

岩溶峡谷型水库枯水期氮素的空间赋存特征及其环境驱动因子

唐玲巧^{1,2}, 焦树林^{1,2}, 李曾^{1,2}, 宋方园^{1,2}, 胡萍萍^{1,2}

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 喀斯特研究院, 贵阳 550025; 2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验室培育基地, 贵阳 550025)

摘要: [目的] 探究枯水期水库氮素的空间分布特征及内源氮释放潜力。[方法] 于2025年12月对杨家园水库7个采样点的3层水柱及表层沉积物进行采样, 分析水体不同形态氮(总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮)及理化参数(ORP、TOC、pH等), 测定沉积物中总氮、铵态氮和硝态氮含量。[结果] 沿入库口至坝前, 水体TN浓度由2.70 mg/L(Y1底层)升至3.44 mg/L(Y7底层), 沉积物TN由910 mg/kg(Y1)升至2 130 mg/kg(Y7), 呈显著沿程累积。水库氮形态垂向分布总体来看受局部氧化还原条件和混合状态共同调控, 存在明显的空间异质性。Spearman相关分析显示, 总氮、氨氮主要受TDS、ALK和pH调控($|r| \approx 0.5 \sim 0.6$), 硝态氮、亚硝态氮与理化参数相关性弱, 揭示枯水期氮素分布的复杂性与多因子耦合特征。沉积物有机氮与水体TN呈极显著正相关($r = 0.93, p < 0.01$), 沉积物硝态氮与水体硝态氮呈极显著正相关($r = 0.93, p < 0.01$), 证实“有机氮矿化→氨氮释放→硝化转化→硝氮交换”的界面交换路径。主成分分析提取2个主成分(累计方差贡献率76.9%), 识别出“氮富集因子”和“氧化还原调控因子”。[结论] 枯水期杨家园水库氮素主要受内源释放控制, 沉积物有机氮是主要氮库, 坝前区为内源释放高风险区, 需加强监测。

关键词: 氮形态; 沉积物-水界面; 枯水期; 杨家园水库

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0057-11

Spatial Distribution Characteristics of Nitrogen in Karst Canyon Reservoirs during Dry Season and Their Environmental Drivers

Tang Lingqiao^{1,2}, Jiao Shulin^{1,2}, Li Zeng^{1,2}, Song Fangyuan^{1,2}, Hu Pingping^{1,2}

(1. Karst Research Institute, School of Geography and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 2. Cultivation Base of the Guizhou Province Key Laboratory of Karst Mountain Ecological Environment, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the spatial distribution characteristics of nitrogen and endogenous release potential in reservoirs during the dry season. [Methods] Samples were collected in December 2025 from three water layers and surface sediments at seven sampling sites in Yangjiayuan Reservoir. Different nitrogen forms in the water (total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and nitrite nitrogen) and physicochemical parameters (ORP, TOC, pH, etc.) were analyzed, and the concentrations of total nitrogen, ammonium nitrogen, and nitrate nitrogen in the sediments were measured. [Results] From the reservoir inlet to the dam front, the TN concentration in the water increased from 2.70 mg/L (Y1 bottom layer) to 3.44 mg/L (Y7 bottom layer), and the TN concentration in the sediments increased from 910 mg/kg (Y1) to 2 130 mg/kg (Y7), showing significant longitudinal accumulation. The vertical distribution of nitrogen forms in the reservoir water was jointly regulated by local redox conditions and mixing status, showing pronounced spatial heterogeneity. Spearman

收稿日期: 2026-04-06

修回日期: 2026-04-27

录用日期: 2026-05-06

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-06-30

资助项目: 贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2023]一般214); 国家自然科学基金项目(42301038)

第一作者: 唐玲巧(2003—), 女, 硕士研究生, 主要从事水生态健康研究。E-mail: 1529013709@qq.com

通信作者: 焦树林(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事水水文水健康研究。E-mail: jiaoshulin@gznu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

correlation analysis showed that total nitrogen and ammonium nitrogen were mainly regulated by TDS, ALK, and pH ($|r| \approx 0.5 - 0.6$), whereas nitrate nitrogen and nitrite nitrogen were weakly correlated with physicochemical parameters, revealing the complexity and multi-factor coupling characteristics of nitrogen distribution during the dry season. Sediment organic nitrogen showed an extremely significant positive correlation with water TN ($r = 0.93$, $p < 0.01$), and sediment nitrate nitrogen was extremely significantly positively correlated with water nitrate nitrogen ($r = 0.93$, $p < 0.01$), confirming the sediment-water interface exchange pathway of "organic nitrogen mineralization $\rightarrow$ ammonium nitrogen release $\rightarrow$ nitrification $\rightarrow$ nitrate nitrogen exchange". Principal component analysis extracted two principal components (cumulative 76.9%), identifying a nitrogen enrichment factor and a redox controlling factor. [Conclusion] During the dry season, nitrogen in Yangjiayuan Reservoir is mainly controlled by endogenous release. Sediment organic nitrogen is the main nitrogen pool, and the dam-front area is a high-risk zone for endogenous release, requiring strengthened monitoring.

Keywords: nitrogen forms; sediment-water interface; dry season; Yangjiayuan Reservoir

Received: 2026-04-06

Revised: 2026-04-27

Accepted: 2026-05-06

Online(www.cnki.net): 2026-06-30

氮素是湖泊、水库等水体富营养化的关键驱动因子之一^[1]。过量的氮、磷等营养物质在河流、湖泊和水库中积累,极大地加速水体富营养化进程,导致藻华频发,给水生生态系统带来巨大的生态风险^[2]。水库作为重要的饮用水源地,其水质状况直接影响人民的生活质量和健康水平^[3]。近年来,人类活动导致的氮磷输入失衡进一步加剧内陆湖泊和水库系统的磷限制状态,过量的氮输入将放大温室气体排放,未来水体富营养化水平升高将导致 CO₂、CH₄和 N₂O 排放量分别增加 49%、12% 和 25%^[4]。因此,深入理解水库氮素的来源、迁移转化与归趋机制,对于水质管理和富营养化防控具有重要意义。

水库氮循环涉及水体、沉积物等多个介质,不同形态氮的生物可利用性和环境行为存在显著差异^[5]。筑坝活动深刻改变了河流生源要素的生物地球化学循环,水库水体的慢流速特征导致水体停留时间显著增加,从而影响氮的形态分布和浓度水平^[6]。在三峡水库等大型水利工程中,水库调度通过水文情势变化显著调控氮的时空分布,水库运行与水位波动、泥沙通量、碳输入等方面的协同效应共同影响氮的迁移转化过程^[7]。目前,关于水库氮素的研究多集中在丰水期外源输入贡献,或藻类暴发期的生物可利用性方面。然而,枯水期特殊水文阶段的研究相对薄弱。于桥水库的研究^[8]表明,当外源污染输入得到有效控制后,内源释放被认为是水质恶化的主要原因。在保护良好的水库中,旱季生活污水对河流硝态氮负荷的贡献可高达 (68.6 $\pm$ 10.6)%,显示枯水期污染源结构具有特殊性^[9-10]。尽管如此,枯水期水库多介质氮形态的系统研究,特

