

# 粤东五华河悬浮颗粒有机质的组成及输出通量\*

张胜华<sup>1,2</sup>, 高全洲<sup>1</sup>, 陶贞<sup>1</sup>, 解晨骥<sup>1</sup>, 林培松<sup>1</sup>, 张超<sup>1</sup>, 何文芳<sup>3</sup>

(1. 中山大学地理科学与规划学院//广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广东广州510275;  
2. 广东省水文局湛江水文分局, 广东湛江524037; 3. 广东省水文局河子口水文站, 广东五华514471)

**摘要:** 河流碳输出过程构成全球碳循环的一个重要环节。基于一个完整水文年的月周期性采样分析, 讨论了五华河径流中悬浮颗粒有机质(POM)的性质及其来源, 估算了流域有机质的输出通量。结果表明: 五华河径流中颗粒有机碳(POC)和颗粒有机氮(PON)的平均含量分别为0.77 mg/L和0.12 mg/L, 其中汛期含量高于枯水期; 五华河河流总悬浮颗粒物(TSS)、POC、PON含量以及河流颗粒有机质C/N比与流量的关系揭示五华河径流中POM主要源自流域土壤有机质的侵蚀, 而且在迁移过程中受到水体微生物的分解; 五华河流域POC和PON年输出通量分别为430 kg/(km<sup>2</sup>·a)和70 kg/(km<sup>2</sup>·a), 其中汛期POC和PON输出量分别占全年输出总量的74.23%和76.17%。

**关键词:** 河流颗粒有机质; C/N; 土壤侵蚀; 五华河

**中图分类号:** P592 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2013)03-0143-06

## Composition and Transported Fluxes of Riverine Particulate Organic Matter of the Wuhua River, East Guangdong Province, China

ZHANG Shenghua<sup>1,2</sup>, GAO Quanzhou<sup>1</sup>, TAO Zhen<sup>1</sup>, XIE Chenji<sup>1</sup>,  
LIN Peisong<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>1</sup>, HE Wenfang<sup>3</sup>

(1. School of Geography and Planning//Guangdong Provincial Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Zhanjiang Branch of Guangdong Provincial Bureau of Hydrology, Zhanjiang 524037, China;

3. Hezikou Gauge Station of Guangdong Provincial Bureau of Hydrology, Wuhua 514471, China)

**Abstract:** Carbon transportation by river system constitutes a key link of the global carbon cycle. Based on monthly sampling and analysis of riverine particulate organic matter for a full hydrological year in the Wuhua River, eastern Guangdong Province, the characteristics and sources of particulate organic matter in the river were discussed and carbon transport fluxes were estimated. The results show that the average contents of particulate organic carbon (POC) and particulate organic nitrogen (PON) in the Wuhua River are 0.77 mg/L and 0.12 mg/L, respectively, which are much higher during the flood season than those during the dry season. The relationships between discharge and the TSS, POC, PON contents, and the ratio of C to N reveal that the POM of the Wuhua River is mainly from soil organic matter within the drainage basin, which is decomposed by microorganisms during transportation. POC and PON fluxes exported by the Wuhua River are 430 kg/(km<sup>2</sup>·a) and 70 kg/(km<sup>2</sup>·a), respectively. The output fluxes in the flood season account for 74.23% and 76.17% of the total annual output.

**Key words:** riverine particulate organic matter; C/N ratio; soil erosion; the Wuhua River

\* 收稿日期: 2012-11-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41071054, 40871143); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(11lgjc13, 11lgjc10)

