

三峡库区不同城镇化梯度下河流  $p\text{CO}_2$  动态及驱动因素\*

易子涵<sup>1,2</sup>, 李思悦<sup>1\*\*</sup>, 唐 薇<sup>1</sup>, 李玉英<sup>3</sup>

(1:中国科学院重庆绿色智能技术研究院,重庆 400714)

(2:中国科学院大学,北京 100049)

(3:南水北调中线水源区水安全河南省协同创新中心, 南阳师范学院农业工程学院,南阳 473061)

**摘 要:** 为研究河流溶解性  $\text{CO}_2$  (二氧化碳)对城镇化的响应,于2018年8月对三峡库区3条具有不同城镇化强度的河流——汝溪河、南河和桃花溪进行野外在线监测及取样分析,测定了样品有机质(溶解性有机碳 DOC)、营养元素(溶解性总氮 DTN、溶解性总磷 DTP);利用 ArcGIS 解译各流域的土地利用组成,并利用碳酸盐平衡方程,通过 pH、Alk(碱度)、水温计算不同城镇化梯度河流的  $p\text{CO}_2$  ( $\text{CO}_2$  分压)。结果表明:建设用地占比从低到高依次为:汝溪河<南河<桃花溪,河流  $p\text{CO}_2$  依次为  $1790\pm1210$ 、 $2006\pm3546$ 、 $4094\pm4218\ \mu\text{atm}$ ,与河流的城镇化梯度变化一致,河流水-气界面呈现为  $\text{CO}_2$  源;DOC、DTN 浓度、Alk、电导率在各河流间呈现显著性差异。DOC、DTN、DTP 浓度和 Alk 的变化规律与河流的城镇化梯度一致。研究发现城镇化进程增加水体的  $p\text{CO}_2$ ,引起区域城镇扩张进程中河流  $\text{CO}_2$  释放通量的增加,结论支持强人为活动影响增加河流碳释放的假设。

**关键词:** 城镇化梯度;三峡库区;二氧化碳分压;环境因子

Dynamics and driving factors of the river  $p\text{CO}_2$  in the Three Gorges Reservoir area with urbanization gradients\*

YI Zihan<sup>1,2</sup>, LI Siyue<sup>1\*\*</sup>, TANG Wei<sup>1</sup> & LI Yuying<sup>3</sup>

(1: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: Collaborative Innovation Center of Water Security for Water Source Region of Middle Route Project of South-North Water Diversion of Henan Province, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, P.R.China)

**Abstract:** Rivers are considered to be an important source of atmospheric  $\text{CO}_2$ , while the responses of riverine  $\text{CO}_2$  evasion rate to intensified human activities such as urbanization are poorly understood. The characterization of  $\text{CO}_2$  partial pressure ( $p\text{CO}_2$ ) in three rivers with different urbanization gradients of the Three Gorges Reservoir area was studied. Water sampling was thus carried out in August 2018. pH values and water temperatures were measured *in situ* using a portable CyberScan PCD 650 multi-parameters system (Eutech, USA), while both the dissolved organic carbon (DOC) and nutrients (DTN-dissolved total nitrogen, DTP-dissolved total phosphorus) were determined in the laboratory. Land use composition was extracted by ArcGIS 10.3. The  $p\text{CO}_2$  of rivers with different urbanization intensity was calculated by pH, alkalinity and water temperature. Our results indicated that the proportions of urban area are as follows: Ruxi River<Nan River<Taohua River, and their mean values of  $p\text{CO}_2$  were  $1790\pm1210\ \mu\text{atm}$ ,  $2006\pm3546\ \mu\text{atm}$ ,  $4094\pm4218\ \mu\text{atm}$  respectively. The average  $p\text{CO}_2$  were much higher than the atmospheric equilibrium, and the studied rivers were therefore characterized as a  $\text{CO}_2$  source. The concentrations of DOC, DTN and Alk (Alkalinity), EC (Conductivity) were significantly different among rivers. The concentrations of DOC, DTN, DTP and Alk were consistent with the riverine urbanization gradients. We concluded that urbanization could enhance riverine  $p\text{CO}_2$ , and thus potentially increased riverine  $\text{CO}_2$  evasion. Our results supported the hypothesis that human intensive practices would increase riverine dissolved  $\text{CO}_2$  and water-air are-

\* 2019-09-26 收稿;2019-12-09 收修改稿.

国家自然科学基金项目(31670473)资助.

\*\* 通信作者;E-mail: lisiyue@cigit.ac.cn.

al flux, which would be helpful for the prediction of riverine  $\text{CO}_2$  emission under regional and global urbanization.

**Keywords:** Urbanization gradient; Three Gorges Reservoir area; partial pressure of carbon dioxide; environmental factors

河流仅占地球表面的极小一部分,却在陆地与海洋间碳循环的过程中扮演着重要的纽带作用.河流输运陆地碳源到海洋生态系统时,大部分的碳未能到达海洋,流失的碳主要被固定、存储和以  $\text{CO}_2$  形式释放<sup>[1]</sup>.近年来,城镇化进程使流域土地利用方式发生了显著改变,明显改变了河流生态系统结构和功能,进而影响河流内部碳的生物地球化学过程<sup>[2-5]</sup>.河流被认为是大气重要的  $\text{CO}_2$  源,其对城镇化的响应对准确评估全球变化下内陆水体碳释放具有重要的科学意义,但相关研究尤其缺乏.

