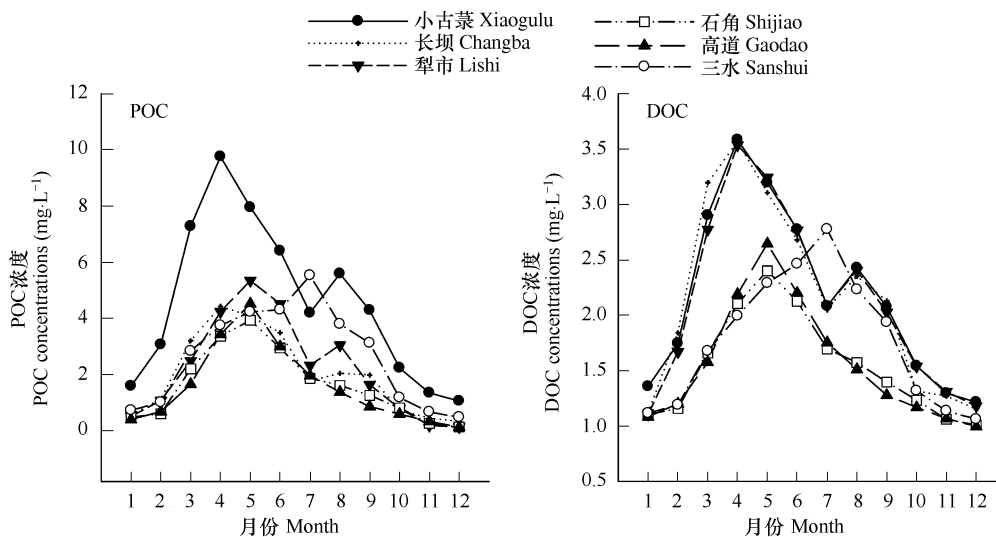


图 8 北江流域 6 个水文站 POC 浓度和 DOC 浓度年内动态对比

Fig. 8 Annual dynamics of POC concentrations and DOC concentrations in 6 hydrological stations of Beijiang River Drainage

高道站使用的是 1971~1998 年流量和含沙量的平均值进行估算 Annual dynamics of DOC concentrations and DOC concentrations in Gaodao were coming from the average values of runoff depth and sediment concentrations during year 1971~1998

的石角、高道、三水 3 站则只出现单峰。

4.2 年际动态

从逐年平均值看,近几十年来,POC 浓度的波动很大,其中小古篆、长坝、石角、三水 4 站在 1985 年以后均出现明显的下降;犁市和高道 2 站相对波动较大;总体上,POC 浓度呈下降趋势(图 9)。这可能与广东省在 1986 年和 1987 年开始北江上游和绥江水土流失大力整治后,水土流失状况显著改善有关^[22]。DOC 浓度表现出与 POC 浓度类似的年际波动,但数量上有差异(图 10)。