作者简介: 张胜华(1986年生), 女, 硕士; 通讯作者: 陶贞; E-mail: taozhen@mail.sysu.edu.cn

河流水系向河口和近海输送各种来自陆地风化和侵蚀的产物, 构成全球生物地球化学循环的一个关键环节<sup>[1-3]</sup>。河流输出的物质带有流域生态系统所特有的生物地球化学标记及流域人类活动的信息<sup>[4]</sup>, 对河口和海岸水域的生态和沉积过程产生深远影响<sup>[5-6]</sup>。随着人类活动强度的增加, 河流水系对有机质的输送过程逐渐成为流域生态学、河口和近海环境地球化学及环境水文学等学科的研究热点<sup>[7-9]</sup>。许多学者在全球不同生物气候带对大河中有机质的性质、来源及输出通量作了较为详尽的研究<sup>[10-19]</sup>, 发现河流有机质的含量和输出通量既决定于流域内生态系统的自然特征和土地利用模式、强度<sup>[20]</sup>, 也受包括生产者和消费者在内的河流水体微生物群落生长和代谢过程的制约<sup>[21]</sup>。山区小流域往往因坡面陡峭而导致较大的土壤侵蚀速率, 成为河流下游悬移质的主要来源区<sup>[22]</sup>。迄今, 对山区小流域河流颗粒有机质 (POM) 的生物地球化学循环研究较少<sup>[23-25]</sup>。本文选择受亚热带季风气候影响的典型山区小流域—粤东五华河流域为研究对象, 进行一个完整水文年的月周期性采样, 分析五华河径流中悬浮颗粒有机质的性质及其来源, 并估算该流域颗粒有机碳和有机氮的输出通量。

五华河是粤东韩江上游梅江的一级支流, 全长 105 km, 集雨面积 1 848 km<sup>2</sup>。河子口水文站控制流域面积 1 031 km<sup>2</sup><sup>[26]</sup> (图 1)。河子口水文站以上流域以花岗岩和泥质页岩为主, 风化层深厚而松散。地貌多为山地丘陵。土壤主要包括黄壤、红壤、赤红壤、紫色土、水稻土、潮泥沙土和菜园土等。流域内年平均气温 21.2 °C, 平均降雨量约为

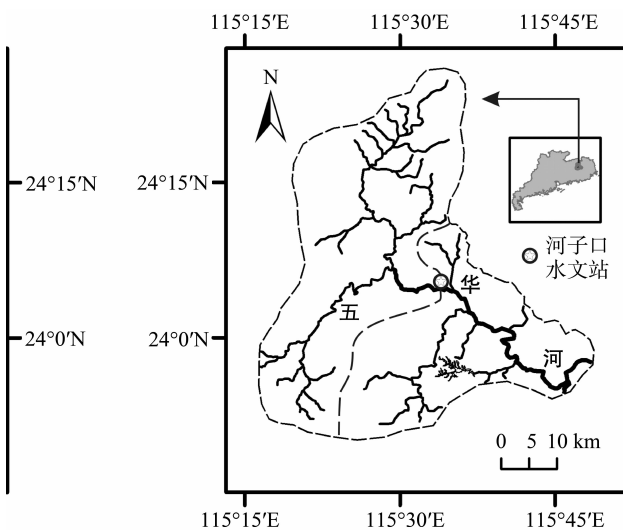


图 1 五华河流域水系分布

Fig. 1 The river systems distribution in the Wuhua River basin

1 518 mm, 年平均径流总量为 14.47 亿 m<sup>3</sup> (河子口水文站, 1960-2009), 汛期 (4-9 月) 径流量占年径流总量的 78% 左右。20 世纪 80 年代初期, 由于自然因素和长期滥伐导致五华河流域成为我国乃至全球季风区水土流失最严重的地区之一, 且以强度水土流失形式沟蚀和崩岗为主<sup>[27]</sup>。崩岗即是在沟谷水流和重力作用下, 山坡土体的崩坍和侵蚀过程; 在我国南方地区, 特别是风化壳深厚的花岗岩和泥质页岩构成的低山丘陵区分布较为普遍<sup>[28]</sup>。

## 1 材料与方法

选择五华河河子口水文站为控制断面, 于 2008 年 12 月至 2009 年 12 月间每月一次在河流中泓线水面以下 0.5 m 处采集水样。将所采集水样 (约 60 L) 在实验室经 0.45 μm 孔径的醋酸纤维微孔滤膜进行抽滤, 将滤膜上的颗粒物收集在蒸发皿中并剔除肉眼可见的植物残屑, 烘干 (65 °C) 后用感量为 0.1 mg 的分析天平称量, 求出河流总悬浮颗粒物 (TSS) 含量。用玛瑙研钵均一化后备用。

