

乌溪江水库富营养化程度及其影响因子时空分布探讨

李其轩¹, 张真¹, 徐梦娇¹, 刘珂珂¹, 葛航¹, 姚子亮², 刘其根¹

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 农业部鱼类营养与环境生态研究中心, 上海 201306;

2. 浙江省丽水市水产技术推广总站, 浙江 丽水 323000)

摘要: 了解乌溪江水库主要水质指标的时空分布特征, 探究其营养化程度的变化趋势, 可为改善乌溪江水库水质、维护其生态系统提供数据参考。2019–2020年, 对丽水市乌溪江水库的7个采样点(S1–S7)的水温(WT)、水深(WD)、pH、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素a(Chl-a)等理化因子进行监测, 并分析对比综合营养指数和理化因子等关键指标在不同时期的分布特征。结果显示, 乌溪江水库的营养盐浓度呈现春夏高秋冬低、从上游(S1)至下游(S7)逐渐下降的趋势, 平均综合营养指数从47.1(S1)下降到32.5(S7), 整体上属于中营养化水库。TP浓度在0.002–0.040 mg/L, 平均值为0.012 mg/L; TN浓度在0.412–2.826 mg/L, 氮的主要赋存形式为硝酸盐。Chl-a含量均值为3.77 μg/L, 河流区的Chl-a含量显著高于下游的过渡区和湖泊区。分析表明汛期地表径流带来的富营养化压力最大, 同时也是氮磷等外源性营养盐输入水体的主要途径; WT、pH、TP与Chl-a含量中等程度相关, 水库生态系统具备很强的净化能力, 但近年来富营养化程度加剧。

关键词: 富营养化; 理化因子; 叶绿素a; 时空分布; 乌溪江水库

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2024)02-0031-08

随着人口增长、城市化和工农业的高速发展, 大量未经有效处理的污染物(氮磷等)被超量排入湖泊、河流、水库等水体, 加速了这些水体的富营养化进程, 并导致有害藻类水华的发生, 为区域环境带来前所未有的压力, 并对社会造成了不良的影响(Lin et al, 2021)。

当前, “绿水青山就是金山银山”的生态理念已深入人心, 且为水库的功能转型与水环境保护指明了方向。近20年来, 太湖、巢湖、洞庭湖、鄱阳湖等长江中下游湖泊都开展了大规模的污染治理和生态修复(朱广伟等, 2019)。根据《中国生态环境状况公告》(2019年), 在107个开展营养状态监测的重要湖泊(水库)中, 贫营养状态、中营养状态、轻度富营养状态和中度富营养状态湖泊(水库)分别占9.3%、62.6%、22.4%和5.6%, 重度富营养化水体实现清零(李韶慧, 2021)。但水体富营养化的情况具有突发性,

对湖泊水库的富营养化程度予以关注, 进一步推进遏制水体富营养化态势的行为仍具有重要现实意义。如太湖, 其各形态氮浓度近10年大幅度下降, 但叶绿素a(Chl-a)、总磷(TP)、蓝藻水华面积和强度等关键指标改善效果不佳, 夏季蓝藻水华暴发的根本态势并未改变(朱广伟等, 2018; 2019)。鄱阳湖仍属轻度富营养化, 氮磷污染情况严重(方娜, 2020)。我国湖库富营养化治理仍任重而道远。

据我国2013年对水库工程的普查, 大(I)和大(II)型水库分别有127、629座, 总库容占我国水库总库容的80.5%, 但对于刚刚达到大(I)型水库分类标准的水库研究罕见(孙振刚等, 2013)。乌溪江梯级水库群包含了大(I)型水库和中型水库, 是较典型受到较少关注和研究的大型梯级水库, 其对当地饮用水源供给的作用日益突出。然而, 梯级水电开发会导致河流水环境发生演化, 产生营养物质累积风险(阙子亿, 2022), 且面源污染的加剧给乌溪江带来了巨大的富营养化压力(王虹艳, 2010)。而目前对乌溪江水库富营养化程度的评估和水环境的系统调查还十分缺乏, 仅在2017年开展过一次调研(张小林等, 2018), 不利于对其水质或生态系统的保护和管理。