$\text{CO}_2$  分压( $p\text{CO}_2$ )是控制水体向大气扩散或吸收  $\text{CO}_2$  的重要因素之一,当河流  $p\text{CO}_2$  大于大气中的  $p\text{CO}_2$  时,河流为碳源.河流  $p\text{CO}_2$  变化规律及控制因素十分复杂,它主要受河流内部碳酸盐体系以及外部的生物地球化学过程的影响<sup>[6-7]</sup>.因此,城镇化背景下人类对河流的外源输入增加及土地利用方式的改变会导致  $p\text{CO}_2$  的显著变化.国内外学者的研究表明内陆水体中的  $\text{CO}_2$  通常处于过饱和状态.例如, Raymond 等在全球尺度上对 6708 条河流进行调查,发现约 95% 的河流  $p\text{CO}_2$  处于过饱和状态,平均值为  $3100 \mu\text{atm}$  左右<sup>[8]</sup>. Li 等对对涪公河的研究表明水体  $p\text{CO}_2$  的平均值为  $1090 \mu\text{atm}$ <sup>[9]</sup>. Wu 等发现三峡库区草堂河 6 月的表层水体  $p\text{CO}_2$  低于大气<sup>[4]</sup>,水体呈碳汇特征,但 Yao 等发现三峡库区干流秋季的  $p\text{CO}_2$  为  $920 \sim 1140 \mu\text{atm}$ <sup>[10]</sup>,为大气  $\text{CO}_2$  浓度的 2~3 倍. Li 等在不同季节对三峡库区河流进行调查,结果表明河流  $p\text{CO}_2$  变化范围为  $50 \sim 6019 \mu\text{atm}$ ,秋季均值为  $1573 \mu\text{atm}$ ,夏季均值为  $1276 \mu\text{atm}$ <sup>[11]</sup>. Ni 等对三峡库区大宁河的研究表明 5 月和 8 月  $p\text{CO}_2$  均值分别为  $483$  和  $2018 \mu\text{atm}$ <sup>[12]</sup>. Wang 等<sup>[3]</sup>对重庆城区范围的主要河流按土地利用组成进行分类调查,结果表明河流  $p\text{CO}_2$  随建设用地与耕地占比的上升有增加的趋势,平均值达到  $3526 \mu\text{atm}$ ,远高于大部分自然河流.

综上所述,尽管大部分河流为碳源,但不同河流  $p\text{CO}_2$  相差巨大.受人为活动及流域自然背景的影响,  $p\text{CO}_2$  在不同的河流系统中中和不同河段的控制因素都有所不同,具有明显的空间异质性,且城镇化将显著增加水体的  $p\text{CO}_2$ <sup>[3]</sup>.因此,对不同城镇化梯度河流的溶存性  $\text{CO}_2$  的研究对了解变化环境下河流水—气界面  $\text{CO}_2$  释放具有重要的意义.虽然国内学者在不同城镇化强度下河流  $p\text{CO}_2$  研究上取得了初步进展,并解释了不同土地利用组成对河流温室气体排放的关键控制作用,但河流  $p\text{CO}_2$  对城镇化的响应研究仍十分有限.因此本文选择亚热带季风性湿润气候区受不同城镇化强度影响的 3 条河流——桃花溪、南河、汝溪河作为研究对象,研究不同城镇化梯度下河流  $p\text{CO}_2$  变化格局及其关键驱动因素,以期为全球变化下河流碳释放的精确估算提供重要的数据支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与样品采集

三峡库区东起湖北宜昌三斗坪三峡大坝坝址,西至重庆市江津朱沱红花堡,三峡水库全长 663 km,干流库段平均水面宽度 1100 m,淹没陆域面积约为  $580 \text{ km}^2$ <sup>[13]</sup>.近年来,库区范围内的城镇化进程逐年加剧.建设用地的扩张以及人类活动强度的增加对河流生态系统造成了巨大的威胁.本研究中的 3 条河流样点位置见图 1.桃花溪流域( $29^\circ 51' 11'' \sim 30^\circ 5' 54'' \text{N}$ ,  $107^\circ 4' 42'' \sim 107^\circ 10' 53'' \text{E}$ )地处长寿区,上游位于云台镇板桥湾,下游处于长寿区市中心处,河流整体受城镇化影响严重,水质较差.南河流域地处四川盆地东部平行岭谷丘陵区,域内林木采伐过度,植被较差,水土流失严重.汝溪河发源于万州区分水镇,途经梁平区再穿过忠县汇入长江,主河道长 54.5 km,常年水面宽度在 100 m 左右,是忠县的第二大支流河,下游位于汝溪镇内.

3 条河流均位于三峡库区内,各流域范围内土地利用组成不同,呈现出不同的城镇化梯度.其中桃花溪受到城镇化影响较为严重,下游有大量生活垃圾及工业废水流入.南河整体而言受到中等程度的城镇化影响.汝溪河作为城镇化强度较低的河流进行对比,以更加直观反映城镇化梯度对河流的影响.

本研究在桃花溪设置 6 个样点,在南河设置 7 个样点,在汝溪河设置 4 个样点.为使得各河流能在不同城镇化梯度下进行纵向比较,各河流样点基本均匀分布在河流的河源至河口处.采样时间为 2018 年 8 月

27 日 8 月 31 日, 使用 2.5 L 采样器对水下 0.1~0.2 m 深的水样进行采集, 并加入浓硫酸抑制微生物活动, 水样于 48 h 内带回实验室冷藏, 于 1 周内完成实验分析.

