

梯级筑坝下小型山区河流水体碳氮磷的时空特征及富营养化风险*

阙子亿^{1,3}, 王晓锋^{1,2,3**}, 袁兴中⁴, 吴胜男^{1,3}, 余乐乐^{1,3}, 李航^{1,3}, 张媛媛^{1,3}, 王继龙^{1,3}

(1: 长江上游湿地科学研究重庆市重点实验室, 重庆 401331)

(2: 三峡库区地表生态过程野外科学观测研究站, 重庆 405400)

(3: 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331)

(4: 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400030)

摘要: 梯级筑坝对河流水环境演化的影响是国内外关注的热点. 小型山区河流高密度梯级开发对水体生源要素的空间格局以及水环境演化的累积影响特征尚不清楚. 以重庆市五布河为研究对象, 对流域内 8 个“河流—水库—下泄水”交替系统中表层水体理化因子及碳(C)、氮(N)、磷(P)形态组成进行季节性监测, 探讨了梯级筑坝对小型河流生源要素空间格局及水体富营养化风险影响的累积特征及驱动机制. 结果表明: 梯级水电开发对五布河流域水生生境和生源要素空间分配的影响具有潜在的累积效应, 各库区水体碳氮磷浓度均呈逐级增加的空间规律; 水库段的有机碳及不同形态的氮、磷浓度均高于入库河流, 因此水体养分浓度呈现出河段尺度(即单个河流—水库—下泄水系统)和流域尺度(即上游至下游)耦合的空间变异模式. 上游水库中溶解性氮、磷的再释放及下泄输移能够补给下游库区, 加之下游水库泥沙对氮、磷的吸附—沉积作用的减弱, 导致水体氮、磷总量及溶解性氮、磷的占比沿程增加, 呈现梯级筑坝对水环境演化的累积影响. 梯级筑坝影响下河流碳氮磷总量的相关性减弱, 而溶解性养分间的相关性增强, 形成了特殊的养分协同演化; 水库群之间水力滞留时间的差异与水体碳氮磷浓度具有较好的线性关系, 是影响流域养分分配的关键因素. 五布河流域水体均为高富营养化风险, 由于梯级筑坝下水体溶解性养分的逐级增加, 下游水库水华风险更大; 水力滞留时间与水体富营养化指数及叶绿素 *a* 浓度呈显著正向关, 结合氮磷比特征的分析, 本研究认为外源磷输入控制及水力滞留时间的调节是五布河梯级水库富营养化防控的有效途径.

关键词: 梯级筑坝; 山区河流; 碳、氮、磷浓度; 时空变异; 富营养化评价; 五布河

Spatial-temporal distribution of carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and eutrophication evaluation of mountainous small river in a cascaded damming*

Que Ziyi^{1,3}, Wang Xiaofeng^{1,2,3**}, Yuan Xingzhong⁴, Wu Shengnan^{1,3}, Yu Lele^{1,3}, Li Hang^{1,3}, Zhang Yuanyuan^{1,3} & Wang Jilong^{1,3}

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

(2: Three Gorges Reservoir Area Earth Surface Ecological Processes of Chongqing Observation and Research Station, Chongqing 405400, P.R.China)

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

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

Abstract: Rivers, as the channel connecting terrestrial and marine ecosystems and transporting a large amount of nutrients to ocean, are important for maintaining the global material cycle. The construction of cascade dams leads to river fragmentation and changes the distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in the water. At present, a lot of studies have been conducted on the

* 2021-12-09 收稿; 2022-03-30 收修改稿.

重庆市教委科学技术研究计划项目(KJZD-K202000502, KJQN201800530)和国家自然科学基金项目(41807321)联合资助.

** 通信作者; E-mail: xiaofeng6540@163.com.

ecological effects of cascade development in large rivers, but few studies focus on small mountainous rivers. The spatial-temporal patterns and controls of the distribution of carbon, nitrogen and phosphorus from cascade river-reservoir systems in the small mountainous rivers remain unclear. In this study, we investigated the spatial-temporal variations of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) concentrations along a cascade damming river (Wubu River) in Southwest China. The results showed that carbon, nitrogen and phosphorus showed an obvious cumulative effect, that was, the contents of C, N and P gradually increased from the first reservoir upstream to the last reservoir downstream underlying cascade dams. And, the organic carbon, as well as nitrogen and phosphorus in the reservoir section, were higher than in those inflow rivers. Thus, different forms of carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in the reach (river-reservoir-release water system) scale and river basin scale (the upstream to downstream) displayed the double coupling variation pattern. Primary production and plankton proliferation were the main mechanisms of organic carbon accumulation in the river. At the same time, cascade reservoirs may form a series of nitrogen and phosphorus "storage tanks" and "reactors" to promote the release and transport of dissolved nitrogen and phosphorus. The re-release and transport of dissolved N and P in the upstream reservoir can replenish the downstream reservoir, increasing the content of N and P in the downstream reservoir and the proportion of dissolved N and P, thus leading to the cumulative effect of water deterioration. The decrease in the adsorption-deposition effect of sediment on nitrogen and phosphorus nutrients in downstream reservoirs also leads to the accumulation of soluble nitrogen and phosphorus concentrations. The correlation of C, N and P in the river was weakened, but there was a significant relationship between dissolved nutrients, forming a special nutrient co-evolution. Furthermore, the hydraulic retention time of the reservoir groups had a good linear relationship with water C, N and P contents, which was the key factor affecting nutrient allocation in the watershed. Seasonal variations of total organic carbon and dissolved organic carbon were highest in spring and lowest in winter in Wubu River Basin. Total nitrogen and nitrate nitrogen in the dry season (winter and spring) were significantly higher than those in the wet season (summer and autumn), and other nutrient forms had no obvious seasonal pattern. Rainfall dilution, algal reproduction, microbial decomposition and re-release were the main processes leading to the seasonal variation of nutrients. The eutrophication risk also presented an increasing trend from upstream to downstream because of the dam. There was also a good linear relationship between hydraulic retention time and eutrophication risk. Combining the analysis of N:P ratio characteristics, it was suggested that exogenous P control and optimal allocation of hydraulic retention time are effective approaches for eutrophication control in the Wubu River Basin.

Keywords: Cascaded damming; montanic small river; carbon, nitrogen and phosphorus; spatial-temporal distribution; eutrophication; Wubu River

河流是连接陆地和海洋生态系统的关键通道,每年向海洋输送大量的营养物质,对维持全球物质循环具有重要意义^[1-3].过去半个多世纪,为充分利用河流灌溉、发电、防洪、航运等多种生态功能,服务于人类社会,筑坝成为全球各地河流开发的重要举措.据估计,当前全球已建各类大坝超过70000座,加上各类小型水库、堰塘等,总库容超过15000 km³,相当于全球河流年径流总量的约27%^[4-5].在全球范围内,超过一半的河流受到水电开发或筑坝拦截的影响^[6],其中1000 km以上河流中63%的河段转变为缓流段或静水段^[7].筑坝蓄水后河流的水力学连续性和纵向连通性发生根本性改变,导致河流物质、能量的重新分配,影响河流生态系统结构与功能.其中,大坝的拦截作用对河流生源要素(碳、氮、磷、硅等)的分布格局、输移通量、组成结构(化学计量比)以及生物地化循环过程影响最为突出^[2, 8].Jossete等^[9]研究发现法国Seine River上游流域筑坝滞留了60%的磷酸盐.据模型估算,全球大坝拦截约26%的沉积物通量和20%~90%的生源要素通量^[10-11].而筑坝在拦截颗粒态生源物质的同时,滞留的生源物质部分经生物转化后能够再次释放进入水体,显著改变了水体溶解性营养盐的来源、分布及化学计量比特征^[12],对河流藻类类群组成^[13]及水环境的演化特征^[14]产生较大影响,成为水体富营养化的重要驱动^[15].因此,筑坝蓄水的水环境效应,特别是养分滞留及富营养化风险一直是国内外关注的热点^[1, 8].随着全球能源需求的不断增加,水电开发在全球快速发展,其带来的流域生源要素的分配格局和迁移转化特征的变化仍然是当前研究的重点.

梯级水电开发是指在比较大的山区河流自上游向下游呈阶梯状修建一系列大坝,以充分利用水位落差带来的水能资源^[16].与单一水库相比,梯级筑坝的河流水文水动力过程、热量传输及生源要素滞留等受到大坝群联动运行的交叠影响,促使河流生态要素的纵向变化模式具有复杂性和不确定性^[17-18].Barbosa等^[19]基于河流连续性和单一筑坝形成的河流非连续性概念,提出了梯级水库连续体的模型,并指出梯级水

库由于水量、物质等的上下承接关系,对河流生态要素的纵向序列及生源要素的拦截、分解和输移等的影响可能存在“累积效应”。随后研究发现,梯级筑坝导致河流生物群落均质化^[20],水体温度逐级升高,浊度逐级下降,生源物质组成与通量持续改变^[21]。Chen等^[22]研究发现,澜沧江上游梯级水电开发导致水体无机氮浓度从上游向下游存在明显的累积增加的现象。李哲等^[18]认为,由于梯级水库的养分滞留具有增殖效应并形成了系列生物地化热点,加速溶解性养分释放,导致河流水体富营养化风险可能逐级增强。上游水库中生源要素的拦截和生物分解,使得大坝下泄排水过程中溶解性碳、氮向下游输移和再富集,是下游水体养分可利用性及富营养化风险增强的重要机制^[15,23]。这些研究均认为梯级筑坝对河流水环境演化影响存在“累积效应”。然而,生源要素在梯级串联的水库中的行为过程还受各水库自身的库容、水力负荷及滞留时间等显著影响^[8,18,24]。例如王昱等^[25]研究发现,梯级水库群的库容与水质因子之间呈现显著的线性关系。因此水库群的排列特征可能干扰水环境因子的沿程累积规律。同时,由于碳氮磷在筑坝河流中的滞留、生物转化及循环效率存在差异^[26],因此梯级筑坝的水环境累积效应存在对象的不确定性。梯级筑坝下不同养分累积特征的差异将导致养分赋存形态及化学计量特征的空间分异,并进一步影响水环境演化模式。除此之外,水库对河流生源要素累积效应的形成还取决于河流系统对筑坝干扰的消纳能力^[18]。因此,梯级开发的河流水体碳氮磷及其不同赋存形态的空间分布格局可能并非简单的梯级衰减或增加的“累积效应”,而是受众多因子的共同影响。揭示梯级筑坝对水体生源要素及生物过程影响的“累积效应”及其形成机制是阐明河流梯级开发生态环境效应的重要内容,对梯级筑坝下水环境演化及水生态安全的调控具有重要意义。

目前为止,尽管国外学者开展了大量梯级筑坝河流水环境演化的研究^[27],我国学者在乌江^[26]、澜沧江—湄公河^[21]、猫跳河^[28]、黑河^[25]等也开展了相关研究,但大多以大型河流为主,相关结论还受到流域环境改变的强烈干扰,在小流域高密度的梯级筑坝河流中鲜见报道。流程短而水电开发强烈的小尺度河流,其生态要素受陆域环境变化干扰小,且经过长时间演变可能形成了连续稳定的纵向序列^[19]。因此开展其水体生源要素空间分布格局及富营养化风险分析,能够更好地识别梯级水电开发对水环境演化的“累积效应”及其形成机制,是水库生态学的有益补充。我国西南山区超过60%的河流受到梯级水电开发的影响,绝大多数位于中小型河流^[29]。本研究选取重庆市五布河为研究对象,对流域串联分布的水库群及其入库河段、下泄水系统进行表层水体碳氮磷形态及浓度的季节性分析,从流域尺度和河段尺度(河流—水库—下泄水尺度)对水梯级开发影响下水体碳氮磷分布格局及赋存形态进行系统分析,并结合梯级水库群水力特征,旨在揭示梯级开发下河流水体生源要素分配的累积效应及形成机制,进一步评估养分梯级累积带来的富营养化风险。本研究的开展可为梯级水电开发下水环境管理提供有益的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

