

## 流域场镇发展下三峡水库典型入库河流水体碳、氮、磷时空特征及富营养化评价\*

龚小杰<sup>1,2</sup>, 王晓锋<sup>1,2</sup>, 刘婷婷<sup>1,2</sup>, 袁兴中<sup>1,2,3\*\*</sup>, 孔维苇<sup>1,2</sup>, 刘欢<sup>1,2</sup>

(1: 长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室, 重庆 401331)

(2: 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331)

(3: 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400030)

**摘要:** 流域场镇式发展是三峡地区城乡统筹发展的重要模式, 通常形成河流两岸串珠状的场镇分布格局, 这种人类活动的点状聚集特征对入库河流水环境的综合影响并不清楚. 选择三峡库区流域场镇发展特征明显的黑水滩河及主要支流为研究对象, 于2014年9月至2015年6月期间对流域内分布的主要场镇前后的水体进行碳、氮、磷浓度的监测分析, 探讨场镇分布对流域水体生源要素时空格局的影响. 研究结果表明, 黑水滩河干、支流水体总有机碳(TOC)和溶解性有机碳浓度为4.5~39.2和3.2~31.4 mg/L, 总氮(TN)、铵态氮和硝态氮浓度范围为1.12~6.96、0.87~5.00和0.073~0.881 mg/L, 总磷(TP)、溶解性总磷和正磷酸盐浓度范围为0.078~0.454、0.049~0.310和0.025~0.222 mg/L, 不同形态的碳、氮、磷含量变化幅度较大; 黑水滩河干、支流流经不同场镇区前后, 水体各形态碳、氮、磷浓度均不同程度增加(其中TOC、TN和TP的增幅范围分别为4.7%~61.3%、26.7%~144.7%和12.8%~50.7%), 而在无场镇分布的干流河段, 水体碳浓度变化不大, 氮、磷浓度明显降低, 表明水体生源要素的空间变异特征受到流域场镇分布格局与河流自净能力的双重影响, 导致黑水滩河干流自上游向下游碳浓度呈“阶梯式”增长, 氮、磷浓度呈“波动式”增长; 相关分析显示, 流域水体碳、氮、磷浓度均呈极显著的正相关关系, 即场镇发展模式下河流水体污染物呈同步变化的趋势, 表明山地河流流域内串珠状场镇发展模式导致从上游向下游水体污染物呈明显的累积效应, 并进一步超出水体自净能力, 造成下游水体恶化. 河流碳、氮、磷浓度的季节变化主要受径流稀释作用影响, 表现为夏秋季低、春季高的模式; 富营养化综合指数表明, 黑水滩河各监测断面全年属于富营养状态以上, 表层水体氮污染严重, 磷污染较轻; 初步估算黑水滩河每年向三峡水库输入TOC、TN、TP通量达4057、1001和47 t, 对三峡水库水环境安全具有严重威胁. 三峡库区沿河串珠状场镇式发展形成了一种“点一面”双重特征的污染模式, 未来河流水体环境污染防控中应予以关注.

**关键词:** 场镇发展; 黑水滩河; 碳、氮、磷; 时空特征; 富营养化评价

## Spatial-temporal characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in a typical river of Three Gorges Reservoir under the development of field towns\*

GONG Xiaojie<sup>1,2</sup>, WANG Xiaofeng<sup>1,2</sup>, LIU Tingting<sup>1,2</sup>, YUAN Xingzhong<sup>1,2,3\*\*</sup>, KONG Weiwei<sup>1,2</sup> & LIU Huan<sup>1,2</sup>

(1: Chongqing Key Laboratory of Wetland Science Research of the Upper Yangtze River, Chongqing 401331, P.R.China)

(2: College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, P.R.China)

(3: Faculty of Architecture and Urban Planning, Chongqing University, Chongqing 400030, P.R.China)

**Abstract:** As an important urban and rural development model in the three gorges reservoir area, watershed field town development model along the river has been widely popularized, and brought a series of the complex influences of the point-like aggregation pat-

\* 2019-04-26 收稿; 2019-06-18 收修改稿.

国家自然科学基金项目(41807321)、重庆市基础研究与前沿探索项目(CSTC2018JCYJAX0672)、重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201800530)和重庆师范大学博士科研启动项目(17XLB023)联合资助.

\*\* 通信作者; E-mail: 1072000659@qq.com.

tern for human activities on the river water environment. In this study, the Heishuitan River and its main tributaries, which are featured with obviously field town development in the basin, were selected to carry out an investigation regarding carbon, nitrogen and phosphorus concentrations in surface water from September, 2014 to June, 2015, for discussing the influence of field towns distribution on the temporal and spatial patterns of water biogenic element in the basin. Results showed that, the concentrations of TOC and DOC in the water of main stream and tributaries were 4.5–39.2 and 3.2–31.4 mg/L, and TN,  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N were 1.12–6.96, 0.87–5.00 and 0.073–0.881 mg/L, while the ranges of TP, DTP and  $\text{PO}_4^{3-}$ -P concentrations are of 0.078–0.454, 0.049–0.310 and 0.025–0.222 mg/L. All of the biogenic elements in the water presents a significantly spatiotemporal variability. The concentrations of carbon, nitrogen and phosphorus increased in certain extent when the water flowed through different towns, with the increasing range of the TOC, TN and TP of 4.7%–61.3%, 26.7%–144.7% and 12.8%–50.7%, respectively. Meanwhile, the water flowed through non-town reaches, the carbon concentrations of the main stream had no significant changes, and nitrogen and phosphorus concentrations were significantly reduced, indicating that the spatial variation characteristics of water biogenic elements (C, N and P) were co-regulated by the distribution pattern of the watershed towns and its self-purification capacity, and resulting that the carbon concentrations in the main stream increased “stepwise” from the upstream to the downstream. While the nitrogen and phosphorus content showed a “fluctuation” growth trend; correlation analysis shows that the concentrations of carbon, nitrogen and phosphorus were significantly related with each other, suggested that the nutrient contents had a synchronous change trend under the development mode of the towns. This study highlights that the bead-like field towns development pattern in mountain river basin would lead an obvious synchronous accumulation of pollutants from the upstream to the downstream, and then beyond the self-purification capacity of river water. In addition, the seasonal variation of carbon, nitrogen and phosphorus concentrations in rivers were mainly affected by runoff dilution, and resulting a pattern of lower concentrations in summer and autumn, and higher in spring. The eutrophication comprehensive index indicates that the monitoring sections of the Heishuitan River were above eutrophication status, and the surface water body has serious nitrogen pollution and light phosphorus pollution. Roughly estimation of the annual input flux of TOC, TN and TP from Heishuitan River to Three Gorges Reservoir amounts to 4057, 1001 and 47 t, which poses a serious threat to the water environment security. The bead-like field town development along the river, forming a specific pollution pattern with “point-surface” dual attributes and threatening the water environment safety of the Three Gorges Reservoir, should be concerned in the future.

**Keywords:** Field town development; Heishuitan River; carbon, nitrogen and phosphorus; spatial-temporal characteristics; eutrophication assessment

碳、氮、磷是自然界最基本的生源要素,人类活动(工业生产、农业活动、城市扩张以及生活污水排放等)已经对自然生态系统的生源要素特征产生了重要影响. 河流作为连接陆域与水域的关键通道,在全球碳、氮、磷的输移和转化过程中发挥着至关重要的作用,也是受人类活动影响最严重的生态系统之一<sup>[1]</sup>. 人类活动导致河流碳、氮、磷输入增加,并在下游湖泊、水库、河口、近海等区域不断累积,造成了全球范围的水体富营养化和营养结构改变,成为 21 世纪最具挑战的生态环境问题<sup>[2-4]</sup>. 河流水体中生源要素的积累主要是流域内面源污染、点源污染及水体内部的生物吸附等等. 近 30 年来,不同研究者从点源控制、面源削减、过程调控、出口截留等方面对河流污染开展了大量研究,并取得了一系列成效<sup>[5-8]</sup>. 然而,随着由于城市化、农业活动以及城镇—农业过渡过程中陆域人类活动的不断变化,河流污染过程愈加复杂,影响河流自身的生态功能. 河流在越来越强烈的“人为—自然”二元干扰下,水体碳、氮、磷的分布特征及控制方面仍然存在来源解析、生物地球化学过程分析、要素的生物转化以及不同形式人类活动强度下的环境阈值等一系列基础问题尚不清楚.

