

三岔河梯级水库生源要素的时空变化特征

王立嘉¹, 王宝利^{1,*}, 肖晶¹, 张海涛¹, 时节¹, 刘涛泽²

(1. 天津大学 表层地球系统科学研究院 天津市环渤海地球关键带科学与可持续发展重点实验室, 天津 300072;
2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081)

摘要: 氮磷硅等生源要素是影响水体初级生产力、水生态系统结构与功能的重要因素。为了解梯级水库-河流体系营养盐的时空变化特征, 对三岔河梯级水库(平寨水库、普定水库、引子渡水库)及入库河流进行了季度调查, 分析了其氮、磷、硅营养盐浓度及其相关环境因子。结果显示, 溶解硅(DSi)、总溶解氮(TDN)、 PO_4^{3-} 浓度分别为0.49~3.81、2.12~4.98、0.64~7.61 $\times 10^{-2}$ mg/L, 平均值分别为1.99、3.25、0.03 mg/L。TDN和 PO_4^{3-} 浓度季节性变化较为明显, 但空间变化较小; DSi的时空变化均较为显著。TDN浓度夏季较高, 而 PO_4^{3-} 浓度春、冬季较高。TDN与叶绿素显著正相关, 而 PO_4^{3-} 与温度显著负相关, 表明两者的影响因素不同。DSi浓度水平沿程依次降低, 主要受生物作用控制。DSi浓度随水体深度增加而增加, 秋季尤为显著; 而TDN和 PO_4^{3-} 在剖面上的变化因季节和水库的不同而不同。

关键词: 氮; 磷; 硅; 梯级水库; 三岔河

中图分类号: TV213; X821 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2019)06-0844-07 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.148

氮磷是河流生态系统不可或缺的元素, 是河流中生物生长和生命活动正常进行的保障。它们是河流中生物进行能量传输所必需的元素, 是控制水体富营养化的关键营养元素。水体中氮、磷等营养盐富集, 可导致其中的藻类过度生长繁殖, 进而影响水体功能^[1-2]。硅藻作为水体中一种很重要的浮游植物^[3], 它的初级生产量在全球初级生产量中占有超过60%的比例^[4]。而硅元素作为硅藻生长所必需的元素, 对初级生产力有很大的影响^[5-6]。

自20世纪以来, 世界各地的水坝数量显著增加^[7-8]。筑坝会极大改变天然河流的状态。大坝截流直接导致河流流速减缓, 进而影响营养盐的循环和浮游生物的群落结构, 使形成的水库向湖沼方向发展^[9]。水库中不同营养元素的滞留效率不同, 从而影响了下游河流中各营养元素的计量比^[10]。此外, 水库具有人工调节水位和底层泄水的特点, 导致水库营养元素的生物地球化学循环过程更为复杂^[11-14]。为此, 以我国西南乌江支流三岔河的梯级水库为研究对象, 对其中三座梯级水库及入库河流的氮、磷、硅等营养盐及其相关环境因子进行了季

度调查, 以了解梯级水库-河流体系营养盐的时空变化特征及其环境影响因素。

1 研究区域概况

乌江为贵州省第一大河, 长江上游右岸支流。它发源于贵州省境内威宁县香炉山花鱼洞, 流经黔北及渝东南酉阳彭水^[15]。三岔河是乌江的支流, 其全长325.6 km, 落差1398.5 m, 平均比降0.43%, 流域面积7246 km²; 三岔河是典型的山间河流, 岩溶发育。三岔河流域属亚热带季风气候区, 雨量充沛; 流域年降水量700~900 mm, 降水分布不均匀, 主要集中在6、7、8月, 占全年降水量的56%。

2 样品采集和分析

2.1 采样点与样品采集

于2017年7月(夏)、10月(秋)、2018年1月(冬)和4月(春)对平寨、普定、引子渡三个梯级水库的入库河流、库区以及下泄水进行野外调查(图1)。其中入库和下泄水只采表层水样, 库区用5 L的Niskin采样器采取分层水样。平寨水库采样深

收稿日期: 2019-08-02; 改回日期: 2019-09-18

基金项目: 国家自然科学基金委-贵州喀斯特科学研究中心联合项目(U1612441); 国家重点研发计划项目(2016YFA0601001)。

第一作者简介: 王立嘉(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向为环境地球化学。E-mail: 787245889@qq.com。

* 通讯作者: 王宝利(1976-), 男, 教授, 博士, 研究方向为流域地球化学循环及其生态效应。E-mail: baoli.wang@tju.edu.cn。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