本研究旨在对乌溪江水库各个季节的理化因子进行监测、分析, 探明其时空分布、变迁的潜在规律以及营养盐赋存形式, 为改善乌溪江水库水质、维护其生态系统提供数据参考和理论依据。

收稿日期: 2022-03-03 修回日期: 2023-10-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0900605); 丽水市紧水滩、乌溪江、千峡湖三大水库洁水渔业研究项目(浙大采招2019 341号)。

作者简介: 李其轩, 2001年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为水域生态学。E-mail: hplqx@163.com

通信作者: 刘其根, 男, 教授。E-mail: qgliu@shou.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

乌溪江是上游衢江延伸出来的一级支流,流域面积 2 632 km²,属亚热带季风性气候,年均降水量 1 698.1 mm,降水一般集中在 4–6 月,占全年降水量的 47%,10–12 月降水较少,仅占全年降水量的 10%,多年平均径流量为 29.2 亿 m³ 左右。

乌溪江梯级水库(28°31'40"~28°49'45" N, 118°47'28"~118°55'50" E)位于瓯江流域、浙江省丽水市、衢州市境内,是浙江省衢州市区饮用水水源地之一,与丽水市人民的生活息息相关。乌溪江水库由 1958 年建成的黄坛口水库(季调节)和 1983 年建成的湖南镇水库(多年不完全调节)组成。黄坛口水库库容为 0.857 亿 m³,为中型水库;湖南镇水库为大型水库,控制集水面积为 2 197 km²,洪水位以下库容为 20.6 亿 m³,正常水位以下库容为 15.82 亿 m³。两座水库为串联型水库,总有效库容为 16.66 亿 m³,整体换水周期为 208 d 左右(游中琼等,2000)。

1.2 采样点设置

于 2019–2020 年对乌溪江水库进行水样的采集和理化因子的测定,5 月代表春季,7–8 月代表夏季,9–11 月代表秋季,12–1 月代表冬季,所述月份(每月中下旬左右)均各采集 1 次样品。由于研究水库为峡湾型水库,因此按照水库的水流方向以及动力学特点,并根据《水库渔业资源调查规范》在乌溪江设置了 7 个采样点,即河流区(S1)、过渡区(S2~S4)、湖泊区(S5~S7),采样点的具体地理信息见图 1。根据水库深度将采样点划分为 8 个水层,分别为水下 0.5、4、8、12、16、20、25 和 30 m,分层采水可以了解理化因子在不同水层的情况。

1.3 水样的采集与处理

水样使用 20 L 采水器采集,回实验室后立即进行水化学测定。

透明度(SD)测定使用 Secchi 盘进行,水温(WT)和溶解氧(DO)使用 YSI58 型溶解氧仪现场测定,水深(WD)采用便携式声呐测深仪 SM-5A 型现场测定;总磷(TP)、总氮(TN)采用《地表水环境质量标准》(国家环境保护总局科技标准司,2002)进行监测。TN 测定采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法(国家环境保护局规划标准处,1989),TP 测定采用磷钼酸铵比色法(国家环境保护局标准处,1989)。其他指标测定遵循《水和废水监测分析方法》(国家环境保护总局编委会,2002):硝酸盐

氮采用紫外分光光度法,亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)采用 N-(1 萘基)乙二胺光度法,氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂光度法,可溶性无机氮(DIN)为上述 3 种无机氮之和;溶解性总磷(DTP)、溶解性无机磷(DIP)用 0.45 μm 滤膜过滤水样后,采取钼锑抗分光光度法测定,溶解性有机磷(DOP)为溶解性总磷(DTP)减去溶解性无机磷(DIP),颗粒态磷(PP)为总磷(TP)减去溶解性总磷(DTP);高锰酸盐指数(COD_{Mn})采用高锰酸钾酸性法,叶绿素 a(Chl-a)采用分光光度法分析。