别是水体剖面与沉积物的同步分析仍较为缺乏,限制了对内源氮释放机制的深入认识。

枯水期是水库水文情势的关键阶段,此时流域降雨减少,地表径流对水库的氮素输入显著减弱,外源贡献相对降低,同时水位下降、水体滞留时间延长,为沉积物内源释放创造条件。有研究^[11]表明,当外源输入得到有效控制时,沉积物作为水库中氮磷的主要来源,对水质起着至关重要的作用。沉积物有机质的矿化作用对氮磷释放具有显著的促进作用,将加剧以磷限制为主的水体富营养化^[12]。枯水期水温降低,水体垂向对流混合可能增强或呈现不均匀状态,影响氮形态的垂向分布。水文情势变化引起的氧化还原波动在控制沉积物-水界面氮交换和转化中起着首要作用^[13]。水位调控下的干湿交替过程可改变氮循环模式,从生物脱氮为主导转向内源氮滞留增强^[14]。因此,枯水期为探究内源过程对水质的贡献提供理想的窗口期。

基于上述背景,本研究以枯水期(12月)杨家园水库为研究对象,在入库口至坝前布设 7 个采样点,系统采集 3 层水柱(表层、中层、底层)及表层沉积物样品,测定水体不同形态氮(TN、NH₃-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N)及理化参数(TOC、pH、ORP、ALK、TDS),分析沉积物总氮、铵态氮、硝态氮含量,通过差减法计算有机氮,旨在阐明枯水期水库氮素的空间垂向分布特征以及识别影响水体氮形态转化的关键环境驱动因子,研究成果将丰富对枯水期水库氮素生物地球化学循环的认识,为水库内源氮风险识别与精准防控提供科学依据,对保障饮用水源地水质安全和富营养化防治具有重要的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

杨家园水库位于贵州省习水县二郎镇,地处赤水河一级支流桐梓河下游河段,是桐梓河干流梯级规划八级开发中的第七级水库,对研究流域营养盐迁移转化及岩溶地区峡谷型水库的水文生态过程具有重要价值。杨家园水电站于2010年3月下闸蓄水,同年5月投产发电,水库总库容 $0.792 \times 10^8 \text{ m}^3$,调节库容 $0.28 \times 10^8 \text{ m}^3$,水域面积约 0.5 km^2 ,多年平均径流量 $14.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。其中,水库上游接圆满贯水电站,坝址以上流域面积 $3\,012 \text{ km}^2$,正常蓄水位450 m,死水位440 m,具有不完全年调节能力。研究区属中亚热带季风性湿润气候,气候垂直变化明显,温和湿润,雨量丰沛但分布不均,年平均气温 $15 \sim 18^\circ\text{C}$,降雨量 $1\,000 \sim 1\,200 \text{ mm}$,降水较为充沛。流域内水系发育,支流众多,植被保存较好,水质纯净。杨家园水库库区两岸岩体以白云岩、石灰岩为主,流域内岩溶地貌发育充分,河谷切割深、岸坡陡峻,属典型岩溶峡谷型水库,具备鲜明的岩溶地貌与水文环境特征。该水库可作为岩溶地区峡谷型水库的典型研究案例,能系统反映此类水库的共性特点与现存问题,也可作为同类型水库的运维管理及生态保护提供实践依据与参考借鉴。

1.2 样品采集

2025年12月(枯水期)进行现场采样。此时水库水位稳定,外源径流输入较弱,水体滞留时间较长,能够较好地反映内源过程对氮素分布的影响。根据水库形态及水文特征,沿水库纵向共布设7个采样点(图1),依次为:入库口(Y1)、库中过渡区(Y2)、第1条支流汇入前(Y3)、第1条支流汇入后(Y4)、第2条支流汇入前(Y5)、第2条支流汇入后(Y6)及坝前(Y7)。点位布设旨在系统捕捉入库河水、支流汇入、库区迁移及出库全过程氮素形态与理化参数的变化规律。

在每个采样点,使用有机玻璃采水器分别采集表层(水面下 0.5 m)、中层($1/2$ 水深)和底层(离底 0.5 m)水样。现场使用多参数水质分析仪(YSI)测定水温、pH、氧化还原电位(ORP)和总溶解固体(TDS)。水样采集后立即装入预先酸洗的高密度聚乙烯瓶内,冷藏避光保存,并于24 h内运回实验室分析。表层沉积物样品采用彼得逊抓斗式采样器采集,每个点位采集3份平行样,混合均匀后装入密封袋,排除空气,冷藏返回实验室。沉积物样品经冷冻

干燥、研磨过筛后,用于测定总氮及各形态氮含量。采样期间所有器具均用现场水样润洗3次,避免交叉污染。现场设置运输空白样和全程序空白样,以保证数据质量。



图1 杨家园水库采样点

Fig.1 Sampling sites in Yangjiayuan Reservoir

1.3 样品分析

水样采集后立即置于 4°C 保温箱中避光保存,返回实验室后立即进行分析或于 4°C 冰箱中保存(不超过24 h)。水体氮形态指标包括总氮(TN)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和亚硝态氮($\text{NO}_2\text{-N}$)。其中,TN采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定; $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定; $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定; $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定。所有水样均设置3个平行样,测定结果的相对标准偏差控制在5%以内。总有机碳(TOC)采用总有机碳分析仪进行测定,样品经 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜过滤后进样分析。碱度(ALK)采用酸碱指示剂滴定法(酸性甲基橙指示剂)测定。

沉积物样品采集后去除石块、植物残体等杂质,置于聚乙烯密封袋中低温保存后返回实验室。样品经冷冻干燥后研磨过100目筛,保存于干燥器中备用。铵态氮、硝态氮分别采用靛酚蓝比色法、紫外分光光度法测定;总氮用凯氏定氮法;有机碳用重铬酸钾-浓硫酸加热滴定法。结果以干重(mg/kg)计。

1.4 数据处理与统计分析

基础数据整理使用Microsoft Excel 2019软件进行,同时使用SPSS软件对数据进行方差分析。图表绘制采用Origin 2021和ArcGIS 10.8软件完成,其中采样点分布图使用ArcGIS软件绘制,相关性热图、柱状图、主成分分析图使用Origin软件绘制。

2 结果与分析

2.1 水体理化参数的空间分布特征

水体 ORP 整体变化范围为 119~165 mV,处于弱氧化至中等氧化状态(图 2a)。空间上,ORP 呈现从入库口至坝前的波动下降趋势,入库口(Y1)ORP 为 137~152 mV,Y3、Y6 出现峰值,表层高达 165 mV,而坝前(Y7)持续降低至最低值(119~122 mV)。结果表明,库中局部区域氧化性较强,而坝前区域还原性增强。垂向上,Y1、Y2、Y6 三层水体 ORP 差异不显著;Y3、Y4 表现为表层 ORP 高于底层,Y5 点位中层 ORP 高于表层和底层。

水体 pH 总体呈弱碱性,变化范围为 7.92~8.50,平均值为 8.07 ± 0.15 (图 2b)。从空间分布来看,pH 呈现明显的沿程变化和局部垂向分层特征。水平方向上,从入库口(Y1)至库区中段(Y4),pH 相对稳定,维持在 7.92~8.00,波动较小。自 Y5 点开始,pH 显著升高,Y5 表层 pH 达到 8.50,为全库最高值,Y6 和 Y7 点 pH 也维持在 8.04~8.16 的较高水平。垂向分布上,Y1~Y4、Y6 三层水体 pH 差异不显著,差值小

于 0.05。然而,Y5 点表现出显著的垂向分层特征,表层 pH 明显高于中层和底层,表层与底层差值达 0.12。Y7 点中层 pH 略低于表层和底层。总体而言,pH 空间异质性主要表现为库区中后段高于前段,垂向上除 Y5 点外整体混合均匀,反映出枯水期水体相对稳定的水化学环境。