近年来,大量学者关注城市河流水体碳、氮、磷污染特征以及流域城市化的综合影响. Sickman 等<sup>[9]</sup>对 Sacramento 河流域城市化对有机质负荷的影响研究中,城市径流中总有机碳(TOC)浓度远高于 Sacramento 河自然河段,流域城市化带来的综合 TOC 输入对下游河流水体年负荷贡献达 17%;我国学者从河网尺度探讨了重庆<sup>[10-11]</sup>、天津<sup>[8]</sup>、嘉兴<sup>[12]</sup>等地区城市化带来的水体氮、磷综合污染特征. 上述研究均肯定了城市发展对河流水体氮、磷污染的影响. 随着城市污水处理能力的不断提高、城市河流生态治理技术的发展以及我国河长制全面推行,城市河流氮、磷的污染在一定程度上得到了缓解. 但在全球城市化进程不断加快的背景下,流域人类活动对河流生源要素(碳)的影响研究仍是水环境治理的基础<sup>[13]</sup>. 与城市影响的面状特征不

同,近年来,随着我国城乡统筹发展战略的实施,流域城镇化速度较快,但薄弱的污水处理能力及流域土地类型的显著变化,导致小流域水体氮、磷污染进一步加剧<sup>[14]</sup>,但关于城镇发展的综合影响研究并不多。作为三峡地区(特别是重庆地区)城镇发展的重要模式,场镇式发展近年来受到广泛推广<sup>[15]</sup>。场镇式发展多是在三峡库区众多支流沿河建镇,导致这些河流两岸形成串联的多级城镇分布,而这种模式导致人类活动压力的点状聚集,可能对河流水体碳、氮、磷含量造成不可预测的累积影响,形成了一种具有“点-面双重特征”的污染过程,对三峡水库的水环境安全造成威胁。流域“串珠状”场镇的分布格局也可能对河流的自净能力产生连续胁迫,威胁整个河流生态系统的健康。然而,目前大多数研究仍集中在城市或工业污染严重的河段,对流域串联场镇分布特征与水体生源要素碳、氮、磷污染的失控关系的研究并不多见,导致这种特殊的人类活动空间模式的环境影响也被忽视。

重庆市是三峡库区的腹心区,近年来经济快速发展,成为我国城市化进程最快的区域之一,对三峡库区水环境安全具有重要影响。据统计,重庆市主要次级河流水质均高于《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅴ类水标准<sup>[16]</sup>,王晓锋等<sup>[17]</sup>对主城区梁滩河的研究中,指出水体全年TN浓度均远高于地表水劣Ⅴ类水标准,大部分监测断面TP浓度属Ⅴ~劣Ⅴ类。黑水滩河是重庆主城区受城市化影响较弱的次级支流,属嘉陵江左岸的一级支流。但近年来,受重庆主城区经济发展和城乡统筹发展规划的带动,黑水滩河流域内原本分布的众多小型场镇迅速发展,形成一系列点状污染源,对其自身及三峡水库水环境安全造成一定威胁。为了研究流域场镇发展对河流水环境,特别是水体碳、氮、磷生源要素的潜在影响及可能的累积效应,本研究以重庆市黑水滩河为研究对象,对流域内主要场镇前后的河流断面表层水体进行一个完整水文年的监测,分析了场镇分布对河流水体不同形态的碳、氮、磷含量的时空特征的影响,并采用对数型幂函数普适指数公式计算水体富营养化评价综合指数,得出黑水滩河水体的营养状态,估算了黑水滩河对三峡水库生源要素的输入特征,以期为三峡水库水环境保护等提供科学支撑,为研究人类活动影响下水生态过程提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域

黑水滩河位于重庆市北碚区,属于三峡水库一级支流嘉陵江的二级支流,黑水滩河干流全长68 km,流域面积328 km<sup>2</sup>,多年平均流量5.55 m<sup>3</sup>/s,年径流总量1.75×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>。干流发源于华蓥山宝顶南坡华秦乡华云村,流经北碚区金刀峡镇、三圣镇、复兴镇,在水土镇东南狮子口注入嘉陵江(图1)。流域内有柳荫河、静观河两条主要支流,分别流经重庆市北碚区柳荫镇和静观镇。北碚区主要场镇均沿黑水滩河分布,在河流两岸形成一系列串珠状人类活动聚集点。黑水滩河属典型山地河流,河流比降较大,流速较快,流域内场镇多沿河分布,发展速度较快,且场镇规模从上游到下游依次提高,严重威胁河流水环境质量。流域处于亚热带季风气候区,雨热同季,雨量充沛,年均温度19.4℃,全年降雨量为1100 mm,85%降雨集中在5—10月。

### 1.2 采样断面布设与样品采集

根据流域场镇分布及水文特征,分别在黑水滩河干、支流流经不同场镇前、后设置采样断面,位置分别为:黑水滩河干流流经金刀峡镇前后(S<sub>1-1</sub>、S<sub>1-2</sub>)、三圣镇前后(S<sub>2-1</sub>、S<sub>2-2</sub>)、复兴镇前后(S<sub>3-1</sub>、S<sub>3-2</sub>)、水土镇前后(S<sub>3-2</sub>、S<sub>4</sub>);支流柳荫河流经柳荫镇前后(S<sub>5-1</sub>、S<sub>5-2</sub>);支流静观河流经静观镇前后(S<sub>6-1</sub>、S<sub>6-2</sub>),共设11个采样断面(图1),其中S<sub>4</sub>断面为黑水滩河河口。分别于2014年9月(秋季)、12月(冬季)和2015年3月(春季)、6月(夏季)进行黑水滩河干支流不同断面表层水样的采集。采样过程中,利用有机玻璃采样器采集500 mL表层水样装入塑料瓶中,每个采样断面采集河道中心和左右两侧1~2 m处3个重复样,所采集样品通过装有足够冰袋的保温箱低温保存后运回实验室后,置于4℃冰箱内,5 d内完成指标测定。现场采样时,利用校正的多参数水质分析仪Manta™2(Eureka Company, USA)测定原位表层水体水温、pH、电导率、叶绿素a、溶解氧(DO)和浊度(表1)。

### 1.3 监测指标与分析方法

本研究主要分析水体不同形态的碳、氮、磷的含量,包括TOC、溶解性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)、总氮(TN)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、正磷酸盐磷(PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P)。水样预处理

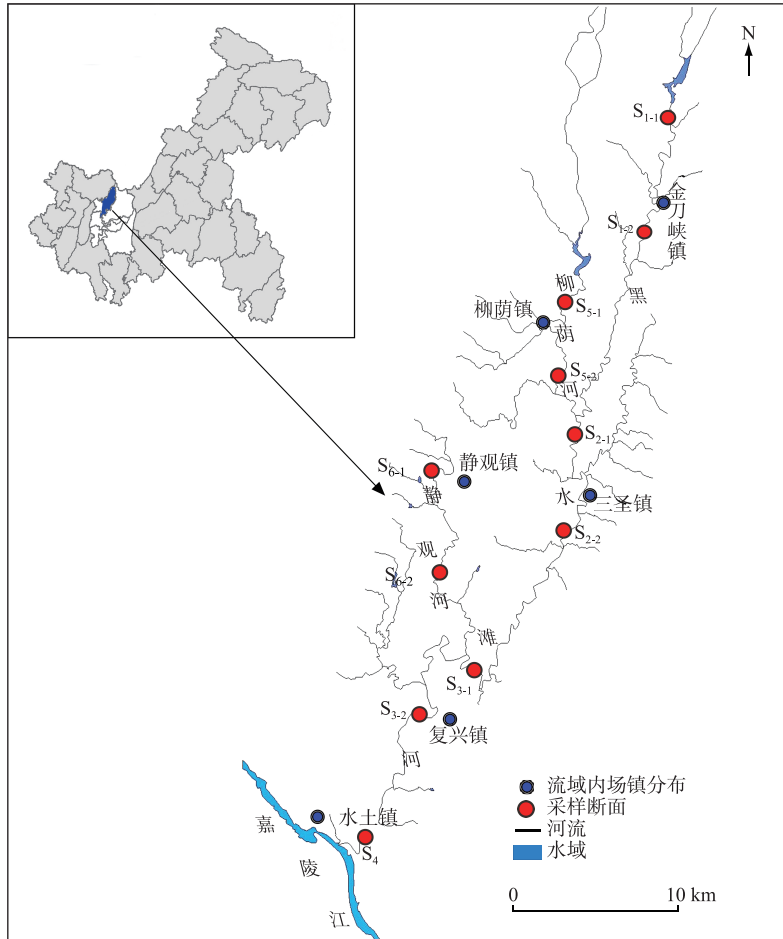


图1 嘉陵江黑水滩河采样断面分布

Fig.1 Sampling sites distribution in Heishuitan River, a branch of Jialingjiang River