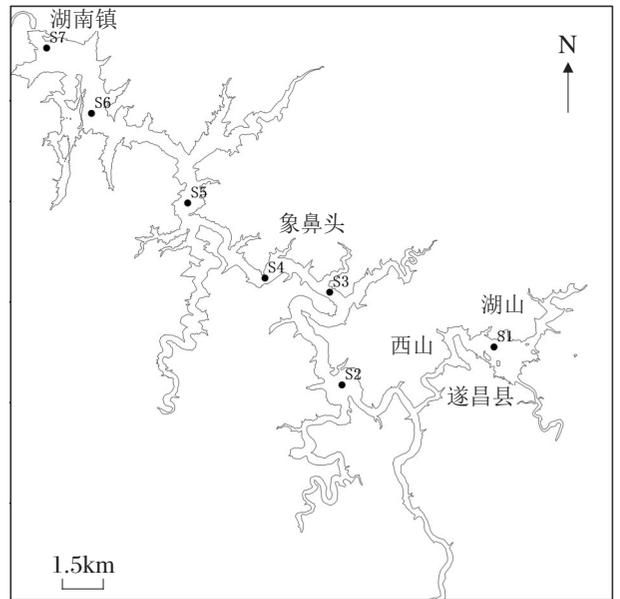


图 1 乌溪江采样点的设置

Fig.1 Location of sampling sites in Wuxi River

用 EXCEL 2019 进行基本数据整理分析, ArcGIS 和 Origin 2018 进行作图,利用 SPSS 26.0 探讨化学指标在各季节和各点位间的差异性。按季度、湖区和水层计算各水化学指标含量,分析前对各水化学指标进行正态性检验,用 Pearson 相关性分析检测 Chl-a 与各理化因子的相关性。用 Pearson 相关系数量化 2 个变量之间的线性相关性,其值为 -1~1,代表着由极强负相关至极强正相关的过渡;用 *P* 值验证统计学差异显著性,当 *P*<0.05,认为其相关性达显著水平,当 *P*<0.01,认为其达极显著水平。

1.4 富营养化评价方法与评价标准

水质参数采用各点位不同深度测定的数学平均值,依据《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》(中国环境监测总站,总站生字(2001)090 号),选择综合营养指数法(TLI)计算富营养化指数,采用使用较广泛的 Chl-a、TP、TN、SD、COD_{Mn}5 参数法进行计算。

采用0~100的一系列数字对水库的营养状态进行分级:TLI(Σ)<30为贫营养;30≤TLI(Σ)≤50为中营养;TLI(Σ)>50为富营养,其中50<TLI(Σ)≤60为轻度富营养,60<TLI(Σ)≤70为中度富营养,TLI(Σ)>70为重度富营养。

2 结果与分析

2.1 富营养化状态与水质评价

乌溪江水库整体上呈现中度营养化状态(图2,表1),平均综合营养指数呈现沿程下降的趋势。在7月的上游入库处(S1)达到峰值,为51.6,进入富营养化状态。在1月的坝前(S7)达到最小值,为29.5,进入贫营养状态。

在季节分布上,综合营养指数呈现春夏高、秋冬低的明显态势;在空间分布上沿程下降趋势明显。

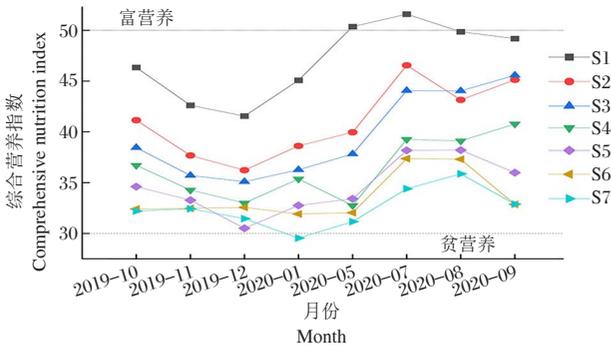


图2 2019-2020年乌溪江水库综合营养指数(TLI)的月变化趋势

Fig.2 Monthly comprehensive nutrition index (TLI) in Wuxijiang Reservoir (2019-2020)

对照《地表水环境质量标准》(国家环境保护总局科技标准司,2002),乌溪江水库的TP含量符合II类水标准、TN含量符合III类水标准、氨氮(NH₄⁺-N)含量符合I类水标准。