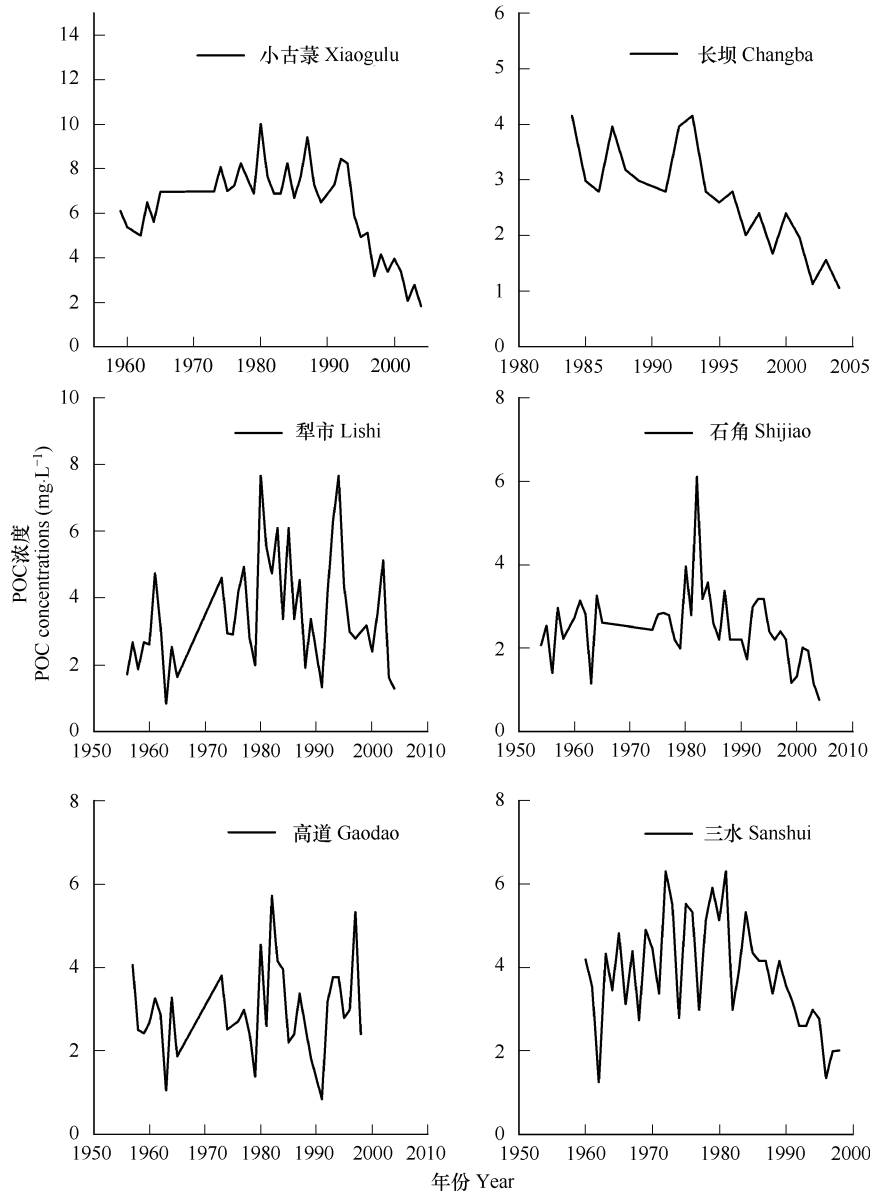


图 9 北江流域 6 个水文站 POC 浓度年际动态

Fig. 9 Inter-annual dynamics of POC concentrations in 6 hydrological stations of Beijiang River Drainage

4.3 空间分布

从空间分布看,POC 浓度从上游到下游呈逐步减小趋势(图 11)。这可能是由于北江流域水土流失区主要集中在粤北山区(如南雄、始兴等),河流含沙量高,使得 POC 浓度比较高;而下游流量大,含沙量相对较小,POC 浓度也相对较小。三水站由于含沙量较中下游其他站点含沙量有所升高,故其 POC 浓度也较高。

