

付陈乐,康满春,孟江槐,等.典型喀斯特水库水化学特征及水体营养状态影响因素研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(3):1483-1495.

Fu C L, Kang M C, Meng J H, et al. Study of hydro-chemical characteristics and influencing factors of the trophic status in typical karst reservoirs [J]. China Environmental Science, 2025,45(3):1483-1495.

典型喀斯特水库水化学特征及水体营养状态影响因素研究

付陈乐^{1,2},康满春^{1,2*},孟江槐^{1,2},刘佳^{1,2},刘流³,龙良红^{1,2},肖尚斌^{1,2} (1.三峡大学,三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站,湖北宜昌 443002; 2.三峡库区生态环境教育部工程研究中心,湖北宜昌 443002; 3.云南师范大学地理学部,云南省高原地理过程与环境变化重点实验室,云南昆明 650500)

摘要: 水库的水化学特征及营养状态是流域自然条件和人为作用的综合体现,本研究以小湾水库(XW)及丹江口水库(DJK)为研究对象,分析了喀斯特水库水体主要离子变化特征以及氮(N)、磷(P)营养盐的空间变化,解析了水体主要离子来源并分析了水库水体营养状态及其影响因素.结果表明:两水库水化学类型分别为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ 型及 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型,均受岩石风化作用控制,且均具有较高水平的人为输入 SO_4^{2-} 、 NO_3^- ; 水库水体氮、磷主要以溶解态为主,水体无碳限制,但 XW 受氮限制,DJK 受磷限制,水体营养状态均呈中营养水平;受喀斯特地区水化学背景及高风化速率的影响,C、N、P 化学计量比为水体综合营养状态指数(TLI)的主要影响因素;水体在不同 N、P 限制条件下其营养状态的影响因子有所不同,而易受岩石风化、气候变化、人为输入等影响的 C:P 的值是控制水库水质的关键因素;基于水体氮、磷营养限制条件分析水化学特征、生源要素化学计量比等的影响,优化水体营养状态评价指标,为不同水文条件及功能作用下的喀斯特水库水体营养状态评价、水质管理提供依据.

关键词: 喀斯特水库; 水化学特征; 离子来源; 营养状态

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)03-1483-13

Study of hydro-chemical characteristics and influencing factors of the trophic status in typical karst reservoirs. FU Chen-le^{1,2}, KANG Man-chun^{1,2*}, MENG Jiang-huai^{1,2}, LIU Jia^{1,2}, LIU liu³, LONG Liang-hong^{1,2}, XIAO Shang-bin^{1,2} (1.Hubei Field Observation and Scientific Research Stations for Water Ecosystem in Three Gorges Reservoir, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.Engineering Research Center of Ecology and Environment, Ministry of Education, Three Gorges Reservoir Area, Yichang 443002, China; 3.Provincial Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Change, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China). *China Environmental Science*, 2025,45(3): 1483~1495

Abstract: The hydro-chemical characteristics and trophic status of reservoirs are shaped by a combination of natural conditions and anthropogenic effects within the watershed. This study focuses on Xiaowan Reservoir (XW) and Danjiangkou Reservoir (DJK) to analyzes the main ions characteristics and spatial variations of nitrogen (N) and phosphorus (P) nutrients in their water bodies, we identify the primary sources of these ions and interprets the nutrient status of these karst reservoirs, along with the influencing factors. The results show that: The water chemistry of the karst reservoirs is governed by rock weathering, resulting in $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca}$ and $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ types for XW and DJK respectively; Both reservoirs exhibit high anthropogenic inputs of SO_4^{2-} and NO_3^- ; In both reservoirs, nitrogen (N) and phosphorus (P) predominant exist in dissolved forms. While no carbon-limitation was observed, N-limitation is evident in XW and P-limitation in DJK, leading to a mesotrophic status in both reservoirs; The stoichiometric ratio of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) are the primary factors influencing the comprehensive trophic level index (TLI) of the reservoirs. This is attributed to the karst hydrochemical background and high weathering rates; Under different N and P limiting conditions, the trophic status is affected by various factors, with the C to P ratio-sensitive to rock weathering, climate change, and anthropogenic inputs-emerging as a key determinant of water quality; To optimize the evaluation indices for assessing the trophic state and managing water quality in karst reservoirs under diverse hydrological conditions and functional roles, it is essential to analyze the effects of water chemical characteristics and stoichiometric ratios of biogenic elements on trophic status based on the analysis of nutrient limitations in water bodies.

Key words: karst reservoirs; hydro-chemical characteristics; ion source; trophic status

收稿日期: 2024-08-29

基金项目: 三峡水库生态系统湖北省野外科学观测研究站(三峡大学)开放基金(2024YWZ05);国家自然科学基金资助项目(51979148,51809149);湖北省自然科学基金创新发展联合基金(2022CFD032)

* 责任作者, 讲师, kmcspring@gmail.com

湖、库水环境化学是流域蒸发、化学风化、大气沉降以及人类活动等共同作用的综合体现^[1],水环境化学特征反映流域内风化岩石类型及离子来源等信息^[2],也体现了人类活动的影响,如农业点、面源污染改变营养盐浓度并经由径流汇入水体导致富营养化、水华爆发等^[3].碳(C)、氮(N)、磷(P)不仅是生物体生长和代谢的必需元素,也参与水生生态系统的营养循环和平衡维持^[4];其中,N、P是水体初级生产力的重要生源要素,也是水体影响富营养化的关键因子^[5],N、P赋存形态、含量都影响着水中浮游植物的繁殖生长^[6],如我国湖泊及水库水体富营养化分布特征与N、P的空间分布趋势存在密切关系^[7];而C既是生源要素,也通过影响其他元素的形态进而影响浮游植物生消^[8],如喀斯特地区风化产生的溶解性无机碳通过碳酸盐泵的作用产生碳酸钙并促进水中磷的共沉淀^[9],在以碳酸盐岩风化为的流域,浮游植物可以通过碳酸酐酶的作用将水体富含的 HCO_3^- 转化为 CO_2 进而吸收利用^[10].当前,筑坝拦截加剧了河流的碎片化,河流水动力条件发生明显改变,各类生源要素在水库水体中不断累积进而改变水体营养状态;此外,气候变化导致的强烈的岩石风化也影响流域生态环境的变化^[11-12].

水库因其功能差异而具有不同的调度运行规律,进而影响着各自的水环境特征.水电开发是人类对河流最显著的干扰之一^[13],其所形成的水库具有人工调节水位和底层泄水等特点,这些人为调控也影响着水体生源要素的地球化学过程^[14].在地处峡谷、水力停留时间长且较深的水库中,水体较大的垂直温差易发生水温分层,这使得水体垂直混合能力降低^[15],进而导致显著的水化学分层,形成库区水体营养盐含量相对较高的现象^[16],为水体中藻类的生长、水体的富营养化如水华爆发提供营养条件^[17];相比之下,水源地水库受自然和人为因素的影响更容易通过频繁的水层掺混影响到整个水深剖面^[18],且水源地水库具有水体交换周期短,水质达标率较高等特点^[19],另外,此类水库周边更密集的人类活动也强烈影响水体营养元素的迁移转化过程^[20]和水生态环境.此外,喀斯特地区水库具有高 HCO_3^- 和 Ca^{2+} 浓度的水化学特征为真核藻类(蓝藻等)提供了更高的竞争优势^[21],同时影

响藻类类型和生长及水体营养状态的C、N、P各类生源要素的含量及化学计量比也不同于其他类型的水库^[22-23],从而更容易出现因土地利用不当而导致的水环境问题,因而在该背景下的水库管理方法及生态评价体系值得更深层次的研究.目前,对于水体水化学的研究多集中于水化学特征及来源解析^[24],亦或是关注其时空变化及影响因素^[25],而评价水体营养状态时多选取经验型营养状态指数法^[26],鲜有基于水库水化学指标及特征作为水体营养的影响因子,并结合传统的水质指标和对应生源要素的化学计量比,对水体营养状态影响因素评价的针对性研究.

小湾水库是澜沧江中下游梯级水电水库中的“龙头”水库,所在地区喀斯特高山-峡谷地貌常伴有陡峭的崖壁及因水流侵蚀形成的峡谷,流域内地形变化剧烈并拥有更为发达的地下水系统^[27];丹江口水库作为南水北调中线工程的水源地,地处丘陵-平原的喀斯特区域,较低的地势及平坦的地形导致其水体流动速度减慢,整个水体易受流域风化及面源污染影响^[28].本研究以受不同程度自然条件和人为因素影响下的喀斯特水库——小湾水库和丹江口水库为研究对象,通过正演模型和水化学通量法计算不同来源对水库溶质的贡献及岩石风化速率,解析不同环境背景下水库水体的主要离子来源及水化学特征,分析水体水化学、营养因素等对水体营养状态的影响,同时补充选用不同于传统营养状态评价的水体水化学指标及生源要素的化学计量比作为评价因子,并区分不同营养限制类型条件下主要影响因素的差异,以期对不同水文条件及功能作用下喀斯特水库的水环境管理和水体富营养化预防提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

小湾水库(XW)属于澜沧江流域,位于云南临沧市与大理白族自治州和保山市交界,库区地处亚热带季风气候区,海拔 987~2804m,日照充足,太阳辐射强度大,辐射量 5000~6000MJ/m²,干湿分明,雨季为 5~10月,流域内河道蜿蜒曲折且流速较快,土地利用类型多为林地,水源输入以澜沧江干、支流为主,春季及雨季有冰雪消融和降雨补充^[29-30].丹

江口水库(DJK)位于鄂豫交界处,是长江支流典型的水源地水库,属亚热带温暖半湿润季风气候,海拔250~500m,太阳辐射量 4400~4700MJ/(m²),降雨集中在5~10月且多暴雨,水库补给多依赖于流经农耕区的上游来水及降雨^[31-32].本研究水样采集时间为2023年8~9月,各断面水样根据水库热分层情况进行分层采集^[33];小湾点位自主库区上游向坝前并结合河段流向及流速变化均匀分布,丹江口因水源补给为上游来水,库区水化学特征及营养状态与地理位置相近的补给河流具有相似性^[34],点位均匀分布于代表性支流,具体采样点分布和水库基本特征见图1和表1.