表1 乌溪江水库水环境质量季节变化

Tab.1 Seasonal change in water quality in Wuxijiang reservoir

环境因子	春	夏	秋	冬
TN	III类	II类	II类	II类
TP	II类	II类	II类	II类
NH ₄ ⁺ -N	I类	I类	I类	I类

2.2 各因子整体时空分布

2.2.1 磷的分布特征 乌溪江水库中TP的浓度为0.002~0.040 mg/L,平均值0.012 mg/L,溶解性无机磷(DIP)平均值0.004 mg/L;溶解性有机磷(DOP)平均值0.003 mg/L;颗粒态磷(PP)平均值约0.004 mg/L(图3)。

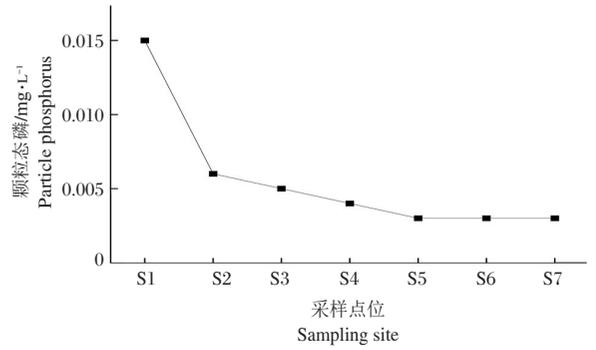


图3 2019-2020年乌溪江水库颗粒态磷沿程分布
Fig.3 Spatial distribution of particulate phosphorus in Wuxijiang reservoir (2019-2020)

乌溪江水库TP含量随着流动距离的增加显著下降(图4)。在入库河口处(S1),冬夏2个季节TP含量较高,春秋趋于一致。颗粒态磷沿程分布曲线与总磷曲线变化趋势相似。

刘腊美等(2009)认为流域非点源颗粒态磷主要来源于径流携带的土壤表层磷,以泥沙结合态的形式输入水体。而颗粒态磷的内源性负荷主要源于有机物的碎屑和细胞等生命体及在底泥中的沉积,沿程的颗粒态磷在S5~S7的湖泊区内逐步趋于稳定(图3)。结合颗粒态磷的沿程分布曲线,可知外源输入是乌溪江水库颗粒态磷的主要来源,其在沿途的吸收中逐步沉积或被分解吸收,最后颗粒磷稳定在0.003 mg/L左右,可认为是稳定的内源性分解产生的颗粒磷。

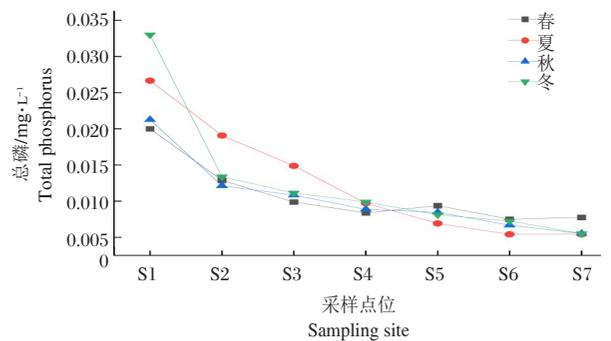


图4 2019-2020年乌溪江水库TP沿程分布
Fig.4 Spatial distribution of total phosphorus in Wuxijiang reservoir (2019-2020)

2.2.2 氮的分布特征 乌溪江水库中的TN浓度在0.412~2.826 mg/L,最大值出现在夏季的S1表层水体。氮主要的存在形式是硝酸盐,其次是氨氮。氮在水体中的多种赋存形式分布比例见表2。

乌溪江水库整体由硝化作用在氮的循环中占据主导地位(表2),亚硝酸盐含量占比较低。而从图5中

可以看出, TN 在 S1 点位显著高于其他点位, 而秋冬 (11 月-1 月), TN 含量也远低于春夏 (5、7 月), 但沿程逐步下降到接近的水平。

表 2 2019-2020 年各采样点三态氮分别占总氮比例 %

Tab.2 Proportion of the three forms of nitrogen at each sampling site (2019-2020)

营养盐	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
NO ₃ -N	61.1	59.5	58.1	65.2	66.6	66.9	65.6
NO ₂ -N	1.1	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.3
NH ₄ ⁺ -N	8.9	7.4	6.6	6.0	6.0	6.3	6.9