理及分析参照国家相关标准方法<sup>[18]</sup>, TN 浓度采用过硫酸钾消解—紫外分光光度法测定;  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度用过  $0.45 \mu\text{m}$  微孔滤膜的水样直接进行紫外分光光度法测定;  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度的测定采用水杨酸—次氯酸盐分光光度法; TP 浓度采用过硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法测定; DTP 浓度用  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜抽滤水样进行硫酸钾消解—钼酸铵分光光度法测定;  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度测定用  $0.45 \mu\text{m}$  滤膜过滤水样直接进行钼酸铵比色; TOC、DOC 浓度分别用原水样和  $0.45 \mu\text{m}$  微孔滤膜抽滤的水样, 通过哈希 TOC 分析仪测定, POC 浓度通过 DOC 和 TOC 浓度的差值计算得到。

#### 1.4 数据分析

采用广泛适用于我国湖、库、河流水体富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式计算黑水滩河干、支流水体营养状态综合指数 (EI)<sup>[19-20]</sup>. 选取叶绿素 *a*、TP、TN、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、DO 作为评价指标, 并根据富营养状态各级分级标准 (贫营养:  $EI \leq 20$ ; 中营养:  $20 < EI \leq 39.42$ ; 富营养:  $39.42 < EI \leq 61.29$ ; 重富营养:  $61.29 < EI \leq 76.28$ ; 极富营养:  $76.28 < EI \leq 99.77$ ) 评价各监测断面水体营养状态, 公式如下:

$$EI_j = 10.77(\ln x_j)^{1.1826} \quad (1)$$

$$EI = \sum_{j=1}^n W_j \cdot EI_j \quad (2)$$

表 1 黑水滩河表层水体基本理化指标的时空分布

Tab.1 Spatial and temporal distribution of basic physical and chemical indexes of surface water in Heishuitan River

理化指标	季节	黑水滩河							柳荫河		静观河	
		S <sub>1-1</sub>	S <sub>1-2</sub>	S <sub>2-1</sub>	S <sub>2-2</sub>	S <sub>3-1</sub>	S <sub>3-2</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5-1</sub>	S <sub>5-2</sub>	S <sub>6-1</sub>	S <sub>6-2</sub>
水温/°C	秋季	21.7	22.1	22.3	26.4	25.2	25.6	26.6	26.3	26.3	24.3	25.4
	冬季	13.6	14.3	14.6	15.1	15.4	15.2	15.3	14.6	15.2	14.2	14.6
	春季	13.6	13.3	15.6	17.8	17.8	19.8	19.0	15.7	17.3	16.8	17.1
	夏季	19.2	18.9	20.2	22.2	23.3	22.7	22.9	22.3	23.1	19.6	21.2
pH	秋季	8.4	8.2	8.1	8.1	8.0	8.1	8.3	7.8	7.5	8.4	8.1
	冬季	8.5	8.5	8.3	8.2	8.0	8.3	8.2	8.3	7.9	8.6	8.0
	春季	8.7	8.5	8.3	8.2	8.1	9.0	8.4	8.1	7.7	8.2	8.2
	夏季	8.2	8.5	8.4	8.3	8.2	8.3	7.9	8.2	7.9	8.4	8.3
电导率/(μS/cm)	秋季	519	919	632	766	697	814	822	489	502	358	586
	冬季	587	1000	699	771	687	869	938	491	553	418	628
	春季	628	1280	898	1236	960	1100	1183	543	636	405	634
	夏季	525	1158	597	677	552	742	799	450	586	398	565
叶绿素 a/(μg/L)	秋季	3.2	3.8	3.3	4.4	4.2	29.7	44.9	1.9	5.1	1.9	3.3
	冬季	1.2	1.2	1.4	2.5	3.3	13.6	11.1	3.3	10.1	1.0	1.3
	春季	1.2	0.9	1.6	2.2	1.3	22.0	26.3	6.3	7.7	1.0	1.3
	夏季	0.5	0.6	1.0	3.6	2.5	2.8	2.4	1.3	11.2	2.1	2.2
溶解氧/(mg/L)	秋季	11.0	8.4	7.9	7.4	8.4	7.4	7.7	8.1	7.4	9.4	8.8
	冬季	10.9	9.9	9.4	8.4	8.8	9.7	8.2	9.9	7.5	8.9	8.6
	春季	11.7	9.8	8.9	8.3	8.1	12.3	7.2	8.6	7.2	10.7	6.8
	夏季	9.7	6.1	6.7	5.2	5.4	5.7	4.0	5.4	5.0	8.2	6.8
浊度/NTU	秋季	9.8	21.9	23.6	31.7	19.8	16.9	44.7	18.2	27.8	10.0	18.7
	冬季	6.4	10.6	13.8	36.4	11.0	12.5	11.1	13.8	30.1	14.6	16.5
	春季	5.8	12.8	16.6	24.0	13.6	44.1	7.3	11.7	17.0	17.1	15.4
	夏季	7.9	12.2	13.4	52.9	19.9	43.2	59.0	27.0	45.5	19.7	16.7

式中,  $EI_j$  为指标  $j$  的富营养化评价普适指数,  $x_j$  为指标  $j$  的“规范值”, 计算方法见文献[20];  $W_j$  为指标  $j$  的归一化权重值, 本研究将各指标视作等权重。

利用三峡库区次级河流平水期流量与污染物浓度, 估算黑水滩河碳、氮、磷对三峡水库的输入负荷, 其计算公式<sup>[21]</sup>为:

$$\text{污染物负荷}(\text{g/s}) = \text{污染物浓度}(\text{mg/L}) \times \text{流量}(\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

研究原始数据均在 Excel 2010 中进行标准化处理与计算, 应用 SPSS 19 (SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行统计分析, 所有统计显著性水平为  $P < 0.05$ 。所有制图均采用 Excel 2010 和 Sigmaplot12.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 碳、氮、磷含量分布

2.1.1 河流不同形态碳浓度的时空分布特征 黑水滩河干、支流水体 TOC、DOC 和 POC 的浓度范围分别为 4.5~39.2、3.2~31.4 和 0.87~7.78 mg/L (平均值分别为 17.23±8.6、14.0±7.1 和 3.26±1.29 mg/L), 流域内 3 种碳形态浓度均有较大的变异, 而且在场镇前后均有不同程度的增长 (图 2a), 增幅范围为 4.7%~61.3%、1.2%~57.5% 和 16.1%~84.1% (平均增幅达 33.8%、33.4% 和 37.4%) (图 3a)。从增幅分布图看, 金刀峡镇前后水体碳含量增幅较大, 其他场镇增幅相似, 可见场镇污染负荷具有一定相似性 (图 3a)。干流水体 TOC、DOC 和 POC 的浓度从上游向下游沿场镇分布呈现明显的阶梯增长 (图 2a), 表现出场镇影响的累积效应。水体碳含量季节变化不明显, 但总体上 TOC 和 DOC 在秋季 (19.6±9.7 和 16.1±8.3 mg/L) 略高, 春冬季 (枯水期) 次之, 夏季 (丰水期) 最低 (14.7±6.2 和 11.9±5.5 mg/L); POC 在春秋两季 (3.58±2.16 和 3.46±1.55 mg/L)

稍高于冬夏季( $3.18 \pm 1.71$  和  $2.84 \pm 1.02$  mg/L) (图 2b).