用棕色玻璃瓶另外装取水样 (1.0 L) 以测定叶绿素 a 含量。采样当天用预先灼烧 (450 °C, 12 h) 的 Whatman GF/F 玻璃纤维微孔 (0.7 μm) 滤膜过滤, 收集滤膜上颗粒物, 用 90% 丙酮浸泡 (经压碎处理) 提取藻类体内的叶绿素。用分光光度计读取提取液在 665 nm 和 750 nm 处的吸光度, 据此计算水体叶绿素 a 的含量<sup>[29]</sup>。

2010 年 1 月, 选取五华河流域内代表性的植物群落 (常绿阔叶林、竹林、竹林-芦苇、收割后的水稻田和菜园地) 样地采集土壤样品。每个样地呈“V”形布点采集 3 个表土样品混合成一个标准样。用 10% 的稀盐酸溶液除去河流悬浮颗粒物和土壤样品中的碳酸盐。用 Vario EL 型号的元素分析仪 (德国 Elementar 公司生产) 测量河流悬浮颗粒物和土壤的有机碳含量 (POC, %) 和总氮含量 (TN, %)。测量重复 3 次, 分析精度 ≤ 0.3%。

河子口水文站的流量数据由梅州水文分局提供。

土壤中的氮素主要以有机态的形式存在, 一般占土壤全氮量的 95% 以上, 无机氮只占全氮量的 1% ~ 5%<sup>[30]</sup>。因此, 五华河河流悬浮颗粒物中有机氮 (PON) 的含量按照 (1) 式计算:

$$\text{PON} = 0.95 \times \text{TN} \quad (1)$$

式中, PON 是河流悬浮颗粒物有机氮含量, mg/L; TN 是河流悬浮颗粒物总氮含量, mg/L。

应用 Pearson 相关分析探讨河流颗粒有机质变

化的影响因子；所有统计分析均由 SPSS17.0 软件完成。

根据 (2) 式计算每月 POC 和 PON 的输出量 ( $M_i$ , 单位: t):

$$M_i = \lambda \times C_i \times Q_i \quad (2)$$

式中,  $\lambda$  是无量纲系数;  $C_i$  是每月 POC 和 PON 的含量 (mg/L, 假设 POC 和 PON 含量在月尺度内不变);  $Q_i$  为河子口水文站的逐日流量 ( $m^3/s$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 河流总悬浮颗粒物中有机质含量的变化

采样年内五华河 TSS 含量变化于 3.66 ~ 178.41 mg/L 之间, 平均为  $25.22 \pm 44.58$  mg/L, 仅为多年 (1981 - 2000) 平均含沙量 (660 mg/L)<sup>[26]</sup> 的 3.82%。采样年五华河悬移质输出总量 (1.6 万 t) 为多年 (1981 - 2000 年) 平均悬移质输出量 (59 万 t)<sup>[26]</sup> 的 2.71%, 揭示了流域内近 20 年来植被恢复所产生的水土保持效益, 及修建水库塘坝对流域侵蚀物质产生的显著拦蓄作用<sup>[31-32]</sup>。

一般而言, 河流悬浮颗粒物的有机质是流域土壤 (外源) 有机质和河流水体自生 (内源) 有机质的混合<sup>[2]</sup>。五华河径流中 POC 的含量变化于 0.17 ~ 2.88 mg/L 之间, 平均为  $0.77 \pm 0.65$  mg/L; PON 的含量变化于 0.02 ~ 0.4 mg/L 之间, 平均为  $0.12 \pm 0.09$  mg/L。河流 TSS、POC、PON 含量的季节变化与流量显著正相关 (表 1, 图 2)。如 2009 年 6 月 12 日采集的样品, 河流 TSS 含量和流量 (分别为 178.41 mg/L 和  $39.3 m^3/s$ ) 分别为所有样品和采样年日流量的最大值; 而 2009 年 1 月 12 日采集的水样中 TSS 含量只有 12.9 mg/L, 相应的流量为  $12.3 m^3/s$ 。2009 年 6 月 12 日 POC 含量为 2.88 mg/L; 而 2009 年 1 月 12 日 POC 含量仅为 0.17 mg/L。汛期 (4 - 9 月) 颗粒有机质含量平均为  $(1.03 \pm 0.85)$  mg/L, 高于非汛期 (10 - 3 月) 的相应值 ( $0.57 \pm 0.26$ ) mg/L。这些参数高度协同的变化规律反映了五华河水体中悬移质与颗