五布河发源于重庆市万盛区金子山,流经綦江区、巴南区,于巴南木洞镇注入长江。全流域由干流和二圣河、鸭溪河、芦沟河三大支流组成。五布河主河道长度为84.4 km,首尾总落差596.7 m,河床平均坡降3.75‰,流域总面积873 km²。全流域干支流总长380.7 km,河口平均流量13.11 m³/s,总径流量4.14亿 m³。流域地势南高北低,属低山深丘地带。自1968年,五布河共经历4轮水能资源开发,共建梯级水电站18座,装机容量12 MW,发电量10512万 kW/h。流域处于亚热带季风气候区、雨热同期,年平均气温18.3℃,多年平均降水量1133 mm,降雨充沛但年内分配不均,5—9月汛期占全年降雨量的67.0%^[30]。

1.2 采样设计与样品采集

根据流域水库分布及水文特征,选取沿五布河干流上游至下游分布的5个梯级电站(查尔岩电站、小观电站、江鹤电站、锡滩电站、杨家洞电站)及支流上3个代表性电站(二圣电站、尖山电站、磨坊大坝)为研究对象开展调查,根据每个水库筑坝和回水长度,选择入库河流段、水库段、下泄水段进行断面设置(图1)。水库断面采样均在大坝坝址前完成,下泄水断面设置在大坝下游200 m范围内,河流段断面设置充分考虑水库回水距离及河流水文情况确定,具体位置见表1。图1所示w1~w3、w4~w6、w7~w9、w10~w12、w13~w15分别表示干流上游至下游连续梯级分布的河流—水库—下泄水系统的采样断面示意,w16表示五布河河口断面;e1~e3、y1~y3、l1~l3分别表示二圣河、鸭溪河及芦沟溪3条支流下游水库的调查断面,共25个调查断

面. 表 1 列出了 8 个梯级水库系统的基本特征, 大部分水库建设于距今 30~40 年前, 库容较小, 水力滞留时间远小于其他大型水库^[24].

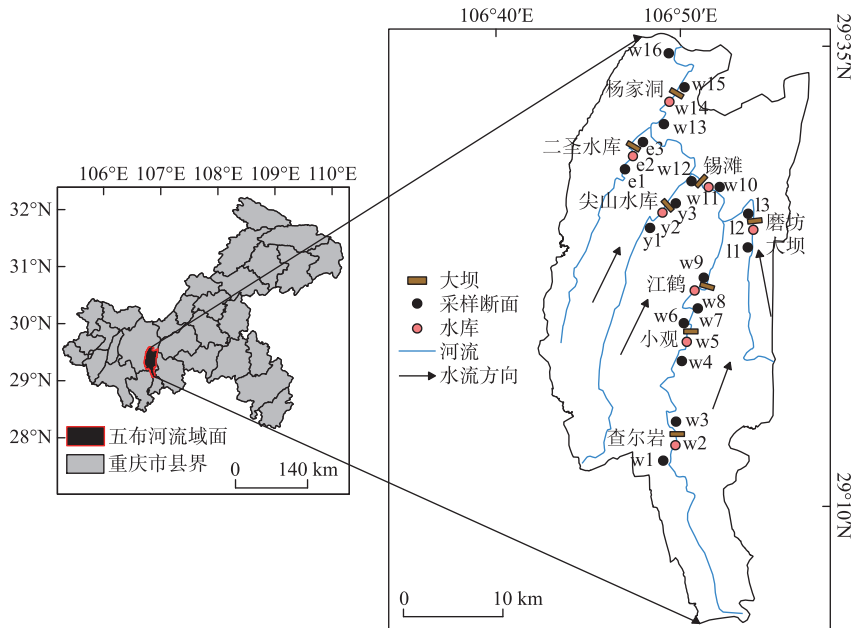


图 1 五布河采样断面分布

Fig.1 Sampling sites distribution in Wubu River

表 1 研究区水库基本信息*

Tab.1 The basic information of the studied reservoirs

指标	查尔岩	小观	江鹤	锡滩	杨家洞	二圣	尖山	磨坊
建设时间	1979 年	1969 年	1984 年	1980 年	1977 年	1959 年	1980 年	1975 年
坝高/m	8	8	6	7.5	12	12	19	16
有效坝长/m	22	40	38	57	90	58	55	37
回水长度/km	0.6	0.6	1.4	—	2.6	3.2	1.1	0.8
河流断面与大坝距离/km	1.1~1.2	1.5	1.5	2.0	3.4	4.0	1.5	1.2
水库容量/($\times 10^5$ m ³)	2	3.7	8.3	13.5	28	7.6	2.3	1.6
电力生产/($\times 10^4$ kW·h)	130	230	325	260	600	20	7	36
平均水深/m	3.2	2.5	3.3	4.2	3.4	5.6	6.4	3.4
平均流速/(m/s)	1.26	0.8	0.63	0.6	0.53	0.65	0.46	0.4
流量/($\times 10^5$ m ³ /s)	4.1	4.3	5.8	6.8	9.9	1.5	1.6	1.0
水力滞留时间/(HRT, d)	0.49	0.85	1.42	2.10	2.60	5.11	1.46	1.61
水力负荷/(H, m/d)	6.58	2.90	2.30	2.02	1.32	1.09	4.39	2.13

* 水力滞留时间(HRT)=库容/入库流量;水力负荷=平均水深/水力滞留时间. 所有数据均来自《重庆市中小河流水能资源开发规划 2015》.

于 2014 年 9 月 1—17 日、12 月 3—8 日和 2015 年 3 月 14—21 日、6 月 21—25 日, 对不同断面表层水体进行现场监测和采样分析, 每次选择晴天或降雨后 3 d 以上采样. 每个采样断面设置河道中心和左右两侧河岸 2~3 m 处的 3 个重复采样点, 利用有机玻璃采样器采集 500 mL 表层水样装入采样瓶中, 置于 4°C 冰箱内带回实验室分析, 3 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 TM 2(Eureka Com-

pany, USA)测定原位表层水体水温、pH、电导率(EC)、叶绿素 *a* (Chl.*a*)、溶解氧(DO)和浊度(Turb),精度分别为 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 、 ± 0.01 、 $\pm 0.01 \mu\text{S}/\text{cm}$ 、 $\pm 0.01 \mu\text{g}/\text{L}$ 、 $\pm 0.01 \text{mg}/\text{L}$ 、 $\pm 0.1 \text{NTU}$ 。

考虑到悬移质泥沙浓度对水体营养物输移、转化的重要影响,在未对水体泥沙浓度进行观测的背景下,本研究采用浊度数据估算了水体悬浮颗粒物浓度,在一定程度上能够反映水体悬移质水平。

$$\text{SS} = 1.1615\text{Turb} + 1.2574 \quad (R^2 = 0.9767) \quad (1)$$

式中,SS为悬浮颗粒物浓度(mg/L),Turb为浊度(NTU), R^2 表示二者线性关系的拟合度。本研究个别水库断面在春、夏季出现富营养化,可能对水体浊度-SS关系产生干扰,因此分析具有局限性。

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、磷浓度,包括总有机碳(TOC)、溶解性有机碳(DOC)、总无机碳(TIC)、颗粒态有机碳(POC)、总氮(TN)、硝态氮(NO_3^- -N)、氨氮(NH_3 -N)、总有机氮(TON)、总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、颗粒态总磷(PP)、正磷酸盐磷(PO_4^{3-} -P)等。水样预处理及分析参照国家相关标准,TN浓度采用过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定; NO_3^- -N浓度采用过 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜的水样进行紫外分光光度法测定; NH_3 -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浓度用过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜的水样进行硫酸钾消解-钼酸铵分光光度法测定; 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;每个水样重复测量3次,误差范围在0.7%~6.3%之间;TOC、TIC、DOC浓度分别用原水样和 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜抽滤的水样,通过TOC分析仪(德国耶拿,Multi N/C 2100)测定,TOC分析仪的精度为0.001 mg/L。此外,POC浓度通过TOC和DOC浓度的差值计算得到;TON浓度通过TN减去 NO_3^- -N、 NH_3 -N浓度得到(由于水体 NO_2^- -N浓度较低,在本研究中未考虑)。

1.4 富营养化风险评价

五布河干支流水体富营养化指数(EI)采用适用于我国湖、库、河流富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式计算^[31-32]。选取叶绿素 *a*、TN、TP、 NH_3 -N、 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: $76.28 < EI \leq 99.77$),评价各采样断面水体所处的营养状态,其公式如下:

$$EI_j = 10.77(\ln x_j)^{1.1826} \quad (2)$$

$$EI = \sum_{j=1}^n w_j \cdot EI_j \quad (3)$$

式中, EI_j 为指标 *j* 的水体富营养化指数, x_j 为指标 *j* 的“规范值”, 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。

原始数据在Excel 2019中进行标准化处理与计算,应用SPSS Statistics 23进行统计分析,所有统计显著性水平为 $P < 0.05$ 。采用ArcGIS绘制研究区图,Graphpad 8.0制作结果分析图。

2 结果与分析

2.1 基本物理、化学及生物参数

各断面水体基本理化参数如图2所示,水温在 $12.6 \sim 28.5^{\circ}\text{C}$ 之间,平均为 21.3°C ;pH在 $7.47 \sim 9.21$ 之间,平均为8.05,水体整体偏碱性;干流水体温度与pH自上游向下游均略有升高;水体DO浓度在 $5.3 \sim 12.8 \text{mg}/\text{L}$ 之间,平均为 $7.8 \text{mg}/\text{L}$,下游断面DO略高于上游,水库断面DO普遍高于入库河段。电导率能够反映水体离子浓度的状况,五布河流域水体电导率在 $260 \sim 582 \mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,呈强烈的空间变异性,下游水库水体电导率远高于上游水库。此外,水体浊度变化范围为 $1.4 \sim 176.4 \text{NTU}$,且呈现出沿水流方向明显下降,丰水期(夏秋季)略高于枯水期(冬春季);水体Chl.*a*浓度($0.9 \sim 51.5 \mu\text{g}/\text{L}$)在春秋两季变异性较强(图2),下游水库(R4、R5、R6、R7)在春季和秋季均出现不同程度的水华。图2可见,梯级水电开发对五布河干流水体温度、pH、离子浓度等要素的影响呈现一定的沿程累积特征。

2.2 碳氮磷浓度及时空变化

2.2.1 碳氮磷的空间变化 五布河干支流水体TOC、TIC、DOC浓度变化范围分别为 $6.6 \sim 43.9$ 、 $4.0 \sim 75.5$ 、 $2.9 \sim 31.5 \text{mg}/\text{L}$ (平均值分别为 (20.2 ± 7.7) 、 (30.5 ± 14.1) 和 $(13.6 \pm 6.0) \text{mg}/\text{L}$);干流水体TOC与DOC浓度自