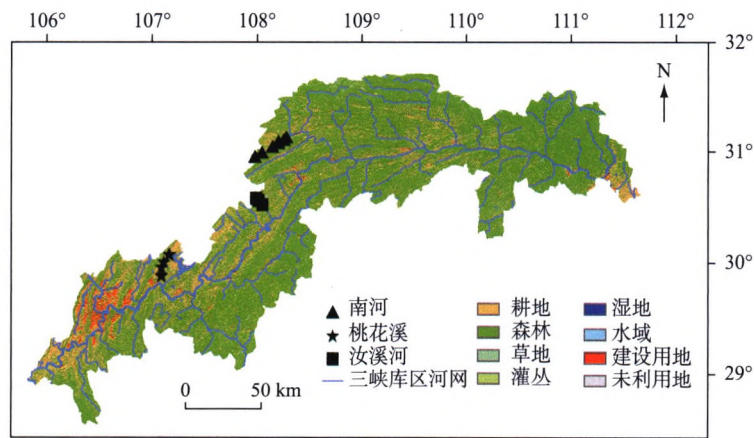


图 1 三峡库区 3 条研究河流采样点及流域土地利用组成

Fig.1 Sampling sites and catchment land use in the three studied rivers of the Three Gorges Reservoir area

1.2 实验分析与方法

1.2.1 野外实验 现场使用 Cyber Scan PCD 650 多参数水质分析仪 EutECh (美国) 测定水温、pH、电导率 (EC) 等. 采样当天完成标准盐酸 (0.0200 mol/L) 滴定总碱度, 并完成水样的预处理工作. 当天用 0.70 μm Whatman GF/F 玻璃纤维膜过滤, 将滤液分装于聚乙烯瓶中, 不留空隙; 用于测定溶解性有机碳 (DOC) 浓度. 另有水样采用 0.45 μm Millipore 硝酸纤维滤膜过滤, 用于测定溶解性总氮 (DTN)、溶解性总磷 (DTP) 浓度.

1.2.2 室内实验 利用 Multi N/C 2100S (德国耶拿) 碳氮分析仪测定 DOC 浓度. 使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法 (HJ 636—2012) 测定 DTN, 钼酸铵分光光度法 (GB 11893—1989) 测定 DTP<sup>[14]</sup>; 结合水温、pH 及碱度计算 pCO<sub>2</sub> (具体见 1.2.4 部分).

1.2.3 土地利用数据来源与数据处理 本研究中所有数据均录入 SPSS 和 R 进行统计分析与绘图, 采用 One-way ANOVA 来判别不同数据组的差异性, 采用 Spearman 非参数相关性分析方法阐释数据间变化的统计相关性. 土地利用组成数据来自清华大学地球系统科学系宫鹏最新研究成果——10 m 分辨率的全球土地覆盖产品 (FROM-GLC10)<sup>[15]</sup>. 研究平台以 ArcGIS 10.3 为主, 其他辅助资料及平台包括有全国数字高层 (DEM) 图、三峡库区行政区域图以及 Google Earth 等.

1.2.4 pCO<sub>2</sub> 计算 河流的溶解性无机碳 (DIC) 主要由碳酸氢根离子 (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)、碳酸根离子 (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)、碳酸以及 CO<sub>2aq</sub> 组成. 这些成分彼此之间存在一系列的平衡关系. 水体 DIC 成分可由亨利定律进行计算. 水体 pH 值均大于 7.6, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 视为与碱度相当. 由测得的 pH、碱度、水温等参数可计算 pCO<sub>2</sub><sup>[16]</sup>.

$$pCO_2 = [H_2CO_3^*]/[H^+] = [HCO_3^-]/K_1 \cdot K_0 \tag{1}$$

$$pK_0 = -7 \times 10^{-5} T^2 + 0.16 T + 1.11 \tag{2}$$

$$pK_1 = 1.1 \times 10^{-4} T^2 - 0.012 T + 6.58 \tag{3}$$

式中, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub><sup>\*</sup> 为 H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 与 CO<sub>2aq</sub> 之和; T 为水温; K 为亨利常数.

2 结果与分析

2.1 研究区域土地利用组成

代表高人类活动强度的建设用地对河流生态系统的影响最为强烈, 建设用地在土地利用栅格图中所占比例越大即代表城镇化强度越高<sup>[17]</sup>. 桃花溪流域建设用地占比最大, 为 12.43%; 南河次之, 建设用地占比为 3.36%; 汝溪河最低, 建设用地所占比例为 0.6%. 城镇化强度高低顺序为: 桃花溪>南河>汝溪河, 此外,

每条河流从上游至下游即沿水流方向城镇化强度增加.

2.2 河流  $p\text{CO}_2$  变化规律

本研究中 17 个样点的 pH 值在 7.56~9.48 之间, 平均值为  $8.23\pm0.7$ , 整体表现为弱碱性, 不同河流的 pH 值无显著差异; 表层水温在 30.8~37.4℃ 之间; 碱度变化范围为 1320~4320  $\mu\text{eq/L}$ , 均值为  $409.4\pm856.2$   $\mu\text{eq/L}$ ; EC 变化范围为 213.9~669.6  $\mu\text{S/cm}$ , 均值为  $413.4\pm139.3$   $\mu\text{S/cm}$ . 图 2 表明, 沿水流方向, 桃花溪 pH 有增高的趋势, 汝溪河和南河则有降低的趋势; 桃花溪、南河碱度有增加趋势; 南河(除有异常值的 Site 5 外)、汝溪河  $p\text{CO}_2$  呈现出明显递增的趋势, 而桃花溪则相反. 桃花溪的 Site 1 样点出现了高达 12067  $\mu\text{atm}$  的异常值, 这可能是由于该点位河宽窄且河水很浅, 河底有大量生活垃圾使得河流原位呼吸加强, 从而导致了该点位  $p\text{CO}_2$  的极端值. 图 3 表明, Alk 空间格局和城镇化梯度一致, 且桃花溪 Alk 显著高于其他 2 条河流 ( $P<0.001$ ), EC 在桃花溪中显著升高 ( $P<0.01$ ). 南河、汝溪河、桃花溪  $p\text{CO}_2$  平均值分别为  $2006\pm3546$ 、 $1790\pm1210$ 、 $4094\pm4218$   $\mu\text{atm}$ . 3 条河流  $p\text{CO}_2$  无显著性差异, 但各河流  $p\text{CO}_2$  变化规律与城镇化梯度一致即城镇化强, 度越高的河流具有更高的  $p\text{CO}_2$ .