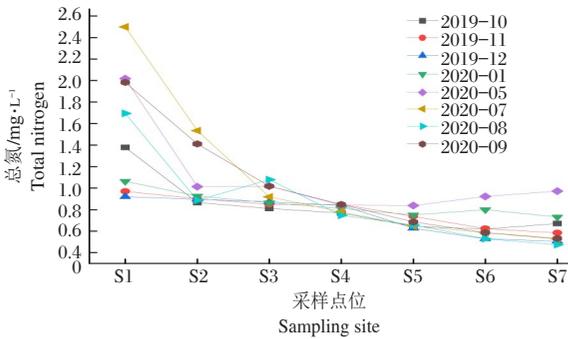


图 5 2019-2020 年乌溪江水库 TN 沿程分布
Fig.5 Spatial distribution of total nitrogen in Wuxijiang reservoir (2019-2020)

2.2.3 Chl-a 的分布特征 Chl-a 含量均值为 3.77 μg/L, 2020 年 9 月在 S3-S4 出现了 10 μg/L 以上的异常波峰。沿程的空间分布规律如图 6 所示, S1~S4 的 Chl-a 含量呈现了空间的异质性。整体上, 乌溪江水库从上游到下游, 沿河区 (S1)、过渡区 (S2~S4)、湖泊区 (S5~S7) 依次减少, 这符合一般水库的规律 (图 6、图 7)。叶绿素变动的趋势曲线也呈现了湖泊区 Chl-a 含量相较于河区、过渡区更加稳定的现象, 凸显了湖泊区的净化作用和生态稳定性。

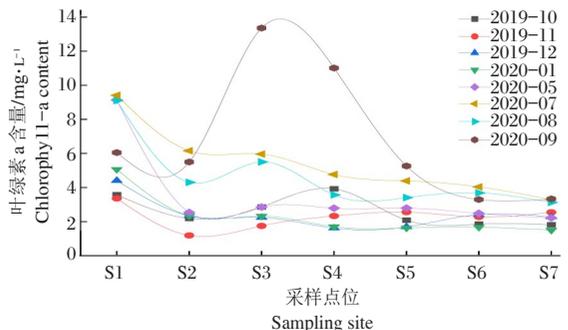


图 6 2019-2020 年乌溪江水库 Chl-a 含量沿程分布
Fig.6 Spatial distribution of chlorophyll-a content in Wuxijiang reservoir (2019-2020)

而叶绿素含量变化在秋冬季节不明显, 在春夏显著上升 (图 7), 存在显著季节差异。

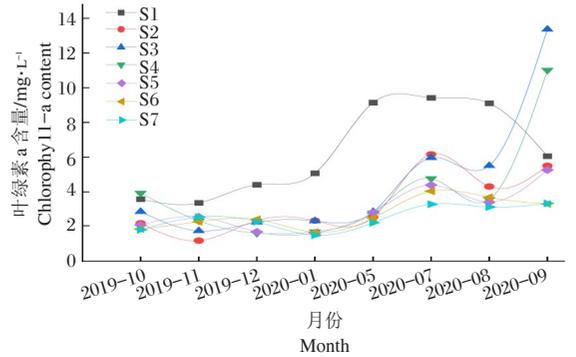


图 7 2019-2020 年乌溪江水库 Chl-a 含量月变化趋势
Fig.7 Variation of chlorophyll-a content in Wuxijiang reservoir (2019-2020)

2.3 各因子的纵向垂直剖面分布

2.3.1 pH、DO、磷、氮等理化环境因子的剖面分布特征 水中的 pH 在 S1、S2 两个点位呈现随水深增加而下降的趋势, 而在 S3~S7 则呈现先增加后下降的趋势。且水中 TP 的含量与 pH 呈现明显相反变化的趋势 (图 8-a、8-d)。而 DO 随水深 (WD) 变化的趋势最复杂: 先下降, 在水域中层达到谷底, 之后缓慢回升, 除 S1 随水深增加 DO 呈显著下降趋势, 其他点位的 DO 在纵向分布上整体遵循“变异模式”, 在中等深度出现一个峰值 (图 8-b)。