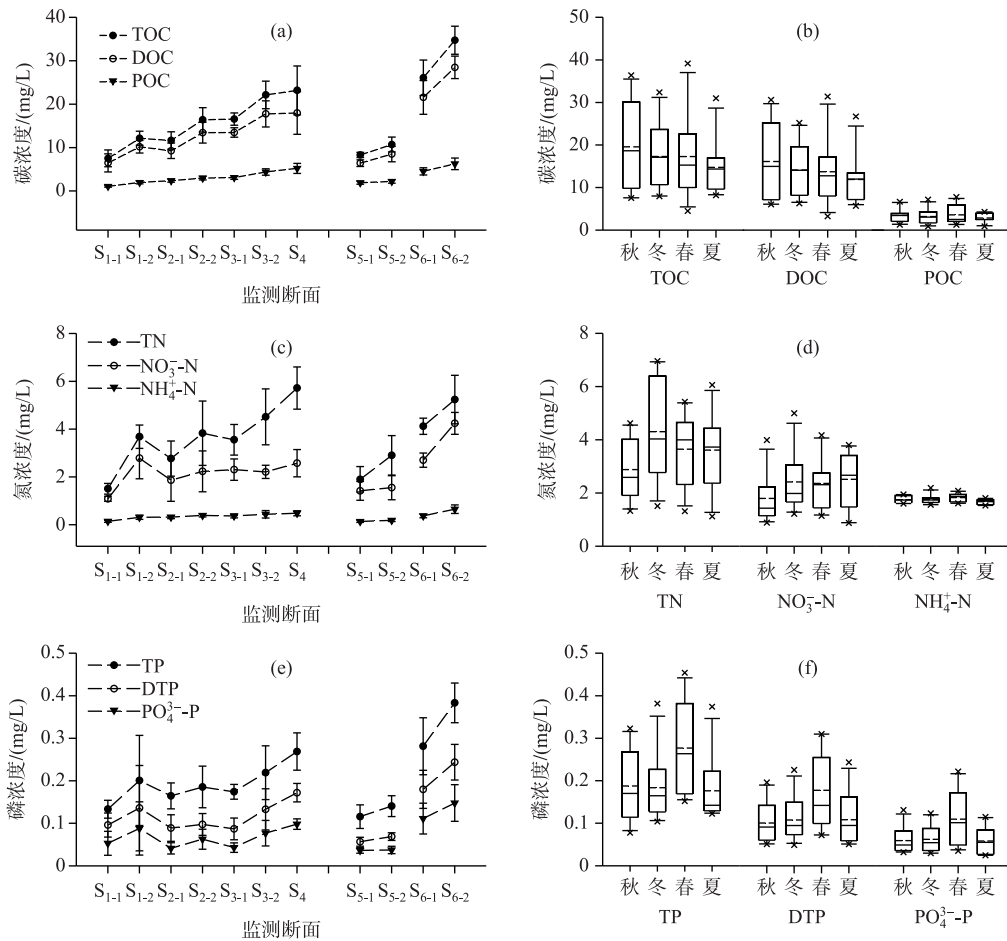


图 2 黑水滩河表层水体碳、氮、磷的时空分布 (箱图中实线为中位值, 虚线为均值)

Fig.2 Spatial and temporal distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in surface water of Heishuitan River (solid line is the median value in the box chart, and the dotted line is the mean value)

**2.1.2 黑水滩河氮浓度的时空变化特征** 随着流域场镇化发展加快, 流域内不断增强的人类活动改变水体氮素的组成, 导致氮素的过量输入, 影响水体代谢过程<sup>[14,22]</sup>. 黑水滩河流域水体 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度变化范围均较大 (分别为 1.12~6.96、0.87~5.00 和 0.073~0.881 mg/L), 年平均值分别为  $3.61 \pm 1.48$  mg/L、 $2.27 \pm 0.99$  和  $0.343 \pm 0.174$  mg/L, TN 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 污染较重, 大部分监测断面 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 均达到 II 类水标准, 这与多数城市河流污染特征不同. 干流上游至下游水体 TN 浓度呈阶梯状增长, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度在上游金刀峡镇前后明显增长后呈缓慢增长趋势 (图 2c), 说明场镇的分布对水体氮含量的影响可能主要是由于有机态和颗粒态氮, 而且黑水滩河自净能力对外源无机氮输入有明显的缓冲能力. 两条支流在流经场镇前后 TN 浓度均有明显增加, 且静观河 (S<sub>6</sub>) 水体 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的增幅均高于柳荫河 (S<sub>5</sub>), 前者流经黑水滩河流域第二大场镇, 城镇污水排放量大, 受无机氮污染显著, 而后者氮增加可能主要是由于有机氮输入. 除 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在流经复兴镇前后有微弱降幅以外, 其余断面水体 TN、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度均表现为场镇前后明显增长, 增幅达 26.7%~144.7%、9.3%~157.4% 和 9.5%~117.7% (图 3b), TN 污染从黑水滩河上游到下游呈现累积增长趋势. 黑水滩河流域水体不同形态氮浓度季节变化较明显 (图 2d), 其中 TN 浓度在冬季最高 ( $4.30 \pm 1.75$

mg/L),春夏季次之(3.65±1.27 和 3.62±1.36 mg/L),秋季最低(2.88±1.11 mg/L);而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度则在秋季(1.80±0.84 mg/L)明显低于其他季节(夏季:2.51±1.03 mg/L;冬季:2.41±1.02 mg/L;春季:2.36±0.92 mg/L). NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度季节上春季最高(0.439±0.178 mg/L),夏季最低(0.250±0.108 mg/L).

2.1.3 黑水滩河不同形态磷含量的时空分布 河流水体 TP 浓度范围为 0.078~0.454 mg/L(平均值为 0.206±0.091 mg/L),大部分监测断面浓度处于《地表水环境质量标准》Ⅲ~V 类水标准(图 2e). 与场镇前的断面相比,场镇后的 S<sub>1-2</sub>、S<sub>2-2</sub>、S<sub>3-2</sub>、S<sub>4</sub>、S<sub>6-2</sub>等断面表现为较高的 TP 浓度,其中 S<sub>6-2</sub>断面最高(0.383±0.047 mg/L),但由于河流自身的净化能力,导致干流上前一个场镇后与后一个场镇前相比 TP 浓度有明显降低,这导致黑水滩河及其支流从上游向下游水体 TP 浓度均呈明显的“波动式”增长. 这种空间规律也表明,流域沿河分布的序列场镇对河流自净能力造成了更大的压力. 黑水滩河干、支流水体 DTP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的浓度范围分别为 0.049~0.310 和 0.025~0.222 mg/L(平均值分别为 0.124±0.069 mg/L 和 0.072±0.046 mg/L),与 TP 浓度的空间分布规律基本一致. 在不同场镇前后数据对比,TP 浓度增幅范围为 12.8%~50.7%(平均增幅为 28.3%),DTP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 平均增幅达 31.7%和 43.5%(图 3c),可见场镇带来的磷负荷的增加主要是溶解性 P 的输入. 季节变化上,3 种不同形态磷浓度均在春季高于其他季节,秋冬季略高于夏季(图 2f),春季可能存在水华风险.

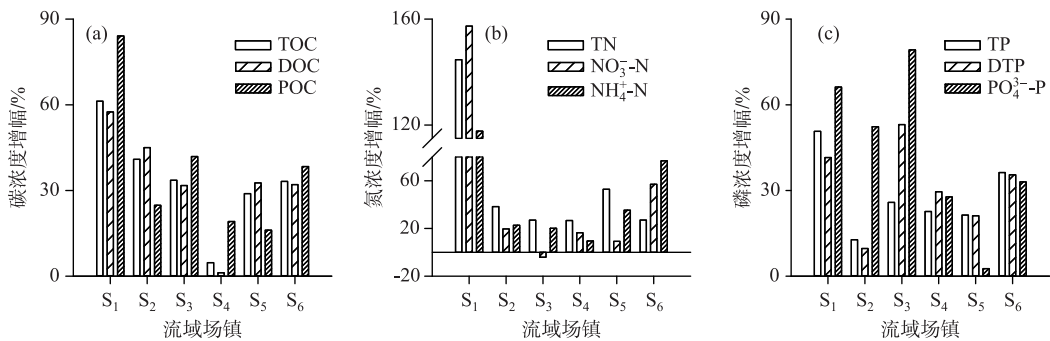


图 3 黑水滩河场镇前后碳、氮、磷各形态浓度增幅百分比

Fig.3 Increase percentage of carbon, nitrogen and phosphorus concentrations before and after the field town of Heishuitan River

## 2.2 场镇对水体碳、氮、磷分布的影响

黑水滩河流域内场镇密集分布,不同人类活动强度造成流经河流水体碳、氮、磷浓度空间分布差异明显,流域内各场镇常住人口分布不均,在一定程度上表征场镇规模大小及其人类活动强度. 为了更明确场镇大小对水体碳、氮、磷浓度的影响,本研究对场镇大小和生源要素在场镇前后的浓度变化进行回归分析,结果表明,除 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度与人口数量存在负相关外,其余皆呈正相关关系(图 4),其中碳、磷浓度随场镇人口增长率较高,氮相对较低,表明流域内场镇规模对水体碳、磷浓度的空间变异特征的解释量较高,是影响黑水滩河水体碳、磷浓度的关键因素.