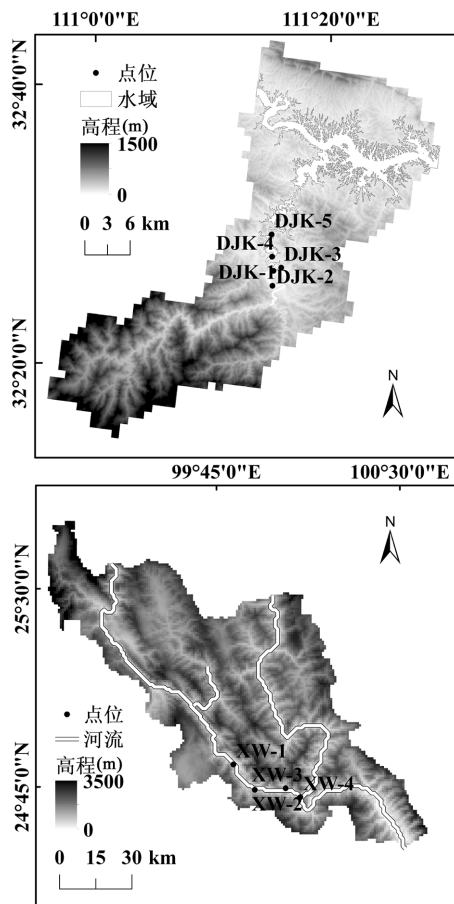


图1 小湾水库(XW)和丹江口水库(DJK)采样点空间分布
Fig.1 Spatial distribution of sampling points in Xiaowan Reservoir (XW) and Danjiangkou Reservoir (DJK)

1.2 水样采集与处理及水化学指标测定

1.2.1 水样采集与处理 通过量水器采取表层水,丹江口水库深层水使用水泵在相应深度抽取,在小湾水库则采集柱状沉积物上覆水作为底层水,采集水样时用对应水层的水样润洗 500mL 的聚乙烯瓶

2~3次,密封后放入4℃恒温冷藏柜保存.现场同步使用多参数水质检测仪(YSI-EXO,USA)原位测定采样点的温度(T)、水深、pH值、溶解氧(DO)等水体理化参数.

表1 小湾水库(XW)和丹江口水库(DJK)的水文、地质和功能特征

Table 1 Hydrological, geological and functional characteristics of Xiaowan Reservoir (XW) and Danjiangkou Reservoir (DJK)

水库特征	小湾水库	丹江口水库	来源
正常蓄水位(m)	1240	170	
流域面积(km ²)	113000	95200	
总库容(亿 m ³)	151.0	290.5	
水文特征			
年均径流量(m ³ /s)	1210	1185	[29,31,35-36]
年均降雨量(mm)	770~1330	700~1200	
年均气温(°C)	14.3~19.0	15.0~16.0	
平均水深(m)	80	20	
水域面积(km ²)	380	1050	
水温垂向分层(m)	表层:0~8 中层:8~20 底层:20~100	表层:0~2 中层:2~4 底层:4~25	[33]
功能	以发电为主要功能	以水源地功能使用	
调节方式	不完全多年调节	多年调节	[27-28]
滞留时间(d)	远大于5	5	
岩石类型	云母片岩、角闪斜长 变质中酸性火山岩、片麻岩、变质砂岩、岩浆岩、碳酸盐岩、碳酸盐岩、碎屑岩等 白云岩、石英岩等		

1.2.2 水化学指标测定 水样送回实验室进行阴、阳离子检验,通过取适量水样于 50mL 锥形瓶中,滴加 2~3 滴酚酞溶液,若溶液显红色,用 0.025mol/L 的盐酸溶液滴定至红色消失,记录消耗盐酸溶液体积;随后滴加 2 滴甲基橙溶液,继续用同浓度的盐酸溶液滴定至溶液由黄色突变为橙色,记录消耗盐酸溶液体积,根据酸碱滴定法的公式最终计算获得 HCO₃⁻浓度,水体样品过 0.22μm 筛后稀释送入离子色谱仪(盛瀚 CIC-D160 型,中国)分析测定阳离子(Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺)和阴离子(Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻)浓度.并通过溶解组分总和减去 1/2HCO₃⁻的计算方法得到总溶解性固体(TDS)含量.使用紫外分光光度计(A360)检测营养盐浓度:总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)(碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法),硝酸盐氮(NO₃⁻-N)(紫外分光光度法),氨氮(NH₄⁺-N)(纳氏

试剂紫外分光光度法),总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)(钼酸铵分光光度法)及正磷酸盐(DP)(分光光度法).

1.3 流域岩石风化速率

采用正演模型^[37]量化岩石风化、大气降水和人为输入等对水库水体溶质的贡献.离子来源分析采用正演法,质量平衡方程见公式(1):

$$C_{Xres} = C_{Xatm} + C_{Xeva} + C_{Xcar} + C_{Xsil} + C_{Xanth} \quad (1)$$

式中: C_{Xres} 表示库水中溶质物质的量浓度; C_{Xatm} 、 C_{Xeva} 、 C_{Xcar} 、 C_{Xsil} 和 C_{Xanth} 分别表示由大气输入、蒸发盐岩贡献、碳酸盐岩贡献、硅酸盐岩贡献和人为输入的溶质的物质的量浓度.

利用水化学通量 X_{car} 、 X_{eva} 和 X_{sil} 来估算流域岩石风化速率^[38],计算时需要先扣除由大气降水输入和人类活动影响的贡献的部分扣除^[37],计算公式如下:

$$CDR_{QC} = \left(2C_{Ca_{car}^{2+}} + 2C_{Mg_{car}^{2+}} + 1/2C_{HCO_3^-} \right) \cdot \frac{Q}{A} \quad (2)$$

$$CDR_{QS} = \left(C_{Na_{sil}^+} + C_{K_{sil}^+} + C_{Mg_{sil}^{2+}} + C_{Ca_{sil}^{2+}} + C_{SiO_2_{sil}^+} \right) \cdot \frac{Q}{A} \quad (3)$$

$$CDR_{QE} = \left(C_{Na_{eva}^+} + C_{Cl_{eva}^-} + C_{Ca_{eva}^{2+}} + C_{SO_4_{eva}^{2-}} \right) \cdot \frac{Q}{A} \quad (4)$$

$$CDR_{QSJ} = CDR_{QC} + CDR_{QS} + CDR_{QE} \quad (5)$$

式中: CDR_{QC} 、 CDR_{QS} 、 CDR_{QE} 、 CDR_{QSJ} 分布表示流域内碳酸盐、硅酸盐、蒸发岩及总风化速率, $t/(km^2 \cdot a)$; Q 为多年平均径流量, m^3/a ; A 为流域面积, km^2 .

1.4 水体营养状态评价

采用综合营养状态指数法对两个水库的营养化状态进行评价,并对水体富营养程度进行分级^[39],其计算公式为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot TLI(i) \quad (6)$$

式中: $TLI(\Sigma)$ 为综合营养状态指数; $TLI(i)$ 为第 i 种参数的营养状态指数; W_i 为第 i 种参数的营养状态指数的相关权重,其计算式为:

$$W_i = \frac{r_i^2}{\sum_{i=1}^m r_i^2} \quad (7)$$

式中: r_i 为第 i 个参数与叶绿素 a (Chl- a)的相关系数, m 为选出的主要参数数目.各种营养状态指数的计算式为:

$$TLI(Chl-a) = 10(2.5 + 1.086 \ln Chl-a) \quad (8)$$

$$TLI(TP) = 10(9.436 + 1.624 \ln TP) \quad (9)$$

$$TLI(TN) = 10(5.453 + 1.694 \ln TN) \quad (10)$$

本研究选择两个水库的氮、磷营养盐状况及 Chl- a 作为评价因子采用综合营养状态指数法进行评价,通过计算最终获得库区不同点位的综合营养状态指数,同一营养状态下,指数越大营养程度越高.该方法是以 Chl- a 作为基准,根据其他参数与其之间的相关系数得出营养状态指数的相关权重.水体氮、磷限制的判定标准: $N:P(TN:TP) < 10$:氮营养限制, $N:P > 20$:磷营养限制^[40].

1.5 数据分析

数据整理及计算处理部分均使用 EXCEL 2013,水库基本理化性质及主要阴阳离子,氮、磷营养盐浓度等数据的统计检验分析在 SPSS 20 中完成,使用 ArcGIS 10.8.1 绘制采样点分布图,采用 Origin 2018 绘制 Piper 三线图、Gibbs 图等,并进行 Pearson 相关性分析,同时绘制各影响因素的主成分分析图和相关性热图.