水体 TOC 浓度为 1.728~3.964 mg/L,总体平均值为 2.710 mg/L(图 2c)。TOC 在空间上呈现出明显的水平异质性与垂向分层特征。从入库口(Y1)至坝前(Y7),TOC 浓度呈先升高后降低的趋势(图 2c)。高值区集中在 Y3 点位,其各层 TOC 平均值达 3.676 mg/L,显著高于其他点位,为全库最高。Y2 和 Y6 点位也处于相对较高水平。低值区出现在 Y5 点位,其各层 TOC 平均值仅为 2.025 mg/L,中层低至 1.728 mg/L,为全库最低。Y4 和 Y7 点位 TOC 水平相近,维持在 2.3~2.4 mg/L。垂向上,所有点位均呈现表层和底层较高、中层较低的分布特征。总体而言,枯水期水库 TOC 的空间分布受到了外源输入和内源过程的共同影响。

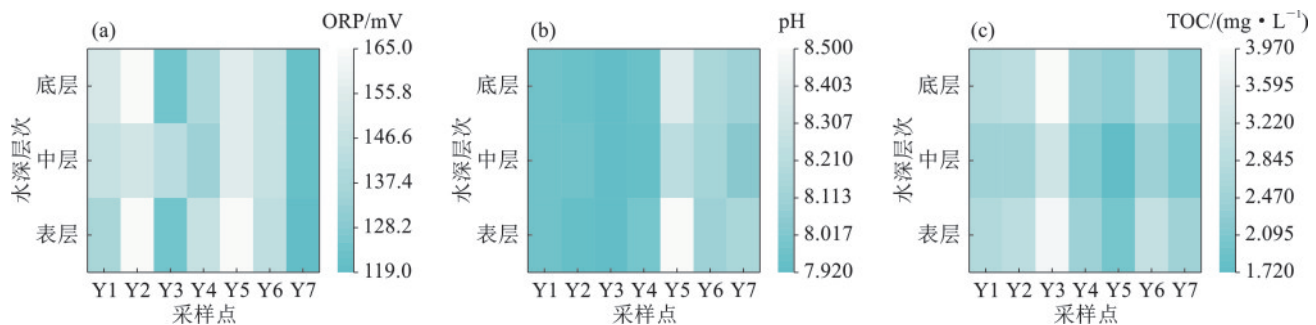


图 2 枯水期水库水体理化参数的空间垂向分布

Fig. 2 Spatial vertical distribution of physicochemical parameters of reservoir water during dry season

2.2 水体氮形态的空间垂向分布特征

对各采样点(Y1~Y7)的 4 个氮形态指标(TN、NH₃-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N)进行多元方差分析(MANOVA),结果显示,各采样点间的整体氮素组成存在极显著差异($F\approx4.52,p<0.001$)。7 个采样点的水体关键氮形态实测数据见表 1,柱状分布图见图 3。根据上述图表对水体氮形态的空间垂向分布特征进行具体分析。

2.2.1 总氮(TN)的空间垂向分布 沿入库口(Y1)至坝前(Y7)方向,TN 浓度总体呈持续升高趋势(图 3a)。Y1 各层 TN 最低,至 Y3 明显升高,Y5~Y7 维持在较高水平,其中 Y7 表层达全库最高值。垂向上,TN 分布存在 2 种模式:Y1、Y2、Y6、Y7 表现为中层富集(中层>底层>表层),而 Y3、Y4、Y5 表现为底层富集(底层>表层>中层)。坝前 Y7 表层异常高值可能与微表层富集或局部输入有关。

表 1 各采样点水体关键氮形态实测数据
Table 1 Measured data of key nitrogen forms in water at each sampling site

采样点	mg/L			
	TN	NH ₃ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N
Y1	2.700±0.080	0.040±0.005	0.218±0.012	0.061±0.004
Y2	2.960±0.100	0.059±0.006	0.143±0.009	0.048±0.003
Y3	3.470±0.120	0.066±0.007	0.245±0.015	0.036±0.002
Y4	3.400±0.110	0.064±0.006	0.057±0.004	0.030±0.002
Y5	3.160±0.090	0.058±0.005	0.420±0.023	0.036±0.002
Y6	3.430±0.100	0.059±0.006	0.188±0.010	0.035±0.002
Y7	3.440±0.110	0.163±0.015	0.259±0.014	0.036±0.002

注:数据为平均值±标准差;n=3。下同。

2.2.2 氨氮(NH₃-N)的空间垂向分布 氨氮浓度沿程呈现入库低、库中升高、坝前底层突增的格局(图 3b)。入库口 Y1、Y2 氨氮含量较低,Y3~Y6 明显升高,Y7 底层出现异常高值。垂向上,氨氮分布存在 3 种模式,Y3、Y4、Y6 为表层富集型(表层>中层>底

层);Y5为中层富集型(中层>表层>底层);Y7为底层富集型(底层显著高于表层和中层)。入库口Y1、Y2中层出现极低值,可能与水团差异有关。

2.2.3 硝态氮(NO_3^- -N)的空间垂向分布 硝氮浓度沿程波动剧烈,无明显单调趋势(图 3c)。Y4全层硝态氮含量极低,形成硝态氮亏损区;Y3中层和Y5底层为

2个高值峰;Y1中层、Y7中层也较高。垂向上,硝态氮分布呈现4种模式,Y1、Y3、Y7为中层富集型(中层>底层>表层);Y5为底层富集型(底层>中层>表层);Y2、Y6为表层富集型(表层>底层>中层);Y4为均匀低值型(3层均<0.090 mg/L)。硝化作用的空间差异是导致硝态氮分布复杂的主要原因。

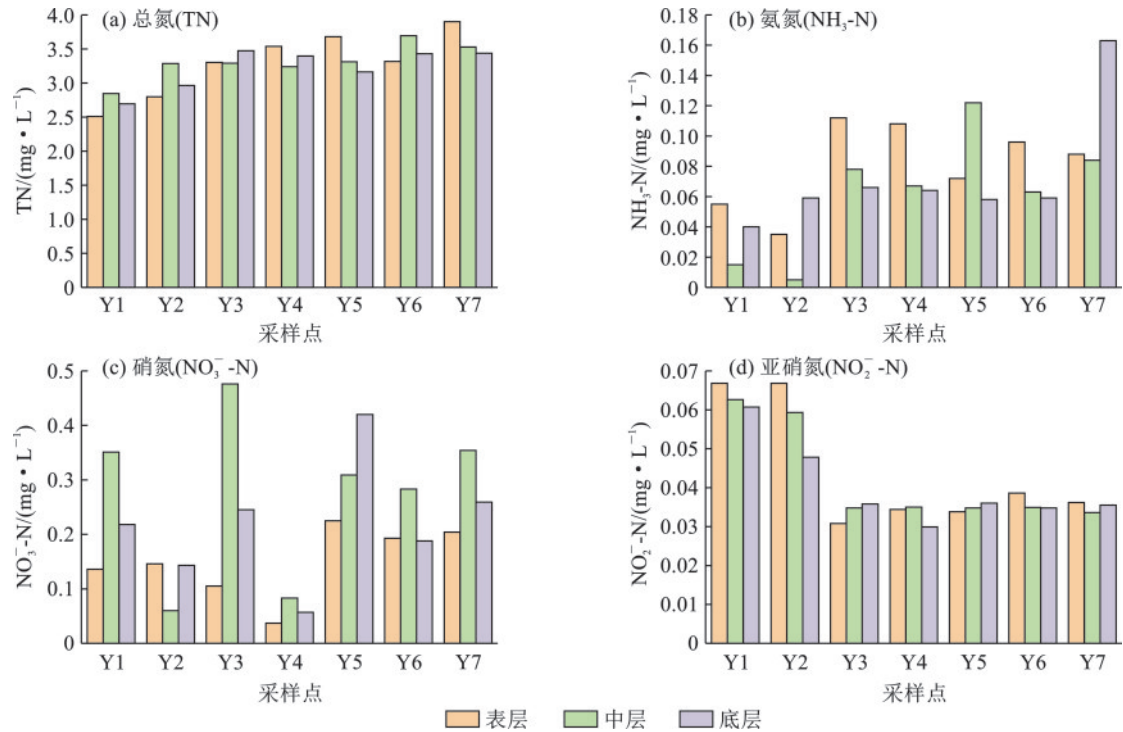


图 3 枯水期水库水体不同形态氮的空间垂向分布

Fig.3 Spatial vertical distribution of different nitrogen forms in reservoir water during dry season