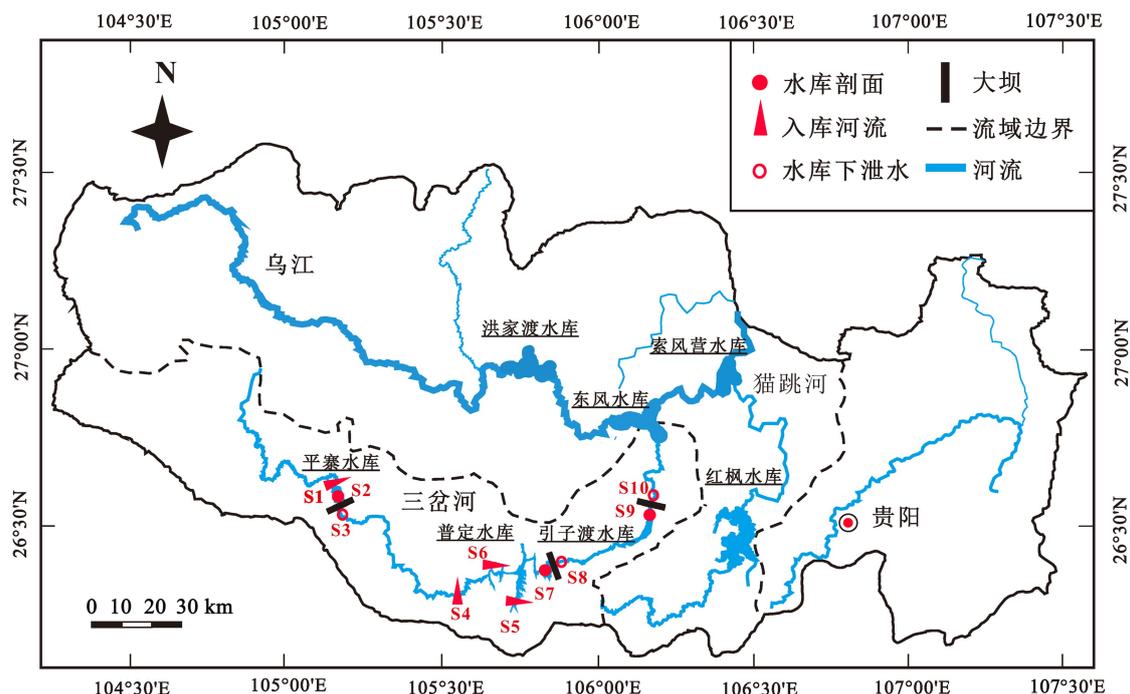


图 1 三岔河梯级水库采样点

Fig.1 Sampling sites in cascade reservoirs along the Sancha River

度为 0、5、15、30、60 m, 普定水库采样深度为 0、5、10、15、30 m, 引子渡水库采样深度为 0、5、15、30、60 m。

2.2 样品处理与分析

采样点水温、pH、溶解氧 (DO) 和叶绿素 (Chl) 等参数利用多参数分析仪 (YSI-EXO, 美国 YSI 公司) 原位测量。采集的水样用 0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤并分装进入 60 mL Nalgene 塑料瓶, 用于测定营养盐浓度。营养盐 (DSi、TDN、PO₄³⁻) 浓度采用荷兰 Skalar SAN++ (荷兰 Skalar 分析仪器公司, 荷兰) 营养盐连续流动分析仪测定, DSi、TDN、PO₄³⁻ 检测限分别为 0.02、0.01、0.02 mg/L。

2.3 数据分析

使用 Excel 2016 和 SPSS 24 (SPSS.Inc) 软件对上述所得数据进行处理分析。

3 结果分析

3.1 基本环境因子

三岔河水温为 11.9~25.2 °C (表 1); 4 月、7 月、10 月和 1 月各观测点的平均水温分别为 16.4、19.5、21.1 和 12.8 °C, 采样点之间的温度没有显著差异, 但 1 月份研究区域平均温度显著低于其他月份 (图 2)。

pH 在 7.6~8.6 之间 (表 1); 4 月、7 月、10 月和 1 月各观测点的平均 pH 分别为 8.1、7.9、8.0 和 8.0, 采样点之间的 pH 没有显著差异。

DO 浓度在 4.3~16.3 mg/L 之间 (表 1); 4 月、7 月、10 月和 1 月各观测点的 DO 平均值分别为 8.2、8.0、6.9 和 7.8 mg/L。与其他采样点相比, 采样点 S2 的 DO 浓度低很多 (图 2)。