## 2.3 黑水滩河碳、氮、磷输出特征

根据《中国河湖大典·长江卷》,黑水滩河河口断面多年平均流量为 5.55 m<sup>3</sup>/s(1.75×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>/a),利用河口 S<sub>4</sub>监测断面年平均浓度估算黑水滩河每年向三峡水库输入碳、氮、磷总量. 其中,TOC、TN 和 TP 输入通量分别为 128.7 g/s(4057 t/a)、31.7 g/s(1001 t/a)和 1.49 g/s(47 t/a). 此外,DOC 和 POC 输入通量分别为 99.8 g/s(3146 t/a)和 28.9 g/s(911 t/a),占 TOC 总输出量的 77.5%和 22.5%;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 与 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 输入通量分别为 14.3 g/s(450 t/a)和 2.7 g/s(83 t/a),占 TN 总输出量的 45.0%和 8.4%,表明无机氮输出以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 为主;DTP、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 输入通量分别为 0.96 g/s(30 t/a)和 0.54 g/s(17 t/a).

## 2.4 黑水滩河水体富营养化特征分析

黑水滩河干、支流各监测断面不同季节水体营养状态综合指数值(EI)的空间分布见图 5a. 流域内 EI 指数在不同季节之间变化较小,但空间变化显著(波动范围达 9.5~63.1). 依据对数型幂函数普适指数公式各



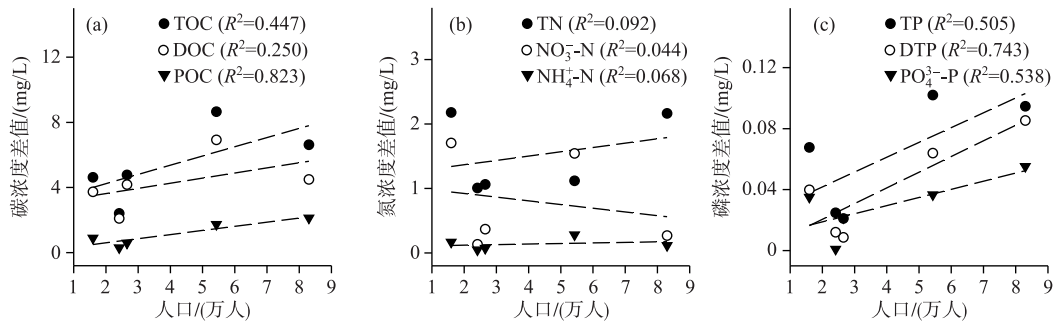


图4 黑水滩河碳、氮、磷浓度与人口数量的回归关系

Fig.4 Regression relationship between the increment of carbon, nitrogen and phosphorus concentrations in Heishuitan River and population quantity

级分级标准,黑水滩河干、支流水体全年属于富营养状态水平以上( $>39.42$ ),具有较高的富营养化风险.空间变化上,干流在 $S_{1-1}$ 断面 $EI$ 值最低,经过金刀峡镇之后 $EI$ 值迅速提高,随后呈“阶梯状”增长,每流经一个场镇,水体 $EI$ 指数都会有明显升高,直至河口达到最大,呈重富营养状态;而干流水体在没有场镇分布的河段( $S_{1-2} \sim S_{2-1}$ 、 $S_{2-2} \sim S_{3-1}$ ) $EI$ 变化不大甚至略有降低,表现出河流一定的自净能力.支流水体柳荫河 $EI$ 值低于静观河,且场镇前后水体 $EI$ 值显著增加.总体上 $EI$ 值变化与碳、氮、磷含量空间变化规律一致.

氮磷比(N/P)是评价河流水体营养盐的限制因子和浮游植物群落的调节因子,也是影响水体藻类水华暴发的重要指标<sup>[23]</sup>. Guildford等<sup>[24]</sup>提出的水中营养物限制性标准中, $N/P \leq 20$ (摩尔比,换算为质量比为9.0)为氮限制状态, $N/P \geq 50$ (摩尔比,换算为质量比为22.6)为磷限制状态,处于两者之间表明氮磷均可能是主要限制因子.计算结果表明,黑水滩河水体N/P变化范围为17.21~86.50,有4.5%属于氮限制状态,有27.3%属于磷限制状态,其余大部分均处在两者之间(图5b).干流水体N/P空间上除 $S_{1-1} \sim S_{1-2}$ 段有明显增长外,其他场镇分布对水体N/P影响并不显著,但总体上下游河段N/P略高于上游.季节变化对水体N/P影响较大,干流大多数断面冬、夏季高于春、秋季.

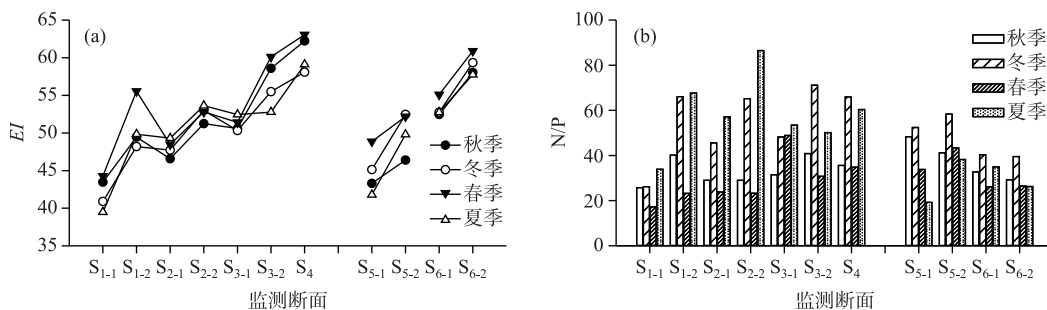


图5 水体富营养化评价综合指数值及氮磷比的变化

Fig.5  $EI$  values and nitrogen to phosphorus ratio of the water

尽管黑水滩河水体N/P分析均属于富营养状态,但调查中仅河口( $S_{3-2}$ 和 $S_4$ 断面)在春季出现水华,其他断面均未发现(表1).相关分析表明,叶绿素 $a$ 与水体TN、TP浓度均不显著,主要因为山地河流流速较快,不利于藻类的生长和繁殖,但一旦有流速缓慢的河段,则具有较高的发生水华的风险.水体各形态碳、氮、磷浓度均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ,表2),可见流域内水体碳、氮、磷的变化规律具有一致性,这可能与流域场镇的连续分布特征相关,且场镇的分布格局使得水体碳、氮、磷浓度呈现同步的累积效应.