2.2.4 亚硝氮(NO_2^- -N)的空间垂向分布 亚硝氮浓度沿程呈现前端平稳,末端突增的格局(图 3d)。Y3~Y7亚硝氮稳定在0.030 0~0.039 0 mg/L,无明显垂向梯度;Y1、Y2显著升高至0.048~0.067 mg/L,且呈现表层>中层>底层的垂向递减趋势。Y1、Y2表层亚硝氮均达0.067 mg/L,约为Y3~Y7的2倍,指示该区域硝化过程不平衡(氨氧化>亚硝氮氧化)或反硝化中间产物积累。

2.3 表层沉积物氮含量及形态组成

7个采样点的表层沉积物的关键氮形态实测数据见表2,柱状分布图见图4。根据上述图表对表层沉积物氮形态的空间分布特征进行分析。

2.3.1 沉积物总氮的空间分布特征 沿入库口至坝前方向,沉积物总氮含量呈现“两谷两峰”的波动式升高趋势(图 4b)。Y1总氮为910 mg/kg,至Y2略降至710 mg/kg(谷值),Y3跃升至1 630 mg/kg(峰值),Y4回落至1 170 mg/kg, Y5为1 010 mg/kg, Y6升至1 250 mg/kg, Y7达到全库最高值2 130 mg/kg。总体而言,沉积物总氮表现出坝前富集的

明显特征,Y7总氮约为入库口Y1的2.3倍,约为最低点Y2的3.0倍。此格局与水体总氮的沿程升高趋势相呼应,表明细颗粒物及伴生氮素向坝前沉降累积是控制氮素空间分布的重要过程。Y3出现局部高值,可能与库湾地形或支流输入导致的沉积中心有关;Y2、Y5相对较低,可能位于水流较快或冲刷较强的区域。

表 2 各采样点表层沉积物关键氮形态实测数据

Table 2 Measured data of key nitrogen forms in surface sediments at each sampling site

采样点	TN	NH_3 -N	NO_3^- -N	有机氮
Y1	910.00±25.00	0.82±0.05	0.52±0.03	909.18±25.10
Y2	710.00±20.00	1.15±0.07	0.24±0.02	708.85±20.00
Y3	1 630.00±45.00	0.34±0.03	2.01±0.11	1 629.66±45.10
Y4	1 170.00±32.00	0.83±0.05	0.28±0.02	1 169.17±32.00
Y5	1 010.00±28.00	4.81±0.25	6.30±0.35	1 005.19±28.20
Y6	1 250.00±35.00	0.19±0.02	0.83±0.05	1 249.81±35.10
Y7	2 130.00±58.00	0.86±0.06	2.37±0.13	2 129.14±58.00

2.3.2 有机氮、铵态氮、硝态氮的组成比例 沉积物氮在形态组成上,有机氮占绝对主导地位,占比 97.50%~99.90%。有机氮为 708.85~2 129.14 mg/kg,与总氮分布高度一致($r=0.999$, $p<0.001$),Y7 有机氮为 2 129.14 mg/kg,Y3 次之,Y2 最低,表明沉积物氮素主要以有机形式赋存,构成巨大的潜在氮库,其矿化分解是内源氮释放的长期来源。铵态氮为 0.19~4.81 mg/kg,占总氮的 0.01%~0.48%,;硝态氮为 0.24~6.30 mg/kg,占总氮的 0.02%~0.62%。二者合计无机氮占比不足 2.50%,其中 Y5 无机氮占比最高(1.10%),Y6 最低(0.08%)。尽管无机氮占比极小,但作为直接参与沉积物-水界面交换的活性组分,其绝对

含量和空间分布具有重要的指示意义。

2.3.3 无机氮的空间分布特征 无机氮(铵态氮+硝态氮)含量与总氮分布格局不同(图 4a)。铵态氮含量为 0.19~4.81 mg/kg,Y5 最高,Y2 次之,Y6 最低。Y5 异常高值可能与局部还原环境下有机氮矿化积累有关;硝态氮含量为 0.24~6.30 mg/kg,Y5 最高,Y7 次之,Y2 最低。Y5、Y3 硝态氮含量较高,可能与这些区域沉积物表层氧化环境较强、硝化作用活跃有关;无机氮总量 Y5 最高,Y7 次之,Y6 最低。总氮最高的 Y7 无机氮并非最高,表明其氮素主要以稳定有机形式封存;而总氮中等的 Y5 无机氮最高,指示该区域沉积物活性氮库更大,界面交换潜力更突出。

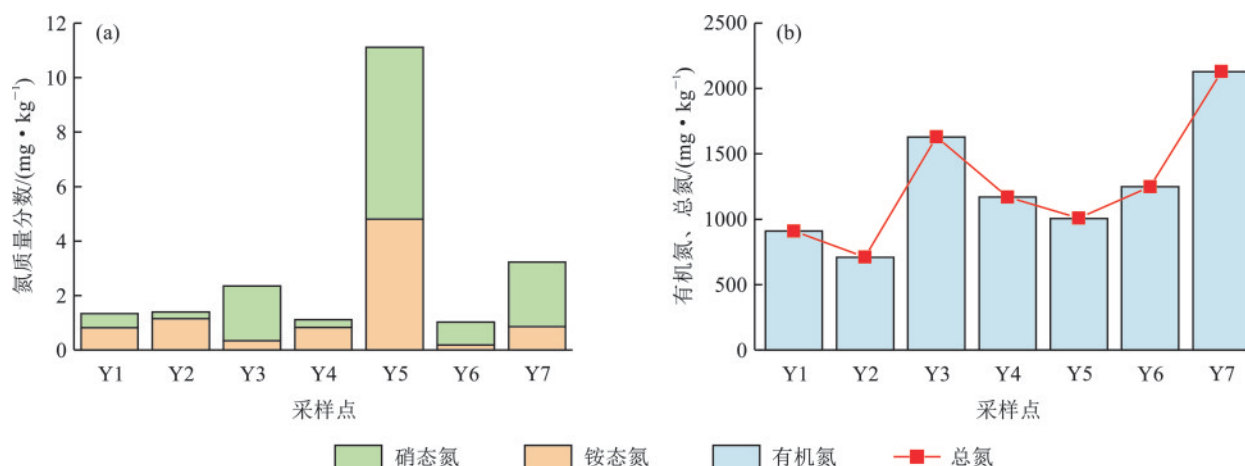


图 4 表层沉积物氮形态空间分布

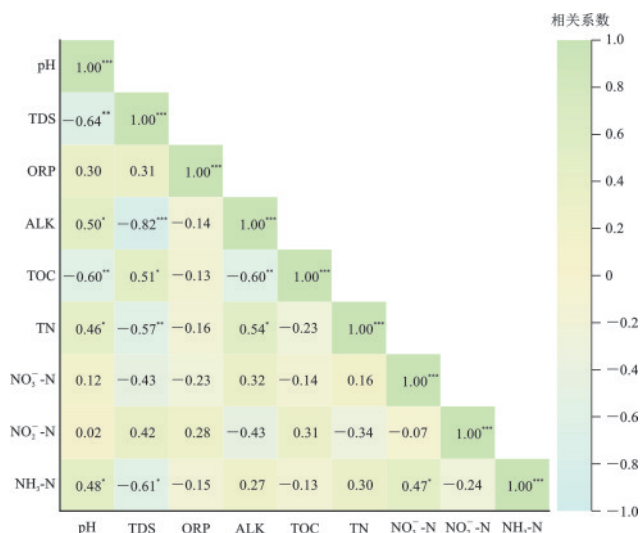
Fig.4 Spatial distribution of nitrogen forms in surface sediments