表 1 三岔河相关水化学参数概况

Table 1 Selected water parameters in the Sancha River

项目	温度/°C	pH	DO/(mg/L)	Chl/(μg/L)	DSi/(mg/L)	TDN/(mg/L)	PO ₄ ³⁻ /(mg/L)
平均值	17.4	8.04	8.4	6.3	1.99	3.25	0.03
最大值	25.2	8.64	16.3	96.2	3.81	6.33	0.11
最小值	11.9	7.65	4.3	0.2	0.08	2.12	0.00
标准偏差	3.6	0.26	1.7	12.1	0.87	0.82	0.02

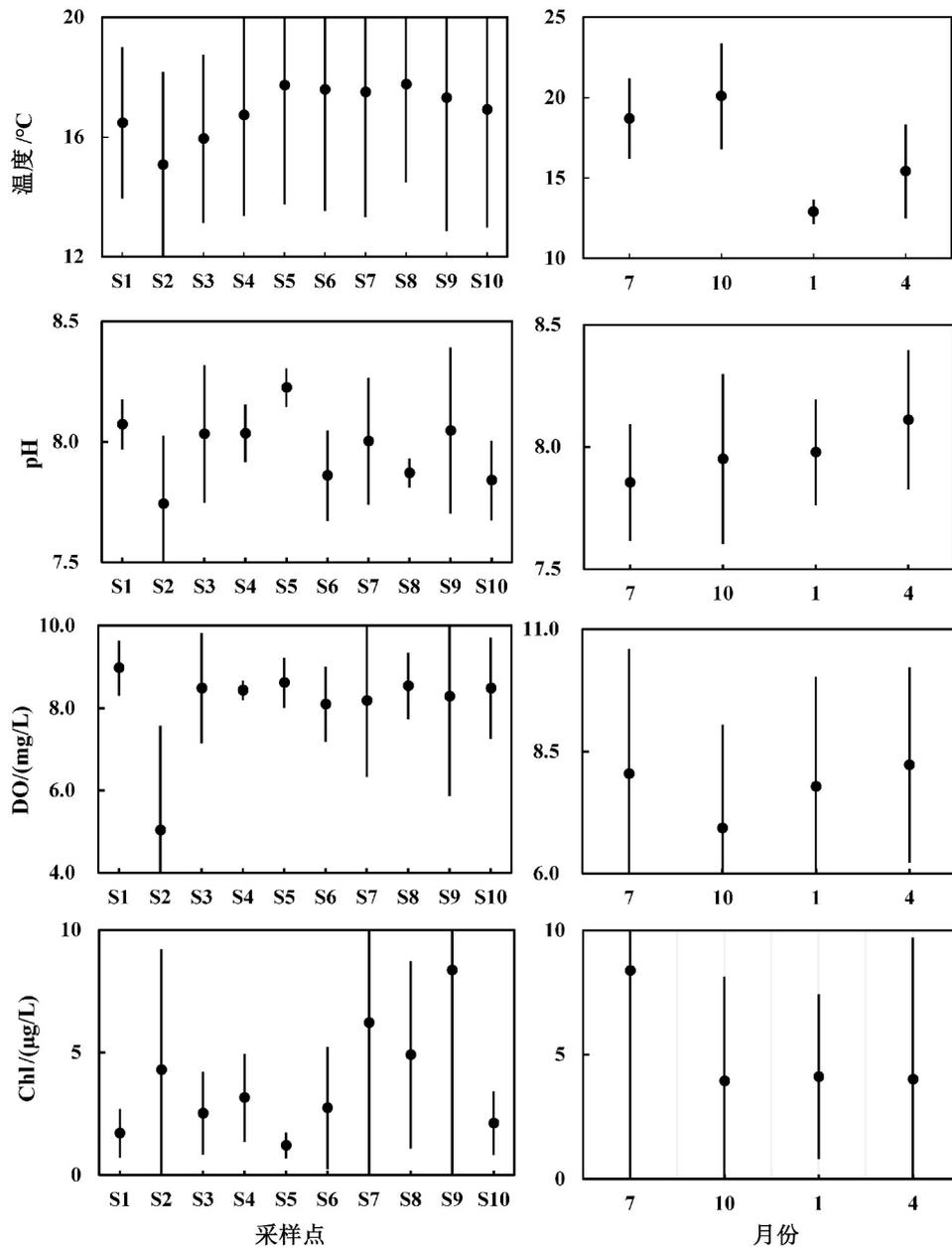


图2 各参数的时空变化

Fig.2 Temporal and spatial variations of the selected parameters

水体中叶绿素浓度在 $0.2 \sim 96.2 \mu\text{g/L}$ 之间(表 1); 4月、7月、10月和1月各观测点的叶绿素平均值分别为 4.0 、 8.4 、 3.9 和 $4.1 \mu\text{g/L}$ 。采样点 S7 和 S9 叶绿素浓度高于其他采样点,且7月份研究区域叶绿素浓度远高于其他三月份(图 2)。