表2 黑水滩河水体碳、氮、磷浓度及其他参数之间的 Pearson 相关性  
 Tab.2 Pearson correlation coefficients among carbon, nitrogen, phosphorus concentrations  
 and other parameters of the water in Heishuitan River

	DOC	POC	TN	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	TP	DTP	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P	水温	pH	电导率	叶绿素 <i>a</i>	DO
TOC	0.995 **	0.905 **	0.655 **	0.607 **	0.770 **	0.781 **	0.656 **	0.626 **	0.161	0.057	-0.018	0.296	-0.031
DOC	1.000	0.858 **	0.629 **	0.592 **	0.736 **	0.756 **	0.629 **	0.598 **	0.160	0.059	-0.035	0.264	-0.014
POC		1.000	0.692 **	0.602 **	0.826 **	0.794 **	0.689 **	0.668 **	0.150	0.044	0.054	0.398 **	-0.094
TN			1.000	0.707 **	0.691 **	0.589 **	0.525 **	0.477 **	-0.184	0.061	0.300 *	0.254	-0.189
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N				1.000	0.678 **	0.647 **	0.593 **	0.582 **	-0.147	0.152	0.150	-0.066	-0.175
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N					1.000	0.820 **	0.719 **	0.680 **	-0.055	0.153	0.366 *	0.321 *	0.069
TP						1.000	0.943 **	0.897 **	-0.122	0.212	0.218	0.191	0.114
DTP							1.000	0.958 **	-0.193	0.303 *	0.215	0.104	0.171
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P								1.000	-0.194	0.288	0.210	0.019	0.162
水温									1.000	-0.352 *	-0.184	0.286	-0.456 **
pH										1.000	0.285	0.062	0.480 **
电导率											1.000	0.287	0.029
叶绿素 <i>a</i>												1.000	-0.027

\* 表示显著性水平  $P < 0.05$ , \*\* 表示显著性水平  $P < 0.01$ .

### 3 讨论

#### 3.1 场镇分布影响河流碳、氮、磷的分布格局

场镇发展是我国三峡地区城乡统筹发展的重要模式,与大城市相比,场镇的人类活动强度相对较弱,对生态系统的影响通常被忽视.然而,在三峡地区,场镇沿河多级串联的分布模式下,可能形成具有“点-面双重特征”的潜在污染系统,对流域水体产生不可忽视的负面影响.黑水滩河作为一个流域内场镇连续分布的典型山地河流,其水体碳、氮、磷等生源要素空间格局受到场镇分布的显著影响(图2).

黑水滩河流域水体 TOC 浓度为 4.5~39.2 mg/L(平均为 17.2±8.7 mg/L),高于世界大部分自然河流<sup>[25-26]</sup>和青藏高原区的典型河流<sup>[27]</sup>,甚至高于重庆主城区次级支流盘溪河<sup>[16]</sup>.一方面,黑水滩河属于典型的山地河流,其水体有机碳总量与流域植被覆盖及强烈的土壤侵蚀密切相关,另一方面,场镇密集分布带来的人为源的输入使得水体 TOC 含量显著增加(图3a).同时,在无场镇分布的河段,水体 TOC 含量变化不大,可能是流速较快,对水体碳代谢消耗能力较弱. DOC 是河流 TOC 的主要组成部分,与流域化学侵蚀、植物生产、城镇污水输入等直接相关,并且受气温、降水的影响显著<sup>[25]</sup>.黑水滩河流域水体 DOC 浓度范围为 3.2~31.4 mg/L(平均为 14.0±7.1 mg/L),高于世界河流的平均水平(5~6 mg/L)<sup>[26]</sup>及植被生产力较高的三江源地区的河流<sup>[28]</sup>.对比发现,黑水滩河各监测断面中受人类活动影响较小的 S<sub>1-1</sub>和 S<sub>5-1</sub>断面 DOC 浓度近似于三江源地区的河流<sup>[28]</sup>,但流经单个场镇后水体 DOC 浓度达到 1.6~1.9 倍,表明场镇发展带来陆源环境的综合变化对河流水体 DOC 具有重要贡献.进一步分析发现,黑水滩河水体中 DOC 浓度占 TOC 浓度的比例达 75%,高于全球平均值(55.3%)<sup>[25]</sup>.一般认为,山地河流具有较高的有机质输入和较高的氧化率,DOC 占 TOC 比例通常较低<sup>[27]</sup>.而黑水滩河水体较高的 DOC 比例表明存在明显的外源 DOC 的直接输入.同 TOC 一致,DOC 浓度在水体流经场镇前后均有显著增加,而在无场镇分布的河段表现基本稳定,使得黑水滩河干流从上游向下游 DOC 浓度呈现“阶梯式”增长(平均增幅达 33.4%,图3),表明流域场镇发展导致河流人为源碳输入明显增加.叶琳琳等<sup>[29]</sup>在对太湖入湖河流 DOC 的研究中也发现流域人类活动是河流中 DOC 增加的主要原因.黑水滩河水体 POC 浓度(3.26±1.29 mg/L)较低,这与其浊度较低形成呼应.自然河流中水体 POC 主要源于陆源输入以及水体内部浮游生物的繁殖和代谢<sup>[30]</sup>,本研究中叶绿素 *a* 与 POC 浓度存在显著相关关系( $P < 0.01$ )(表2),春季藻类繁殖旺盛期 POC 浓度高于其他季节,均表明浮游生物生长对水体 POC 具有一定的贡献.而同时,场镇发展带来的陆域环境的综合改变对水体 POC 浓度也可能产生一些直接影响,

但本研究缺乏直接证据,因此未来研究中需要采样同位素技术辨析 POC 浓度变化的主导过程. 综上,本研究认为,作为一种综合的环境影响,流域场镇的发展格局显著改变三峡入库河流水体碳含量及空间部分格局,进而影响水体碳代谢和输移.

黑水滩河流域 TN、TP 浓度低于同为重庆主城区次级河流的盘溪河<sup>[16]</sup>、梁滩河<sup>[17]</sup>、跳蹬河<sup>[11]</sup>等,仅相当于重庆都市区河网平均氮、磷浓度的 1/2<sup>[10]</sup>,但与天津<sup>[8]</sup>、嘉兴<sup>[12]</sup>等平原城市河网浓度水平一致,总体处于较高的水平. 与有机碳相似,由于沿岸分布场镇污水处理设施落后,场镇所产生的生活污水以及废弃物直接或间接进入流经河段(据统计,北碚区 2016 年城镇生活源污水排放量高达 5935.02 万 t),导致黑水滩河水体中不同形态氮、磷浓度均在不同场镇前后有不同程度升高(除 NO<sub>3</sub>-N 在 S<sub>3</sub>前后略有降低),其中 TN、TP 平均增幅达 64.8% 和 35.1%(图 3). 作为对照,黑水滩河干流在流经无场镇分布的河段(上一个场镇后和下一个场镇前)时,水体氮磷浓度大多表现出不同程度的降低(图 2c、2e),表明河流仍具有一定的自净能力. 而随着水体流经场镇,氮磷浓度又再次升高,流域内连续分布的场镇对河流生态系统带来了持续的压力,逐步威胁河流自净能力,并最终在河口处达到氮磷浓度的峰值(图 2c、2e). 与城市或农业河流氮、磷污染特征不同<sup>[11-12]</sup>,黑水滩河流域这种串珠状沿河分布的场镇污染具有一定“点-面”复合和连续胁迫特征,一旦场镇带来的污染负荷累积超过河流自净阈值,则会导致河流生态系统的恶化. 统计分析表明,除 NO<sub>3</sub>-N 以外的水体氮、磷各形态浓度与场镇规模大小呈正相关关系(图 4),也反映出场镇规模及其分布对河流水体营养盐污染有显著影响. 本研究给出了一个流域连续场镇发展影响水环境的典型模式,这种串珠状的场镇分布与发展对河流生态系统的综合影响在未来水环境保护中需要重点关注. 同时,与平原河流不同<sup>[8]</sup>,山地地区河流流速快,外源污染物输入后滞留时间短,不利于原位的自净消耗,因此山地河流对外源连续污染更敏感. 而流域场镇分布过于密集可能使得污染物迅速积累,最终可能达到河流自净能力的极限,造成下游水环境的崩溃. 庆旭瑶等<sup>[11]</sup>对重庆主城区次级河流的研究也认为流域内污染源过密使得下游污染物浓度远高于上游. 平原地区,河流流速缓慢,水体外源污染物有足够的滞留时间进行自净消耗. 因此,西南地区场镇式发展必须根据场镇密度设置污水处理标准,减少流域环境压力. 本研究中黑水滩河上游 S<sub>1-1</sub>~S<sub>1-3</sub>河段氮、磷浓度增幅较大,表明源头河段对场镇污染较敏感,需要在金刀峡镇建立完善的污水处理系统,严格做到控源截污.