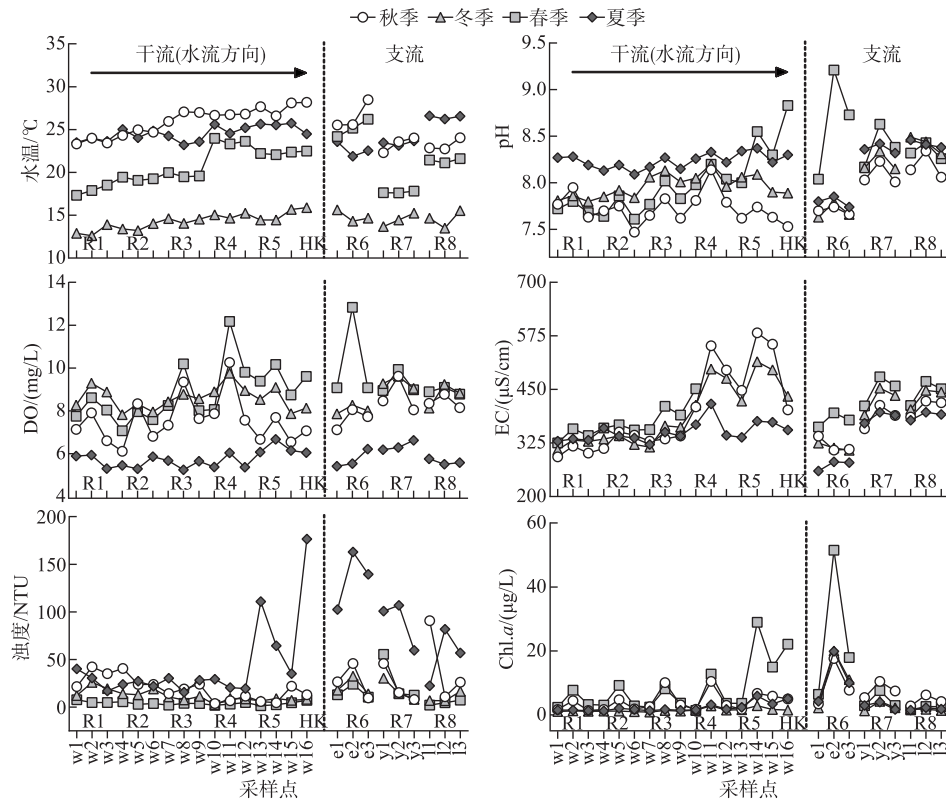


图2 五布河表层水体基本理化参数时空分布

Fig.2 Spatial and temporal distribution of basic physical and chemical parameters of surface water in Wubu River

上游向下游呈明显的升高趋势,POC 与 TIC 浓度沿程变化规律不明显. TN、NO₃-N 和 NH₃-N 浓度分别为 1.32~6.78、0.87~3.50 和 0.02~0.69 mg/L,年平均值分别为(3.18±0.87)、(1.86±0.58)和(0.16±0.13) mg/L;流域内水体 TN 浓度普遍超过国家地表水 V 类水标准(2.0 mg/L);水体无机氮以 NO₃-N 为主,而 NH₃-N 浓度较低(基本满足地表水 II 类水甚至 I 类水标准).空间变化上看,水体 TN 和无机氮浓度也均呈现上游向下游逐渐增加的趋势,尤其下游水库 R5 中 NH₃-N 浓度较上游 R1 高 4 倍多,3 条支流下游水库氮浓度均较高.全流域水体 TP 浓度(0.04~0.27 mg/L,平均值为(0.10±0.05) mg/L)相对较低,大部分断面可达到 III 类水标准;水体 TP、DTP(0.01~0.16 mg/L,平均值为(0.07±0.03) mg/L)和 PO₄³⁻-P 浓度(0.01~0.08 mg/L,平均值为(0.04±0.02) mg/L)沿五布河干流均呈明显升高,与上游 R1 相比,下游 R5 水体中 TP、DTP 及 PO₄³⁻-P 浓度分别增加了 1.6、1.8 和 2.2 倍.

图 3 所示,从单个“河流-水库-下泄水”系统看,大部分水库段有机碳浓度明显高于下泄水段和河流段,氮、磷浓度则表现为水库段与下泄水段普遍高于相应的入库河段,因此,梯级筑坝干扰下干流水体养分浓度变化呈现出“河段尺度”上波动的沿程“累积”模式.进一步分析发现(图 4),五布河干流及支流表层水体中养分的组成比例随梯级水库建设发生变化,下游水库水体中溶解性养分(DOC、PO₄³⁻-P 及 NH₃-N)在 TOC、TP、TN 中的占比高于上游水库,同时大部分水库段 DOC 和 PO₄³⁻-P 占 TOC 和 TP 的比例高于河流段,表明梯级水库建设可能改变了水体营养盐组分,影响水环境时空演化.

2.2.2 碳氮磷的季节变化 图 5 所示为各形态碳氮磷浓度的季节变化规律.全流域表层水体 TOC 和 DOC 在春季显著高于其余 3 个季节($P<0.05$),夏季略高于秋冬季;TIC 浓度则在冬季最高,秋季次之,春季和夏季无明显差异;TOC 和 DOC 浓度在“河流-水库-下泄水”尺度的分异受季节影响强烈,春季河流段与水库、下

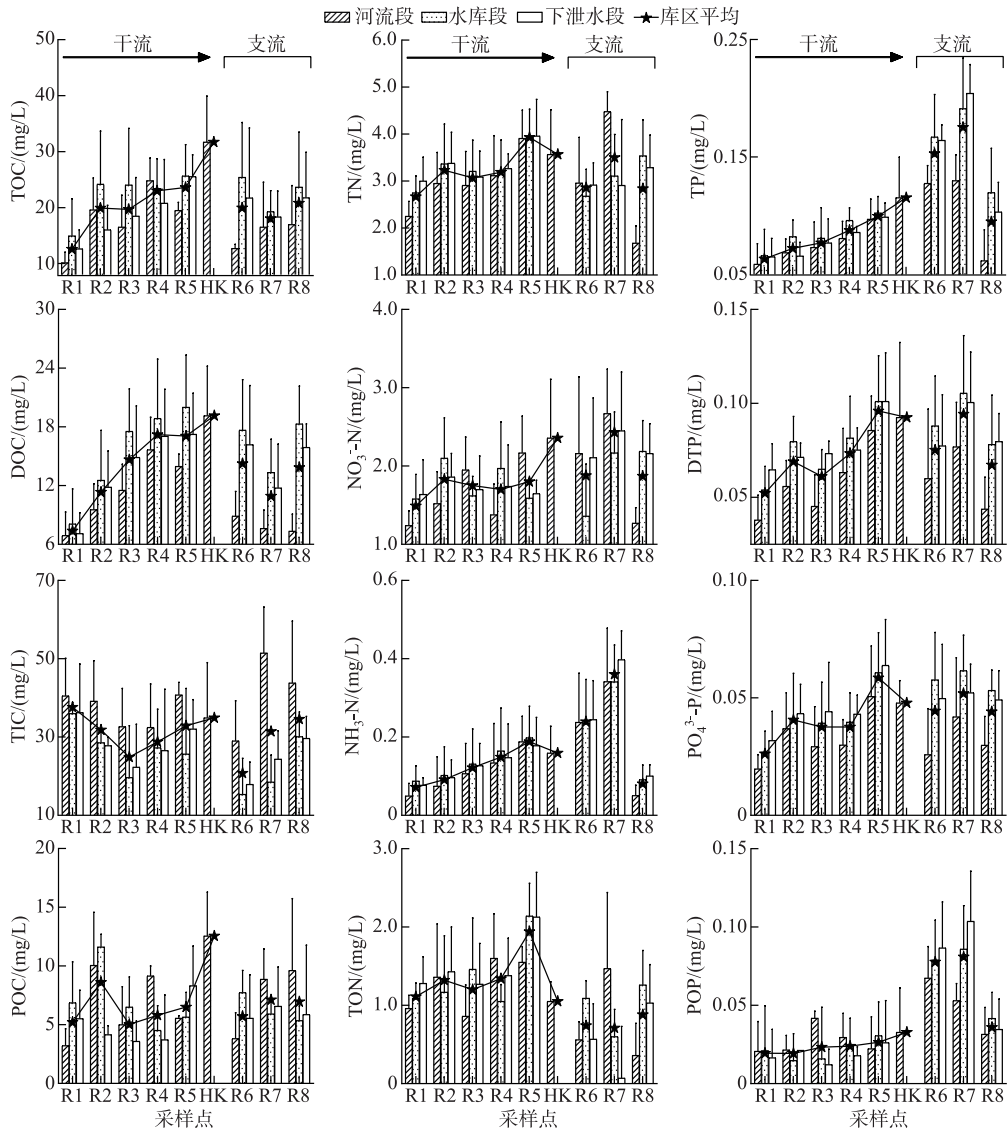


图3 五布河表层水体碳氮磷的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in surface water of Wubu River

泄水段的差异较大,而其他季节差异较小. TN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度在冬春季节(旱季)显著高于夏秋季节(雨季) ($P < 0.05$),而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度则呈现春季略高,秋季次之,夏冬季较低的季节模式;同一季节内,河流段、水库段、下泄水段氮丰度并无明显差异,即氮素在河流-水库-下泄水之间的分异受季节变化的影响较弱. TP、DTP 及 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的季节变化不明显,但“河流-水库-下泄水”尺度上,同一季节水库、下泄水的磷浓度均明显高于河流段(尤其是春秋季). 总体上,水体碳氮浓度呈现不同的季节模式,且河流-水库-下泄水之间的碳、磷浓度的差异受季节影响较大,夏季出现不同断面均质化特征.

2.3 五布河水体富营养化风险评价

2.3.1 水体氮磷比(N:P)的空间分异 N:P 是影响浮游植物生物量以及藻类群落结构的重要因素,也是影响水体藻类水华暴发的重要指标^[33]. 一般而言,水体 $\text{N:P} < 7 \sim 10$ 时,水体中的浮游植物表现为氮限制状态,当