2 结果与分析

2.1 水体基本理化性质

如图 2 所示,小湾水库在垂向上比丹江口水库具有更明显的分层现象,其中小湾水库各断面理化性质表现为: T 的变化范围为 $18.9 \sim 27.9^\circ C$,混合层($0 \sim 5m$)的温度在 $26 \sim 28^\circ C$,滞温层($>20m$)平均温度约 $19^\circ C$,而温跃层($5 \sim 20m$) T 变化幅度达 $7 \sim 8^\circ C$;DO 浓度变化范围为 $1.6 \sim 11.2 mg/L$,最低值出现在分层处;TDS 变化范围为 $95.0 \sim 235.0 mg/L$,呈现随水深递增的趋势;pH 值表现为表层高中、下层低,变化范围为 $7.3 \sim 8.9$,水体呈弱碱性;Chl- a 在水体中层变化幅度大,但基本呈现表、底低中层高的现象,平均值为 $2.6 \mu g/L$.相比之下,丹江口水库各断面上水体理化性质变化趋势相似, T 的变化范围为 $21.0 \sim 33.2^\circ C$,表层水水温较高但向深层逐渐降低;DO、TDS、pH 值则具有较为显著的空间差异,水体 DO 浓度变化范围为 $0.3 \sim 11.7 mg/L$,在垂向上表现为表层 $>$ 中层 $>$ 底层;TDS 含量变化范围为 $106.0 \sim 167.0 mg/L$,自上游向下游逐渐上升;水体 pH 值自上游向下游明显降低($7.1 \sim 10.5$),且在垂向水柱中表现出随深度增加而降低的趋势;各采样断面底层 Chl- a 浓度均存在剧烈变化($0.5 \sim 35.8 \mu g/L$).

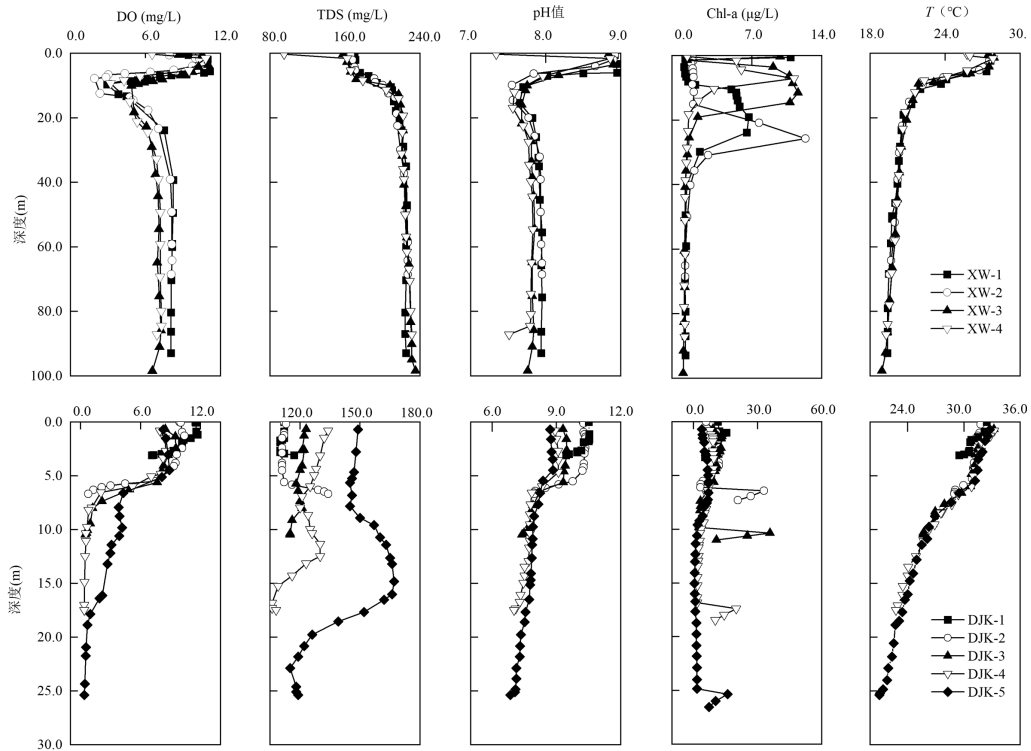


图2 小湾水库(XW)和丹江口水库(DJK)的溶解氧、总溶解性固体、pH值、叶绿素-a及温度垂向分布

Fig.2 Comparative vertical profiles of dissolved oxygen, total dissolved solids (TDS), pH, chlorophyll-a, and water temperature in Xiaowan Reservoir (XW) and Danjiangkou Reservoir (DJK)

2.2 水化学离子特征

通过 $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ 、 $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ 的比值可以将控制天然水体水化学组成的因素区分为大气降水、岩石风化和蒸发结晶三类。由图 3(a)可见,两个水库流域内的所有采样点都落在岩石风化控制区域,说明两个水库库水阴、阳离子的主要控制类型为岩石风化。而在水库主要离子 Piper 图(图 3(b))中,水库水体中阴离子在三

角图中均靠近 HCO_3^- 轴,阳离子靠近 Ca^{2+} 轴,表明两个水库的优势阴、阳离子为 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 。此外,根据水库优势离子含量: HCO_3^- (XW:115.33、DJK:87.54mg/L), Ca^{2+} (XW:24.89、DJK: 21.44mg/L)及离子含量占比情况: XW: Ca^{2+} (46%)、 HCO_3^- (51%)、 SO_4^{2-} (39%),DJK: Ca^{2+} (56%)、 HCO_3^- (61%)、 SO_4^{2-} (27%)分析,两水库均表现出明显的喀斯特水库水化学特征。

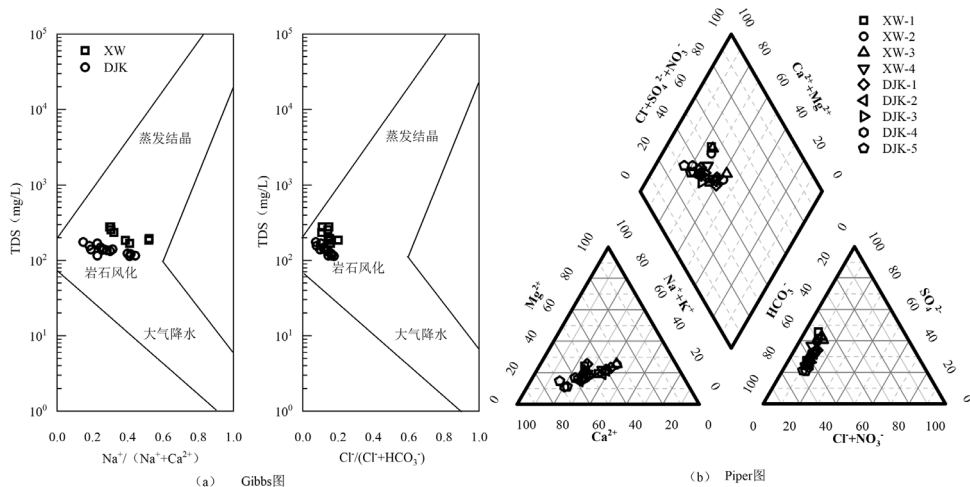


图3 小湾水库(XW)和丹江口水库(DJK)的 (a)水化学吉布斯 Gibbs 图及(b)阴、阳离子 Piper 图

Fig.3 (a) Gibbs diagram and (b) Piper diagram showing the distributions of dissolved cation and anion on an equivalent concentration (mg/L) in the Xiaowan Reservoir (XW) and Danjiangkou Reservoir (DJK)

各主要离子在水库不同断面的空间变化如图 4 所示.其中,小湾水库底层水 Ca^{2+} 浓度(32.85mg/L)约是表层水(16.94mg/L)的两倍, HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度在垂向上均呈现随水深增加而上升的趋势($P < 0.05$,

表:101.03,67.31mg/L;底:129.63,110.43mg/L);而丹江口水库表、中、底层水体的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 浓度并无显著差异($P > 0.05$),但底层 SO_4^{2-} 浓度与表、中层存在差异.