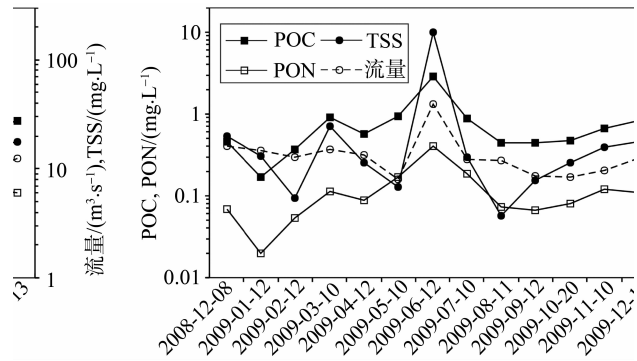


图 2 五华河 TSS、POC、PON 含量与流量的季节变化  
Fig. 2 The seasonal variation of TSS, POC, PON contents and discharge of the Wuhua River

粒有机质的来源较为一致, 即河流悬浮颗粒物和 POM 主要来自流域土壤的侵蚀过程。

五华河悬浮颗粒物中 POC 和 PON 的含量分别变化于 1.3% ~ 13.82% 和 0.19% ~ 2.49%, 低于流域内水库较多、植被盖度较高、水土流失轻微的增江 (东江一级支流) 河流 POC (2.84% ~ 26.61%) 和 PON (0.43% ~ 5.03%) 的含量<sup>[25]</sup>; 接近于西江河流的相应值<sup>[17]</sup>; 高于长江流域河流 POC 的含量 (0.5% ~ 2.5%)<sup>[16]</sup>。而且 POC 和 PON 的含量均与 TSS 呈负相关关系 (图 3), 一致于世界上其它流域河流颗粒有机质与 TSS 的关系<sup>[2,24]</sup>。这是由于汛期不仅坡面径流冲刷表层土壤颗粒有机质, 同时松厚的风化壳物质也遭到沟谷水流的侵蚀, 使得径流侵蚀输出物中矿物成分增加, 河流颗粒有机质被矿物所稀释。如 2009 年 6 月份径流量、TSS 含量最大, 但是悬浮颗粒物中 POC 和 PON 含量 (%) 却最小。

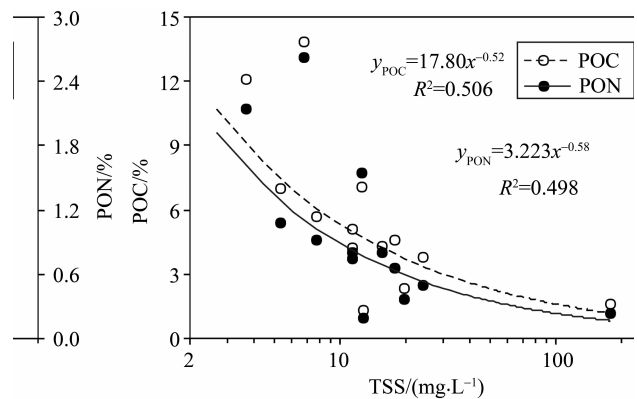


图 3 五华河 TSS 与 POC 和 PON 含量的相关关系  
Fig. 3 The relationship between TSS content and contents of POC and PON in the Wuhua River

表 1 五华河 TSS、POC、PON 与流量 ( $Q$ ) 的关系

Table 1 The relationship between the contents of TSS, POC, PON and discharge ( $Q$ ) of the Wuhua River

回归方程	$R^2$	$P$	$n$
$TSS = 5.5364 Q - 52.13$	0.920	0.000	13
$POC = 0.0726 Q - 0.2402$	0.748	0.000	13
$PON = 0.0093 Q - 0.0105$	0.617	0.001	13

## 2.2 水体生物地球化学过程对河流颗粒有机质的改造

颗粒有机质的 C/N 比被广泛用于识别有机质的来源。陆源有机质的 C/N 比变化于 12 ~ 400 之间, 淡水浮游植物的 C/N 比变化于 6 ~ 8 之间<sup>[16]</sup>。