2.3 河流有机质及营养盐特征

河流 DOC 浓度范围为 3.76~8.1 mg/L, 均值为  $5.37\pm1.44$  mg/L; DTN 浓度在 0.037~2.99 mg/L 范围内变化, 均值为  $0.73\pm0.81$  mg/L; DTP 浓度在 0.08~0.53 mg/L 之间变化, 均值为  $0.26\pm0.12$  mg/L. 图 2 表明, 沿水流方向, 桃花溪、南河 DOC 浓度有增高趋势. 图 3 表明, DTP、DTN、DOC 浓度平均值均在桃花溪最大, 且桃花溪 DTN、DOC 浓度均显著大于其他 2 条河流, DOC 和营养元素 (DTN、DTP) 的变化规律与河流城镇化梯度一致.

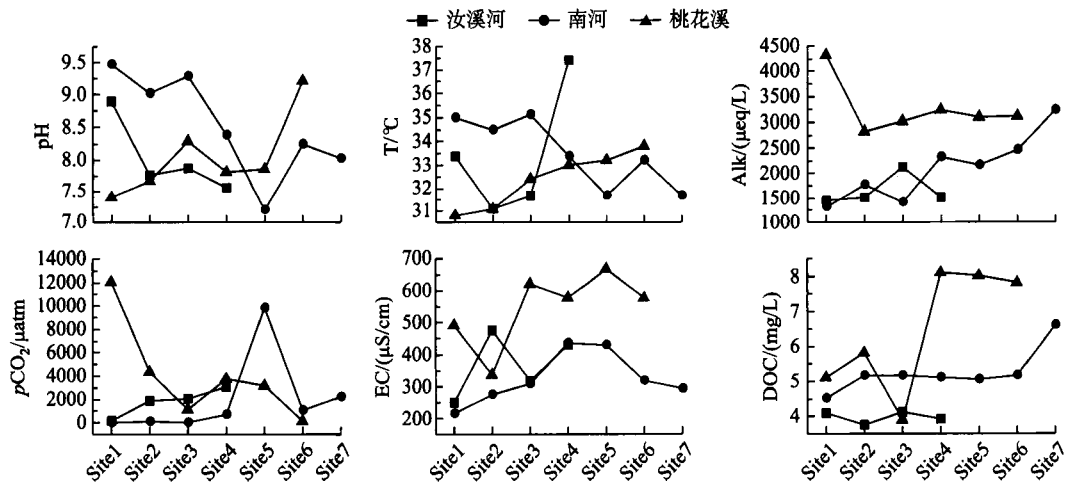


图 2 河流不同站点理化指标及  $p\text{CO}_2$  格局 (从 Site1 到 Site7 为水流方向)

Fig.2 Characteristics of physical and chemical parameters and  $p\text{CO}_2$  in the studied rivers

3 讨论

3.1 河流水环境对  $p\text{CO}_2$  的影响

pH、温度与  $p\text{CO}_2$  呈极显著负相关 (图 4), 此结果与国内外学者的研究一致<sup>[18-21]</sup>. pH 值和水体的碳酸盐动态平衡密切相关, 游离态  $\text{CO}_2$  增加会导致 pH 降低. 水温对  $p\text{CO}_2$  影响机制较为复杂, 通常情况下, 水温通过影响气体分子在水中的溶解度、微生物活性、水生植物光合、呼吸作用和气泡的形成影响  $\text{CO}_2$  的产生及消耗过程<sup>[22-24]</sup>, 温度较高时, 一方面水生植物光合作用增强, 大量消耗水中  $\text{CO}_2$ ; 另一方面水生生物的呼吸作用、微生物矿化降解 DOC 都有利于  $p\text{CO}_2$  增加. 夏季的高温与长时间的光照条件使水生植物的光合作用占主导地位从而引起  $p\text{CO}_2$  的下降. 碱度是影响水体  $p\text{CO}_2$  的又一重要因素, 碱度的大小代表着水体中碳酸盐浓度, 当碳酸盐浓度较高时会促使  $\text{CO}_2$  与水的反应逆向进行从而增加  $p\text{CO}_2$ .