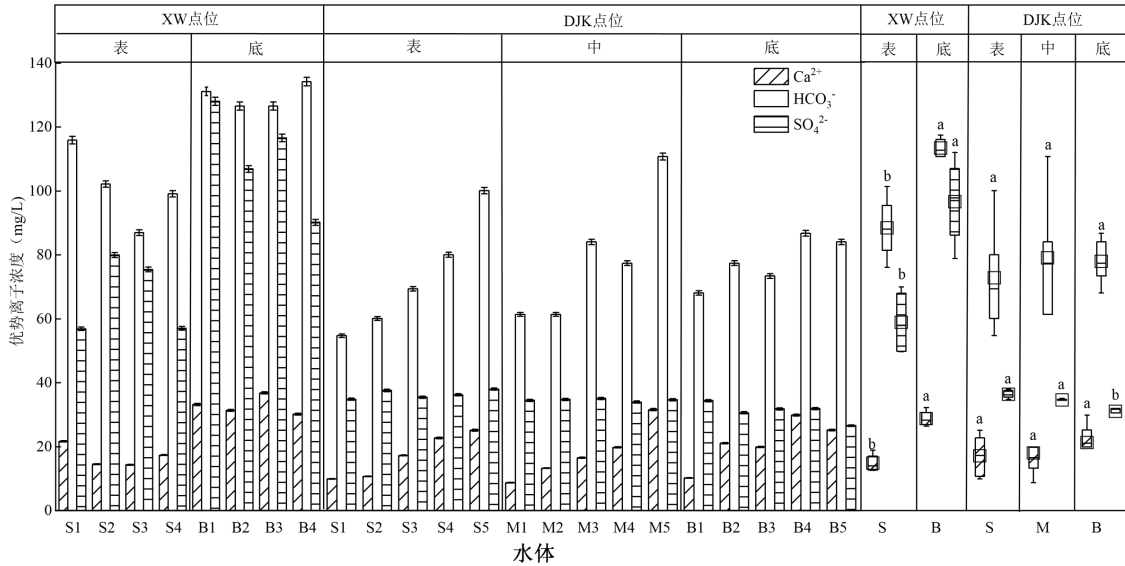


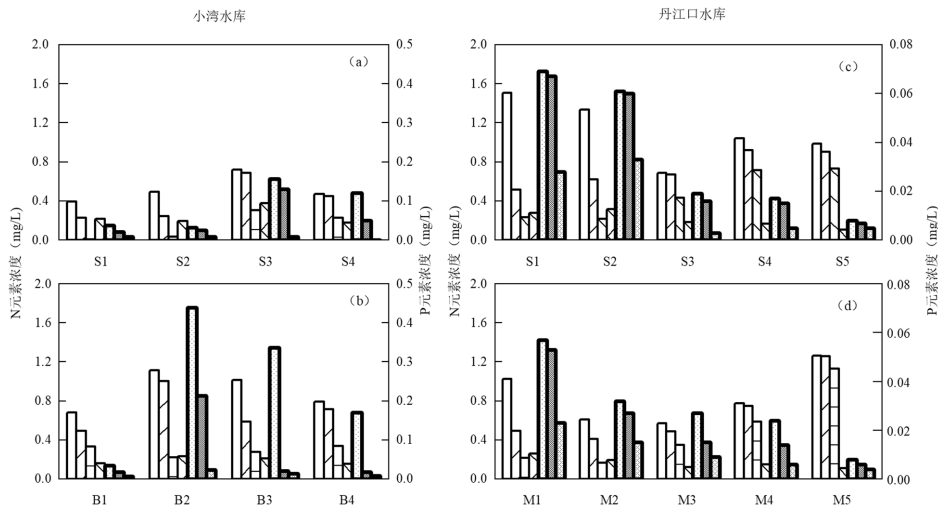
图 4 小湾水库和丹江口水库(S)、中(M)、底(B)层水体优势离子(Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-})空间变化

Fig.4 Comparative spatial variations of dominant ions (Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-}) in the surface, middle and bottom layer of the water column in Xiaowan reservoir (XW) and Danjiangkou reservoir (DJK)

2.3 水体氮、磷浓度及营养状态空间变化

水库水体氮、磷营养空间变化如图 5 所示,其中,小湾水体 TN、TP 浓度变化范围分别为 0.394~1.112, 0.032~0.440mg/L,其表层水体 TN、 NO_3^- -N 浓度均低于底层水体,但 NH_4^+ -N 含量则相反;水体氮以溶解态为主(77.42%),其主要由 NO_3^- -N(40.61%)和 NH_4^+ -N(40.19%)组成,而水体磷多为颗粒态(60.08%),其中正磷酸盐(DP)水平较低(19.63%);相比之下,丹江口不同水深 TN、TP 浓度变化范围(图

5(c)~图 5(e)分别为 0.570~1.895,0.008~0.069mg/L,垂向上,各形态 N 浓度随水深变化无显著变化($P > 0.05$),但表层的 DTN 浓度则从上游至下游表现出上升趋势;各点位水体中溶解态氮占 78.45%,其中 NO_3^- -N(59.76%)和 NH_4^+ -N(34.08%)则分别高于和低于小湾水库;磷元素也是以溶解态为主(82.17%),其中 DP 含量高(50.52%);丹江口水库 P 元素各形态浓度大致表现为向下游减少的趋势但各点位在垂向上没有较大差异.



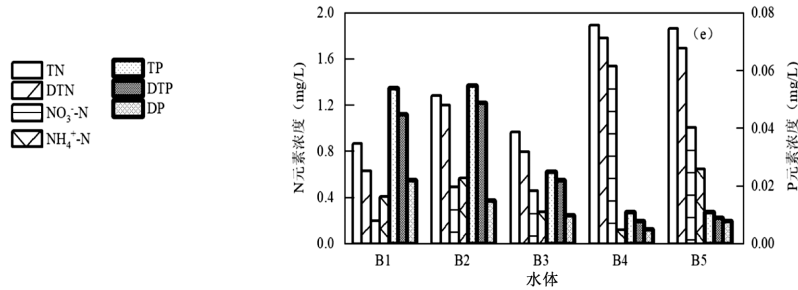


图 5 小湾水库和丹江口水库不同形态氮(TN、DTN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N)、磷(TP、DTP、DP)营养元素空间变化

Fig.5 Spatial variations of different nitrogen species (TN, DTN, NO₃⁻-N, NH₄⁺-N,) and phosphorus species (TP, DTP, DP) in the water bodies of Xiaowan reservoir (XW) and Danjiangkou reservoir (DJK)

图中 N 元素对应左纵轴,P 元素对应右纵轴,图 a、b 对应小湾水库表、底层水体,c、d、e 对应丹江口水库表、中、底层水体

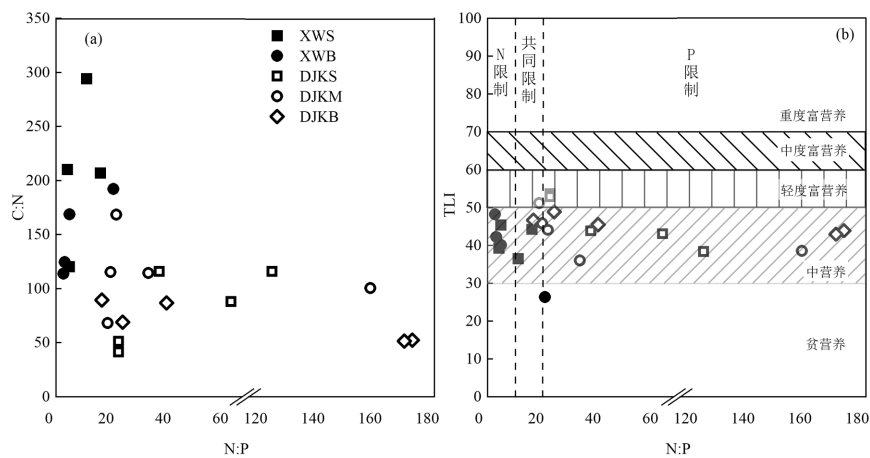


图 6 小湾水库(XW)和丹江口水库(DJK)各断面上表、中、底层水体(a)C:N 与(b)TLI 与 N:P 的响应关系

Fig.6 (a) Responses of (a) C:N, and (b) the comprehensive trophic level index (TLI) to N:P in water samples collected from the surface, middle and bottom layers of the water column in Xiaowan reservoir (XW) and Danjiangkou reservoir (DJK)

TLI>70:重度富营养;60<TLI≤70:中度富营养;50<TLI≤60:轻度富营养;30<TLI≤50:中营养;0<TLI≤30:贫营养;N:P<10:氮限制,N:P>20:磷限制;10<N:P<20:共同限制

根据 N:P 比值评价水库的营养限制类型,小湾水库 N:P 均值为 3,属于氮营养限制类型,C:N、C:P 的均值分别为 115 及 345 丹江口水库 N:P 均值为 27,属于磷营养限制类型,C:N、C:P 均值分别为 46 及 1243 (图 6(a));通过综合营养状态指数法对水库水体进行富营养状况评价,小湾水库和丹江口水库水体营养状态处于中营养水平(XW:40.30,DJK:45.04),但丹江口水库表、中层存在局部轻度富营养(图 6(b)).

3 讨论

3.1 水体主要离子来源解析

根据小湾水库和丹江口水库的水化学离子特征,两个流域内均存在部分蒸发岩(主要为石膏),故只考虑石膏溶解作用所产生的 Na⁺、Cl⁻、Ca²⁺、SO₄²⁻对水库的贡献;因碳酸盐岩中的 Na⁺和 K⁺含量较少,

故不考虑该部分的贡献;通常认为,Na⁺和 K⁺来自于钠、钾长石等硅酸盐岩风化溶解产生,Ca²⁺和 Mg²⁺来自于钙、镁硅酸盐岩风化溶解,NO₃⁻仅来源于人为输入,而 SO₄²⁻则来源于含硫化肥的施用和化石燃料燃烧等人为输入及蒸发岩风化.基于上述前提,根据 Noh 等^[41]、Sun 等^[42]研究澜沧江和长江流域内硅酸盐及蒸发岩风化端元的数据,假设蒸发岩端元值为进行大气输入校正后的区域最小值^[43],Cl⁻大气输送浓度来源于流域降雨数据,最终通过海盐校正法^[44]得到其他离子含量,具体如下:

$$C_{Cl^-}^{evaXW}=0.458\text{mmol/L}, C_{Cl^-}^{atmXW}=0.017\text{mmol/L},$$

$$C_{HCO_3^-}^{carXW}=1.890\text{mmol/L}, C_{Cl^-}^{evaDJK}=0.149\text{mmol/L},$$

$$C_{Cl^-}^{atmDJK}=0.010\text{mmol/L}, C_{HCO_3^-}^{carDJK}=1.435\text{mmol/L},$$

$$[C_{Cl^-}/C_{Na^+}]_{eva}=1.00, [C_{Ca^{2+}}/C_{Na^+}]_{eva}=0.27,$$

$$[C_{Ca^{2+}}/C_{SO_4^{2-}}]_{eva}=1.00, [C_{Cl^-}/C_{Na^+}]_{atm}=1.15,$$

$$[C_{Ca^{2+}}/C_{Na^+}]_{atm}=0.02, [C_{Mg^{2+}}/C_{Na^+}]_{atm}=0.11,$$

$$[C_{Ca^{2+}}/C_{Na^+}]_{silXW}=0.35, [C_{Ca^{2+}}/C_{Na^+}]_{silDJK}=0.30,$$

$$[C_{Mg^{2+}}/C_{K^+}]_{sil}=0.50, [C_{Mg^{2+}}/C_{Na^+}]_{sil}=0.20,$$

$$[C_{Na^+}/C_{Cl^-}]_{anth}=0.50;$$

各离子质量守恒方程可简化如下:

$$C_{Na_{res}^+} = C_{Na_{aim}^+} + C_{Na_{sil}^+} + C_{Na_{eva}^+} + C_{Na_{anth}^+} \quad (11)$$

$$C_{K_{res}^+} = C_{K_{sil}^+} + C_{K_{anth}^+} \quad (12)$$

$$C_{Mg_{res}^{2+}} = C_{Mg_{aim}^{2+}} + C_{Mg_{cur}^{2+}} + C_{Mg_{sil}^{2+}} \quad (13)$$

$$C_{Ca_{res}^{2+}} = C_{Ca_{aim}^{2+}} + C_{Ca_{cur}^{2+}} + C_{Ca_{eva}^{2+}} + C_{Ca_{sil}^{2+}} \quad (14)$$

$$C_{Cl_{res}^-} = C_{Cl_{aim}^-} + C_{Cl_{cur}^-} + C_{Cl_{eva}^-} \quad (15)$$

$$C_{NO_{3res}^-} = C_{NO_{3anth}^-} \quad (16)$$

$$C_{SO_{4res}^{2-}} = C_{SO_{4eva}^{2-}} + C_{SO_{4anth}^{2-}} \quad (17)$$

根据(11)~(17),小湾水库水体溶质受自然因素影响的比例为 64.5%,其中碳酸盐岩和蒸发岩的贡献值分别为 37.89%、21.67%;受人为因素影响的

SO₄²⁻、NO₃⁻浓度(AnthSO₄²⁻、AnthNO₃⁻)分别为 1.727,0.056mmol/L;而丹江口水库水体溶质受人类活动影响的比例为 35.9%,人类活动贡献的 SO₄²⁻、NO₃⁻分别为 0.768,0.071mmol/L,且自然因素作用下碳酸盐岩的贡献值也最高(46.72%).由于端元贡献值与不同流域的岩性分布、人类活动影响程度等密切相关^[45],本研究中,碳酸盐岩广泛分布于两个流域内,且小湾水库还存在丰富的蒸发岩^[46]且易受其高太阳辐射的环境作用蒸发进入水体.进一步通过水化学通量^[38]计算流域岩石风化速率,小湾水库的岩石风化速率(CDR_{QSI})为 83.489t/(km²·a)(其中碳酸盐岩 64.078t/(km²·a)、蒸发岩 14.733t/(km²·a)、硅酸盐岩 4.678t/(km²·a)),丹江口水库的岩石风化速率为 68.046t/(km²·a)(其中碳酸盐岩 58.374t/(km²·a)、蒸发岩 5.581t/(km²·a)、硅酸盐岩 4.091t/(km²·a)).

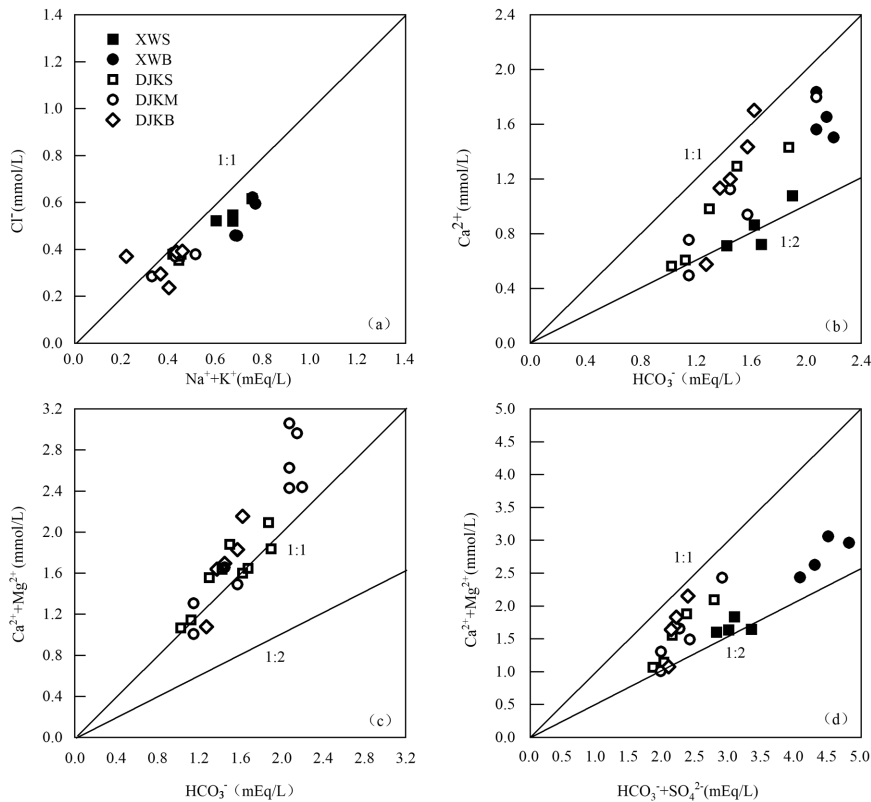


图 7 小湾水库(XW)和丹江口水库(DJK)采样断面垂向分层水体主要离子(Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、HCO₃⁻)浓度比值图
Fig.7 Ratios of dominant ions (Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻) at equivalent concentration (mEq/L) across water sampling profiles in Xiaowan reservoir (XW) and Danjiangkou reservoir (DJK)

两个水库分层水样中 Cl⁻/(Na⁺+K⁺)比值整体偏向 Na⁺+K⁺一侧(图 7(a)),说明水体 Na⁺、K⁺不足以平衡 Cl⁻,Cl⁻并非全部来源于蒸发岩溶解,可能有部分

源自硅酸盐矿物的风化溶解;相比之下,丹江口水库浓度比值更靠近岩盐溶解线(1:1),则说明丹江口的硅酸盐矿物相对更少.水样中 Ca²⁺与 HCO₃⁻比值点

(图 7(b))落在 1:1 线和 1:2 线(方解石溶解线)之间,且呈显著正相关关系($r=0.90、0.89,P<0.01$), $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 与 HCO_3^- 比值点(图 7(c))大部分落在岩盐溶解线 $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 一侧,说明小湾水库和丹江口水库所在区域均存在碳酸盐岩风化的情况, Ca^{2+} 和 HCO_3^- 具有共同来源,但碳酸钙岩并不是 HCO_3^- 的全部来源^[47], HCO_3^- 不足以平衡 $Ca^{2+}、Mg^{2+}$,推断其源于方解石的溶解而不是白云石^[48-49],同时存在其他如硅酸盐岩矿物等的风化.此外,图 7(d)中各点均落在靠近 1:1 线和 1:2 线之间,且 Mg^{2+} 与 SO_4^{2-} 有显著的正相关关系($r=0.98、0.80,P<0.01$),表明两个流域内均存在石膏的溶解,而且岩石的风化过程不仅仅是由硫酸和碳酸共同控制,还存在着不少部分由硅酸控制^[50].除此之外,两个水库的平均水深、补给来源、蓄水及换水时间不尽相同,一方面,以上游来水为水源的水库其库区水化学特征大都与补给来源相似^[34],但同时,水体滞留时间越长的水库其水化学特征被改变的可能越大^[51],因此,在不同的蓄水周期及周边环境的影响下,丹江口水库的水化学特征会更快响应流域内的

人类活动,而小湾水库在长期蓄水及深水条件下,其水化学特征会因为水体分层而具有垂向差异性.

3.2 水体营养状态及影响因素分析

本研究中,小湾水库和丹江口水库的 N、P 元素均超过富营养化的国际标准(TN :0.2mg/L,TP: 0.02mg/L^[40]),小湾水库水体 C:N:P=345:3:1,丹江口水库 C:N:P=1243:27:1,小湾水库具有高 C:N 和低 C:P,水华爆发作为富营养水体的典型特征,藻类的类型和生长取决于水体 C、N、P 等各生源要素的含量及化学计量比^[22];且化学计量比含量更能影响水体的营养状态^[23],通常,藻类体内 C、N、P 元素比例相对固定,蓝藻中 C:N:P=160:23:1,绿藻中 C:N:P=375:23:1^[8].同时,两个水库因位于喀斯特地区而具有丰富的无机碳源,均未形成碳限制,水体中 C:N、C:P 均远远高于藻类生长所需的比例;其中小湾水库高 C:N 有利于绿藻等对碳需求高的藻类生长并通过生物固碳形成碳汇^[8],丹江口水库则因高 C:P 更有利于对磷需求较低的蓝藻的快速增殖^[52],进而导致水质恶化并释放大量温室气体而成为碳源^[53].