2.4 枯水期水-沉积物界面氮形态的耦合关系

2.4.1 水体氮形态与理化参数的相关性 为探究枯水期水库水体氮形态的环境驱动因子,对水体理化参数(pH、TDS、ORP、ALK、TOC)与各形态氮(TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$)进行 Spearman 相关性分析。结果表明,理化参数与氮形态之间存在一定的相关关系,但部分显著相关的变量相关系数并不高,反映出枯水期氮素分布受多因素综合调控的复杂性(图 5)。

总氮(TN)与 TDS 呈显著负相关,与 ALK 呈显著正相关($r=0.54$),与 pH 呈正相关($r=0.46$)。此结果印证高离子强度区域氮素含量较低、高碱度偏碱性环境有利于氮素存留的规律。氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)与 TDS 呈显著负相关($r=-0.61$),与 pH 呈显著正相关($r=0.48$),与 TN 呈正相关($r=0.30$)。硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)与各理化参数相关性均未达显著水平($|r|\leq 0.47$),与氨氮呈正相关($r=0.47$),与 TDS 呈负相关($r=-0.43$)。硝氮分布受硝化作用强度、水体混合、反硝化损失等多因素综合影响,单一理化参数难以解释其空间分异。亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)与各理化参数相关性均未达显

著水平($|r|\leq 0.43$),与 TDS 呈正相关趋势($r=0.42$),与 ALK 呈负相关趋势($r=-0.43$)。亚硝氮作为硝化/反硝化中间产物,其积累受局部微环境控制,而非简单的理化参数线性关系。



注:*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$ 。下同。

图 5 水体氮形态与理化因子的相关性矩阵热图

Fig.5 Heatmap of correlation matrix between nitrogen forms in water and physicochemical factors

水体理化参数与氮形态的相关性呈现显著但强度有限的特征,反映枯水期水库氮素分布的复杂性。显著相关的变量对(TDS与TN、TDS与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、ALK与TN)为理解氮素空间分异提供统计支撑,但相关系数不高也说明氮形态分布受多因素协同调控,单一因子解释力有限。

2.4.2 水体底层氮与沉积物氮的相关性 为探究枯水期水库沉积物-水界面的氮交换特征,对底层水体氮形态(TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$)与表层沉积物氮形态(Sed_TN、Sed_ NH_4 、Sed_ NO_3 、Sed_OrgN)进行Spearman相关性分析。结果表明,沉积物氮形态与水体氮形态之间存在紧密的耦合关系(图6)。

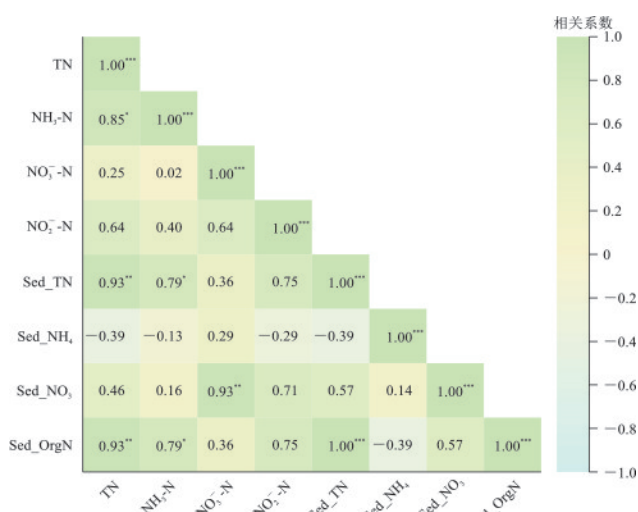


图6 底层水体氮形态和沉积物氮形态的相关性热图

Fig.6 Heatmap of correlation matrix between nitrogen forms in bottom water and nitrogen forms in sediment

沉积物总氮(Sed_TN)和有机氮(Sed_OrgN)与水体总氮(TN)呈极显著正相关($r=0.93$, $p<0.01$),与水体氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)呈显著正相关($r=0.79$, $p<0.05$),与水体亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)呈较强正相关($r=0.75$)。此结果证实,沉积物有机氮(占沉积物总氮97.50%以上)的矿化分解是水体氮素的重要来源。

沉积物硝态氮(Sed_ NO_3)与水体硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)呈极显著正相关($r=0.93$, $p<0.01$),与水体亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)呈较强正相关($r=0.71$)。表明沉积物-水界面的硝态氮存在快速交换平衡,硝化作用生成的硝态氮可迅速进入水体。

沉积物铵态氮(Sed_ NH_4)与水体氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)相关性极弱($r=-0.13$),但与水体硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)呈弱正相关($r=0.29$),揭示沉积物铵态氮可能先释放,而后到达沉积物-水界面发生硝化,最后以硝氮的形态进入水体,从而贡献于水体氮库,而非直接以氨氮形式积累。

综上,枯水期水库沉积物-水界面的氮交换遵循“沉积物有机氮矿化→氨氮释放→硝化转化→硝氮/亚硝氮交换”的基本路径。沉积物有机氮构成巨大的潜在氮库,硝化作用在界面氮转化中起关键调控作用。

3 讨论

3.1 枯水期氮素空间分布的主控因素

3.1.1 沿程累积效应与局部“热点”的形成机制 沿入库口(Y1)至坝前(Y7)方向,水体总氮呈持续升高趋势,沉积物总氮更呈现“两谷两峰”的波动式升高趋势。此沿程累积效应与梯级水库的研究结果一致,即在筑坝影响下,库区水体碳氮磷浓度呈逐级增加的空间规律,水库段的有机碳及不同形态氮、磷浓度均高于入库河流^[15]。其机制在于上游水库中溶解性氮的再释放及下泄输移能够补给下游库区,导致水体氮总量沿程增加。

Y4、Y6作为河流交汇点,Y7作为坝前深水区,形成3个特征迥异的氮累积“热点”。Y4交汇区沉积物总氮为1170 mg/kg(中等),但水体硝氮全层极低(0.037~0.083 mg/L),pH较低。结合碱度与硝氮的正相关关系,推测该区域可能存在较强的反硝化作用,将硝氮还原为气态氮去除。嘉陵江梯级水库的研究^[16]也发现,在深层水体中反硝化作用是主要的氮转化过程。Y6交汇区沉积物总氮1250 mg/kg(较高,氨氮较高,这指示该点硝化过程不平衡——氨氧化速率大于亚硝氮氧化速率,导致中间产物亚硝氮积累。上覆水中溶解性总氮在干支流交汇处最大,但不同交汇区因水动力条件和微生物群落差异,氮的转化路径可截然不同^[17]。硝化模式受水力停留时间驱动,不同库区呈渐变的氮转化特征^[18]。Y7坝前区沉积物总氮2130 mg/kg(全库最高),底层水体氨氮0.163 mg/L(全库最高),ORP仅119~122 mV,表明水库沉积物中氮的释放受氧化还原条件控制,还原环境显著促进氨氮的释放^[19]。水库筑坝改变河流原有的物质场及能量场,直接影响生源物质的生物地球化学行为,沉积物释放氮素进入上覆水可造成水体二次污染^[20]。