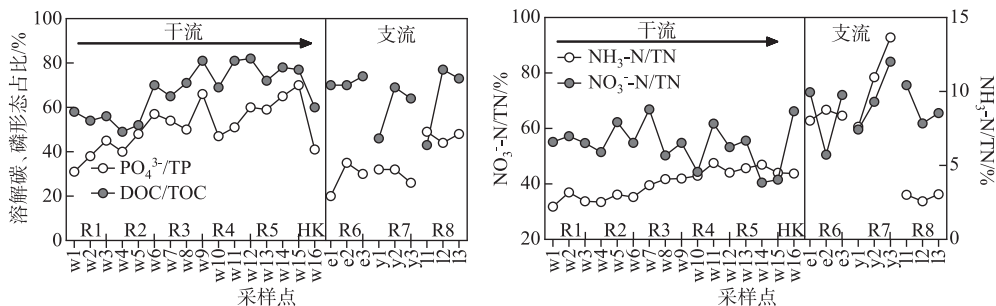


图4 溶解态营养盐的占比
Fig.4 The proportion of dissolved nutrients

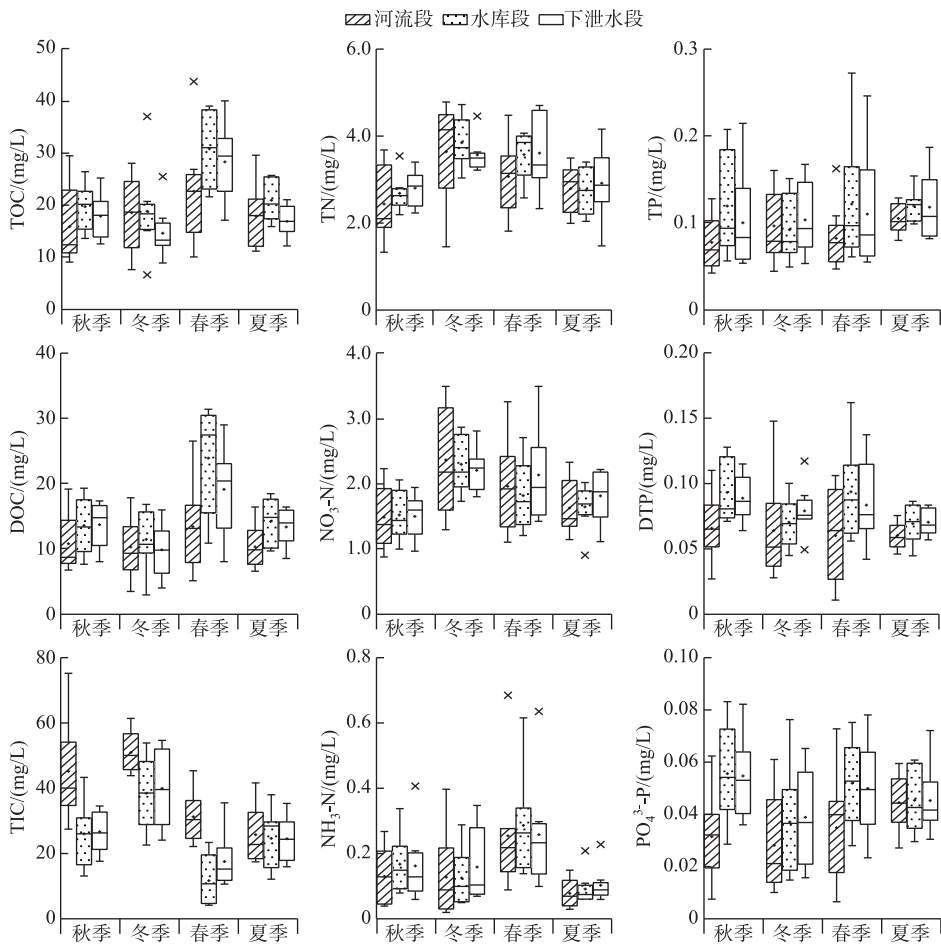


图5 五布河表层水体碳氮磷的时间分布

Fig.5 Temporal distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in surface water of Wubu River

N:P>23~30 时,水体中的浮游植物表现为磷限制,当 N:P 介于两者之间时,为浮游植物生长的最佳范围,易造成水体水华暴发^[34]. 五布河流域水体 N:P 变化范围为 7.85~65.05 (图 6a),结合水体氮磷浓度特征分析,

干流水体大多属于磷限制,支流水体大部分为水华高风险断面. 梯级水电开发影响下,五布河干流水体 N:P 表现出沿程降低趋势,下游库区略低于上游(图 6a). 随着磷元素在下游水体的逐级累积(图 3),将进一步增大下游水库的水华风险.

2.3.2 水体富营养化指数(EI)的时空特征 五布河干、支流各监测断面水体富营养化指数的时空分布如图 6b 所示. 依据对数型幂函数普适指数公式各级分级标准,除个别断面外,五布河流域大部分断面全年均处于富营养状态(35.1~58.7),富营养化风险较大. 同时,在五布河干流水体 EI 指数自上游向下游呈波动增长趋势,下游库区水体 EI 指数明显高于上游库区,而且在单个河流-水库-下泄水系统中,水库段 EI 指数普遍高于下泄水和入库河流段. 由于水库段光热条件及水动力条件均有利于藻类繁殖,因此梯级水库系统可能导致河道形成一系列串联的藻华增殖区,进而影响全流域生态安全.

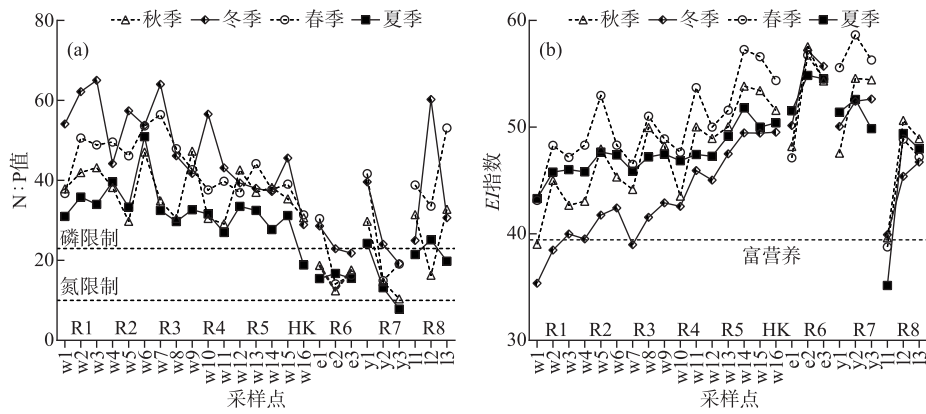


图 6 五布河水体 N:P 和水体富营养化指数

Fig.6 N:P ratio and water eutrophication index in Wubu River

2.4 水环境因子时空演变关联性及水力学驱动

2.4.1 水环境因子间的协同演化 分析五布河流域水环境因子间的相关关系表明(图 7),各生源要素总量(TN、TP 及 TOC)间的相关性均不显著,仅 TN 与 TOC 间存在较弱的正相关关系;同时,除 NO₃⁻-N 外,溶解性养分之间均呈现显著的相关关系,其中 NH₃-N、DOC 与 DTP、PO₄³⁻呈极显著正相关关系(P<0.01). 表明,梯级水电开发导致的流域水文环境的变化可能导致五布河流域水体溶解性养分出现明显的同步演化,而生源要素总量的时空分布格局对梯级水电开发的响应呈非同步性. 此外,水体氮浓度的时空分布格局与水温、浊度、DO 等有关,有机碳的分布则与 pH、DO 等密切相关;TP 与浊度、pH 呈显著正相关关系,而与 DO 无相关性. 可见,碳氮磷在水体中的累积与代谢受到不同因子的影响. 最后,水体叶绿素 a 与不同形态的碳氮磷浓度(TN 除外)均呈显著的相关关系,同时与 pH、DO 也具有极显著正相关性,表明梯级水电开发下水文格局及水体营养盐格局的改变将影响水体初级生产力,进而影响水体 OC、pH 和 DO 特征. 而 pH 和 DO 条件变化进一步作用于水体碳氮磷的生化代谢过程,形成复杂的协同演变.

悬移质(主要是泥沙)作为水体营养物的载体,可能是影响水体养分形态和分布的主要因素. 进一步分析水体悬浮颗粒物浓度与水体养分及溶解性养分占比的相关性可见(表 2),全年水平(IF=100),水体悬浮颗粒物与 TN、TOC、TON 呈显著的负相关性,与 TP、POP 呈显著的正相关关系. 同时,水体悬浮颗粒物与溶解性碳、氮、磷浓度均无显著相关关系,但与 PO₄³⁻:TP、TIN:TN 之间具有显著的负相关关系. 然而,这种关系受季节变化影响较大,春季水体悬浮颗粒物与氮、磷关系密切,夏季与水体磷浓度呈显著的正相关关系,秋、冬季则均无显著关系,这可能与悬浮颗粒物来源的季节性差异有关.

2.4.2 水动力条件对生源要素分布格局的影响 水文条件的改变是梯级水库水环境及水生态发生变化的根本驱动^[23]. 进一步分析水力滞留时间与各生源要素分布格局的关系可见(图 8),五布河流域表层水体 TOC、TN、TP、NO₃⁻-N、NH₃-N 以及 DTP 等均与水力滞留时间呈显著的正向线性关系,而 POC 与水力滞留时间呈一

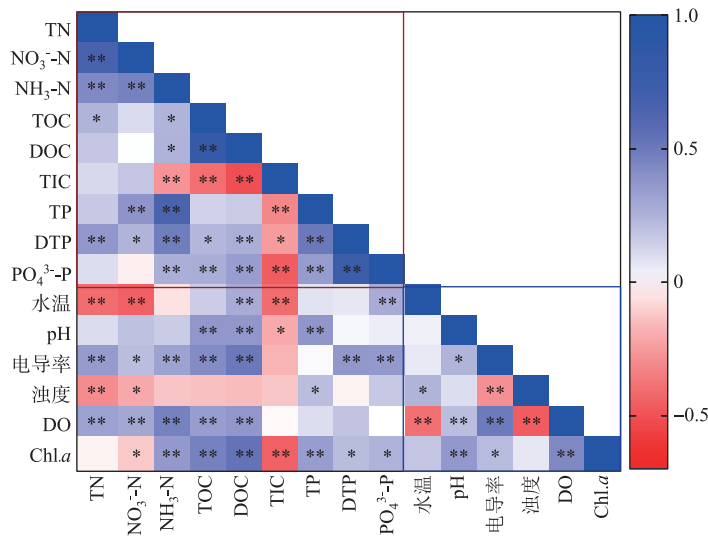


图 7 五布河水体碳、氮、磷浓度及其他参数之间的 Pearson 相关性
 (* 表示显著性水平 $P < 0.05$, ** 表示显著性水平 $P < 0.01$)

Fig.7 Pearson correlation coefficients among carbon, nitrogen, phosphorus concentrations and other parameters of the water in Wubu River (* signifying significance level $P < 0.05$, ** signifying significance level $P < 0.01$)

表 2 五布河水体碳、氮、磷浓度及溶解性养分占比与水体悬浮颗粒物浓度的相关性分析

Tab.2 Pearson correlation analysis between the concentration of C, N, P, fraction of dissolved nutrients with suspended solids in surface water of Wubu River

时间		TN	NO ₃ ⁻ -N	NH ₃ -N	TON	TP	DTP	PO ₄ ³⁻ -P	POP
全年	<i>r</i>	-0.293	-0.120	-0.170	-0.255	0.258	-0.070	0.048	0.343
	<i>P</i>	0.003	0.233	0.091	0.010	0.010	0.491	0.637	0
秋季	<i>r</i>	-0.373	-0.088	-0.347	-0.283	-0.222	-0.200	-0.216	-0.147
	<i>P</i>	0.066	0.677	0.090	0.171	0.287	0.338	0.300	0.482
冬季	<i>r</i>	-0.122	0.310	0.247	-0.330	0.133	-0.027	0.108	0.218
	<i>P</i>	0.562	0.131	0.234	0.132	0.526	0.897	0.606	0.295
春季	<i>r</i>	0.418	0.412	0.642	0.078	0.667	0.070	-0.269	0.730
	<i>P</i>	0.038	0.041	0.001	0.710	0	0.740	0.193	0
夏季	<i>r</i>	-0.374	-0.262	0.515	-0.244	0.626	0.541	0.706	0.458
	<i>P</i>	0.066	0.206	0.008	0.240	0.001	0.005	0	0.021