2.3.2 Chl-a、TN 等含量垂直剖面特征 可溶性无机氮 (DIN) 是浮游植物主要吸收利用的氮源, 在表层水体 (0~10 m) 平缓下降, 中层水体 (10~30 m) 略微升高。

Chl-a 反映了浮游植物生物量的高低 (阮晓红等, 2008), 其随深度增加呈明显下降趋势 (图 8-f)。Chl-a 含量在垂直剖面上波动下降, 在 5~10 m 达到第一个波峰, 在 20 m 左右再次抬升下降, 这样的波动趋势集中体现在 S2、S3、S4, 说明存在显著的分层差异; S1 点位的 Chl-a 含量随深度显著下降, S5 点位的 Chl-a 含量只在 10~15 m 出现了一个平缓的波峰; 而 S6~S7 纵向剖面分布则更稳定, Chl-a 含量没有随深度增加出现明显的波动。

2.3.3 Chl-a 含量与水深等各理化因子含量的相关性 水体中的理化因子会与 Chl-a 产生互动效应, 从而产生直接或间接的影响。用 Pearson 相关性分析检测 Chl-a 与各理化因子的相关性, 结果见表 3。相关性分析结果表明, TP、pH、WT 3 个因素和 Chl-a 含量呈中等程度相关, 其相关系数分别为 0.438、0.483、0.493, 与其他因子相关性较弱或无显著相关性。