3.2 三岔河氮、磷、硅时空变化

三岔河全年 DSi 、 TDN 和 PO_4^{3-} 浓度分别为 $0.49 \sim 3.81$ 、 $2.12 \sim 4.98$ 、 $0.02 \sim 0.08 \text{ mg/L}$ (图 3)。其中,平寨水库、普定水库、引子渡水库库区(S2、S7、S9) DSi 全年浓度分别为 $1.19 \sim 3.53$ 、 $0.09 \sim 2.49$ 、

$0.08 \sim 2.81 \text{ mg/L}$, TDN 全年浓度分别为 $2.38 \sim 6.03$ 、 $2.61 \sim 4.76$ 、 $2.35 \sim 6.33 \text{ mg/L}$, PO_4^{3-} 全年浓度分别为 $0.0065 \sim 0.1053$ 、 $0.0033 \sim 0.0736$ 、 $0.0033 \sim 0.0586 \text{ mg/L}$ 。三个水库下泄水(S3、S8、S10)的 DSi 、 TDN 和 PO_4^{3-} 浓度分别为 $1.33 \sim 2.56$ 、 $3.20 \sim 3.33$ 、 $0.0219 \sim 0.0334 \text{ mg/L}$, 入库河流的为 $2.54 \sim 3.03$ 、 $2.52 \sim 4.14$ 、 $0.0205 \sim 0.0407 \text{ mg/L}$ 。水库中三种营养盐平均浓度小于下泄水和河流。时间变化上, DSi 浓度春季最低,冬季最高; TDN 浓度夏季最高,秋季最低; PO_4^{3-} 浓度春季最高,夏季最低。