DOC 浓度从上游到下游有所减小(图 11),但较 POC 而言,各水文站的差距较小,这是因为各水文站虽然

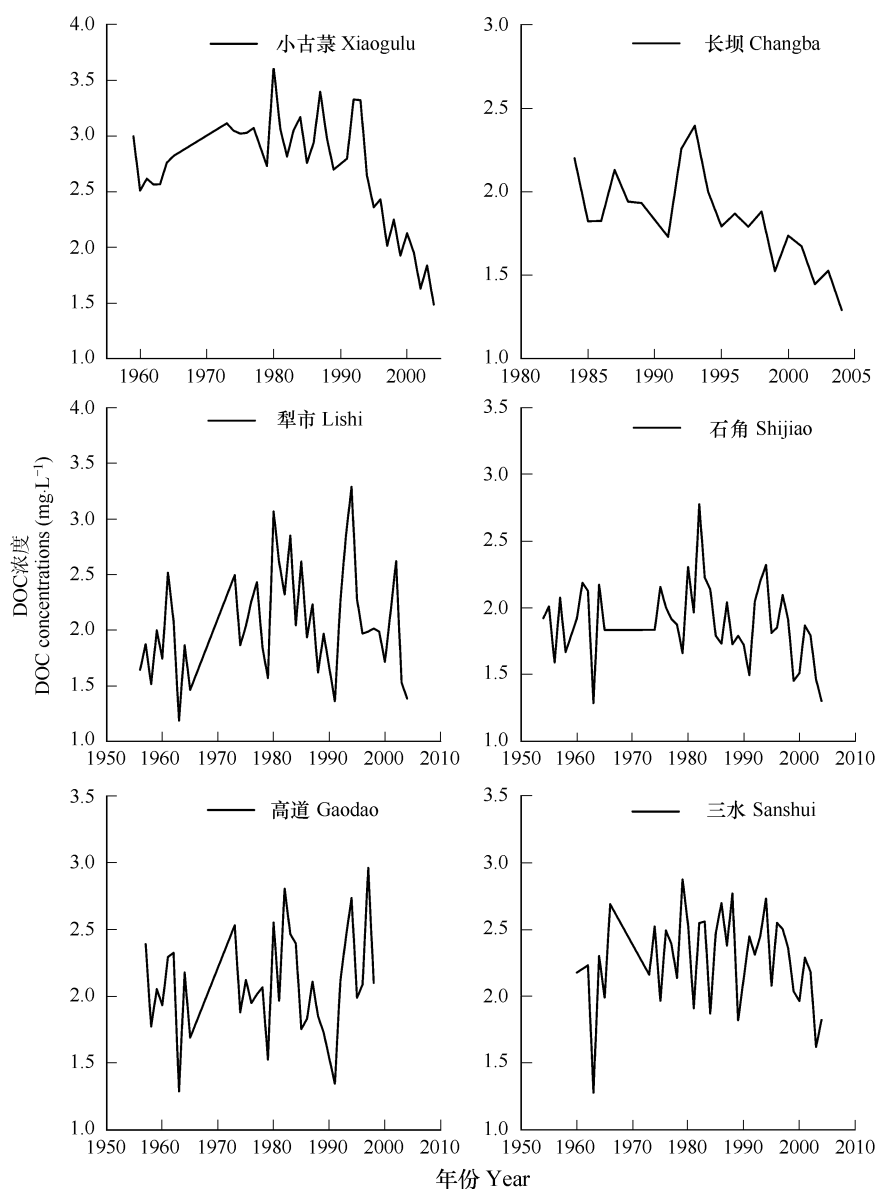


图 10 北江流域 6 个水文站 DOC 浓度年际动态

Fig. 10 Inter-annual dynamics of DOC in 6 hydrological stations in Beijiang River Drainage

含沙量较大,但径流深差别较小所致。

5 结论

本研究根据有机碳浓度与含沙量、流量资料的关系,构建了广东省北江流域 POC 浓度和 DOC 浓度估算模型。利用西江高要站实测一整年(包括一次洪水事件)POC 浓度和 DOC 浓度资料进行验证,证明该模型可满足年平均状态的有机碳浓度估算,并能较好的反映有机碳浓度的年内动态。据此构建的北江流域有机碳浓度时间序列表明:(1)北江流域有机碳主要以 POC 形式存在;(2)总体上,北江流域 DOC 和 POC 浓度的年内动态相似,均为汛期浓度高于非汛期浓度,这可能是因为汛期气温较高,降水丰富,机械侵蚀和化学侵蚀活动较强,微生物产量较高所致;DOC 和 POC 浓度的年际动态均以下降趋势为主,但是数量上有差异;(3)各水文站之间,年内动态相似,但年际动态存在较大差异,这是由各水文站水文条件差异所致;(4)空间分布上,自上游往下,POC 浓度和 DOC 浓度均有所下降,但到三水站又有所上升。