时间		DOC	DIC	TOC	POC	PO ₄ ³⁻ :TP	DOC:TOC	TIN:TN
全年	<i>r</i>	-0.193	-0.011	-0.347	-0.145	-0.280	-0.051	-0.215
	<i>P</i>	0.089	0.913	0	0.150	0.016	0.615	0.041
秋季	<i>r</i>	-0.214	0.203	-0.593	-0.329	0.114	-0.099	0.194
	<i>P</i>	0.111	0.331	0.002	0.108	0.588	0.637	0.352
冬季	<i>r</i>	-0.152	-0.237	-0.224	0.064	0.007	-0.221	0.398
	<i>P</i>	0.467	0.253	0.282	0.761	0.973	0.289	0.049
春季	<i>r</i>	0.461	0.039	-0.105	0.078	-0.633	-0.200	0.138
	<i>P</i>	0.020	0.855	0.618	0.713	0.001	0.337	0.512
夏季	<i>r</i>	0.224	-0.296	0.270	0.165	0.110	-0.009	0.119
	<i>P</i>	0.282	0.151	0.192	0.429	0.599	0.968	0.571

定的负相关关系。水力滞留时间能够解释 TOC 空间变异的 37%~59%, TP 空间变异的 79%~90%, 对水库间 TN 差异性的解释量也高达 77%, 表明梯级水库的水力特征是各生源要素总量的空间变异的关键驱动因素; 同时, 水力滞留时间对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ (35%~54%) 和 $\text{NH}_3 \text{-N}$ (80%~85%) 变异性的解释量也较高, 而对 DOC 和溶解性 P 的解释量较低。此外, 水力滞留时间与流域内水体 EI 指数以及 Chl.a 浓度也具有极显著的正相关关系 (图 9), 进一步表明, 沿五布河流域不同水力特征的水库空间分布可能是控制流域内水体富营养化和水华高风险断面分布的关键因素。

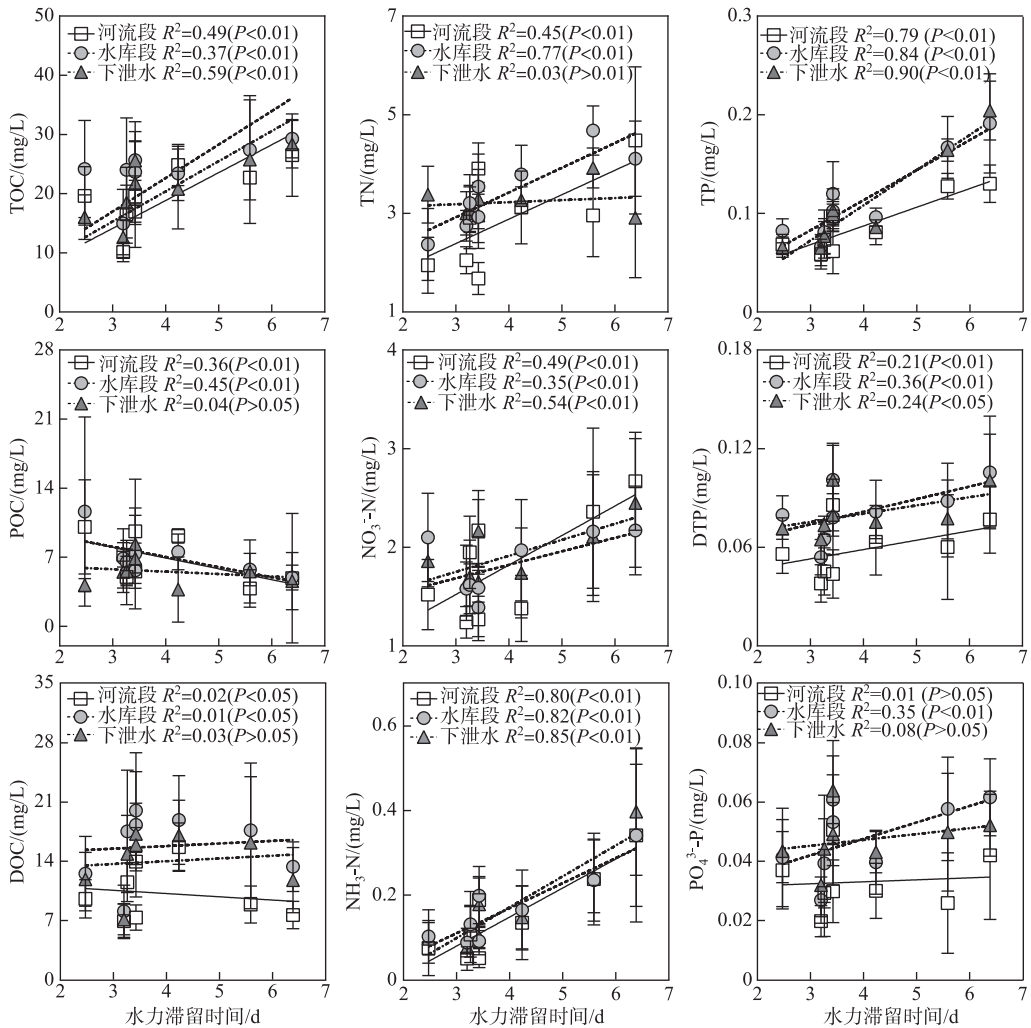


图 8 水力滞留时间与各生源要素分布格局的关系

Fig.8 The relationship between the hydraulic retention time and the distribution pattern of carbon, nitrogen and phosphorus

3 讨论

3.1 水电梯级开发下五布河流域水体生源要素的沿程累积

水电梯级开发使得河流“原始连续流动状态”被系列串珠状“河流—水库连续体”所取代, 迫使河流生态系统结构和功能发生彻底改变, 影响流域水文水力条件以及生源物质的输移与分配, 进而导致流域水体

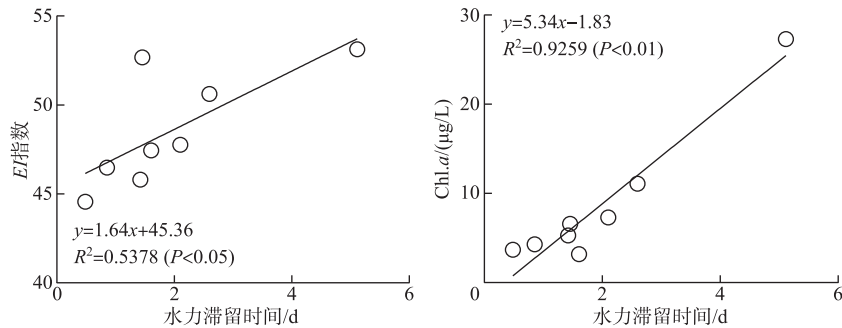


图9 水力滞留时间与EI和叶绿素a浓度的相关关系

Fig.9 Relationship between hydraulic retention time and EI, chlorophyll-a

物理化学性质发生显著改变^[8,35]. 已有研究表明,梯级水库建设对河流水生态因子的影响可能存在逐级“累积效应”^[36-37],例如颗粒悬浮物拦截率随梯级筑坝逐渐增加,导致水体浊度逐级下降;水库的热量延滞效应导致水温沿程升高^[38];水体各类离子及污染物浓度逐级累积和水质富营养化趋势加重^[36]等. 本研究中,五布河水体浊度沿干流逐级下降,温度、pH均有逐级升高的趋势(图2). 王万发等^[14]研究指出,梯级筑坝导致水体碳代谢过程和碳酸盐平衡改变,进而影响水库和下泄水的pH值,且这种影响在梯级水库间存在传递效应. 本研究五布河上下游海拔高差较大,水温的变化可能与海拔降低有关. 但从河流—水库—下泄水温的普遍增加的现象看,水库的热量存储对水温的沿程增加可能具有一定的累积影响. 此外,本研究水体电导率沿上游向下游水库呈现明显增加(图2),与王昱等^[25]在黑河流域研究结果一致. 因此,从水体理化性质看,梯级筑坝对五布河水生生境可能产生了一定的“累积影响”.

梯级水库建设增强了水体悬浮颗粒物拦截和滞留,导致下游水体生源要素(尤其POC、颗粒有机氮、POP等)可能出现不同程度的衰减^[14,39-40]. 然而,五布河梯级水库表层水体生源要素的总量(TOC、TN、TP)均沿上游向下游呈明显增加的空间分布模式(图3),这与传统观点认为梯级水库拦截颗粒物导致下游生源要素浓度降低的结论相悖^[28,41],但与程豹等^[21-22,25]等的监测结果一致. 梯级水库建设带来的光热条件与水动力条件改变,导致水体初级生产增强(图2). 浮游植物生长代谢固定无机碳,补给了水体TOC浓度. 喻元秀等^[42]研究指出,梯级筑坝影响下乌江流域水体有机碳浓度受上层光合作用和下层呼吸作用的共同调控. 本研究中,相关分析结果显示五布河水体TOC、DOC与Chl.a呈极显著的正相关,而TIC与Chl.a呈负相关(图7),肯定了水体内源初级生产对碳的空间变异具有一定的解释力. 而且,水库中内源生物质有机碳更易形成悬浊态而不易沉积^[43],为梯级水电开发下TOC的沿程累积提供了可能. 从单个“河流—水库—下泄水”系统看,水库段Chl.a、TOC、POC及DOC浓度均明显高于其对应的入库河段(图3),形成了连续的“有机碳泵”效应. 这种由筑坝引起的生物碳泵效应在喀斯特河流中被广泛提出,在梯级水库中具有连续累积特征^[12]. 此外,本研究中水体DOC浓度及其在TOC占比呈现明显的梯级增长(图4),且流域内各水库和下泄水断面DOC:TOC(69.21%、71.52%)显著高于河流段(60.09%),均明显高于全球平均值(55.3%)^[44],违背了季风区河流携带的颗粒碳较多的一般规律. 这可能归因于筑坝导致藻类及微生物富集有利于水体DOC的积累^[45]和颗粒碳在梯级水库中的沉积. Shi等^[46]的研究中就指出,梯级水库水体细菌丰度的显著增加是导致DOC浓度逐级增加的重要原因. 由此推断,梯级水电开发下,库区段水体生物碳泵作用的改变可能是导致五布河TOC与DOC逐级增加的重要机制(图10).

梯级水库建设对河流TN、TP分配格局的影响存在多种复杂调控路径,包括营养盐多级物理拦截与滞留,固定与再悬浮,吸附—解吸与矿化作用,以及河流生态系统“消纳”等^[18]. 五布河干流梯级水库TN、TP浓度沿程增加,与梯级筑坝下养分的“拦截—衰减”预期也并不一致^[28]. Chen等^[22]对湄公河的研究中发现,湄公河上游梯级水库水体TN和TP浓度也并未下降,甚至有所增加. 王昱等^[25]对黑河的研究发现,水体TP浓度沿梯级水库呈增加趋势,其将这一现象归因于上游外源性P输入在梯级水库中的连续积累. 研究认为,经过梯级水库的逐级分选,下游水库沉积层氮磷的生物有效性显著提高,释放潜势较大^[22]. Shi等^[47]研究表

明,上游水库蓄水导致沉积层中微生物丰度增加,加速了氮磷的释放及下泄输移,补给下一级水库水体氮磷丰度. 因此,五布河梯级水库 TN 和 TP 浓度沿程增加的可能的机制是“上游水库拦截—沉积—分解与再悬浮—下泄—下游水库累积”(图 10). 进一步从氮磷形态分析可见,水体颗粒态磷沿程增加或衰减的规律不明显,而溶解性磷(DTP、 PO_4^{3-})及无机氮浓度在水库之间的递增效应极为显著(图 3). 而且,水体 NH_3-N 、 $PO_4^{3-}-P$ 等在 TN 和 TP 中占比也呈沿程增加的趋势(图 4),可见水体氮磷浓度的沿程增加更多来源于溶解性养分的积累. 梯级水库增加了河流还原性环境,有利于生物可利用磷(交换性磷、铁结合磷和有机结合磷)通过微生物分解和物理再悬浮释放入水体^[48-49],同时抑制亚硝化与硝化过程^[25],导致下层水体中溶解性 P 与 NH_3-N 的富集. 同时,本研究中水库均为下泄式滚水坝,上级库区底层水体中溶解性 N、P 通过下泄能够补给下游河段和下一级水库(图 3). 下泄水的 NH_3-N 、DTP 及 $PO_4^{3-}-P$ 浓度普遍高于上游入库河流段(图 3)也进一步佐证水库蓄水对水体氮磷“活化作用”. 因此,水电梯级开发使得河流沿程形成系列 N、P“蓄积库”和“反应器”,促使溶解性氮磷释放和下泄输移,进而导致下游水体氮磷浓度提高(图 10),增加了下游水库富营养化的风险.