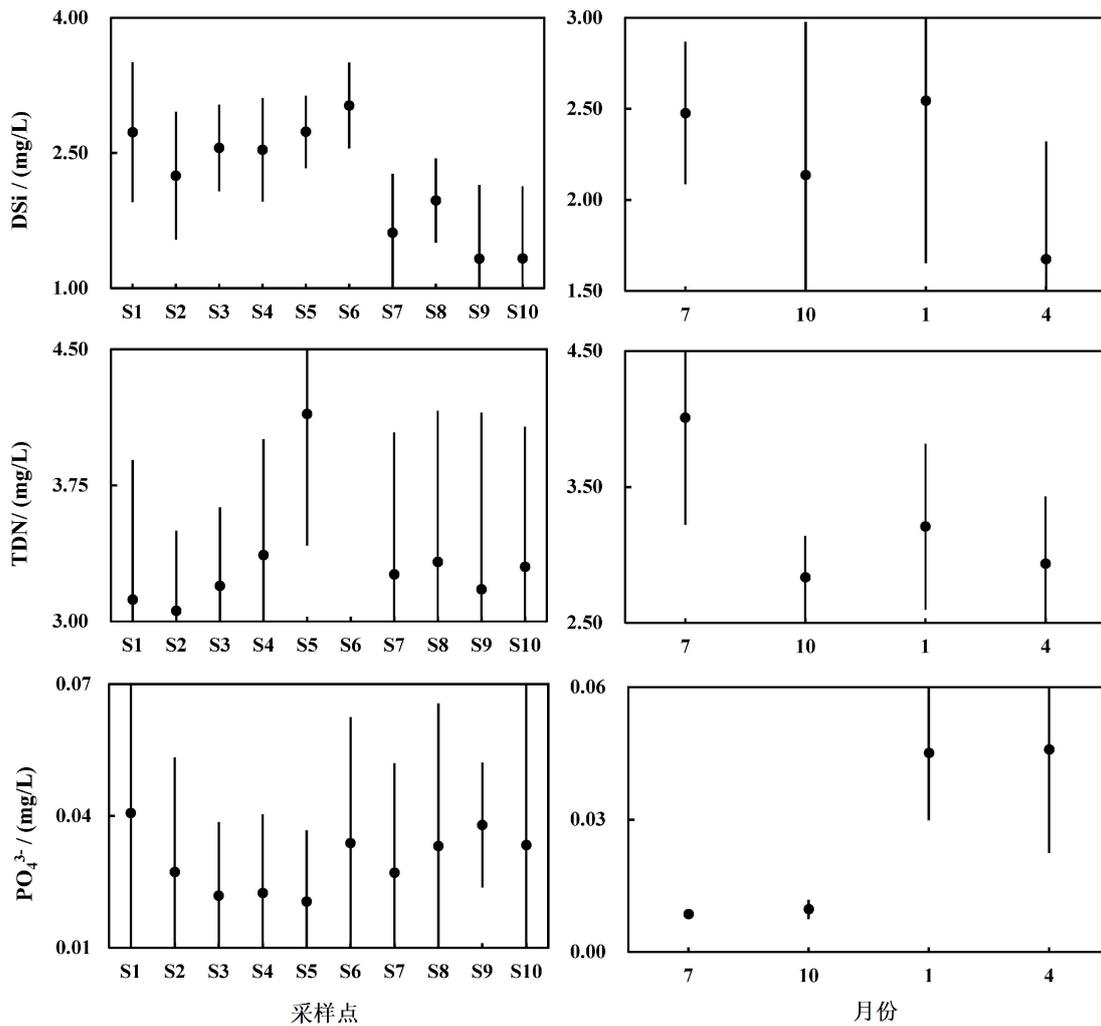


图 3 三岔河梯级水库氮磷硅时空变化

Fig.3 Spatiotemporal variations of nitrogen, phosphorus and silicon in cascade reservoirs along the Sancha River

3.3 梯级水库氮、磷、硅水体剖面变化

各水库溶解硅 (DSi) 呈现出明显的季节性分层现象,分层时浓度一般随深度增加而增加(图 4)。分层一般从春季 4 月份开始;秋季 10 月份分层最为显著,水体中 DSi 浓度变化可达 2.73 mg/L(引子渡水库);冬季 1 月份分层消失。各水库 DSi 分层因水库不同而不同,如平寨水库 10 月份 DSi 浓度最低点在 10 m 左右,而普定和引子渡水库的最低点出现在表层。

各水库磷酸根 (PO_4^{3-}) 也呈现出明显的季节分层现象,且分层现象出现在 4 月份,其他月份没有明显分层现象。分层时浓度变化也因水库的不同而有着不同的变化趋势,其浓度变化随着剖面的不同也较为复杂。水体中 PO_4^{3-} 的浓度变化可达 0.07 mg/L(普定水库);平寨水库 4 月份 PO_4^{3-} 浓度最低点在 10 m 左右,浓度最高点出现在 30 m 左右。普

定水库 4 月份 PO_4^{3-} 浓度最低点在 15 m 左右,浓度最高点出现在 10 m 左右。引子渡水库 4 月份 PO_4^{3-} 浓度最低点在 30 m 左右,浓度最高点出现在 15 m 左右。

TDN 干流变化不大,但入库支流变化较大(普定水库)。TDN 在水库剖面上的变化相对 DSi 和 PO_4^{3-} 不很显著,仅在 7 月份的引子渡水库出现了较为明显的分层变化。且 7 月份平寨和普定两个水库的 TDN 浓度远高于其他月份相对应水库的浓度。水体中 TDN 的浓度变化可达 2.99 mg/L(引子渡水库)。分层时浓度随深度增加而降低。