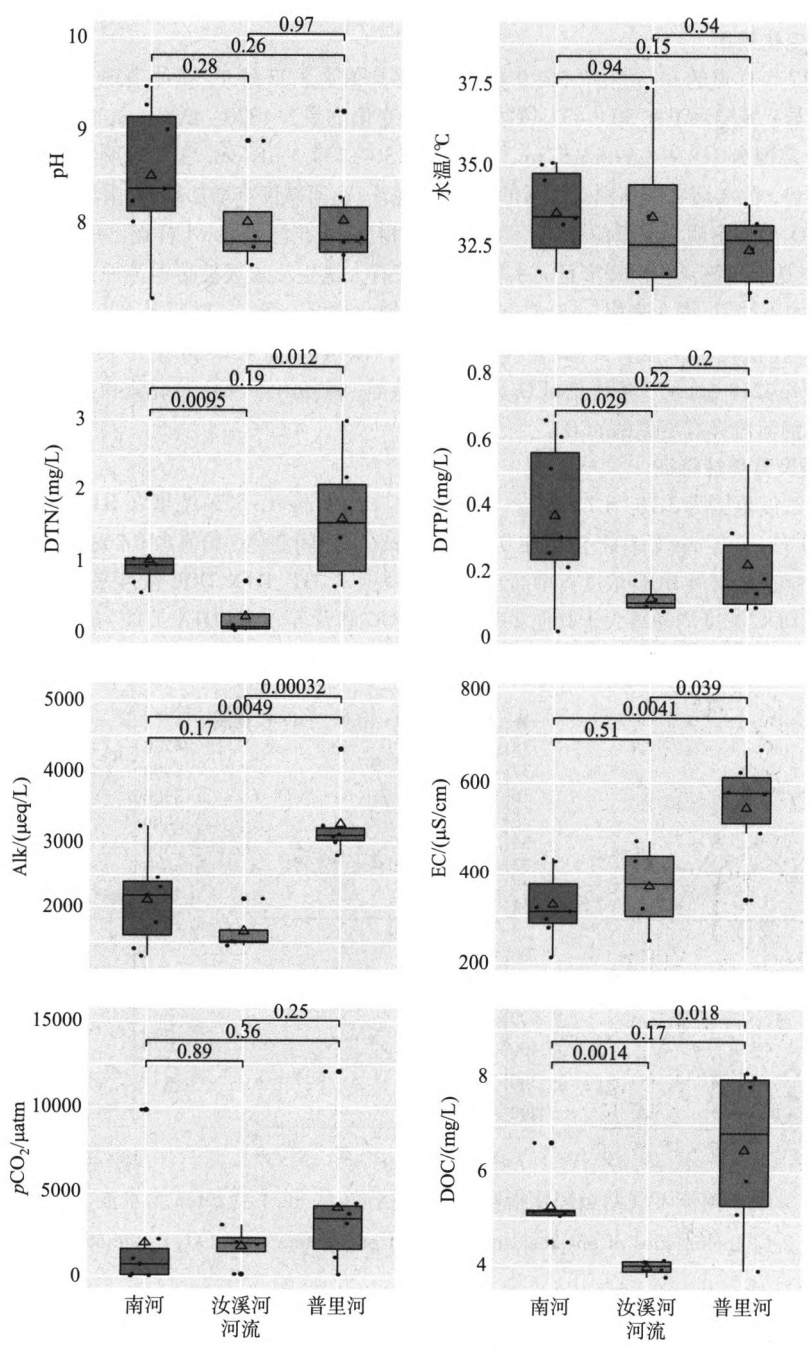


图3 河流水质指标及 $p\text{CO}_2$ 均值格局(箱体间的数值代表不同河流显著性差异水平, 三角形代表平均值, 横线代表中位数;从上到下分别为最大值、上四分位数、下四分位数、最小值)

Fig.3 Averages of water quality parameters and  $p\text{CO}_2$  in the studied rivers

养分(DTN、DTP 浓度)对水体 $p\text{CO}_2$ 的浓度变化至关重要,它们一方面促进水体中微生物的矿化作用使水体中 $\text{CO}_2$ 增多,另一方面促进水生植物的光合作用消耗 $\text{CO}_2$ ,本研究的结果表明 $p\text{CO}_2$ 与DTN和DTP浓度无显著相关关系,这可能是因为夏季光照充足且水温较高极大促进了水生植物的光合作用使其与矿化和呼吸作用所产生的 $\text{CO}_2$ 相互抵消。DOC大部分来自与土壤有机质(DOM)的分解产物或者人类生产活动中所产生的有机废物,另一部分来自于浮游生物的代谢过程<sup>[25]</sup>,是河流水体中 $\text{CO}_2$ 的主要碳源之一。本研究发现