3.1.2 内源和外源贡献辨析 枯水期是水库外源输入相对减弱的时期。入库口Y1、Y2水体总氮相对较低(2.70~2.96 mg/L),而坝前Y7高达3.44 mg/L,呈现典型的入库低、坝前高的格局。与外源输入主导模式相反,表明枯水期氮素分布主要受内源过程控制,环境因子通过影响硝化、氨化和同化作用调控氮素的分布和来源^[21]。

在相关性分析中,沉积物有机氮与水体总氮呈显著正相关($r=0.93$, $p<0.01$),沉积物硝态氮与水体硝氮呈极显著正相关($r=0.93$, $p<0.01$),直接证实沉

积物-水界面氮交换的活跃性。已有研究^[22]证实,水库沉积物在枯水期可成为水体氮素的重要来源。九龙江北溪库区的研究发现,洪水季节带来的大量有机质沉积在库区,造成枯水期沉积物无机氮磷向上覆水体释放^[23]。石砭峪水库的研究表明,就全年而言,水库沉积物表现为蓄积作用,内源污染控制是水库污染控制的关键^[24]。同时百花水库和洪家渡水库的研究也证明沉积物是水溶性氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)内源释放的来源[释放通量分别为 0.97 、 $0.27 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$]^[25]。Y7点底层水体氨氮异常高达 0.163 mg/L ,而该点ORP仅 $119\sim 122 \text{ mV}$,符合还原环境促进沉积物氨氮释放的机制。三峡水库消落带的研究提出氮释放主要发生在落干期(低水位期),而沉积物反硝化作用主要发生在淹没期(高水位期),当氧化还原电位较低时反硝化作用增强^[26]。表明枯水期低水位条件下,沉积物释放的氨氮可在底层水体中积累,若水体混合不充分则形成局部高值区。

3.2 理化参数对水体氮形态转化的驱动机制

3.2.1 ORP的主导作用:氧化还原条件对氨氮/硝氮平衡的调控 ORP与各氮形态的相关性虽未达显著水平,但仍呈现规律性趋势,与氨氮呈弱负相关,与硝氮呈弱负相关,与总氮呈弱负相关。已有研究^[27]进一步揭示了这一机制的深层次规律,即沉积物在缺氧条件下向上覆水体大量释放氨氮,延迟富营养化环境的恢复;水位升高后土壤氧化还原电位逐渐降低,变化范围由 $-75\sim 84 \text{ mV}$ 降至 $-290\sim -70 \text{ mV}$,进而影响氮的形态转化^[28]。在垂直剖面上,深层沉积物中厌氧环境的加强促进有机氮的矿化与铵态氮的累积,而浅层沉积物则因水力扰动发生硝化-反硝化作用的动态失衡^[29]。Y7点位于坝前深水区,具备深层沉积物和还原环境的双重特征,其底层氨氮的异常积累正是此机制的体现;而Y5点虽ORP更低(125 mV),底层氨氮不高,但底层硝氮高达 0.420 mg/L ,可能是由于硝化作用活跃,生成大量硝氮,且反硝化作用受限于电子供体不足或低温,使硝氮在沉积物中积累。有研究^[30]表明,有机碳、硫化物和铁均可作为硝酸盐还原的电子供体,不同电子供体驱动下氮转化产物的分配存在差异。

3.2.2 TOC的耦合效应:有机质矿化提供氨氮来源,同时作为反硝化碳源 总有机碳(TOC)在氮循环中扮演着双重角色,一方面作为有机氮矿化的来源,另一方面作为反硝化作用的电子供体^[31]。TOC与各氮形态的相关性均较弱($|r|\leq 0.32$),但与pH呈显著负相关($r=-0.60, p<0.05$),与ALK呈显著负相关($r=-0.60, p<0.05$),表明高有机质区域水体偏酸、碱度

较低,可能与有机酸积累或呼吸作用产生的 CO_2 有关。平寨水库的研究^[21]发现,枯水期TOC与总氮呈正相关($r=0.61$),有机质矿化是水体氮素的重要来源。Y3点TOC最高,同时硝化作用活跃,表明有机质矿化释放的氨氮为硝化作用提供充足底物。Y7点沉积物有机氮含量最高,虽水体TOC不高,但沉积物-水界面有机质矿化持续释放氨氮,导致底层水体氨氮积累。三峡库区消落带的研究^[28]进一步证实,添加有机质后,土壤总氮和铵态氮含量显著增高,且铵态氮在垂直方向上发生迁移,与Y7点高有机氮沉积物对应高底层氨氮的现象相吻合,反硝化作用需要有机碳作为电子供体,有机碳的可用性是限制反硝化速率的关键因素之一。Y4点硝氮全层亏损,TOC为 2.439 mg/L ,可能发生反硝化脱氮;Y5点TOC中等,但沉积物有机氮较高,可能为界面反硝化提供充足碳源,促进硝氮的去除。

值得注意的是,TOC与氮形态的弱相关性表明,枯水期水体TOC与氮素来源不同步,或有机质对氮转化的影响主要通过沉积物界面间接体现,而非直接控制水体氮形态分布,提示在研究水库氮循环时,应同时关注水柱与沉积物中碳氮的耦合关系。

3.2.3 pH与ALK的间接影响:对微生物活性的约束 pH和碱度(ALK)通过调控微生物代谢活动间接影响氮转化过程。pH与氨氮呈显著正相关($r=0.48, p<0.05$),与总氮呈正相关($r=0.46$);TDS与氨氮呈显著负相关($r=-0.61, p<0.05$),与总氮呈显著负相关($r=-0.57, p<0.05$);ALK与总氮呈显著正相关($r=0.54, p<0.05$),与TDS呈显著负相关($r=-0.82, p<0.01$)。

硝化细菌对pH较为敏感,最适生长pH为 $7.5\sim 8.5$ 。Y5点pH最高,其硝氮也最高;Y4点pH最低,硝氮全层亏损,与pH与硝氮的正相关趋势一致,尽管相关性不强,但典型点位的对比仍体现偏碱环境对硝化作用的促进作用;碱度对硝化过程的影响体现在硝化过程消耗碱度需要水体具备足够的缓冲能力,同时高碱度环境往往与较高的碳酸盐体系相关,可能间接指示水体中无机碳充足,有利于自养硝化细菌的生长^[32]。ALK与总氮呈显著正相关,与硝氮呈正相关趋势,表明高碱度区域氮素存留能力更强。然而,硝化消耗碱度理论上应导致ALK与硝氮呈负相关,正相关趋势可能反映硝化活跃区同时具备较高的碳酸盐体系缓冲能力,或ALK与硝氮共同受控于其他环境因子,如地下水补给;TDS与氨氮、总氮的显著负相关(r 分别为 -0.61 、 -0.57)表明,高离子强度区域氮素含量较低。此规律在入库口Y1、Y2点和坝前Y7

点得到印证。TDS 指示水体来源与混合状态,入库水体 TDS 较高、氮较低,反映外源输入稀释作用;库区内部 TDS 降低,氮累积,反映内源释放主导。

3.2.4 主成分分析 为综合识别影响杨家园水库枯水期氮形态转化的关键环境驱动因子,对 7 个采样点最底层的水体氮形态(TN、NH₃-N、NO₃⁻-N)、沉积物氮形态(Sed_NH₄、Sed_NO₃、Sed_OrgN)及理化参数(ORP、TOC、TDS、ALK)进行主成分分析(图 7)。由图 7 可知,前 2 个主成分累计解释方差达 76.9%(PC1 41.6%,PC2 35.3%)。