最后,初步估算黑水滩河每年向三峡水库输入氮、磷总量远超同尺度的入库支流花溪河(TN: 8.9 g/s, TP: 1.22 g/s)<sup>[21]</sup>,因此急需加强河口污染物输出控制. 随着三峡地区场镇发展模式的不断推进,陆域人类活动的外源污染物输入显著改变各场镇流经河流流域内的碳、氮、磷输入格局,连续场镇分布对河流污染的累积效应及其与河流自净能力的对冲作用应该成为未来水环境保护的重点.

### 3.2 季节变化及其影响因素分析

黑水滩河干、支流水体碳含量季节变化不大,呈现冬夏略低于春秋的模式,冬季降雨较少,陆源碳输入不足,而夏季由于径流量大,碳浓度被稀释,春季温度升高,蒸发量增大,径流量降到最低,而碳浓度反而升高. 同时,水体氮、磷季节变化特征则较明显,表现为夏、秋季(雨季)浓度较低,冬、春季(旱季)较高(图 2),这种营养盐浓度的季节变化被认为受径流的稀释作用驱动<sup>[16,31]</sup>. 同时,温度的季节变化影响水体微生物活性和生物地化速率,进而导致不同季节水体自净能力差异<sup>[32]</sup>. 夏季整体水温较高,水体微生物活动增强,消耗水体中的营养盐<sup>[31,33-34]</sup>. 然而,相关分析表明,营养盐浓度与水温并没有显著相关关系(表 2),表明水体内部微生物活动对营养盐浓度季节变化影响较小,而径流量的季节变化可能是主导因素,这也体现出山地河流的径流变异大的特征. 春季温度升高,加之黑水滩河水体 POC、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和各种磷形态浓度均最高,因此具有较高的水华爆发的风险<sup>[35]</sup>. 本研究认为,黑水滩河碳、氮、磷季节变异受到降雨、山地河流水文活动等因素综合影响.

### 3.3 水体富营养化

水体富营养化是河流水体的主要生态环境问题<sup>[36]</sup>. 黑水滩河干、支流水体 TN 浓度严重超标,年均浓度(3.61±1.48 mg/L)为地表水 V 类的 1.8 倍,与大部分城市河流研究一致<sup>[37]</sup>,但水体磷浓度较低,基本达到 III、IV 类水标准,这也与大部分自然水体相似,也是重庆山地河流的典型特征<sup>[10]</sup>. 根据国际上水华爆发的氮磷浓度对比(TN、TP 的浓度分别达到 0.20 和 0.02 mg/L),黑水滩河水体具有极高的水华暴发风险. 根据 EI 指数评价,黑水滩河各监测断面全年处于富营养状态以上(图 5). 同时水体 EI 值空间分布特征与碳、氮、磷

浓度分布特征相似,在不同场镇均表现为场镇后高于场镇前,且从河流上游到下游呈增加趋势,因此,场镇连续分布极大的增加了黑水滩河水华发生的可能.研究表明,通常水体叶绿素 *a* 浓度与营养盐浓度呈显著相关关系<sup>[38]</sup>,然而,由于山地河流流速快,跌水多,不利于藻类的繁殖和积累,因此本研究中水体并无水华暴发现象,且氮磷营养盐与叶绿素 *a* 浓度的相关性并不显著( $\text{NH}_4^+\text{-N}$  除外),与陈晓玲等<sup>[39]</sup>的研究一致.但在河流下游,比降变小,流速减缓,营养盐积累,仍有较大的水华风险.最后,场镇分布不仅影响水体营养盐浓度的空间格局,而且对水体氮磷比影响显著,使得整个黑水滩河流域水体氮磷组成多样化,进一步增加河流缓流段水体恶化的几率.

## 4 结论

1) 黑水滩河干、支流受陆域外源污水输入影响,水体 TN 浓度严重超标,年均浓度( $3.61 \pm 1.48 \text{ mg/L}$ )为地表水 V 类的 1.8 倍,而 TP 浓度范围为  $0.078 \sim 0.454 \text{ mg/L}$ ,大部分监测断面浓度处于 III ~ V 类水标准;流域场镇发展对水体生源要素的浓度影响显著,黑水滩河流域水体流经场镇前后,各形态碳、氮、磷浓度均明显增加,且沿程的场镇格局带来的污染有明显的累积效应,从源头断面  $S_{1-1}$  到干流入江口  $S_4$ ,水体 TOC、TN 和 TP 浓度增幅高达 207.7%、208.0% 和 101.8%;无场镇分布的河段,水体碳变化不大,而氮、磷呈不同程度降低,因此黑水滩河干流水体碳含量自上游向下游呈“阶梯式”增长,而氮、磷则呈“波动式”增长.流域场镇发展显著改变水体有机碳和营养盐的空间分布,且给河流自净带来了较大的压力,在未来水环境治理中需要得到关注.

2) 流域水体各形态有机碳季节波动不大,春秋季节略高于冬夏季;不同形态的氮、磷浓度季节波动较大,雨季(夏秋季)低于旱季(春冬季),降雨导致径流增加,带来的水体氮、磷稀释效应是这种季节模式的主要驱动力;黑水滩河流域水体各营养盐浓度在春季均较高,具有较大的水华暴发风险.总体上,黑水滩河碳、氮、磷季节变异受到降雨、山地河流水文活动等因素综合影响.

3) 本研究中,黑水滩河表层水体氮污染严重,磷污染较低,两者均超过发生富营养化条件,但叶绿素 *a* 与 TN、TP 浓度无显著相关性,主要是山地河流流速较快,不利于藻类的生长和繁殖.河流富营养化综合指数表明,黑水滩河干、支流各监测断面全年属于富营养状态以上,受外源污染物输入影响,各监测断面营养状态分布特征与碳、氮、磷一致.因此,需建立完善沿河场镇的污水处理系统,严格做到控源截污,减轻入库污染负荷.

4) 初步估算,黑水滩河每年向三峡水库输入碳、氮、磷总量达到 4057、1001 和  $47 \text{ t/a}$ ,尽管水体污染水平低于重庆地区大多数城市污染的河流,但流域场镇发展带来的河流水体连续污染物积累对三峡水库水环境安全的威胁仍需予以重视.

## 5 参考文献

- [ 1 ] Lundqvist J. A global perspective on water and the environment. *Physics & Chemistry of the Earth Part B Hydrology Oceans & Atmosphere*, 2000, **25**(3): 259-264. DOI: 10.1016/S1464-1909(00)00013-7.
- [ 2 ] Logan B, Taffs KH, Eyre BD *et al.* Assessing changes in nutrient status in the Richmond River estuary, Australia, using paleolimnological methods. *Journal of Paleolimnology*, 2011, **46**(4): 597-611. DOI: 10.1007/s10933-010-9457-x.
- [ 3 ] Fabricius KE. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**(2): 125-146.
- [ 4 ] Liu EF, Shen J, Zhang EL *et al.* A geochemical record of recent anthropogenic nutrient loading and enhanced productivity in Lake Nansihu, China. *Journal of Paleolimnology*, 2010, **44**(1): 15-24.
- [ 5 ] Tian YM. Study on water environment management and water pollution control of Qingdao small town [Dissertation]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2009. [田艳梅. 青岛市小城镇地区水环境管理与水污染控制方法研究[学位论文]. 青岛: 青岛理工大学, 2009.]
- [ 6 ] Zhang YM, Zhang YC, Gao YX *et al.* Water pollution control technology and strategy for river-lake systems: a case study in Gehu Lake and Taige Canal. *Ecotoxicology*, 2011, **20**(5): 1154-1159.
- [ 7 ] Shan BQ, Zhang H, Tang WZ *et al.* Methodology for road map enacting of river pollution mitigation and its application in