4 讨论

河流筑坝拦截后,水流变缓,水体透明度增加,温度升高,有利于浮游植物生长^[16-18]。浮游植物在光合作用下,吸收无机营养盐,合成有机质,同时释

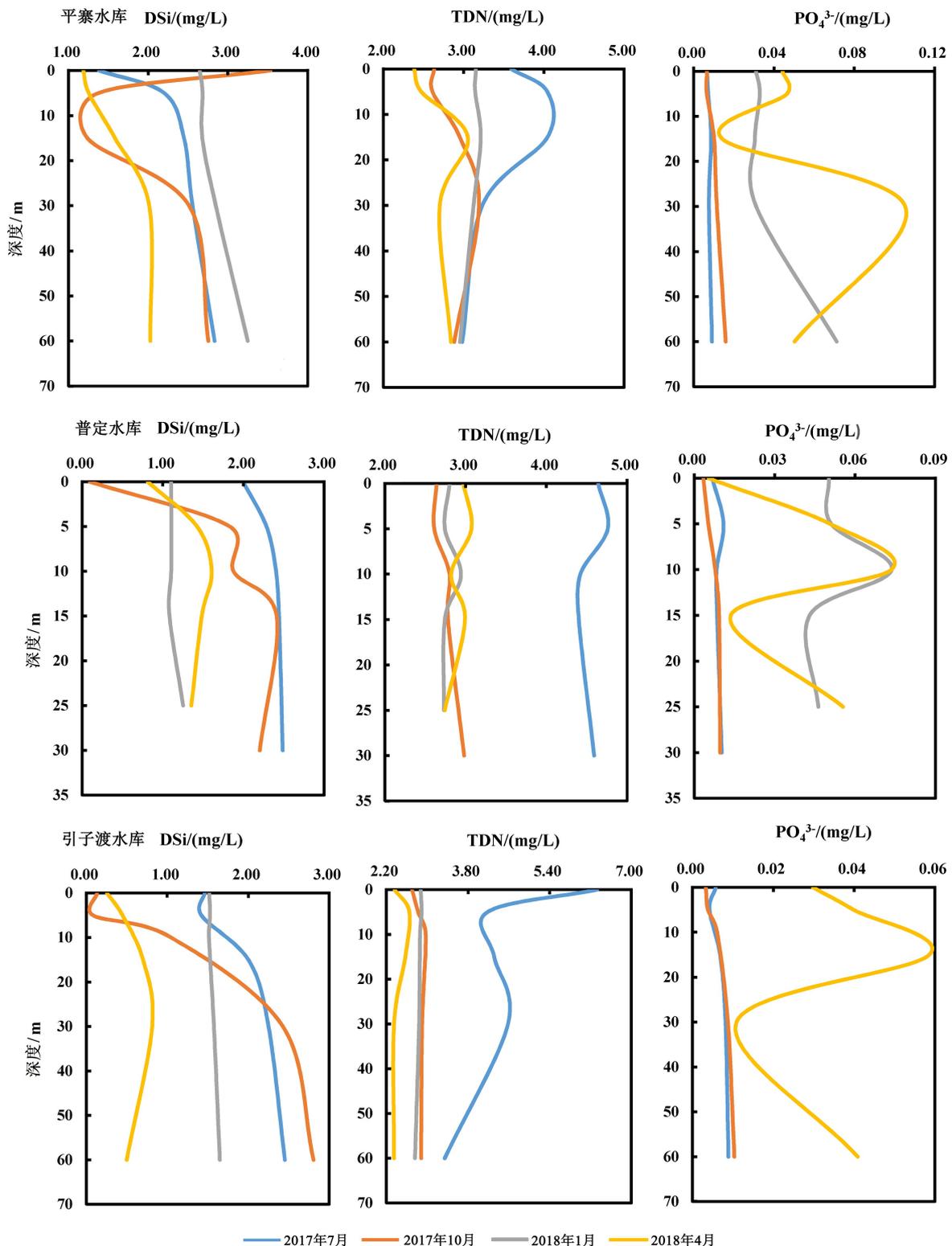


图4 水库氮磷硅水体剖面变化

Fig.4 Profile variations of nitrogen, phosphorus and silicon in the reservoirs

放氧气^[19],从而导致温度、pH、DO 和叶绿素浓度这
四个指标表现出显著的正相关关系(表 2)。浮游植

物中只有硅藻吸收利用 DSi;由于硅藻光合作用,水
库真光层的 DSi 浓度明显低于底层(图 4),这使得

表2 本研究调查参数相关性分析

Table 2 Correlation analysis for selected parameters in this study

项目	DSi	TDN	PO ₄ ³⁻	温度	pH	DO
TDN	0.277 *					
PO ₄ ³⁻	-0.090	-0.334 **				
温度	-0.170	0.222 *	-0.577 **			
pH	-0.419 **	-0.013	0.048	0.227 *		
DO	-0.307 **	0.228 *	-0.009	0.324 **	0.797 **	
Chl	-0.168	0.369 **	-0.139	0.307 **	0.373 **	0.558 **

注:** 代表在 0.01 水平上显著相关,* 代表在 0.05 水平上显著相关。

DSi 和 DO 浓度显著负相关;同时硅藻沉降到水库底层,有一部分重新转化为 DSi,也可导致底部的 DSi 偏高,但这一部分的贡献很小,大部分作为硅壳滞留在水库中,从而导致下游 DSi 浓度明显下降,如引子渡水库 DSi 浓度明显减小(图 3)。由于所研究的水库均采用了底层泄水的发电方式,水库底部的 DSi 通过泄水将底部的 DSi 带入到下泄水中,水库下泄水的 DSi 浓度明显高于水库库区。除此之外,DSi 还受流域风化的影响,丰水期流域 DSi 的输入较大(图 4)。