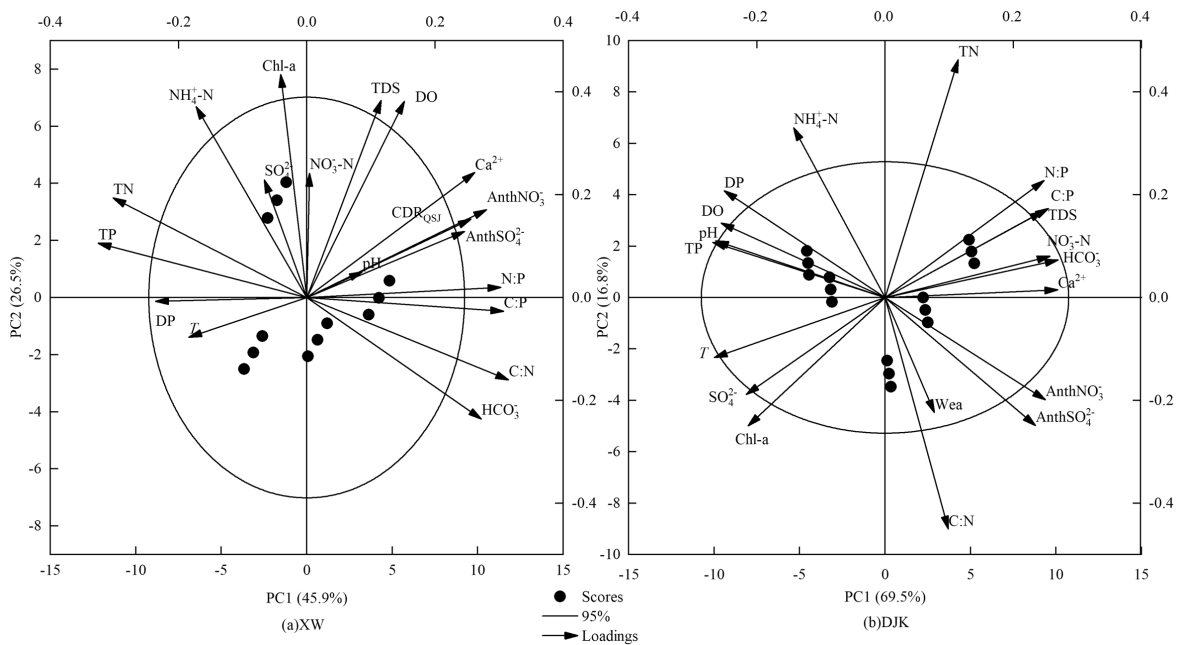


图 8 小湾水库(XW)和丹江口水库(DJK)水体营养状态影响因素主成分分析

Fig.8 Principal component analysis of the water trophic status in Xiaowan Reservoir (XW) and Danjiangkou Reservoir (DJK), highlighting key contributing factors

为进一步评价水体营养状态,本研究对两个水库水化学因子分别进行主成分分析(图 8),主成分分别解释了两个水库水体营养状态 73.6%、86.8%的变

化.小湾水库营养状态 48.4%的方差变异来自于主成分 1(PC1,图 8(a)), C、N、P 化学计量比及 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 CDR_{QSI} 、 $AnthNO_3$ 与 $AnthSO_4^{2-}$ 是该成分

内较强的正荷载,表明小湾流域内自然风化强烈且营养状态主要受营养元素化学计量比控制,同时人为输入的 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 对水体溶质的影响较为突出;主成分 2(PC2)则解释了 25.2%的方差变异,DO、TDS、Chl-a、 NH_4^+-N 分别贡献 0.384、0.386、0.433、0.369 的正荷载,他们的空间变异性导致该水库营养状态的空间变异性^[54].在丹江口水库中,PC1 解释了其水体营养变化的 70.8%(图 8(b)),其中 C、N、P 化学计量比及 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 等是主要的正荷载;PC2 则解释了 16%的变量信息,其中 N:P 和 C:P 为主要载

荷,说明丹江口水库水体营养状态主要受到 C、N、P 化学计量比的控制,而其作为平原水源地水库,必须控制 N、P 等营养的人为输入才能调节水质.此外,高风化速率通常会导致更多的岩石及矿物发生风化,并使得土壤和沉积物中的磷更易被冲刷和输送到水体之中,但喀斯特地区的岩性类型以碳酸盐岩为主,其含磷量相对较低且多为与钙素结合的稳态磷酸盐^[55],在长时间的风化过程中,TP 及 DP 含量相对降低,进而导致两水库的 CDR_{QSJ} 与二者呈现负相关.

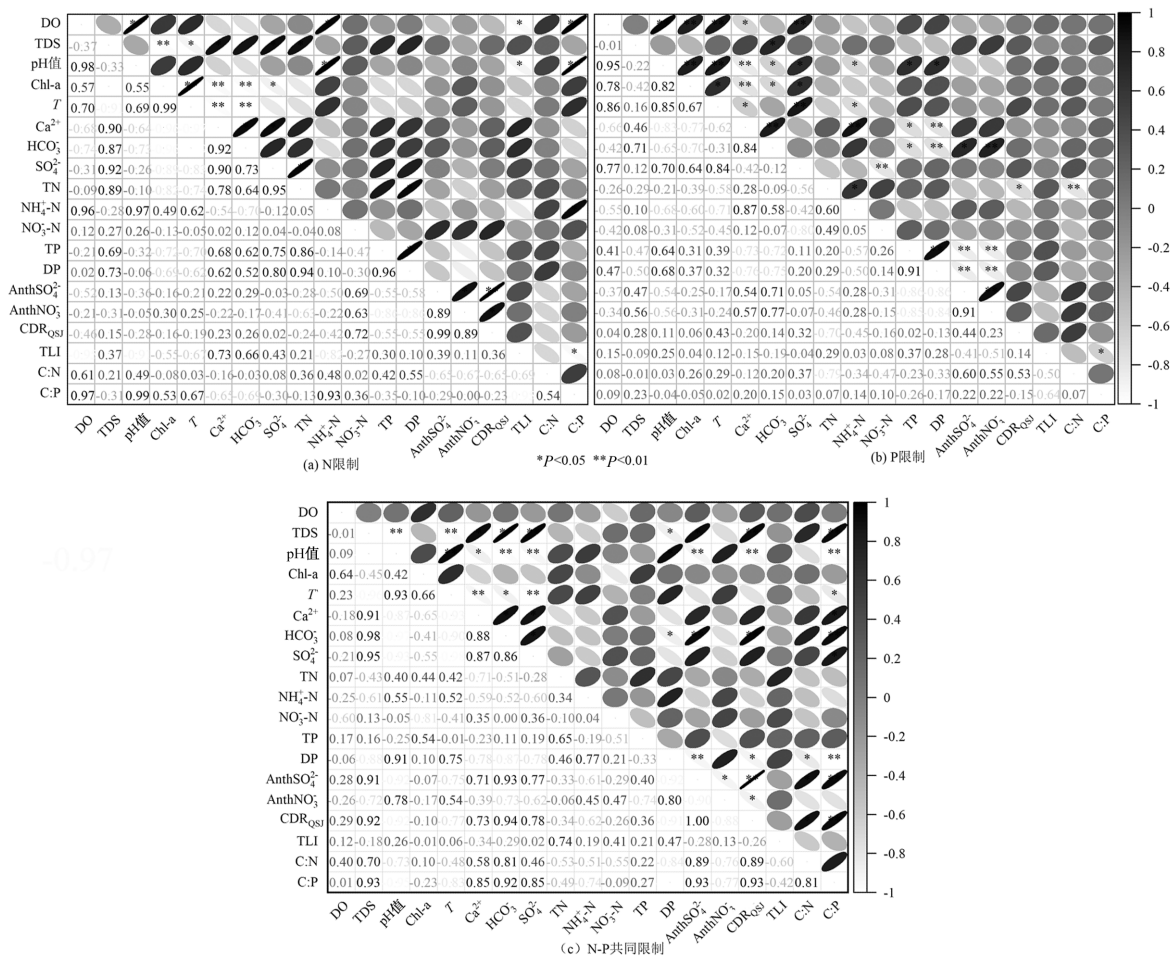


图 9 氮(a)、磷(b)及共同营养(c)限制下水库水体营养状态影响因素偏相关性分析

Fig.9 Partial correlation of impact factors on the comprehensive trophic level under (a) Nitrogen (N) limitation, (b) Phosphorus (P) limitation, and (c) N-P Joint limitation in the reservoir

两个水库所在的喀斯特地区的气候条件影响着水库水化学的背景特征,水体中的 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 等离子与 T 呈显著负相关($P < 0.01$;图 9),喀斯特水体的高 pH 值^[56]与 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 等离子呈负相关, T 和 pH 值则共同影响着 Chl-a,这些因子则共同影响水体的

TLI(图 9).为厘清不同营养限制类型下水库营养状态的影响因子,本研究以 N:P 比值作为区分条件进行了偏相关分析(图 9).在 N 限制条件下,TLI 与 DO、pH 值、C:P 均呈显著负相关($r < -0.90, P < 0.05$;图 9(a)),与 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 NH_4^+-N 浓度呈负相关但不显著;

其中, NH_4^+ -N 作为易吸收的 N 营养元素^[57]可缓解水体的 N 限制, NH_4^+ -N 浓度上升能促进浮游植物的增殖并消耗水体中的其他生源要素并降低 TLI; 同时 DO、pH 值还显著影响着 C:P($r>0.97, P<0.01$), 主要是由于在碱性条件或高 DO 的水体中, 上覆水中含 P 的物质会向沉积物迁移进而吸附或沉淀于底泥之中^[58], 水体中 C:P 上升而 TLI 也因此下降($r=-0.95, P<0.05$). 相比之下, 在 P 限制条件下, TLI 仅与 C:P 呈显著负相关($P<0.05$, 图 9(b)), 喀斯特地区较高的风化程度提供了大量的无机碳, TP 及 DP 含量相对不足(HCO_3^- 与 TP、DP 的相关性 $r<-0.72, P<0.05$), C:P 上升促使水体 TLI 下降; 相比于 N 限制, P 限制条件下的适宜的 DO 和 pH 值会促进藻类对有机磷进行吸收^[59], 从而导致其对 Chl-a 的影响更为显著($P<0.01$); 在 N-P 共同限制条件下(图 9(c)), TLI 与水体 TN、TP、Chl-a 均无显著的相关关系($P>0.05$), 水体 C:N 则主要受岩石风化速率和人为输入营养影响, 而 C:P 同时还与 T、pH 值、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 等水化学因子相关; 由此可见, 相比于已有的水体营养状态评价方法及其主要影响指标^[26], 不同水文条件及功能作用下的喀斯特水库水体营养状态影响因素各异且 C:P 是关键指标. 综上, 对于喀斯特水库水体的营养状态评价, 应考虑岩石风化、气候变化、人为输入等对水化学因子、生源要素间化学计量比的影响, 进而根据水体氮、磷营养限制条件分析水体营养主要影响因素, 尤其要考虑各生源要素间化学计量比的影响, 优化水体营养状态评价指标, 从而为有效评价喀斯特水库水体营养状态和水质管理提供依据.