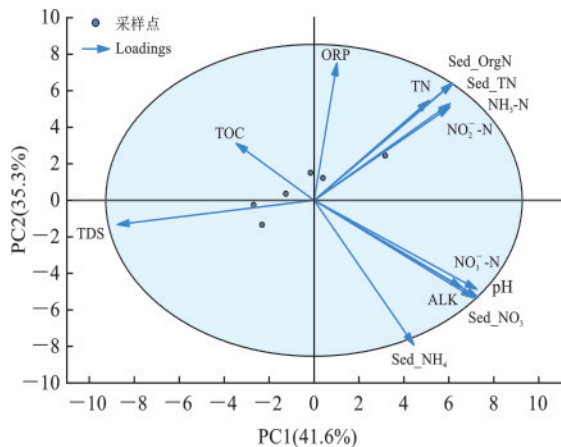


图 7 主成分分析
Fig.7 Principal component analysis

PC1 主要表现为氮形态与 TDS 的对比,载荷较高的正向变量包括 Sed_NO₃(0.332)、pH(0.329)、ALK(0.321)、NO₃⁻-N(0.300)、Sed_TN(0.281)、Sed_OrgN(0.280)、NH₃-N(0.275)等,而 TDS 呈显著负向载荷(-0.398)。这一主成分可解释为“氮富集因子”,反映氮素含量与离子强度的负相关关系,即高 TDS 区域(如入库口)氮含量较低,低 TDS 区域(坝前)氮素累积明显。PC1 得分上,Y7(3.17)、Y5(2.85)最高,Y1(-2.31)、Y2(-2.69)最低,直观呈现沿程氮素累积趋势

PC2 主要体现 ORP 与沉积物铵态氮的对比,ORP 呈较高正向载荷(0.376),而 Sed_NH₄(-0.396)、Sed_NO₃(-0.266)、ALK(-0.266)、pH(-0.243)呈负向载荷。该主成分可命名为“氧化还原调控因子”,高 PC2 得分点对应较高 ORP、较低沉积物铵态氮,反映氧化环境抑制沉积物铵态氮积累,促进其转化或释放。Y7(2.45)、Y3(1.51)、Y6(1.23)得分较高,Y5(-3.97)得分极低,与前述分析一致;低 PC2 得分点则对应还原环境下铵态氮的积累。Y5 PC2 得分极低,则与其沉积物铵态氮、硝态氮等异常高值相符。根据 PC1 与 PC2 的载荷和得分分布表(表 3),可将 7 个采样点划分为 4 类功能区:氮富集-氧化调控区

(Y6、Y7)、有机质-氧化过渡区(Y3)、氮富集-还原积累区(Y5)和氮贫乏区(Y1、Y2、Y4)。

主成分分析结果印证氧化还原条件(ORP)是调控枯水期水库氮形态转化的首要驱动因子,而有机质积累(Sed_OrgN、TOC)与离子强度(TDS)则通过影响氮库规模和赋存形态发挥协同作用,证明氮素(总氮、氨氮、硝氮)往往是水体富营养化的主要污染物,而 pH、ORP 等环境因子则通过调控微生物过程间接影响氮的迁移转化^[33]。

表 3 主成分载荷与得分矩阵					
Table 3 Principal component loadings and scoring matrix					
变量	PC1	PC2	采样点	PC1	PC2
TN	0.23	0.27	Y1	-2.31	-1.33
NH ₃ -N	0.28	0.26	Y2	-2.69	-0.25
NO ₃ ⁻ -N	0.30	-0.24	Y3	-0.16	1.51
NO ₂ ⁻ -N	0.27	0.26	Y4	-1.26	0.36
Sed_TN	0.28	0.32	Y5	2.85	-3.97
Sed_NH ₄	0.20	-0.40	Y6	0.40	1.23
Sed_NO ₃	0.33	-0.27	Y7	3.17	2.45
Sed_OrgN	0.28	0.32			
ORP	0.05	0.38			
TOC	-0.16	0.16			
TDS	-0.40	-0.07			
ALK	0.32	-0.27			
pH	0.33	-0.24			

4 结 论

1)杨家园水库枯水期氮素呈现显著的沿程累积与垂向分异,内源释放主导。沿入库口至坝前,水体总氮持续升高,沉积物总氮呈波动式累积;垂向上存在中层富集与底层富集 2 种模式。空间异质性主要受内源过程控制,沉积物-水界面氮交换活跃。

2)主成分分析识别出氮富集因子和氧化还原调控因子是控制氮素分布的两类关键因子,氧化还原电位(ORP)是调控氮形态转化的关键因子,PC2 明确为氧化还原调控因子。TOC 通过矿化提供氨氮来源,pH 和碱度通过调节硝化细菌活性间接影响硝化强度。

3)沉积物-水界面遵循“有机氮矿化→氨氮释放→硝化转化→硝氮交换”的界面交换路径。沉积物有机氮与水体总氮呈极显著正相关,沉积物硝态氮与水体硝氮呈极显著正相关。沉积物中有机氮占绝对主导(>98%),构成巨大的潜在氮库。根据空间分异特征,可将库区划分为氮富集-氧化调控区、有机质-氧化过渡区、氮富集-还原积累区和氮贫乏区。

参考文献:

- [1] 施沁璇,郝贵杰,叶霆,等.衢州地区渔业水域水库水体富营养化水平及驱动因子研究[J].渔业科学进展,2021,42(1):18-28.
Shi Qinxuan, Hao Guijie, Ye Ting, et al. Research on eutrophication and its driving factors in reservoirs of the Quzhou area[J].Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(1):18-28.
- [2] 黄振华,邵志平,史新明,等.义乌岩口水库富营养化综合评价及水环境容量分析[J].环境科学,2024,45(12):7073-7081.
Huang Zhenhua, Shao Zhiping, Shi Xinming, et al. Comprehensive eutrophication evaluation and water environment capacity analysis of Yiwu yankou reservoir[J].Environmental Science, 2024, 45(12):7073-7081.
- [3] Shou Chenyang, Yue Fujun, Zhou Bin, et al. Chronic increasing nitrogen and endogenous phosphorus release from sediment threaten to the water quality in a semi-humid region reservoir[J].Science of the Total Environment, 2024, 931: e172924.
- [4] Yu Wei, Liu Fali, Jiao Xianglan, et al. Human-induced N-P imbalances will aggravate GHG emissions from lakes and reservoirs under persisting eutrophication[J].Water Research, 2025, 276: e123240.
- [5] 赵丽,姜霞,王雯雯,等.丹江口水库表层沉积物不同形态氮的赋存特征及其生物有效性[J].长江流域资源与环境,2016,25(4):630-637.
Zhao Li, Jiang Xia, Wang Wenwen, et al. Occurrence characteristics and bio-availability of nitrogen fractions in sediments of Danjiangkou reservoir[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(4):630-637.
- [6] 郭甜,郑志宏,廖鹏,等.喀斯特河流筑坝对生源要素生物地球化学循环的影响及展望[J].地球与环境,2025,53(2):287-296.
Guo Tian, Zheng Zhihong, Liao Peng, et al. Impacts of damming on biogeochemical cycling of carbon, nitrogen, and phosphorus in karst rivers: Insights and prospects[J].Earth and Environment, 2025, 53(2):287-296.
- [7] Zhang Zhongtian, Jin Guangqiu, Tang Hongwu, et al. The response to hydrological regime change of nitrogen transformation processes at the sediment-water interface of seasonal floodplain lakes: Insights from the Yangtze River-Poyang Lake system [J]. Water Resources Research, 2025, 61(4): ee2024WR037972.
- [8] 丛海兵,黄廷林,李创宇,等.于桥水库沉积物内源污染特性研究[J].水资源保护,2006,22(4):20-23.
Cong Haibing, Huang Tinglin, Li Chuangyu, et al. Study on internal pollution of sediments in Yuqiao Reservoir[J].Water Resources Protection, 2006, 22(4):20-23.
- [9] Lin Changkun, Du Ronghua, Guo Fei. Implication of self-organizing map, stable isotopes combined with MixSIAR model for accurate nitrogen control in a well-protected reservoir[J].Environmental Research, 2024, 248: e118335.
- [10] 梁慧雅,翟德勤,孔晓乐,等.府河-白洋淀硝酸盐来源判定及迁移转化规律[J].中国生态农业学报,2017,25(8):1236-1244.
Liang Huiya, Zhai Deqin, Kong Xiaole, et al. Sources, migration and transformation of nitrate in Fuhe River and Baiyangdian Lake, China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(8):1236-1244.
- [11] Zhou Bin, Fu Xujin, Wu Ben, et al. Phosphorus release from sediments in a raw water reservoir with reduced allochthonous input[J].Water, 2021, 13(14): e1983.
- [12] Liu Jiayuan, Feng Yue, Zhang Yan, et al. Allometric releases of nitrogen and phosphorus from sediments mediated by bacteria determines water eutrophication in coastal river basins of Bohai Bay [J].Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 235: e113426.
- [13] Yu Juhua, Zhang Yushu, Zhong Jicheng, et al. Water-level alterations modified nitrogen cycling across sediment-water interface in the Three Gorges Reservoir[J].Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(21):25886-25898.
- [14] 韩畅,杨文俊,毕胜,等.三峡水库常年回水区表层沉积物中氮素污染特征研究[J].中国水利,2026(2):36-46.
Han Chang, Yang Wenjun, Bi Sheng, et al. Pollution characteristics of nitrogen in surface sediments of the perennial backwater area of the Three Gorges Reservoir [J].China Water Resources, 2026(2):36-46.
- [15] 阙子亿,王晓锋,袁兴中,等.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[J].湖泊科学,2022,34(6):1953-1971.
Que Ziyi, Wang Xiaofeng, Yuan Xingzhong, et al. Spatial-temporal distribution of carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and eu-trophication evaluation of mountainous small river in a cascaded damming[J].Journal of Lake Sciences, 2022, 34(6):1953-1971.
- [16] Li Siqi, Cui Gaoyang, Li Qinkai, et al. Hydrochemical characteristics and spatial-temporal distribution of nitrogen and silicon in cascade reservoirs of the Jialing River [J].Earth and Environment, 2018, 46:10-16.
- [17] 苏青青,刘德富,纪道斌,等.蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征[J].环境科学,2018,39(5):2135-2144.
Su Qingqing, Liu Defu, Ji Daobin, et al. Nutrient distribution characteristics of the sediment-water system in the Xiangxi River during the impoundment of TGR[J].Environmental Science, 2018, 39(5):2135-2144.
- [18] Mu Jinglong, Ding Shuai, Liu Su mei, et al. Multiple

- isotopes decipher the nitrogen cycle in the cascade reservoirs and downstream in the middle and lower Yellow River: Insight for reservoir drainage period[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 918: e170625.
- [19] 梁秀娟, 肖长来, 杨天行, 等. 密云水库中氮分布及迁移影响因素研究[J]. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 2005(增刊1): 272-280.
- Liang Xiujian, Xiao Changlai, Yang Tianxing, et al. Study on nitrogen distribution and migration influencing factors in Miyun Reservoir[J]. *Science China (D Edition: Earth Sciences)*, 2005(S1): 272-280.
- [20] 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[J]. *湖泊科学*, 2009, 21(5): 614-622.
- Ran Xiangbin, Yu Zhigang, Yao Qingzhen, et al. Advances in nutrient retention of dams on river[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, 21(5): 614-622.
- [21] 孔杰, 周忠发, 李永柳, 等. 喀斯特高原水库水体氮素分布特征研究: 以平寨水库为例[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(11): 116-124.
- Kong Jie, Zhou Zhongfa, Li Yongliu, et al. Study on the characteristics of nitrogen distribution in water bodies of karst plateau reservoirs: Taking pingzhai reservoir as an example [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, 44(11): 116-124.
- [22] Lu Junping, Liu Tingxi, Shi Xiaohong, et al. Characteristics and pollution contribution of the internal nitrogen release from the sediments in the dahekou reservoir in Inner Mongolia[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: e907769.
- [23] 陈朱虹, 陈能汪, 吴殷琪, 等. 河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量[J]. *环境科学*, 2014, 35(9): 3325-3335.
- Chen Zhuhong, Chen Nengwang, Wu Yinqi, et al. Sediment-water flux and processes of nutrients and gaseous nitrogen release in a China river reservoir[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(9): 3325-3335.
- [24] 黄廷林, 秦昌海, 李璇. 峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析[J]. *环境科学*, 2013, 34(9): 3423-3429.
- Huang Tinglin, Qin Changhai, Li Xuan. Studies on seasonal variation and sources of nitrogen and phosphorus in a canyon reservoir used as water source[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(9): 3423-3429.
- [25] Ren Jie, Han Guilin, Liu Xiaolong, et al. Key factors controlling nitrogen transformation and efflux at the sediment-water interface: A comparative study from different trophic reservoirs [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(5): 2119-2131.
- [26] Liu Dongsheng, Chen Qiuwen, Maavara T, et al. Nitrogen cycling in reservoir drawdown areas and the impacts on water quality[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2024, 38(7): e2024GB008136.
- [27] Zhou Shilei, Sun Yue, Zhang Yiran, et al. Pollutant removal performance and microbial enhancement mechanism by water-lifting and aeration technology in a drinking water reservoir ecosystem [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: e135848.
- [28] 敦静怡. 三峡库区消落带土壤氮垂直迁移转化特征研究[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023.
- Dun Jingyi. Study on the vertical migration and transformation characteristics of soil nitrogen in the drawdown zone of the Three Gorges Reservoir [D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023.
- [29] Kong Lingchao, Wang Yi, Xiao Peng, et al. Typhoon-induced depth-dependent nitrogen release from reservoir sediments: Insights from high-resolution ROV monitoring[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 663: e134242.
- [30] Li Shengjie, Wang Shuo, Pang Yunmeng, et al. Influence of electron donors (Fe, C, S) on N₂O production during nitrate reduction in lake sediments: Evidence from isotopes and functional genes [J]. *ACS ES&T Water*, 2022, 2(7): 1254-1264.
- [31] Liu Yang, Xin Jia, Wang Yuan, et al. Dual roles of dissolved organic nitrogen in groundwater nitrogen cycling: Nitrate precursor and denitrification promoter[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 811: e151375.
- [32] Sui Yuan, Cui Youwei, Yang Ruichun, et al. Alkalinity change induces succession of heterotrophic and autotrophic nitrifying bacterial communities: Comprehensive insights on the mechanism [J]. *Journal of Environmental Management*, 2026, 400: e128680.
- [33] 王立志, 宋红丽, 董彬, 等. 黑藻与金鱼藻自然衰亡过程中营养盐释放规律研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(1): 138-146.
- Wang Lizhi, Song Hongli, Dong Bin, et al. Nutrition release during natural decomposition of submerged macrophyte *Hydrilla verticillata* and *Ceratophyllum demersum* [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 138-146.