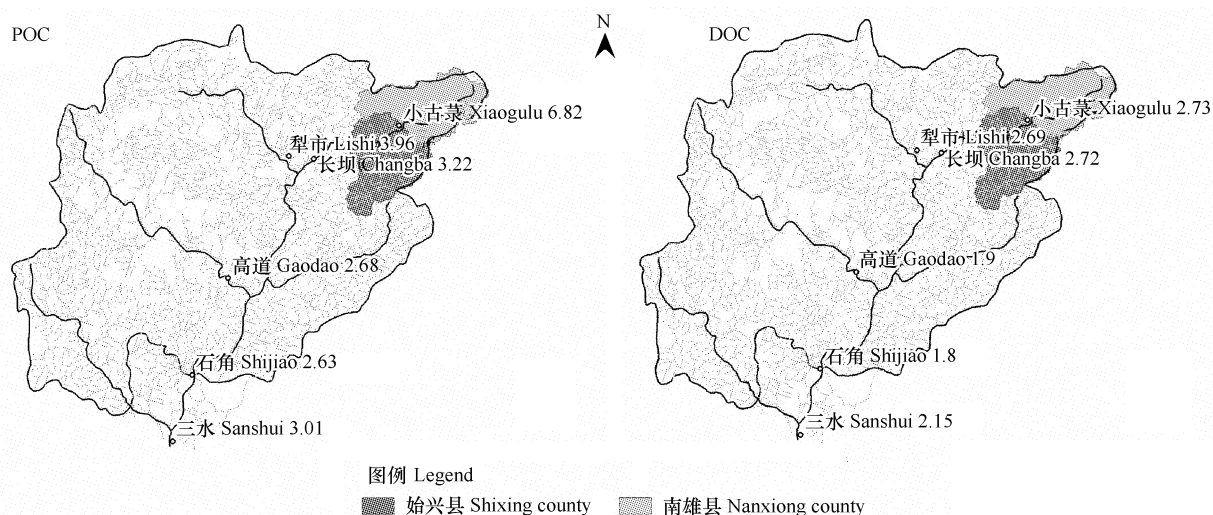


图 11 POC 浓度和 DOC 浓度空间分布(1971 ~ 2000 年)($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

Fig. 11 Spatial distribution of POC concentrations and DOC concentrations (1971 ~ 2000) ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

References:

- [1] Kemps S. Sinks of the anthropogenically enhanced carbon cycle in surface fresh waters. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(3):4657–4676.
- [2] Gao Q Z, Shen C D. Riverine carbon flux and continental erosion. *Advance in Earth Sciences*. 1998,13(4): 369–375.
- [3] Degens E T. Transport of carbon and minerals in major world rivers part 1. *Proceedings of a workshop arranged by Scientific Committee on Problems of the Environmental (SCOPE) and the United Nations Environment Programme (UNEP)*. Hamburg: Hamburg University, 1982.
- [4] Ittekkot V, Laane R W P M. Fate of riverine particulate organic matter. In: Degens E T, Kempe S, Richey J E eds. *Biogeochemistry of Major World Rivers*, SCOPE 42. Chichester: John Wiley, 1991. 233–244.
- [5] Eppley R W, Peterson B W. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. *Nature*, 1979, 282:677–680.
- [6] Committee on Flux of Organic Carbon to the Ocean. Flux of organic carbon by rivers to the oceans. Report of a workshop Woods Hole. Massachusetts: Office of Energy Research, 1981.
- [7] Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the YangTze and Yellow rivers (China) *Marine Chemistry*, 1993,43:235–246.
- [8] Gan W B, Chen H M, Han Y F. Carbon transport by the Yangtze (at Nanjing) and Huanghe (at Jinan) Rivers, People's Republic of China. Hamburg: Mitt. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg, 1983.
- [9] Milliman J D, Xie Q H, Yang Z C. Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Changjiang River to the ocean. *American Journal of science*, 1984, 284:824–834.
- [10] Saliot A, Bigot M, Bouloubassi I, *et al.* Transport and Fate of Hydrocarbons in Rivers and Their Estuaries, Partitioning Between Dissolved and Particulate Phases; Case Studies of the Rhone, France, and the Huanghe and the Changjiang, *China Science of the Total Environment*, 1990,97/98:55–68.
- [11] Wu Y, Zhang J, Liu S M, *et al.* Source and distribution of carbon within the Yangtze River system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71:13–25.
- [12] Cai D L, Tan F C, Edmond J M. Organic carbon isotope geochemistry of the Changjiang (Yangtze River) estuary. *Geochimica*, 1992,(3):305–312.
- [13] Cai D L, Cai A Z. Study on organic carbon isotopic in Huanghe estuary. *Science in China (Series B)*, 1993,23(10):1105–1113.
- [14] Gao Q Z, Shen C D, Sun Y M, *et al.* The organic carbon weathering fluxes in Xijiang River Basinage. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4): 639–645.
- [15] Gao Q Z, Shen C D, Sun Y M, *et al.* A preliminary study on the organic carbon weathering fluxes in Beijiang River Drainage. *Environmental Science*, 2001, 22(2): 12–18.
- [16] Wei X G. Study on riverine carbon flux and erosion of Zhujiang (Pearl) River drainage basin. Guangzhou: Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [17] Gao Q Z, Shen C D, Sun Y M, *et al.* Seasonal variations of riverine organic carbon contents in Makou and Hekou gauge stations of the Pearl River. *Geochimica*, 1999, 28(3):273–280.