4 结论

4.1 小湾水库及丹江口水库水化学类型分别为 $\text{HCO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}$ 型及 HCO_3^-/Ca 型, 均受岩石风化作用控制; 前者岩石风化以碳酸盐岩为主且风化速率达 $83.489\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$, 后者岩石风化主要有碳酸盐岩和硅酸盐岩风为主, 风化速率约为 $68.046\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$.

4.2 小湾水库中 N、P 营养分别以溶解态氮(77.42%)和颗粒态磷(60.08%)为主, 丹江口水库则都以溶解态为主(占比分别为 78.45%、82.17%); 两个水库均不存在 C 限制, 但分别存在 N 限制、P 限制; 综合营养指数 TLI 分别为 40.30 和 45.04, 均呈中度营养水平.

4.3 喀斯特地区水库水体的营养水平受其水化学

背景及高风化速率的影响, C、N、P 化学计量比是水体 TLI 的主要影响因素; 水体存在不同 N、P 限制时营养状态的影响因子则有所不同, 但提高易受岩石风化、气候变化、人为输入等影响的 C:P 均为改善水库水质的关键手段.

4.4 不同水文条件及功能作用下的喀斯特水库水体营养状态评价, 应基于水体氮、磷营养限制条件, 综合分析水化学特征、生源要素化学计量比等的影响, 优化水体营养状态评价指标, 为喀斯特水库水体营养状态评价、管理提供依据.

参考文献:

- [1] Brennan S T, Lowenstein T K. The major-ion composition of Silurian seawater [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2002, 66(15): 2683-2700.
- [2] Raymo M E, Ruddiman W F. Tectonic forcing of late Cenozoic climate [J]. *Nature*, 1992, 359(6391): 117-122.
- [3] Zhai S J, Yang L, Hu W-p, et al. Atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during optimal algal growth period in northern Lake Taihu [J]. *Environ Pollut Control*, 2009, 31(4): 5-10.
- [4] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, et al. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change [J]. *New Phytologist*, 2010, 186(3): 593-608.
- [5] 吴丰昌, 金相灿, 张润宇, 等. 论有机氮磷在湖泊水环境中的作用和重要性 [J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 1-7.
Wu F C, Jing X C, Zhang L Y, et al. Effects and significance of organic nitrogen and phosphorous in the lake aquatic environment [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 1-7.
- [6] 叶琳琳, 吴晓东, 赵冬悦, 等. 崇明岛河网浮游植物和无机、有机氮的时空分布特征 [J]. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 528-536.
Ye L L, Wu X D, Zhao D Y, et al. Temporal and spatial distributions of phytoplankton and inorganic and organic nitrogen in Chongming Island [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(3): 528-536.
- [7] 蔡龙炎, 李颖, 郑子航. 我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究 [J]. *地球与环境*, 2010, 38(2): 235-241.
Cai L Y, Li Y, Zheng Z H. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus of lake systems in China and their impact on eutrophication [J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(2): 235-241.
- [8] 柳星, 贺海波, 刘再华. 水体 CO_2 施肥及其碳增汇和富营养化缓解效应 [J]. *第四纪研究*, 2023, 43(2): 573-585.
Liu X, He H B, Liu Z H. Effects of CO_2 fertilization in aquatic ecosystems on the carbon sequestration and eutrophication mitigation [J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(2): 573-585.
- [9] 刘再华. 岩溶湖库生产力的溶解无机碳施肥及碳增汇和富营养化缓解效应 [J]. *科学通报*, 2023, 68(8): 915-926.
Liu Z H. DIC fertilization of primary production in karst lake-reservoirs and its effects on carbon sequestration and mitigation of eutrophication (in Chinese) [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2023, 68: 915-926.
- [10] 田立德, 姚檀栋, 沈永平, 等. 青藏高原那曲河流域降水及河流水体中氧稳定同位素研究 [J]. *水科学进展*, 2002, (2): 206-210.
Tian L D, Yao T D, Shen Y P, et al. Study on stable isotope in river water and precipitation in Naqu River basin Tibetan Plateau [J]. *Advances in Water Science*, 2002, (2): 206-210.

- [11] Han Q, Wang B, Liu C Q, et al. Carbon biogeochemical cycle is enhanced by damming in a karst river [J]. *Science of The Total Environment*, 2018,616:1181-1189.
- [12] Wang W, Li S L, Zhong J, et al. Understanding transport and transformation of dissolved inorganic carbon (DIC) in the reservoir system using $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and water chemistry [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,574:193-201.
- [13] Grill G, Lehner B, Thieme M, et al. Mapping the world's free-flowing rivers [J]. *Nature*, 2019,569(7755):215-221.
- [14] Milliman J D. Blessed dams or damned dams? [J]. *Nature*, 1997,386(6623).
- [15] Topping D J, Rubin D M, Vierra Jr L. Colorado River sediment transport: 1. Natural sediment supply limitation and the influence of Glen Canyon Dam [J]. *Water Resources Research*, 2000,36(2):515-542.
- [16] 张 垒,李秋华,黄国佳,等.亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析 *环境科学* [J]. *环境科学*, 2015,36(2):438-447.
Zhang L, Li Q H, Huang G J, et al. Seasonal stratification and eutrophication characteristics of a deep reservoir, Longtan Reservoir in subtropical area of China [J]. *Environmental Science*, 2015,36(2):438-447.
- [17] 谢 理,杨 浩,渠晓霞,等.滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中 DOM 释放特征研究 [J]. *环境科学*, 2013,34(9):3458-3466.
Xie L, Yang H, Qu X X, et al. Dissolved organic matter release of zizania caduciflora and phragmites australis from Lake Dianchi [J]. *Environmental Science*, 2013,34(9):3458-3466.
- [18] García Chicote J, Armengol X, Rojo C. Zooplankton abundance: A neglected key element in the evaluation of reservoir water quality [J]. *Limnologica*, 2018,69:46-54.
- [19] 杜云彬,陈求稳,王智源,等.江苏省典型湖泊饮用水源地安全综合评价 [J]. *水资源保护*, 2020,36(5):71-78,92.
Du Y B, Chen Q W, Wang Z Y, et al. Safety evaluation of typical lake drinking water sources in Jiangsu Province [J]. *Water Resources Protection*, 2020,36(5):71-78,92.
- [20] 肖胜生,房焕英,余小芳,等.壤中流驱动下可溶性有机碳迁移的研究进展 [J]. *中国水土保持科学*, 2020,18(3):155-161.
Xiao S S, Fang H Y, Yu X F, et al. Advances of the migration of dissolved organic carbon driven by interflow [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2020,18(3):155-161.
- [21] 李 冰,李小辉,彭启轩,等.黄龙自然保护区喀斯特湖泊水色特征及其影响因素 [J]. *应用与环境生物学报*, 2022,28(5):1215-1224.
Li B, Li X H, Peng Q X, et al. Characteristics of water color and its influencing factors in karst lakes of Huanglong Nature Reserve [J]. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 2022,28(5):1215-1224.
- [22] Pliński M, Józwiak T. Temperature and N: P ratio as factors causing blooms of blue-green algae in the Gulf of Gdańsk [J]. *Oceanologia*, 1999,41(1):73-80.
- [23] Mori T. Does coenzymatic stoichiometry really determine microbial nutrient limitations? [J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2020,146:107816.
- [24] 刘 敏,赵良元,李青云,等.长江源区主要河流水化学特征、主要离子来源 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(3):1243-1254.
Liu M, Zhao L Y, Li Q Y, et al. Hydrochemical characteristics, main ion sources of main rivers in the source region of Yangtze River [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(3):1243-1254.
- [25] 刘佳驹,赵雨顺,黄 香,等.雅鲁藏布江流域水化学时空变化及其控制因素 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(11):4289-4297.
Liu J J, Zhao Y S, Huang X, et al. Spatiotemporal variations of hydrochemistry and its controlling factors in the Yarlung Tsangpo River [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(11):4289-4297.
- [26] 宋子豪,邹 伟,桂智凡,等.我国常用湖泊营养状态指数研究进展与展望 [J]. *湖泊科学*, 2024,36(4):987-1001.
Song Z H, Zou W, Gui Z F, et al. Common-used trophic level index in Chinese lakes: Progress and prospects [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2024,36(4):987-1001.
- [27] 李 丹,李 黎,叶建庆.小湾水库影响区地震活动性探讨 [J]. *中国地震*, 2022,38(3):526-536.
Li D, Li L, Ye J Q. Preliminary Study of the Seismicity around Xiaowan Reservoir, Yunnan, China [J]. *Earthquake Research in China*, 2022,38(3):526-536.
- [28] 梁雄兵,张中旺,谢海燕,等.南水北调中线工程水源地的主要环境问题分析 [J]. *人民长江*, 2005,(4):53-54,57-71.
Liang X B, Zhang Z W, Xie H Y, et al. Analysis of main environment problems in water source area of the middle route project of S-N water transfer [J]. *Yangtze River*, 2005,(4):53-54,57-71.
- [29] 刘静思,朱晓声,胡子龙,等.不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响:以三峡水库和小湾水库为例 [J]. *环境科学*, 2020,41(8):3601-3611.
Liu J S, Zu X S, Hu Z L, et al. Effects of different water stratification on the vertical distribution of nitrogen in sediment interstitial waters: A case study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir [J]. *Environmental Science*, 2020,41(8):3601-3611.
- [30] 王 丽,邱新法,王培法,等.复杂地形下长江流域太阳总辐射的分布式模拟 [J]. *地理学报*, 2010,65(5):543-552.
Wang L, Qiu X F, Wang P F, et al. Distributed modeling of global solar radiation of rugged terrain of the Yangtze River Basin [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010,65(5):543-552.
- [31] 肖春艳,武 俐,赵同谦,等.南水北调中线源头区蓄水前土壤氮磷分布特征 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(10):1814-1820.
Xiao C Y, Wu L, Zhao T Q, et al. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorous in soils from the middle line source area of the South-to-North Water Division Project [J]. *China Environmental Science*, 2013,33(10):1814-1820.
- [32] 何 飞,陈正洪,孙朋杰,等.基于 CLDAS 辐射产品降尺度的县域太阳能资源精细化评估 [J]. *气象与环境科学*, 2023,46(6):49-58.
He F, Chen Z H, Sun P J, et al. Refined assessment of county solar energy resources based on downscaling CLDAS radiation products [J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2023,46(6):49-58.
- [33] 刘 畅,刘晓波,周怀东,等.水库缺氧区时空演化特征及驱动因素分析 [J]. *水利学报*, 2019,50(12):1479-1490.
Liu C, Liu X N, Zhou H D, et al. Temporal and spatial evolution characteristics and driving factors of reservoir anoxic zone [J]. *ShuiLi XueBao*, 2019,50(12):1479-1490.
- [34] 王艳碧,周忠发,孔 杰,等.基于水化学与氮氧同位素的喀斯特山区水体硝酸盐来源示踪与估算——以平寨水库为例 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(10):5265-5276.
Wang Y B, Zhou Z F, Kong J, et al. Tracing and estimation of nitrate sources based on hydrochemistry and nitrogen and oxygen isotopes in karst mountainous water: A case study of the Pingzhai reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(10):5265-5276.
- [35] 王 慎,张思思,许 尤,等.不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系 [J]. *环境科学*, 2019,40(6):2753-2763.
Wang S, Zhang S S, Xu Y, et al. Relationship between the vertical distribution of nutrients and bacterial community structures in sediment interstitial waters of stratified reservoirs with different water