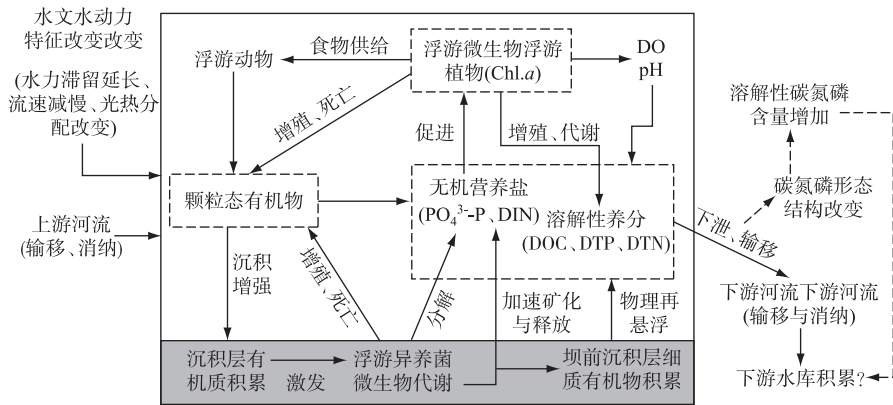


图 10 小型梯级水库中碳氮磷的协同演化关系的调控过程

Fig.10 Regulation process of co-evolution of carbon, nitrogen and phosphorus in small cascade reservoirs

除此之外,泥沙作为水体中污染物迁移、转化的主要载体,对水体碳氮磷分布及赋存形态具有一定的主导作用^[50-51]. 悬浮质对营养物的吸附—沉积是稳定的水—沙环境系统中营养物自净的关键环节^[52]. 水体中 N、P 能够被悬浮泥沙吸附并随泥沙颗粒输移或沉积,形成富营养的表层沉积层^[51]. 当沉积层中 N、P 浓度达到一定水平,则通过生物转化和物理扩散释放回水体,形成二次污染^[15]. 因此,筑坝导致水体泥沙分布规律显著改变,尤其梯级筑坝下沿程水体泥沙浓度的减少(图 2),可能对水体碳氮磷的分布产生影响. 研究表明,水体泥沙浓度越高,对氮磷的“吸附—沉降”作用越强烈,对天然水体营养盐具有一定的缓冲作用^[53]. 五布河上游至下游,水体悬浮颗粒物的减少导致对营养物的物理“吸附—沉降”机制减弱,是下游水体溶解性养分浓度增加的可能原因(图 2,3). 分析发现,全年五布河水体悬浮颗粒物与 TOC、TN、TON 浓度呈显著的负相关关系. 特别是,水体悬浮颗粒物与 $PO_4^{3-}:TP:TIN:TN$ 之间呈显著的负相关关系,表明悬浮颗粒物对下游水体溶解性氮磷浓度增加具有一定的解释力. 然而,而悬浮颗粒物与 TP、POP 仍呈显著的正相关关系,这主要是因为悬浮物对 P 的吸附作用较强^[54],导致 P 与悬浮颗粒物同步性特征. 由于悬浮颗粒物对 N、P 的吸附性存在差异,导致水体 N、P 营养物非平衡沉积和空间格局分异^[54]. 本研究梯级水库系统建设时间较长,形成了相对稳定的水沙格局,下游水库泥沙对水体中养分的吸附—沉积效应减弱,对水体氮磷浓度时空分异有一定的作用. 本研究由于数据的缺乏,未能充分揭示泥沙作用与生物地化循环作用对碳氮磷在水体中分布格局的相对重要性,也是未来探索的有益方向.

3.2 水电梯级开发下流域水环境因子的协同演变及水力学驱动

筑坝显著改变了河流水文水动力条件、光热分布以及养分输送等,形成了特定的河—库生境,进而发展

出不同的生物群落、生产力格局以及生源物质的循环模式^[18]。基于“梯级水库连续体”概念框架^[19],梯级水库驱动下河流生态系统结构与功能要素存在同步“累积”变化,可能导致水环境因子之间呈现新的关联性。本研究发现,尽管水体各生源要素总量(TN、TP及TOC)在梯级水库间均呈现明显的“累积”,但三者之间相关性并不显著(图8),表现出时空配置的非同步性。这主要归因于筑坝河流非平衡化学计量比沉积^[43]以及生源要素生物地化行为的差异。研究认为,水库对P的拦截效率较高(可达80%以上),而对N的拦截率最弱^[8],导致下游河流氮磷浓度的“解关联”^[55]。梯级筑坝下水力滞留时间的延长和泥沙浓度的衰减可能进一步增强养分“解关联效应”^[56]。

然而,水体溶解性养分之间均存在显著的正相关关系(图8),表现出时空配置的同步性,侧面反映出梯级筑坝可能主导了溶解态养分的协同演化。梯级水库群的驱使下,水体中碳氮磷有充足的时间参与内源生物地化过程,并形成相互耦合的关联^[57]。进一步分析表明,水体叶绿素 a 浓度与 NO_3^- -N、 NH_3 -N、DTP、 PO_4^{3-} -P、DOC等均呈显著正相关关系(图7)。随着水体流速减慢,沉积层中养分的积累和微生物丰度的增加促使无机营养物的释放,进而影响水体中浮游植物、藻类及细菌的增殖。这些生物生长、代谢进一步补给了水体DOC浓度。相关研究认为,湖泊水体中浮游植物的生长与代谢是碳氮磷之间协同演变的关键过程。韩翠红等^[12]研究指出,筑坝形成的河段“湖泊化”能够增强水体的生物碳泵效应,同时影响水体无机氮与总磷的时空分布。此外,叶绿素 a 浓度与DO、pH的正相关关系表明,水体藻类繁殖提高了DO,而且通过DIC的消耗使得水体pH升高(图7,图10)。pH升高导致水体碳酸盐平衡改变,水体 CO_2 分压降低,有利于水-气界面 CO_2 吸收和周转,提高表层水体的碳浓度^[43];同时DO和pH升高有利于水体微生物好氧代谢的增强,提高颗粒物的矿化效率和生物地化效率,促使非溶解性的碳氮磷转变为溶解态^[23],进一步影响水体氮磷形态的转变(图10)。由此,梯级水库可能增强生物调控机制下的水体“碳氮磷”协同演变,导致溶解性养分间形成复杂的协同演变关系。

除生物过程的调控外,水力滞留时间也是调控“河流-水库”系统水环境及水生态变化的关键驱动力^[14]。梯级分布的水库对生源要素的拦截、滞留及转化等受各个水库水力负荷及水力滞留时间的强烈影响,导致“累积影响”的强度存在空间变异,进而出现流域水环境变异的波动性和不连续性(图3)。分析发现,水力滞留时间与水体TN、TP及TOC浓度具有良好的线性关系(图9),是五布河流域梯级水库间营养分异的主要调控因素。以往的研究中,水力滞留时间与营养元素拦截率以及沉积层中N、P丰度密切相关^[14],而与水体生源要素的浓度之间的关系存在不确定性。已有大部分研究认为滞留时间越长,水体颗粒物沉积越彻底,水体TOC、TN、TP及颗粒态养分浓度越低^[22, 58]。然而,这些研究大多在大型河流上^[59],水库水力滞留时间足够长(>30 d)、库区水体形成光热分层,上下扰动较弱,因此导致表层水体养分浓度降低^[3]。本研究水库滞留时间较短(<6 d),水深较浅(<5 m),不易形成稳定分层水团,水体垂向交换频繁,沉积层中的可溶性养分释放并补给表层水体;同时上覆水中微生物与藻类的增殖、代谢具有N、P生物泵的作用,促使养分由沉积层向表层水体的迁移和积累^[12]。此外,从悬浮颗粒物与碳氮磷浓度的相关分析结果可见(表2),水库水力滞留时间越长,水体中泥沙及悬浮颗粒物的沉积越彻底,对水体中溶解性养分的“吸附-沉积”作用越弱,也是滞留时间与溶解性氮磷浓度呈正相关的可能机制。图9可见,水力滞留时间对水库段水体 NO_3^- -N、 NH_3 -N、DTP等溶解性营养盐的积累具有重要影响(尤其是 NH_3 -N浓度)。特别说明的是,水力滞留时间与水库下游河段养分浓度也呈正向关系,表明上游水库对养分的调控作用能够影响下游河段,并进一步影响下一级水库。可见,在小型的梯级水库群中,下游水库泥沙拦截和沉积增强,导致对水体溶解性养分的“吸附-沉积”作用减弱,加之浅水水库生物-物理驱动的沉积层溶解性养分吸附-释放(及再悬浮)差异是导致水体生源要素空间分异的主要机制。

3.3 梯级水电开发对河流生源要素季节变化模式的影响

由图5可见,五布河流域水体C、N、P浓度具有不同程度的季节变化,其中TOC、DOC浓度呈现春季最高,冬季最低的季节模式。河流中有机碳的来源通常包括内源和异源两部分,异源性有机碳主要来自陆地土壤侵蚀及植物残体的径流输入,内源性有机碳则主要是水生生物和浮游微生物的生长代谢产物。五布河处于亚热带季风气候区,冬季低温少雨,土壤侵蚀带来的碳输入较少,内源水体生物代谢较弱,因此有机碳浓度最低;而春季降雨稀少,异源性有机碳输入较弱,但梯级筑坝导致浮游生物的大量繁殖补给内源性有机

碳,因此有机碳浓度较高.刘金科等^[60]对九龙江的研究中,水库筑坝后浮游植物的生物量决定了九龙江河水中 DOC 的浓度的季节变化.本研究水体 TIC 浓度在春季最低也进一步佐证了浮游植物光合作用固定 TIC,而补给了 DOC 和 TOC(图 5),这与杨梦迪等^[61-62]的研究结果相似.尽管夏季与秋季高温多雨导致异源性有机碳输入增多,但一方面,山区河流汇流快、流量大,外源碳输入多为 POC,在梯级水库群作用下大量沉积;另一方面,高温带来的异养呼吸增强,特别是浅水型河流中有机碳被快速分解;此外,径流的快速汇入对河流水体生源要素浓度产生强烈稀释效应,因此夏秋季水体 TOC、DOC 浓度普遍较低.从不同水文断面来看,河流段、水库段及下泄水段水体碳浓度的季节模式一致,但春季水库段有机碳浓度远高于河流段,冬、夏季则没有明显差异.表明梯级水电开发影响下流域出现阶段性浮游生物增殖热点,导致河流水体内源性有机碳在不同季节出现分异.