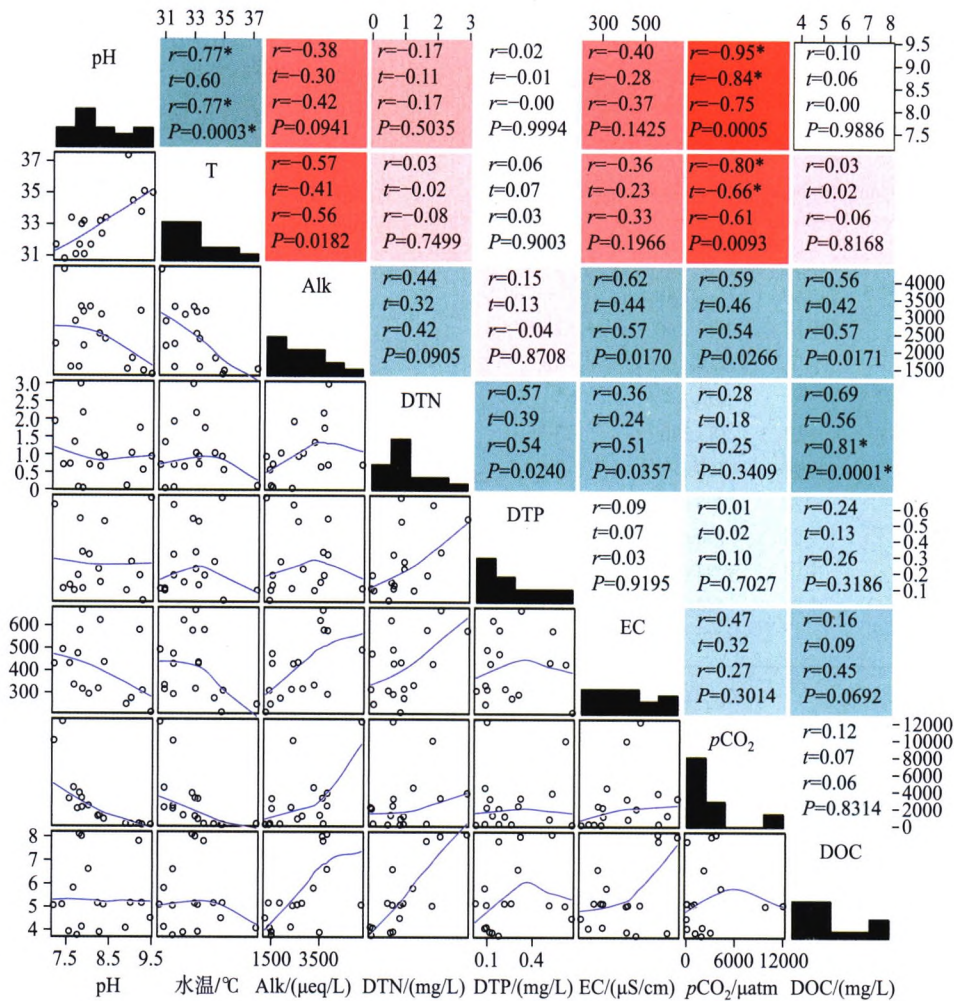


图 4 环境因子相关关系矩阵  
(空白处表示无显著相关性, \*、\*\* 和 \*\*\* 代表的显著性差异水平分别为  $P<0.05$ 、 $P<0.01$  和  $P<0.001$ ;  
· 右上部分数字代表相关系数;左下部分为两因子间的散点图;对角线为各因子的频数统计图)

Fig.4 Correlation matrix of environmental factors

pCO<sub>2</sub>与 DOC 浓度无明显的相关性,主要归因于人为活动的影响弱化了其相关关系.

3.2 城镇化梯度对河流理化性质及 pCO<sub>2</sub>的影响

河流中 N、P 形态及浓度受到人类生产生活活动和其他环境因素的影响. 耕地和建设用地较其他土地利用方式而言更易产生非点源污染. 耕地区域, 农药、无机肥料和有机肥的施用是提高当地作物产量的主要因素. 传统的农业活动增加了土壤侵蚀的风险, 此外, 如过度施肥能导致非点源污染通过地表径流进入地表水. 在旱季, 城市土地与许多水质参数呈正相关(例如 DTP、氨氮). 降水期间, 建设用地上的非点源污染(如有机化合物、重金属和多种来源的养分)从不透水表面流入河流进而影响河流水体的理化性质<sup>[26]</sup>. 本研究中, 有 61% 的样点 N:P 化学计量比低于 16:1<sup>[27]</sup>, 这说明大部分水体的营养盐限制元素为 N 元素. 对不同河流的 DTN 和 DTP 进行比较, 表明汝溪河的 DTN 和 DTP 均处于最低的水平, 其 DTN 达到Ⅱ类地表水标准, DTP 为Ⅲ类地表水标准;南河 DTN 为Ⅳ类地表水标准, DTP 为Ⅲ类;桃花溪的 DTN 浓度远高于其他 2 条河流, DTN 为Ⅴ类地表水标准, DTP 为Ⅳ类, 此结果也与各河流的城镇化梯度趋势一致. 此外, 受城镇化污染输入的影响, 桃花溪的 EC 和 DOC 浓度均值也显著大于其他 2 条河流.

通过对三峡库区城镇化梯度下典型河流的研究发现城镇化强度较高的河流 pCO<sub>2</sub> 更高, 其中汝溪河和南

河的  $p\text{CO}_2$  沿水流方向也呈升高趋势, 表明外源输入会导致河流原位呼吸增强进而使河流  $p\text{CO}_2$  增加. 这一结果与吴学谦等夏季在三峡库区范围内草堂河的研究结果一致<sup>[4]</sup>. 虽然  $p\text{CO}_2$  在不同河流间与同一河流上下游的不同站点均对城镇化梯度产生响应, 但本研究仅以土地利用组成图定性描述了城镇化梯度, 进一步的研究将会量化城镇化梯度以期更准确地揭示  $p\text{CO}_2$  与城镇化梯度的定量关系; 此外, 城镇化梯度对  $p\text{CO}_2$  的影响机制及关键生物地球化学过程极其复杂, 其作用机理以及与气象、水文地质等条件交叉产生的影响仍需深入的研究.

表 1 世界河流水体  $p\text{CO}_2$  比较\*  
Tab.1 Comparison of  $p\text{CO}_2$  in the world rivers

水体名称	所属国家	$p\text{CO}_2/\mu\text{atm}$	建设用地占比/%
St. Lawrence <sup>[28]</sup>	加拿大	~1300	—
黄河 <sup>[29]</sup>	中国	790~1600	2.25
龙川江 <sup>[16]</sup>	中国	860~1600	0.5
欧洲河流 <sup>[30]</sup>	—	125~9425	—
猫跳河 <sup>[31]</sup>	中国	38~3300	3.86
亚马逊河 <sup>[32]</sup>	巴西	4350±1900	—
南河	中国	2006±3546	3.36
汝溪河	中国	1790±1210	0.6
桃花溪	中国	4094±4218	12.43
大宁河 <sup>[33]</sup>	中国	483±294	0.44
全世界河流 <sup>[34]</sup>	—	679~9475	—

\*—表示无相关数据.