乌江 TDN 主要成分为 NO₃⁻[20-22],受流域人为输入影响较大,如普定支流的 TDN 浓度变化较大。同时 7 月份流域地表径流增加,输入河流 TDN 的量也增加,从而导致河流中 TDN 的浓度显著增加(图 3)。TDN 和叶绿素呈显著正相关,表明 TDN 可以促进梯级水库的浮游植物生长。同时 TDN 还与温度和溶解氧显著正相关,表明氮源和温度增加可促进浮游植物生长,而浮游植物光合作用释放氧气可导致水体溶解氧增加[23]。由此看出生物作用是水库营养元素循环的一个重要影响因素[24-25]。

PO₄³⁻ 与 TDN 呈显著负相关,表明两者的地球化学行为明显不同。PO₄³⁻ 受浮游植物吸收作用,在 7、10 月份浓度明显降低,并表现出和水温呈显著正

相关。此外,PO₄³⁻ 在水库剖面变化复杂,表明影响 PO₄³⁻ 的因素也很复杂。如在水库底层呼吸作用中,有机质可以很快的转化为无机磷,从而造成 PO₄³⁻ 浓度增加[26-27]。另外,相对 DSi 和 TDN 来说,PO₄³⁻ 的浓度低两个数量级左右,流域土壤的径流输入也可造成河流-水库体系 PO₄³⁻ 浓度的明显波动,从而造成 PO₄³⁻ 的时空变化较为复杂。

5 结论

1)TDN 和 PO₄³⁻ 浓度季节性变化较为明显,但空间变化较小;DSi 的时空变化均较为显著。TDN 浓度夏季较高,而 PO₄³⁻ 浓度春、冬季较高。TDN 与叶绿素呈显著正相关,而 PO₄³⁻ 与温度呈显著负相关,表明两者的影响因素不同。

2)DSi 浓度水平沿程依次降低,而且这一变化主要受生物作用控制。DSi 浓度随水体深度增加而增加,秋季尤为显著;而 TDN 和 PO₄³⁻ 在剖面上的变化则因季节和温度的变化而变化。

3)三种营养盐库区浓度明显小于入库河流;而水库下泄水浓度高于相对应的库区,主要受到水库底层泄水的发电方式的影响。

致谢:感谢课题组成员在野外采样工作中的支持和帮助。

参 考 文 献

- [1] 张翀,赵亮,张莹,等.藻类爆发危害及其控制技术研究进展[J].环境保护科学,2015,41(3):107-112.
- [2] Linkov I, Fristachi A, Satterstrom F K, et al. Harmful cyanobacterial blooms: Identifying data gaps and the need for a management framework [M]. Managing Critical Infrastructure Risks, 2007: 207-242.
- [3] 杨东方,高振会,秦洁,等.地球生态系统的营养盐硅补充机制[J].海洋科学进展,2006,24(4):568-576.
- [4] Tréguer P, Nelson D M, Van Bennekom A J, et al. The silica balance in the world ocean: A reestimate[J]. Science, 1995, 268(5209): 375-379.
- [5] Conley D J, Schelske C L, Stoermer E F. Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication[J]. Marine Ecology Progress Series, 1993, 101(1-2):179-192.
- [6] Werner D. Silicate metabolism[M]. The Biology of Diatoms London: Black Well Scientific Publications, 1977: 110-149.
- [7] Ver L M B, Mackenzie F T, Lerman A. Biogeochemical responses of the carbon cycle to natural and human perturbations: Past, present, and future[J]. American Journal of Science, 1999, 299(7-9): 762-801.
- [8]. World Commission on Dams (WCD). Dams and development: A new framework for decision-making [M]. London: Earthscan Publications (C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