- [18] Han W Y. Carbon cycle in Daya Bay and Pearl River estuary. Beijing: Science Press, 1991.
- [19] Han W Y, Lin H Y. Carbon fluxes and carbon cycle in Pearl River estuary. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(1): 56—63.
- [20] Wang M Y, Zhao G J, Zhang S. A study of the mass transport rate of carbon, nitrogen, phosphorus and sulphur of Changjiang River. In: Zhang S, Zhang L C, Tian L Q *et al.* eds. Study on the background values of chemical elements in aquatic environment. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1989.
- [21] Hope D, Billett M F, Cresser M S. A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes. *Environmental Pollution*, 1994, 84: 301—324.
- [22] Committee of Guangdong Local chronicle compilation. Guangdong Annals: Annals of Water Conservancy. Guangzhou: Guangdong People's Press, 1995.
- [23] Committee of Beijiang Levee annals compilation. Beijiang Levee annals. Guangzhou: Guangdong Higher Education Press, 1995.
- [24] Pearl River Water Resources Commission of Ministry of Water Resources, Committee of Pearl River Annals Compilation. Pearl River Annals (Volume 1). Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1991.
- [25] Yang Z J. Long history of Beijiang. *Volcanology and Mineral Resources*, 2001, 22(1): 71—78.
- [26] Ludwig W, Probst J, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemistry Cycle*, 1996, 10: 23—41.
- [27] Sun H G, Han J T, Zhang S R, *et al.* Affections of "05-06" Catastrophic Flood on transported riverine carbon fluxes in Xijiang River. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 21(23): 2773—2779.
- [28] Spitzy A, Leenheer J A. Dissolved organic carbon in rivers. In: Degens E T, Kempe S, Richey J E eds. Biogeochemistry of major world rivers. New York: Wiley, 1991: 213—232.
- [29] Thurman E M. Organic geochemistry of natural waters. Boston: Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, 1985.
- [30] Tao S, Liang T, Xu S P, *et al.* Temporal and spatial variation of dissolved organic carbon content and its flux in Yichun River. *Acta Geographica Sinica*, 1997, 52(3): 254—261.
- [31] Wang J T, Zhang Z B. Adsorption of Natural Dissolved Organic Matter on Solid Particles in Seawater. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1998, 28(4): 627—632.
- [32] Brinson M M. Organic matter losses from four watersheds in the humid tropics. *Limnology and Oceanography*, 1976, 21: 572—582.
- [33] Naiman R J, Siebert J R. Transport of nutrients and carbon from the Nanaimo River to its estuary. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23: 1183—1193.

参考文献:

- [2] 高全洲, 沈承德. 河流碳通量与陆地侵蚀研究. *地球科学进展*, 1998, 13(4): 369—375.
- [12] 蔡德陵, Tan F C, Edmond J M. 长江口区有机碳同位素地球化学. *地球化学*, 1992, (3): 305—312.
- [13] 蔡德陵, 蔡爱智. 黄河口区有机碳同位素地球化学研究. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(10): 1105—1113.
- [14] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏等. 西江流域的有机碳侵蚀通量. *沉积学报*, 2000, 18(4): 639—645.
- [15] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏等. 北江流域有机碳侵蚀通量的初步研究. *环境科学*, 2001, 22(2): 12—18.
- [16] 魏秀国. 珠江流域河流碳通量与流域侵蚀研究. 广州: 中国科学院, 2003.
- [17] 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.
- [18] 韩舞鹰. 大亚湾和珠江口的碳循环. 北京: 科学出版社, 1991.
- [19] 韩舞鹰, 林洪瑛. 珠江口的碳通量和碳循环. *海洋学报*, 1992, 14(1): 56—63.
- [20] 王明远, 赵桂久, 章申. 长江碳、氮、磷、硫输送量的研究. 见: 章申, 张立成, 田笠卿等主编. 化学元素水环境背景值研究. 北京: 测绘出版社; 1989. 121—131.
- [22] 广东省地方志编纂委员会. 广东省志·水利志. 广州: 广东人民出版社, 1995.
- [23] 《北江大堤志》编纂委员会. 北江大堤志. 广州: 广东高等教育出版社, 1995.
- [24] 水利部珠江水利委员会, 《珠江志》编纂委员会. 珠江志(第一卷). 广州: 广东科技出版社, 1991.
- [25] 杨志坚. 北江万古流·记北江地质成因和自然资源. *火山地质与矿产*, 2001, 22(1): 71—78.
- [27] 孙会国, 汉景泰, 张淑荣等. "05-06" 西江特大洪水对河流碳输出通量的影响. *科学通报*, 2006, 21(23): 2773—2779.
- [30] 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.
- [31] 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. *青岛海洋大学学报*, 1998, 28(4): 627—632.