五布河水体 TN、NO₃-N 在枯水期(冬春季)明显高于丰水期(夏秋季),这与同区域的小型山地河流(黑水滩河^[63]、汝溪河^[64])营养盐的季节变化模式相同.一般认为,丰水期降雨丰富,地表冲刷作用较强,加之雨热同期,流域氮磷生物代谢作用增强,水体氮磷浓度高于枯水期^[21].然而,夏季输入的营养盐多以颗粒态为主,在梯级筑坝的河流中,这些颗粒态养分能够在水库段形成沉积,使得表层水体养分总量并未增加;同时,溶解性养分在水库段被浮游生物固定并向深层转移,导致表层水体养分浓度进一步降低.此外,夏秋季温度较高,水体氮素的生物地化效率提高,尤其梯级水库对水力学条件的改变,有利于水体反硝化及硝化-反硝化过程,部分氮素以 N₂或 N₂O 形式排放^[65],而冬季这些过程受低温限制,反而使得表层水体氮素形成积累.此外,在山地河流中,一些研究也发现了氮营养物季节模式受雨季稀释效应的驱动^[63].五布河流域地形坡度大,森林密集,低污染负荷的地表径流输入可能对营养盐浓度产生强烈的稀释(夏秋季降低的电导率也反映出径流携带的离子浓度较低).虽然五布河水体磷浓度同样受到稀释效应、泥沙吸附-沉积作用及浮游生物固定下沉等过程的影响,但夏季外源输入、沉积层有机磷活化和再释放等对表层水体磷素的补给可能抵消这些作用,并未表现出明显的季节变化,但具体的影响机制并不清楚.本研究强调,在梯级水库开发影响下,山区小型河流水体氮磷浓度的时空模式的驱动机制发生变化,在未来水环境管理中应给予更多的关注.

3.4 水电梯级开发下流域水体富营养化风险变化

水体富营养化是筑坝河流面临的最重要的生态威胁^[15].河流筑坝导致水文情势变化以及光热分层为水体藻华生长提供了良好的条件,加之营养物的拦截和释放,水体富营养化风险大大提高^[8].梯级筑坝干扰下,五布河表层水体营养物呈现显著的逐级累积,且水库段溶解性营养物浓度普遍高于河流段,具备了水华的条件.根据 *EI* 指数评价,五布河大部分监测断面全年处于高富营养化状态(图 6).特别是,*EI* 指数的空间特征与碳氮磷浓度分布相似,呈自上游库区向下游逐级增加的趋势,表明梯级筑坝增强了下游水库的富营养化风险.同时,N:P 作为水体营养结构的主要指标^[32],影响水体藻类及其他浮游生物群落结构.从 N:P 分析可见,水体大部分断面 P 限制较为明显,因此控制外源 P 输入对五布河流域富营养化防控具有重要意义.然而,由图 3 可见,梯级水库对 P 的累积效应更显著,将加剧水体富营养化的风险.同时,五布河下游 3 条支流上的水库 N:P 比均为浮游植物生长的最佳范围,具有极高的水华暴发风险.随着支流的不断输入,可能进一步加剧干流下游水库的水质恶化.同时,梯级水库水体 N:P 自上游至下游相对平稳(下游水体 P 限制有一定缓解),加之生境条件的均质化,水体藻类类群组成也可能出现同质性.进一步分析水力滞留时间与 *EI* 指数、叶绿素 *a* 的关系表明(图 9),水力滞留时间是调控 *EI* 指数及叶绿素 *a* 空间分异的关键因素.这与前文所述水力滞留时间影响营养盐分配格局的结论一致.因此,五布河水质保护管理中,梯级水电开发显著增加了水体富营养化状态及水华暴发风险,水力滞留时间的调控和 P 输入控制是流域富营养化防控的关键,也是未来梯级筑坝的小流域综合管理的有效路径.

4 结论

1) 五布河梯级水库建设对水环境演化具有重要影响,梯级水库群初级生产增强是导致 TOC 和 DOC 浓度沿程增加的主导因素;同时,梯级水库可能形成一系列氮磷“蓄积库”和“反应器”,促使溶解性氮磷释放和下泄输移,加之下游水库泥沙对氮磷养分的吸附-沉积效应的减弱,导致氮磷沿程积累及溶解性养分的比

例逐级升高。

2) 梯级筑坝降低了流域水体碳氮磷总量间的相关关系, 呈现出养分总量的“解关联”, 但增强了溶解性养分的协同演化关系。水体 Chl.a 浓度与水体养分浓度呈显著的相关关系, 梯级筑坝下水环境之间形成了复杂的响应关系; 水力滞留时间是影响五布河梯级水库间养分分异的关键因素。

3) 五布河流域水体 TOC 和 DOC 在春季最高, 冬季最低; TN、NO₃-N 在枯水期(冬春季)明显高于丰水期(夏秋季), 其它养分形态无明显季节规律。降雨稀释、藻类繁殖、微生物分解及再释放等是导致养分季节变化的主要过程。

4) 五布河全流域均为高富营养化风险, 由于养分的逐级增加, 下游水库富营养化风险增强; 外源 P 输入控制以及梯级水库水力滞留时间的调控是五布河流域富营养化防控的关键。

5 参考文献

- [1] Friedl G, Wüest A. Disrupting biogeochemical cycles-consequences of damming. *Aquatic Sciences*, 2002, **64**(1): 55-65. DOI: 10.1007/s00027-002-8054-0.
- [2] Maavara T, Lauerwald R, Regnier P *et al.* Global perturbation of organic carbon cycling by river damming. *Nature Communications*, 2017, **8**: 15347. DOI: 10.1038/ncomms15347.
- [3] Wang FS. Impact of a large sub-tropical reservoir on the cycling of nutrients in a river. *Water Research*, 2020, **186**: 116363. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116363.
- [4] Lehner B, Liermann CR, Revenga C *et al.* High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, **9**(9): 494-502. DOI: 10.1890/100125.
- [5] Nilsson C, Reidy CA, Dynesius M *et al.* Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. *Science*, 2005, **308**(5720): 405-408. DOI: 10.1126/science.1107887.
- [6] Middelburg JJ. Are nutrients retained by river damming? *National Science Review*, 2020, **7**(9): 1458. DOI: 10.1093/nsr/nwaa073.
- [7] Grill G, Lehner B, Thieme M *et al.* Mapping the world's free-flowing rivers. *Nature*, 2019, **569**(7755): 215-221. DOI: 10.1038/s41586-019-1111-9.
- [8] Liu CQ, Wang FS, Wang YC *et al.* Responses of aquatic environment to river damming—from the geochemical view. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 384-396. [刘丛强, 汪福顺, 王雨春等. 河流筑坝拦截的水环境响应——来自地球化学的视角. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(4): 384-396.]
- [9] Jossette G, Leporcq B, Sanchez N *et al.* Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France). *Biogeochemistry*, 1999, **47**(2): 119-146. DOI: 10.1007/BF00994919.
- [10] Vörösmarty CJ, Meybeck M, Fekete B *et al.* Anthropogenic sediment retention: Major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 2003, **39**(1/2): 169-190. DOI: 10.1016/S0921-8181(03)00023-7.
- [11] Wang FS, Wang BL, Liu CQ *et al.* Changes in nutrient ratios and phytoplankton community structure caused by hydropower development in the Maotiao River, China. *Environmental Geochemistry and Health*, 2014, **36**(3): 595-603. DOI: 10.1007/s10653-013-9583-2.
- [12] Han CH, Sun HL, Wei Y *et al.* Spatiotemporal variations of hydrochemistry in Karst dammed rivers and carbon fertilization effect of biological carbon pump: A case study of Pingzhai Reservoir and Lake Hongfeng in Guizhou Province. *J Lake Sci*, 2020, **32**(6): 1683-1694. DOI: 10.18307/2020.0610. [韩翠红, 孙海龙, 魏榆等. 喀斯特筑坝河流中生物碳泵效应的碳施肥及对水化学时空变化的影响——以贵州平寨水库及红枫湖为例. 湖泊科学, 2020, **32**(6): 1683-1694.]
- [13] Zhang HX, Huo SL, Cao XH *et al.* Homogenization of reservoir eukaryotic algal and cyanobacterial communities is accelerated by dam construction and eutrophication. *Journal of Hydrology*, 2021, **603**: 126842. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126842.
- [14] Wang WF, Zhong J, Li C *et al.* The influence of cascade reservoir construction on water chemistry distribution in Karst area. *J Lake Sci*, 2020, **32**(3): 713-725. DOI: 10.18307/2020.0311. [王万发, 钟君, 李彩等. 喀斯特地区梯级水库建造对水化学分布的影响. 湖泊科学, 2020, **32**(3): 713-725.]
- [15] Bao LL, Li XY, Su JJ. Phosphorus cycling and the associated ecological effects of eutrophication in dam-regulated rivers. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(14): 4663-4670. [鲍林林, 李叙勇, 苏静君. 筑坝河流磷素的迁移转化及其富营养