五华河流域土壤有机质 C/N 比变化于 9.99 ~ 18.36 之间 (图 4), 平均为  $12.66 \pm 2.74$ 。偏向陆源有机质 C/N 比的低值区, 这与湿热地区土壤有机质的强烈矿化过程有关。群落类型也影响土壤有机质的 C/N 比。五华河流域常绿阔叶林土壤有机质 C/N 比最大 (18.36); 竹林土壤有机质的 C/N 比为 10.24; 竹林-芦苇群落土壤有机质 C/N 比为 12.54; 收割后的水稻田和菜园地 C/N 比较接近 (分别为 11.86 和 12.72)。另外, 比较不同群落土壤样品的 POC、PON 含量 (图 4), 发现水稻田土壤有机质含量最高, 这可能与水稻田土壤长期处于还原环境有关。

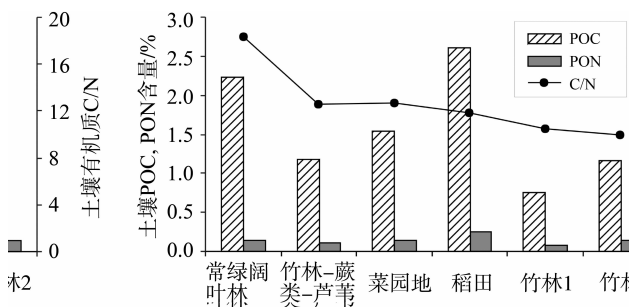


图 4 五华河流域不同群落土壤有机质含量及其 C/N 比  
Fig. 4 Contents and C/N ratio of organic matter in soils from different type vegetations within the Wuhua River basin

五华河河流颗粒有机质的 C/N 比变化于 5.64 ~ 9.54 之间, 平均为  $7.58 \pm 1.01$ , 显著小于流域土壤有机质的 C/N 比 ( $P = 0.000$ ), 而接近淡水浮游植物的 C/N 比。

五华河水体叶绿素含量变化于 0.68 ~ 6.81  $\mu\text{g/L}$  之间, 平均为  $2.83 \pm 2.15 \mu\text{g/L}$ 。表明五华河水体浮游植物的生产力水平较低。采样年内只在 2009 年 1、2、4、5、11、12 月采集的水样中检测出叶绿素, 其中最大值出现在 11 月份, 最小值出现在 1 月份, 其他月份未检出叶绿素含量 (图 5)。这些现象与五华河流域的水文情势和水体藻类的生态习性有关。1 月份河流水温较低; 汛期 6 - 9 月份, 降雨径流侵蚀作用较强, 致使河流 TSS 较多。增加的 TSS 和汛期较大的河水流速抑制了水体光合

作用致使浮游植物有机质大量减少。

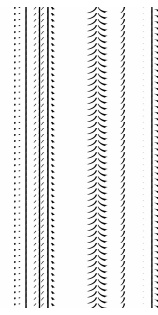


图 5 五华河河流颗粒有机质的 C/N 比、水体叶绿素 a 含量的时间变化

Fig. 5 The temporal variation of the chlorophyll-a content and C/N ratio in the TSS of the Wuhua River

五华河河流颗粒有机质的 C/N 比与流量正相关 ( $r = 0.77, P = 0.045$ ), 揭示河流颗粒有机质来源于降雨径流侵蚀的陆源有机质的输入, 即随着汛期径流侵蚀动力的增大, 更多的陆地有机质进入河流; 同时汛期增大的河水流速和增加的河流泥沙含量均抑制河流水体中的光合作用, 进而减少浮游植物对河流 POC 的贡献。这两个方面均导致河流颗粒有机质的 C/N 比增大。

另外, 7 - 10 月份河流颗粒有机质的 C/N 比较小, 这可能是由于这期间正值水稻生长阶段追施氮肥, 残留的  $\text{NH}_4^+$  进入河流被 TSS 细颗粒吸附所致。

但是, 如果把五华河河流颗粒有机质看作浮游植物生物量与土壤有机质的两端元简单混合, 就会得出浮游植物生物量在河流颗粒有机质中占绝对优势的结论, 因为五华河河流颗粒有机质的 C/N 比与浮游植物的更接近。这与五华河河流 TSS 较低的有机质含量和水体中较低的叶绿素含量相矛盾。显然, 仅浮游植物贡献并不能完全解释五华河 POM 较低的 C/N 比。