- the Haihe river basin. *Acta Scientiae Circumstiae*, 2015, **35**(8): 2297-2305. [单保庆, 张洪, 唐文忠等. 河流污染治理任务路线图制定方法及其在海河流域的应用. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2297-2305.]
- [ 8 ] Zheng JF, Jiao JD, Sun LP *et al.* Pollution characteristics of nitrogen, phosphate and eutrophication in river network water in central urban area of Tianjin. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 326-335. DOI: 10.18307/2018.0205. [郑剑锋, 焦继东, 孙立平等. 天津中心城区河网氮磷污染与富营养化特征. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 326-335.]
- [ 9 ] Sickman JO, Zanoli MJ, Mann HL. Effects of urbanization on organic carbon loads in the Sacramento river, California. *Water Resources Research*, 2007; W11422.
- [ 10 ] Wang XF. Research on carbon gases emissions from metropolitan river network [Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2017. [王晓锋. 大都市区河网体系碳排放研究[学位论文]. 重庆:重庆大学, 2017.]
- [ 11 ] Qing XY, Ren YF, Lv ZQ *et al.* Characteristics of total nitrogen and total phosphorus pollution and eutrophication assessment of secondary river in urban Chongqing. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2446-2452. [庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强等. 重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价. 环境科学, 2015, **36**(7): 2446-2452.]
- [ 12 ] Liang X, Zhu S, Ye R *et al.* Biological thresholds of nitrogen and phosphorus in a typical urban river system of the Yangtze delta, China. *Environmental Pollution*, 2014, **192**: 251-258.
- [ 13 ] Vörösmarty CJ, McIntyre P, Gessner M *et al.* Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 2010, **467**(7315): 555-561.
- [ 14 ] Gao F, Shao ML, Cao CL *et al.* Nitrogen and phosphorus pollution characteristics and influencing factors in urbanized watershed-A case study of Xiaojia River in Beilun District, Ningbo City. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 689-699. DOI: 10.18307/2019.0308. [高凤, 邵美玲, 曹昌丽等. 城镇化流域氮、磷污染特征及影响因素——以宁波北仑区小浞江为例. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 689-699.]
- [ 15 ] Li Y. Study on accelerating township government function in coordinating urban and rural development-take one town of eastern Chongqing for example [Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2010. [李瑜. 统筹城乡背景下乡镇政府场镇发展职能研究——以渝东某镇为例[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2010.]
- [ 16 ] Zhang QQ, Wang K, Hao LL *et al.* Diurnal variation and evaluation of water quality in different seasons of Panxi river in Chongqing. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2251-2258. [张千千, 王效科, 郝丽岭等. 重庆市盘溪河水质不同季节变化规律及水质评价. 环境科学, 2012, **33**(7): 2251-2258.]
- [ 17 ] Wang XF, Ying XZ, Liu H *et al.* Temporal and spatial variation of nutrients and output risk in Liangtan River, Three Gorges Reservoir. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2017, **2**(1): 21-27. [王晓锋, 袁兴中, 刘红等. 三峡库区梁滩河水体营养盐时空分布及输出风险. 三峡生态环境监测, 2017, **2**(1): 21-27.]
- [ 18 ] National Environmental Protection Agency ed. Water and wastewater monitoring and analysis methods: Fourth 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: 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [ 19 ] Shan BQ, Jian YX, Tang WZ *et al.* Temporal and spatial variation of nitrogen and phosphorus and eutrophication assessment in downstream river network areas of north Canal river watershed. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 352-358. [单保庆, 菅宇翔, 唐文忠等. 北运河下游典型河网区水体中氮磷分布与富营养化评价. 环境科学, 2012, **33**(2): 352-358.]
- [ 20 ] Li ZY, Wang JY, Guo C. A universal index formula for eutrophic evaluation using a logarithmic power function. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(3): 664-672. [李祚泳, 汪嘉杨, 郭淳. 富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式. 环境科学学报, 2010, **30**(3): 664-672.]
- [ 21 ] Zhang S, Li CM, Zheng BH *et al.* Trophic states and nutrient output of tributaries in Three Reservoir Area. *Environmental Science*, 2007, **28**(3): 500-505. [张晟, 李崇明, 郑丙辉等. 三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响. 环境科学, 2007, **28**(3): 500-505.]
- [ 22 ] Ren L, Cui E, Sun H. Temporal and spatial variations in the relationship between urbanization and water quality. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(23): 13646-13655.
- [ 23 ] Li Z, Guo JS, Fang F *et al.* Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2009, **21**(4): 509-517. DOI: 10.18307/2009.0409. [李哲, 郭劲松, 方芳等. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 509-517.]
- [ 24 ] Guildford SJ, Hecky RE. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: is there a common

- relationship? *Limnology & Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223.
- [25] Ludwig W, Probst J, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(1): 23-41.
- [26] Meybeck M. Carbon, nitrogen and phosphorous transport by world rivers. *American Journal of Science*, 1982, **282**(4): 401-450.
- [27] Zhao DZ, Wang ZH, Shen SH *et al.* Temporal and spatial changes of carbon in water from typical rivers and lakes over the Tibetan Plateau. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, **35**(11): 13-19. [赵登忠, 王朝辉, 申邵洪等. 青藏高原典型河流与湖泊表层水体碳时空变化特征初步分析. 长江科学院院报, 2018, **35**(11): 13-19.]
- [28] Ma XL, Liu GM, Wu XD *et al.* Seasonal variations of dissolved organic carbon exports in streams under alpine meadow in the Three Rivers' Headwater regions, Qinghai-Tibetan Plateau. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(10): 2387-2394. [马小亮, 刘桂民, 吴晓东等. 三江源高寒草甸下溪流溶解性有机碳的季节性输移特征. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(10): 2387-2394.]
- [29] Ye LL, Wu XD, Kong FX *et al.* Source of dissolved organic carbon and bioavailability of dissolved carbohydrates in the tributaries of lake Taihu. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 914-921. [叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔等. 太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性. 环境科学, 2015, **36**(3): 914-921.]
- [30] Zhang JL, Bao X, Cai JM *et al.* Seasonal variations and sources of particulate and dissolved organic carbon in Tangxihe river. *Journal of Biology*, 2017, **34**(2): 58-62. [张金流, 鲍祥, 蔡敬民等. 塘西河水体颗粒和溶解有机碳季节变化及其来源分析. 生物学杂志, 2017, **34**(2): 58-62.]
- [31] Zha HM, Zhu MY, Zhu GW *et al.* Seasonal difference in water quality between lake and inflow/outflow rivers of lake Taihu. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 1102-1112. [查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟等. 太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析. 环境科学, 2018, **39**(3): 1102-1112.]
- [32] Bakri DA, Rahman S, Bowling L. Sources and management of urban storm water pollution in rural catchments, Australia. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 2008, **356**(3/4): 299-311.
- [33] Yan X, Cai Z, Yang R *et al.* Nitrogen budget and riverine nitrogen output in a rice paddy dominated agricultural watershed in eastern China. *Biogeochemistry*, 2011, **106**(3): 489-501.
- [34] Li YF, Xia YQ, Li XB *et al.* Temporal and spatial variations of total nitrogen and total phosphorus in the typical reaches of Qinhuai river. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 91-97. [李跃飞, 夏永秋, 李晓波等. 秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征. 环境科学, 2013, **34**(1): 91-97.]
- [35] Cao C, Zheng B, Chen Z *et al.* Eutrophication and algal blooms in channel type reservoirs: A novel enclosure experiment by changing light intensity. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(10): 1660-1670.
- [36] Yang XE, Wu X, Hao HL *et al.* Mechanisms and assessment of water eutrophication. *Journal of Zhejiang University-Science B*, 2008, **9**(3): 197-209.
- [37] Al-Kharabsheh AA. Influence of urbanization on water quality at Wadi Kufranja basin (Jordan). *Journal of Arid Environments*, 1999, **43**(1): 79-89. DOI: 10.1006/jare.1999.0534.
- [38] Wang Q, Lu C, Fan ZP *et al.* Eutrophication and spatial distribution of N, P and chlorophyll-a in the Taizihe River basin, Liaohe River catchment. *J Lake Sci*, 2017, **29**(2): 297-307. DOI: 10.18307/2017.0205. [王琼, 卢聪, 范志平等. 辽河流域太子河流域 N、P 和叶绿素 a 浓度空间分布及富营养化. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 297-307.]
- [39] Chen XL, Zhang Y, Zhang L *et al.* Distribution characteristic of nitrogen and phosphorus in Lake Poyang during high water period. *J Lake Sci*, 2013, **25**(5): 643-648. DOI: 10.18307/2013.0504. [陈晓玲, 张媛, 张琮等. 丰水期鄱阳湖水体中氮、磷含量分布特征. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 643-648.]