- 化特征. *生态学报*, 2017, **37**(14):4663-4670.]
- [16] Yang K, Deng X, Li XL *et al.* Impacts of hydroelectric cascade exploitation on river ecosystem and landscape: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(5): 1359-1367. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2011.0181. [杨昆, 邓熙, 李学灵等. 梯级开发对河流生态系统和景观影响研究进展. *应用生态学报*, 2011, **22**(5): 1359-1367.]
- [17] Poff NL, Schmidt JC. How dams can go with the flow. *Science*, 2016, **353**(6304): 1099-1100. DOI: 10.1126/science.aah4926.
- [18] Li Z, Chen YB, Li C *et al.* Advances of eco-environmental effects and adaptive management in river cascading development. *Advances in Earth Science*, 2018, **33**(7): 675-686. [李哲, 陈永柏, 李翀等. 河流梯级开发生态环境效应与适应性管理进展. *地球科学进展*, 2018, **33**(7): 675-686.]
- [19] Barbosa FAR, Padisák J, Espíndola ELG *et al.* The cascading reservoir continuum concept (CRCC) and its application to the river Tietê-basin, São Paulo State, Brazil. In: Theoretical reservoir ecology and its applications. Brazilian: International Institute of Ecology, Brazilian Academy of Sciences and Backhuys Publishers, 1999: 425-437.
- [20] Serafim-Júnior M, Lansac-Tôha FA, Lopes RM *et al.* Continuity effects on rotifers and microcrustaceans caused by the construction of a downstream reservoir in a cascade series (Iguaçu River, Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, 2016, **76**(2): 279-291. DOI: 10.1590/1519-6984.00314.
- [21] Cheng B, Wang X, Ma JC *et al.* Spatial distribution characteristics of nutrients and chlorophyll A in the lancang river basin under cascade reservoirs. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1779-1787. DOI: 10.13227/j.hjlx.201809047. [程豹, 望雪, 马金川等. 澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素 a 的空间分布特征. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1779-1787.]
- [22] Chen QW, Shi WQ, Huisman J *et al.* Hydropower reservoirs on the upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream. *National Science Review*, 2020, **7**(9): 1449-1457. DOI: 10.1093/nsr/nwaa026.
- [23] Mao ZP, Wang YC, Peng WQ *et al.* Advances in effects of dams on river ecosystem. *Advances in Water Science*, 2005, **16**(1): 134-140. [毛战坡, 王雨春, 彭文启等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展. *水科学进展*, 2005, **16**(1): 134-140.]
- [24] Liang X, Xing T, Li JX *et al.* Control of the hydraulic load on nitrous oxide emissions from cascade reservoirs. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(20): 11745-11754. DOI: 10.1021/acs.est.9b03438.
- [25] Wang Y, Lu SG, Feng Q *et al.* Effect of cascade dam construction on the spatio-temporal variations of water quality in Heihe River. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1539-1551. DOI: 10.18307/2020.0525. [王昱, 卢世国, 冯起等. 梯级筑坝对黑河水质时空分布特征的影响. *湖泊科学*, 2020, **32**(5): 1539-1551.]
- [26] Zhou T, Cheng TY, Yu NX *et al.* Nitrogen and phosphorus retention in cascade reservoirs along the upper reaches of Wujiang River. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 707-713. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201803.037. [周涛, 程天雨, 虞宁晓等. 乌江中上游梯级水库氮磷滞留效应. *生态学杂志*, 2018, **37**(3): 707-713.]
- [27] Cassol APV, Oliveira MA, Domingues AL *et al.* Climate factors and limnological conditions shaping phytoplankton community in two subtropical cascading reservoirs. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2017, **29**. DOI: 10.1590/s2179-975x6316.
- [28] Li HH, Liu CQ, Wang FS *et al.* Change characteristics of phosphorus in cascade reservoirs in Maotiao River system in summer. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 368-372. [黎慧卉, 刘丛强, 汪福顺等. 猫跳河流域梯级水库磷的夏季变化特征. *长江流域资源与环境*, 2009, **18**(4): 368-372.]
- [29] Zhao XG, Liu L, Liu XM *et al.* A critical-analysis on the development of China hydropower. *Renewable Energy*, 2012, **44**: 1-6. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.005.
- [30] Ren HQ, Yuan XZ, Liu H *et al.* Shape and benthic invertebrate community features of the potholes in Wubu River, Chongqing. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(12): 3402-3408. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2015.0314. [任海庆, 袁兴中, 刘红等. 重庆五布河壶穴形态及底栖动物群落特征. *生态学杂志*, 2015, **34**(12): 3402-3408.]
- [31] 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. DOI: 10.13671/j.hjlx.2010.03.025. [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.]
- [32] 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. DOI: 10.13227/j.hjlx.2012.02.017. [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.]
- [33] Zhang Y, Song CL, Ji L *et al.* Cause and effect of N/P ratio decline with eutrophication aggravation in shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1294-1302. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.327.
- [34] Smith VH. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science*, 1983, **221**(4611): 669-671. DOI: 10.1126/science.221.4611.669.
- [35] Wang FS, Maberly SC, Wang BL *et al.* Effects of dams on riverine biogeochemical cycling and ecology. *Inland Waters*, 2018, **8**(2): 130-140. DOI: 10.1080/20442041.2018.1469335.
- [36] Zhong HP, Liu H, Geng LH. Cumulative effects of Lancang River Basin cascade hydropower development on ecology and environment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, **38**(S1): 577-581. [钟华平, 刘恒, 耿雷华. 澜沧江流域梯级开发的生态环境累积效应. 水利学报, 2007, **38**(S1): 577-581.]
- [37] Wang BL, Zhang HT, Liang X *et al.* Cumulative effects of cascade dams on river water cycle: Evidence from hydrogen and oxygen isotopes. *Journal of Hydrology*, 2019, **568**: 604-610. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.11.016.
- [38] Huang F, Wei L, Li L *et al.* Cumulative effects of water temperature by cascade hydropower stations built on upper and middle reaches of the Wujiang River. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, **18**(4): 337-342. [黄峰, 魏浪, 李磊等. 乌江干流中上游水电梯级开发水温累积效应. 长江流域资源与环境, 2009, **18**(4): 337-342.]
- [39] Liu XL, Li SL, Wang ZL *et al.* Sources and key processes controlling particulate organic nitrogen in impounded river-reservoir systems on the Maotiao River, southwest China. *Inland Waters*, 2018, **8**(2): 167-175. DOI: 10.1080/20442041.2018.1462612.
- [40] Yang SL, Zhang J, Zhu J *et al.* Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response. *Journal of Geophysical Research; Earth Surface*, 2005, **110**(F3): F03006. DOI: 10.1029/2004JF000271.
- [41] Lu T, Chen NW, Duan SW *et al.* Hydrological controls on cascade reservoirs regulating phosphorus retention and downriver fluxes. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, **23**(23): 24166-24177. DOI: 10.1007/s11356-016-7397-3.
- [42] Yu YX, Liu CQ, Wang FS *et al.* Characteristics of dissolved inorganic carbon and its isotope in cascade reservoirs of wujiang River Basin. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(16): 1935-1941. DOI: 10.1360/cs2008-53-16-1935. [喻元秀, 刘丛强, 汪福顺等. 乌江流域梯级水库中溶解无机碳及其同位素分异特征. 科学通报, 2008, **53**(16): 1935-1941.]
- [43] Li Z, Lu LH, Lv PY *et al.* Imbalanced stoichiometric reservoir sedimentation regulates methane accumulation in China's Three Gorges reservoir. *Water Resources Research*, 2020, **56**(9): e2019WR026447. DOI: 10.1029/2019WR026447.
- [44] Ludwig W, Probst JL, Kempe S. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10**(1): 23-41. DOI: 10.1029/95GB02925.
- [45] Wen ZD, Song KS, Liu G *et al.* Characterizing DOC sources in China's Haihe River Basin using spectroscopy and stable carbon isotopes. *Environmental Pollution*, 2020, **258**: 113684. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113684.
- [46] Shi WQ, Chen QW, Yi QT *et al.* Carbon emission from cascade reservoirs: Spatial heterogeneity and mechanisms. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(21): 12175-12181. DOI: 10.1021/acs.est.7b03590.
- [47] Shi WQ, Chen QW, Zhang JY *et al.* Nitrous oxide emissions from cascade hydropower reservoirs in the upper Mekong River. *Water Research*, 2020, **173**: 115582. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115582.
- [48] Søndergaard M, Jensen JP, Jeppesen E. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia*, 2003, **506/507/508/509**(1/2/3): 135-145. DOI: 10.1023/b:hydr.0000008611.12704.dd.
- [49] Joshi SR, Kukkadapu RK, Burdige DJ *et al.* Organic matter remineralization predominates phosphorus cycling in the mid-Bay sediments in the Chesapeake Bay. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(10): 5887-5896. DOI: 10.1021/es5059617.
- [50] Liu C, Du YH, Yin HB *et al.* Exchanges of nitrogen and phosphorus across the sediment-water interface influenced by the external suspended particulate matter and the residual matter after dredging. *Environmental Pollution*, 2019, **246**: 207-216. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.11.092.
- [51] Huang M, Zhou FC. Analysis on releasing and adsorption to the nutrients by sediment. *Water Sciences and Engineering Technology*, 2008, **5**(11): 49-51. [黄敏, 周富春. 泥沙对营养物质吸附与释放研究进展分析. 水利科学与工程技术, 2008, **5**(11): 49-51.]
- [52] López-Tarazón JA, López P, Lobera G *et al.* Suspended sediment, carbon and nitrogen transport in a regulated Pyrenean

- River. *Science of the Total Environment*, 2016, **540**: 133-143. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.06.132.
- [53] Liu SW, Zhang XF, Lv PY *et al.* Effects of cascade reservoirs in the lower reaches of Jinsha River on nitrogen and phosphorus retention. *J Lake Sci*, 2019, **31**(3): 656-666. DOI: 10.18307/2019.0305. [刘尚武, 张小峰, 吕平毓等. 金沙江下游梯级水库对氮、磷营养盐的滞留效应. 湖泊科学, 2019, **31**(3): 656-666.]
- [54] Zhou JJ, Zhang M, Li Z. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures. *J Lake Sci*, 2018, **30**(4): 865-880. DOI: 10.18307/2018.0401. [周建军, 张曼, 李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 865-880.]
- [55] Maavara T, Akbarzadeh Z, van Cappellen P. Global Dam-driven changes to riverine N:P:Si ratios delivered to the coastal ocean. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(15): e2020GL088288. DOI: 10.1029/2020GL088288.
- [56] Tong YD, Li JQ, Qi M *et al.* Impacts of water residence time on nitrogen budget of lakes and reservoirs. *Science of the Total Environment*, 2019, **646**: 75-83. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.255.
- [57] Wei Y, Yang CP, Yan H *et al.* Coupled cycling of carbon and silica in Karst reservoirs: Insights from Hongfeng Lake, Puding Reservoir and Pingzhai Reservoir. *Earth and Environment*, 2020, **48**(1): 1-9. [魏榆, 杨昌平, 晏浩等. 喀斯特水库碳、硅耦合循环: 以红枫湖、普定水库和平寨水库为例. 地球与环境, 2020, **48**(1): 1-9.]
- [58] Ran XB, Yu ZG, Yao QZ *et al.* Advances in nutrient retention of dams on river. *J Lake Sci*, 2009, **21**(5): 614-622. DOI: 10.18307/2009.0502. [冉祥滨, 于志刚, 姚庆祯等. 水库对河流营养盐滞留效应研究进展. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 614-622.]
- [59] Xiang P, Wang SL, Lu WQ *et al.* Distribution and retention efficiency of nitrogen and phosphorus in cascade reservoirs in Wujiang River Basin. *Earth and Environment*, 2016, **44**(5): 492-501. [向鹏, 王仕禄, 卢玮琦等. 乌江流域梯级水库的氮磷分布及其滞留效率研究. 地球与环境, 2016, **44**(5): 492-501.]
- [60] Liu JK, Han GL, Yang KH *et al.* Temporal and spatial variations of dissolved carbon in the Jiulongjiang River Basin. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(11): 2578-2587. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201811019. [刘金科, 韩贵琳, 阳昆桦等. 九龙江流域河水溶解态碳的时空变化. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(11): 2578-2587.]
- [61] Yang MD, Cui GY, Li QK *et al.* The cycle and coupling effect of carbon and sulfur in cascade reservoirs: A case study of Jialing River. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(3): 651-660. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201803.034. [杨梦迪, 崔高仰, 李亲凯等. 梯级水库群水体碳、硫元素循环及耦合效应——以嘉陵江为例. 生态学杂志, 2018, **37**(3): 651-660.]
- [62] Li GR, Liu CQ, Chen C *et al.* Dissolve inorganic carbon and its carbon isotope composition in cascade reservoir of the Maotiao River during summer and autumn. *Environmental Science*, 2009, **30**(10): 2891-2897. DOI: 10.13227/j.hjks.2009.10.011. [李干蓉, 刘丛强, 陈椽等. 猫跳河流域梯级水库夏-秋季节溶解无机碳(DIC)浓度及其同位素组成的分布特征. 环境科学, 2009, **30**(10): 2891-2897.]
- [63] Gong XJ, Wang XF, Liu TT *et al.* 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. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 111-123. DOI: 10.18307/2020.0111. [龚小杰, 王晓锋, 刘婷婷等. 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. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 111-123.]
- [64] Shi ZL, Wang YY, Wen AB *et al.* Tempo-spatial variations of sediment-associated nutrients and contaminants in the Ruxi tributary of the Three Gorges Reservoir, China. *Journal of Mountain Science*, 2018, **15**(2): 319-326. DOI: 10.1007/s11629-017-4486-9.
- [65] Wu SN, Wang XF, Liu TT *et al.* Spatiotemporal variability of the nitrous oxide concentrations and fluxes from a cascaded dammed river. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, **9**: 728489. DOI: 10.3389/fenvs.2021.728489.