- Ltd., 2000.
- [9] Wang B, Liu C Q, Wang F, et al. The distributions of autumn picoplankton in relation to environmental factors in the reservoirs along the Wujiang River in Guizhou Province, SW China[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 598(1):35-45.
- [10] Cappellen P V, Maavara T. Rivers in the anthropocene: Global scale modifications of riverine nutrient fluxes by damming[J]. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2016, 16(2): 106-111.
- [11] 刘丛强. 生物地球化学过程与地表物质循环——西南喀斯特流域侵蚀与生源要素循环[M]. 北京:地质出版社, 2007.
- [12] Xie P, Wu J H, Huang J H, et al. Three-Gorges Dam; Risk to ancient fish[J]. *Science*, 2003, 302(5648): 1149-1151.
- [13] Friedl G, Wehrli C T. Is the Iron Gate I reservoir on the Danube River a sink for dissolved silica? [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 68(1):21-32.
- [14] Milliman J D. Blessed dams or damned dams[J]. *Nature*, 1997, 386(6623): 325-327.
- [15] 侯祯亮. 贵州省三岔河流域水化学特征及其影响因素分析[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.
- [16] 钟成华. 三峡库区水体富营养化研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [17] 余立华, 李道季, 方涛, 等. 三峡水库蓄水前后长江口水域夏季硅酸盐、溶解无机氮分布及硅氮比值的变化[J]. *生态学报*, 2006, 26(9): 2817-2826.
- [18] Wang F, Maberly S C, Wang B, et al. Effects of dams on riverine biogeochemical cycling and ecology[J]. *Inland Waters*, 2018, 8(2): 130-140.
- [19] 陈法锦, 陈淳青, 周凤霞, 等. 秋季珠江口外海海域的生态环境特征[J]. *海洋环境科学*, 2017(36): 852.
- [20] 朱俊. 水坝拦截对乌江生源要素生物地球化学循环的影响[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005.
- [21] Bidle K D, Azam F. Accelerate dissolution of diatom silica by marine bacterial assemblages[J]. *Nature*, 1999, 397:508-512.
- [22] Brzezinski M A, Olson R J, Chisholm S W. Silicon availability and cell-cycle progression in marine diatoms[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 67(1):83-96.
- [23] Wang B, Qiu X L, Peng X, et al. Phytoplankton community structure and succession in karst cascade reservoirs, SW China[J]. *Inland Waters*, 2018, 8: 229-238.
- [24] 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[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4): 384-396.
- [25] 张翊鹏, 刘丛强, 王宝利, 等. 乌江中上游水库—河流域系夏秋季 N、Si 分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(4): 331-336.
- [26] 聂晶. 水库水体总磷三维数学模型及其应用[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
- [27] 顾德宇, 汤荣坤, 余群. 大亚湾沉积物间隙水的无机磷硅氮营养盐化学[J]. *海洋学报*, 1995, 17(5):73-80.

Spatiotemporal Variations of Nutrients in Cascade Reservoirs along the Sancha River

WANG Lijia¹, WANG Baoli¹, XIAO Jing¹, ZHANG Haitao¹, SHI Jie¹, LIU Taoze²

(1. Institute of Surface-Earth System Sciences, Tianjin University, Tianjin Key Laboratory of Earth Critical Zone Science and Sustainable Development in Bohai Rim, Tianjin 300072, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China)

Abstract: Nutrients, such as nitrogen, phosphorus and silicon, are important factors affecting the primary productivity and the structure and function of the aquatic ecosystem. In order to understand the spatiotemporal variation of nutrients in cascade reservoir-river systems, we investigated seasonal variations of nitrogen, phosphorus and silicon and related environmental factors in the mainstream of the Sancha River and cascade reservoirs (Pingzhai, Puding and Yinzidu reservoirs) on the river. The results showed that concentrations of dissolved silicon (DSi), total dissolved nitrogen (TDN) and concentrations of PO_4^{3-} varied in the ranges of 0.49-3.81 mg/L, 2.12-4.98 mg/L, $0.64-7.61 \times 10^{-2}$ mg/L, respectively, with the averages of 1.99 mg/L, 3.25 mg/L and 0.03 mg/L, respectively. The seasonal variations of TDN and PO_4^{3-} concentrations were remarkable, but their spatial variations were relatively small. Meanwhile, spatiotemporal variations of DSi were significant. TDN were high in summer, while concentrations of PO_4^{3-} were high in spring and winter. TDN correlated positively and significantly with chlorophyll, and PO_4^{3-} concentrations correlated negatively with temperature, indicating that their influencing factors were different. The DSi concentration, which was mainly controlled by biological activity, decreased along the mainstream of the river. The DSi concentration increased with the water depth, especially in autumn, but variations of TDN and PO_4^{3-} along the water profile varied differently in different seasons and different reservoirs.

Key words: nitrogen; phosphorus; silicon; spatiotemporal variation; Sancha River