3.3 与其他河流  $p\text{CO}_2$  比较

表 1 表明全球大部分河流水体中的  $p\text{CO}_2$  大于大气中的  $\text{CO}_2$  浓度, 总体表现为碳源. 一般地, 热带河流、亚热带河流、温带河流的  $p\text{CO}_2$  呈现依次递减的趋势. 我们的研究表明在一个区域内, 城镇化可以明显增加河流  $p\text{CO}_2$ , 主要归因于城镇化进程中人类生产活动过程中向水体输入的营养元素、有机质等增强了河流的原位呼吸. 此外, 本研究中的 3 条河流位于亚热带区域, 较同区域的其他河流的  $p\text{CO}_2$  高. 但在大尺度上, 城镇化占比和河流  $p\text{CO}_2$  并未表现出明显的正相关关系, 主要是由于河流  $p\text{CO}_2$  的影响因素极其复杂.

4 结论

- 1) 三峡库区典型城镇化河流水体中的  $p\text{CO}_2$  高于大气中的  $\text{CO}_2$  浓度, 呈现  $\text{CO}_2$  源.
- 2) 研究区域内, 城镇化强度越高的河流具有高的营养盐、有机质浓度及  $p\text{CO}_2$ , 表明人类活动与土地利用方式的改变极大地改变了河流生态系统的碳循环过程.
- 3) 南河和汝溪河的  $p\text{CO}_2$  沿上游至下游显著升高, 主要归因于下游高的营养物质及有机碳的输入增加了河流的原位呼吸. 研究不同城镇化梯度下  $p\text{CO}_2$  的变化规律对城镇化进程中的河流碳循环尤其是  $\text{CO}_2$  释放的评估具有突出的科学意义.

致谢: 感谢中国科学院重庆绿色智能技术研究院生态水文研究中心的各位老师在本研究样品采集和分析过程中给予的支持和帮助.

5 参考文献

[ 1 ] Cole JJ, Prairie YT, Caraco NF *et al.* Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 2007, **10**: 172-185. DOI: 10.1007/s10021-006-9013-8.

[ 2 ] Fearnside PM. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **133**(1): 69-96. DOI: 10.1023/A:1012971715668.

[ 3 ] Wang X, Yuan X, He YX *et al.*  $p\text{CO}_2$  and  $\text{CO}_2$  fluxes of the metropolitan river network in relation to the urbanization of Chongqing, China. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2017, **122** (3): 470-486. DOI: 10.1002/2016JG003494.

[ 4 ] Wu XQ, Cao M, Fu JN *et al.* Partial pressure and diffusion flux of carbon dioxide in summer main stream and tributary (Caotang River) of the Three Gorges Reservoir. *Journal of Shanghai University: Natural Science*, 2015, **21**(3): 311-318. [ 吴学谦, 操满, 傅家楠等. 三峡水库夏季干流、支流(草堂河)水体的二氧化碳分压及扩散通量. 上海大学学报: 自然科学版, 2015, **21**(3): 311-318. ]

[ 5 ] Cole JJ, Caraco NF. Carbon in catchments: Connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism. *Marine Freshwater Research*, 2001, **52**: 101-110. DOI: 10.1071/mf00084.