河流水体中分解者的作用可以进一步帮助解释河流 POM 所经历的生物地球化学变化。河流颗粒有机质在迁移过程中不断地遭受着主要包括细菌和真菌等微生物群落的分解作用<sup>[33]</sup>, 最先遭到分解的是水解性氨基酸、碳水化合物和脂类等活性较大的物质<sup>[34]</sup>。这类活性大的化学物质具有“高碳低氮”的元素组成特征。因此, 随着分解过程的持续, 五华河河流颗粒有机质的 C/N 比逐渐降低。五华河水体中较高的  $\text{CO}_2$  分压, 也佐证了这种微生物对有机质的分解过程 (未刊数据)。事实上, 在全球许多大河流中尤其是下游河段均发现了这种水体与大气之间的  $\text{CO}_2$  交换现象<sup>[15]</sup>。

- [13] GEBHARDT A C, GAYE-HAAKE B, UNGER D, et al. Recent particulate organic carbon and total suspended matter fluxes from the Ob and Yenisei Rivers into the Kara Sea (Siberia) [J]. *Marine Geology*, 2004, 207: 225 – 245.
- [14] RAYMOND P A, BAUER J E. Riverine export of aged terrestrial organic matter to the North Atlantic Ocean [J]. *Nature*, 2001, 409(6819): 497 – 500.
- [15] RICHEY J E, MELACK J M, AUFDENKAMPE A K, et al. Out gassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Nature*, 2002, 416(6881): 617 – 620.
- [16] WU Y, ZHANG J, LIU S M, et al. Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(1): 13 – 25.
- [17] GAO Q Z, TAO Z, SHEN C D, et al. Riverine organic carbon in the Xijiang River (South China): seasonal variation in content and flux budget [J]. *Environmental Geology*, 2002, 41(7): 826 – 832.
- [18] 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 [J]. *环境科学*, 2001, 22(2): 12 – 18.
- [19] 魏秀国, 卓幕宁, 郭治安, 等. 东江流域土壤、植被和悬浮物的碳、氮同位素组成 [J]. *生态环境学报*, 2010, 19(5): 1186 – 1190.
- [20] MATSSON T, KORTELAINEN P, RAIKE A. Export of DOM from boreal catchments: impacts of land use cover and climate [J]. *Biogeochemistry*, 2005, 76(2): 373 – 394.
- [21] BATTIN T J, KAPLAN L A, FINDLAY S, et al. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks [J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(2): 95 – 100.
- [22] MILLIMAN J D, SYVITSKI J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: The importance of small mountainous rivers [J]. *The Journal of Geology*, 1992, 100(5): 525 – 544.
- [23] KAO S J, LIU K. Particulate organic carbon export from a subtropical mountainous river (Lanyang Hsi) in Taiwan [J]. *Limnology and Oceanography*, 1996, 41(8): 1749 – 1757.
- [24] LEITHOLD E L, BLAIR N E, PERKEY D W. Geomorphologic controls on the age of particulate organic carbon from small mountainous and upland rivers [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): GB3022.
- [25] 陶贞, 高全洲, 姚冠荣, 等. 增江流域河流颗粒有机碳的来源、含量变化及输出通量 [J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5): 789 – 795.
- [26] 朱能胜. 五华河流域水文特性变化分析 [J]. *广东水利水电*, 2010(6): 65 – 68.
- [27] 广东省科学院丘陵山区综合科学考察队. 广东山区水土流失及其治理 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1991.
- [28] 曾昭璇. 我国南部红土区的水土流失问题 [J]. *第四纪研究*, 1991, 11(1): 9 – 17.
- [29] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [30] 韩士杰, 董云社, 蔡祖聪, 等. 中国陆地生态系统碳循环的生物地球化学过程 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [31] 刘健. 梅江五华河近 30 年河床演变的研究 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2009, 26(4): 125 – 129.
- [32] 吴宏旭, 杨兴群. 五华河流域水土保持与河流泥沙变化分析 [J]. *人民珠江*, 2003(6): 62 – 64.
- [33] GUYOT J L, WASSON J G. Regional pattern of riverine dissolved organic carbon in the Amazon drainage basin of Bolivia [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, 39(2): 452 – 458.
- [34] HAYNES R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(2): 211 – 219.