- temperatures [J]. *Environmental Science*, 2019,40(6):2753–2763.
- [36] 张清淼,郭晓明,金超,等.丹江口水库淅川库区大气降水中无机离子特征及来源解析 [J]. *环境科学研究*, 2022,35(12):2677–2684.
Zhang Q M, Guo X M, Jing C, et al. Characteristics and source apportionment of inorganic ions in precipitation in Xichuan Area of Danjiangkou Reservoir [J]. *Research of Environment Sciences*, 2022, 35(12):2677–2684.
- [37] 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,等.清江流域岩石风化特征及其碳汇效应 [J]. *环境科学*, 2016,37(12):4671–4679.
Lü J M, An Y L, Wu Q X, et al. Rock weathering characteristics and the atmospheric carbon sink in the chemical weathering processes of Qingshuijiang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2016,37(12): 4671–4679.
- [38] 覃小群,蒋忠诚,张连凯,等.珠江流域碳酸盐岩与硅酸盐岩风化对大气 CO₂ 汇的效应 [J]. *地质通报*, 2015,34(9):1749–1757.
Qin X Q, Jiang Z C, Zhang L K, et al. The difference of the weathering rate between carbonate rocks and silicate rocks and its effects on the atmospheric CO₂ consumption in the Pearl River Basin [J]. *Geological Bulletin of China*, 2015,34(9):1749–1757.
- [39] 王明翠,刘雪芹,张建辉.湖泊富营养化评价方法及分级标准 [J]. *中国环境监测*, 2002,18(5):47–49.
Wang M C, Liu X Q, Zhang J H, et al. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2002,18(5):47–49.
- [40] Bergström, Ann-Kristin. The use of TN: TP and DIN: TP ratios as indicators for phytoplankton nutrient limitation in oligotrophic lakes affected by N deposition [J]. *Aquatic Sciences*, 2010,72:277–281.
- [41] Noh H, Huh Y, Qin J, et al. Chemical weathering in the Three Rivers region of Eastern Tibet [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(7):1857–1877.
- [42] Sun H, Han J, Li D, et al. Chemical weathering inferred from riverine water chemistry in the lower Xijiang basin, South China [J]. *Science of The Total Environment*, 2010,408(20):4749–4760.
- [43] Li S, Lu X, Bush R T. Chemical weathering and CO₂ consumption in the Lower Mekong River [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 472:162–177.
- [44] Gaillardet J, Dupré B, Louvat P, et al. Global silicate weathering and CO₂ consumption rates deduced from the chemistry of large rivers [J]. *Chemical Geology*, 1999,159(1–4):3–30.
- [45] 张小薇,虞之锋,陈敏,等.典型喀斯特溪流化学特征及碳汇通量研究 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(2):648–657.
Zhang X W, Yu Z F, Chen M, et al. Hydro-chemical characteristics and carbon sink fluxes of a typical karst stream [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(2):648–657.
- [46] 肖茜,杨昆,洪亮.近30a云贵高原湖泊表面水体面积变化遥感监测与时空分析 [J]. *湖泊科学*, 2018,30(4):1083–1096.
Xiao Q, Yang K, Hong L. Remote sensing monitoring and temporal-spatial analysis of surface water body area changes of lakes on the Yunnan-Guizhou Plateau over the past 30 years [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018,30(4):1083–1096.
- [47] Thomas J, Joseph S, Thirivkramji K, et al. Seasonal variation in major ion chemistry of a tropical mountain river, the southern Western Ghats, Kerala, India [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,71:2333–2351.
- [48] 张涛,蔡五田,李颖智,等.尼洋河流域水化学特征及其控制因素 [J]. *环境科学*, 2017,38(11):4537–4545.
Zhang T, Cai W T, Li Y Z, et al. Major ionic features and their possible controls in the water of the Niyang River Basin [J]. *Environmental Science*, 2017,38(11):4537–4545.
- [49] 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,等.贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析 [J]. *环境科学*, 2015,36(5):1565–1572.
Lü J M, An Y L, Wu Q X, et al. Hydrochemical characteristics and sources of Qingshuijiang River Basin at wet season in Guizhou Province [J]. *Environmental Science*, 2015,36(5):1565–1572.
- [50] 严宇鹏,牛凤霞,刘佳,等.雅鲁藏布江上游夏季水化学特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2022,42(2):815–825.
Yan Y P, Niu F X, Liu J, et al. Hydrochemical characteristics and sources of the upper Yarlung Zangbo River in summer [J]. *China Environmental Science*, 2022,42(2):815–825.
- [51] 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 [J]. *湖泊科学*, 2020,32(3):713–725.
Wang W F, Zhong J, Li C, et al. The influence of cascade reservoir construction on water chemistry distribution in karst area [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020,32(3):713–725.
- [52] King D L. The role of carbon in eutrophication [J]. *Water Pollution Control Federation*, 1970:2035–2051.
- [53] Kim H S, Hwang S J, Shin J K, et al. Effects of limiting nutrients and N: P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir [J]. *Hydrobiologia*, 2007,(1):255–267.
- [54] 田永杰,唐志坚,李世斌.我国湖泊富营养化的现状和治理对策 [J]. *环境科学与管理*, 2006,(5):119–121.
Tian Y J, Tang Z J, Li S B, et al. Present of eutrophication of our countrys lakes and control measures [J]. *Environmental science and mangement*, 2006,(5):119–121.
- [55] Chen H, Li D, Xiao K, et al. Soil microbial processes and resource limitation in karst and non-karst forests [J]. *Functional Ecology*, 2018,32(5):1400–1409.
- [56] Zhang Z H, Hu G, Ni J. Effects of topographical and edaphic factors on the distribution of plant communities in two subtropical karst forests, southwestern China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013,10:95–104.
- [57] Kamp A, Høgslund S, Risgaard-Petersen N, et al. Nitrate storage and dissimilatory nitrate reduction by eukaryotic microbes. [J]. *Frontiers in microbiology*, 2015,(6):1492.
- [58] Zaccone R, Caruso G, Calì C. Heterotrophic bacteria in the northern Adriatic Sea: seasonal changes and ectoenzyme profile [J]. *Marine Environmental Research*, 2002,54(1):1–19.
- [59] 冯胜,秦伯强,高光.太湖磷转化细菌与水体磷形态关系 [J]. *湖泊科学*, 2008,(4):428–436.
Feng S, Qin B Q, Gao G. The relationships between phosphorus-transmuting bacteria and phosphorus forms in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008,(4):428–436.

致谢: 本研究的现场采样工作由三峡水库生态野外监测站及云南师范大学地理学部给予支持,实验分析由三峡大学水利与环境学院淡水生态系统碳循环课题组提供帮助,在此一并感谢。

作者简介: 付陈乐(2001-),男,江西抚州人,三峡大学硕士研究生,主要从事淡水生态碳循环研究.m13170890623@163.com.