- [ 6 ] Field CB, Raupach MR. The global carbon cycle: Integrating humans, climate, and the natural world. *Global Carbon Cycle Integrating Humans Climate & the Natural World*, 2004, **62**(6): 2389-2390.
- [ 7 ] Zhang LJ, Xu XM, Wen ZC *et al.*  $p\text{CO}_2$  control factors and water-gas interface flux of the Yellow River in autumn. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(2): 227-235. [ 张龙军, 徐雪梅, 温志超等. 秋季黄河  $p\text{CO}_2$  控制因素及水-气界面通量. 水科学进展, 2009, **20**(2): 227-235. ]
- [ 8 ] Raymond PA, Hartmann J, Lauerwald R *et al.* Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature*, 2013, **503**(7476): 355-359. DOI:10.1038/nature12760.
- [ 9 ] Li SY, Lu XX, Bush RT *et al.*  $\text{CO}_2$  partial pressure and  $\text{CO}_2$  emission in the lower Mekong river. *Journal of Hydrology*, 2013, **540**: 40-56. DOI:10.1016/j.jhydrol.2013.09.024.
- [ 10 ] Yao G, Gao Q, Wang Z *et al.* Dynamics of  $\text{CO}_2$ , partial pressure and  $\text{CO}_2$ , outgassing in the lower reaches of the Xijiang Rive, a subtropical monsoon river in China. *Science of the Total Environment*, 2007, **376**(1/2/3): 255-266. DOI:10.1016/j.scitotenv.2007.01.080.
- [ 11 ] Li SY, Ni MF, Mao R *et al.* Riverine  $\text{CO}_2$ , supersaturation and outgassing in a subtropical monsoonal mountainous area (Three Gorges Reservoir Region) of China. *Journal of Hydrology*, 2018, **558**: 460-469. DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.01.057.
- [ 12 ] Ni MF, Li SY, Luo JC *et al.*  $\text{CO}_2$  partial pressure and  $\text{CO}_2$  degassing in the Daning River of the upper Yangtze River, China. *Journal of Hydrology*, 2019, **569**: 483-494. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.017.
- [ 13 ] Li Z, Bai L, Guo JS *et al.* Comparison of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , fluxes at water-gas interface between two tributaries of three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1008-1016. [ 李哲, 白镭, 郭劲松等. 三峡水库两条支流水-气界面  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  通量比较初探. 环境科学, 2013, **34**(3): 1008-1016. ]
- [ 14 ] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods eds. *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [ 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. ]
- [ 15 ] Gong P, Liu H, Mei N *et al.* Stable classification with limited sample: transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017. *Science Bulletin*, 2019, **64**(6): 370-373. DOI:10.1016/j.scib.2019.03.002.
- [ 16 ] Li SY, Lu XX, He M *et al.* Daily  $\text{CO}_2$  partial pressure and  $\text{CO}_2$  outgassing in the upper Yangtze River basin: a case study of the Longchuan Rive, China. *Journal of Hydrology*, 2012, **466**: 141-150. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.08.011.
- [ 17 ] Zhao S, Liu S, Zhou D *et al.* Prevalent vegetation growth enhancement in urban environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, **113**(22): 6313-6318. DOI:10.1073/pnas.1602312113.
- [ 18 ] Li SY, Zhang QF. Partial pressure of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CO}_2$  emission in a monsoon-driven hydroelectric reservoir (Danjiangkou Reservoir), China. *Ecological Engineering*, 2014, **71**: 401-414. DOI:10.1016/j.ecoleng.2014.07.014.
- [ 19 ] Cheng BH, Hao QJ, Jiang CS. Research progress of greenhouse gas emission and its influencing factors in reservoir. *Wetland Sci*, 2012, **10**(1): 121-128. [ 程炳红, 郝庆菊, 江长胜. 水库温室气体排放及其影响因素研究进展. 湿地科学, 2012, **10**(1): 121-128. ]
- [ 20 ] Schrier-Uijl AP, Veraart AJ, Leffelaar PA *et al.* Release of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry*, 2011, **102**(1-3): 265-279. DOI:10.1007/s10533-010-9440-7.
- [ 21 ] Stadmark J, Leonardson L. Emissions of greenhouse gases from ponds constructed for nitrogen removal. *Ecological Engineering*, 2005, **25**(5): 542-551. DOI:10.1016/j.ecoleng.2005.07.004.
- [ 22 ] Jacinthe PA, Filippelli GM, Tedesco LP *et al.* Carbon storage and greenhouse gases emission from a fluvial reservoir in an agricultural landscape. *Catena*, 2012, **94**: 53-63. DOI:10.1016/j.catena.2011.03.012.
- [ 23 ] Guo JS, Jiang T, Li Z *et al.* Diurnal variation characteristics of  $p\text{CO}_2$  in the summer water column of Gaoyang backwater area in Pengxi River, Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 190-196. DOI: 10.18307/2012.0204. [ 郭劲松, 蒋滔, 李哲等. 三峡水库澎溪河流域高阳回水区夏季水体  $\text{CO}_2$  分压日变化特性. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 190-196. ]
- [ 24 ] Natchimuthu S, Selvam BP, Bastviken D *et al.* Influence of weather variables on methane and carbon dioxide flux from a shallow pond. *Biogeochemistry*, 2014, **119**(1-3): 403-413. DOI: 10.1007/s10533-014-9976-z.



- [25] Guo JS, Li W, Li Z *et al.* Spring primary productivity in Xiaojiang River backwater area in the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci.*, 2011, **23**(4): 591-596. DOI: 10.18307/2011.0415. [郭劲松, 李伟, 李哲等. 三峡水库小江回水区春季初级生产力. 湖泊科学, 2011, **23**(4): 591-596.]
- [26] Zhang J, Li SY, Dong RZ *et al.* Influences of land use metrics at multi-spatial scales on seasonal water quality: A case study of river systems in the Three Gorges Reservoir Area, China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **206**(76-85). DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.09.179.
- [27] Passow U. Transparent exopolymer particles (TEP) in aquatic environments. *Progress in Oceanography*, 2002, **55**(3): 287-333. DOI: 10.1016/S0079-6611(02)00138-6.
- [28] Hélie JF, Hillaire MC, Rondeau B *et al.* Seasonal changes in the sources and fluxes of dissolved inorganic carbon through the St. Lawrence River—Isotopic and chemical constraint. *Chemical Geology*, 2002, **186**(1/2): 117-138. DOI: 10.1016/S0009-2541(01)00417-x.
- [29] Ran L, Lu XX, Yang H *et al.* CO<sub>2</sub> outgassing from the Yellow River network and its implications for riverine carbon cycle. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, **120**(7): 1334-1347.
- [30] Frankignoulle M. Carbon dioxide emission from European estuaries. *Nature*, 1998, **282**: 434-436. DOI: 10.1126/science.282.5388.434.
- [31] Wang F, Wang B, Liu CQ *et al.* Carbon dioxide emission from surface water in cascade reservoirs-river system on the Maotiao River, southwest of China. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(23): 3827-3834. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2011.04.014.
- [32] Müller D, Warneke T, Rixen T *et al.* Lateral carbon fluxes and CO<sub>2</sub> outgassing from a tropical peat-draining river. *Biogeosciences*, 2015, **12**(20): 5967-5979. DOI: 10.5194/bg-12-5967-2015.
- [33] Li SY, Mao R, Ma YM *et al.* Gas transfer velocities of CO<sub>2</sub> in subtropical monsoonal climate streams and small rivers. *Biogeosciences*, 2019, **16**: 681-693. DOI: 10.5194/bg-16-681-2019.
- [34] Cole JJ, Caraco NF. Carbon in catchments: Connecting terrestrial carbon losses with aquatic metabolism. *Marine Freshwater Research*, 2001, **52**: 101-110. DOI: 10.1071/mf00084.