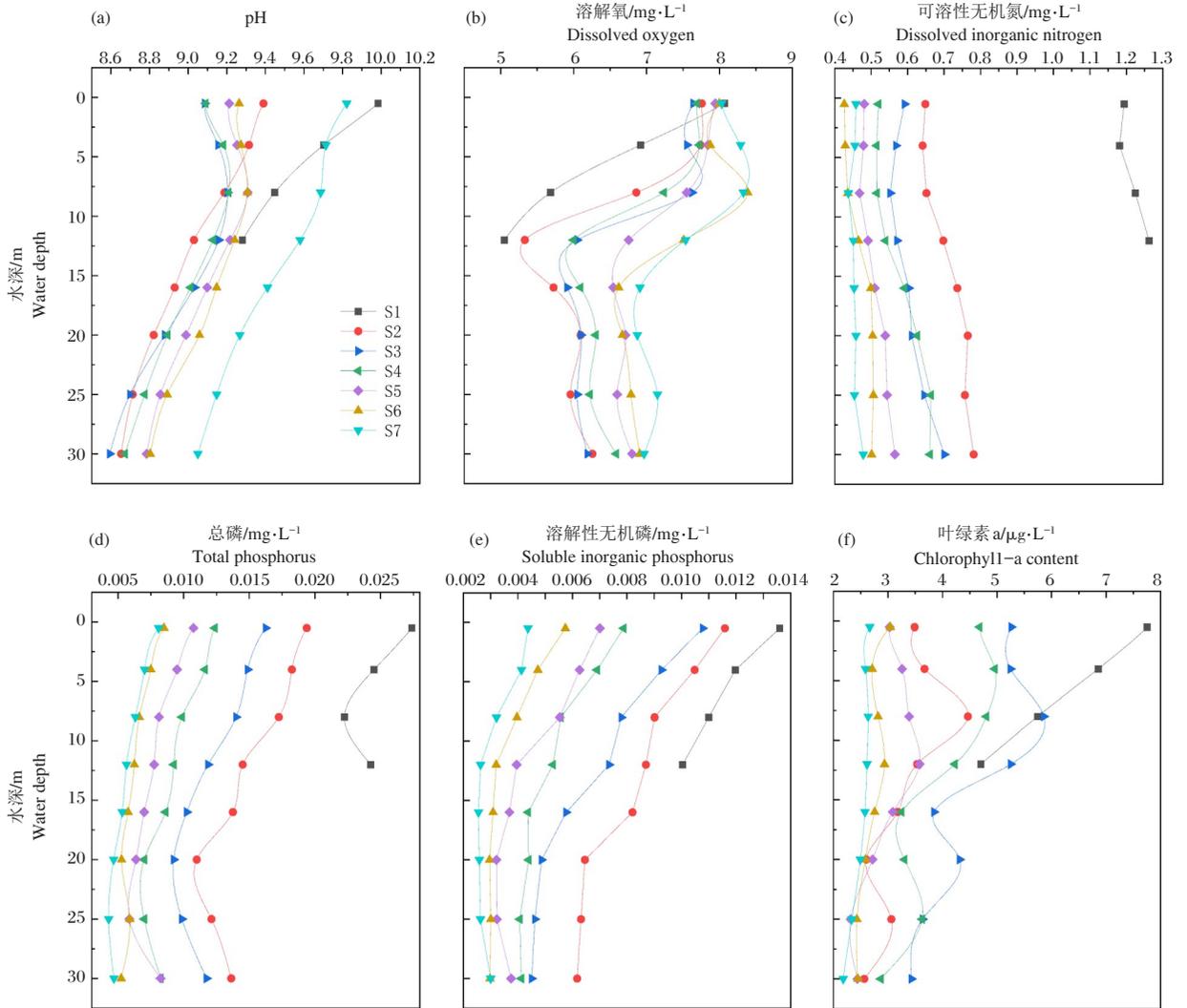


图8 乌溪江水库理化因子随水深变化趋势

Fig.8 Vertical distribution of environmental factors in Wuxijiang reservoir

表3 乌溪江水库 Chl-a 与理化因子的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient of chlorophyll-a and environmental factors in Wuxijiang reservoir.

理化因子	WD	TN	TP	DO	pH	DIN	WT
Chl-a	-0.230**	0.368**	0.438**	-0.136**	0.483**	0.269**	0.493**

注: **表示在 0.01 级别 (双尾) 显著。

Note: **highly significant ($p < 0.01$, 2-tailed).

3 讨论

3.1 乌溪江水库的水环境质量现状及其变化趋势

乌溪江水库全年平均综合营养指数为37.8,为中度营养化水库。整体水质良好(表1),大部分季节, TN、TP 含量都符合国家地表水 II 类标准,春季 TN 污染有所加重,仅满足 III 类水标准,为最主要污染因子。

富营养化程度在时间上呈现出春夏高而秋冬低的格局,在空间上则呈现从上游到下游逐步降低的趋势。通常水库自上而下可分为河流区(如图2中的 S1~S3)、过渡区(图2中的 S4~S5)和湖泊区(图2中的 S6~S7),本研究表明,乌溪江水库河流区 TN、TP 含量最高,过渡区次之,湖泊区最低,符合大多数水库的特征,而 Chl-a 含量则河流区与过渡区交汇水域更高,这主要是河流输入的营养盐在过渡区随着流速减缓沉降加速,为浮游植物的大量繁殖提供了充足的养分,且水流减缓等更有利于藻类繁殖。从综合营养指数来看,入库处(S1)平均综合营养指数为47.1,在春夏之交(5~7月),平均综合营养指数超过50,进入富营养化状态,坝前湖泊区平均综合营养指数稳定,S6、S7分别为33.6、32.5。可见外源性输入是乌溪江水库营养盐的主要来源,初步验证了王虹艳(2010)关于丽水市

人类活动、工农业生产导致的土壤磷素富集、水体富营养化的推论。农业化肥的大量使用和工业、生活废水的排放带来的面源污染加剧了乌溪江水库等周边水体富营养化的风险。乌溪江水库在降雨季呈现的综合营养指数大幅提升的特征也印证了冲刷地表产生的径流入库时输入了大量营养盐。

与氮磷等指标一样,综合营养指数也呈随水流梯度依次下降的趋势,这主要是因为:(1)营养盐间接被浮游生物吸收利用。人为投放的鲢(*Hypophthalmichthys molitrix*)、鳙(*Aristichthys nobilis*)增加了利用食物链富集、提取水体中营养盐的效率;(2)营养盐随着水体流动不断沉积,成为潜在的内源性负荷。坝前水体营养化程度相较于入库处水体降低了约 31%,证明了乌溪江水库生态系统对缓解富营养化是十分有效的。

乌溪江水库整体水环境质量尚未达到富营养化水平,但其营养化程度加深的速度值得警惕。张小林等(2018)在 2017 年调查得知,乌溪江水库平均综合营养指数为 28.4,属于贫营养型水库。而本研究在 2019–2020 年的调查结果显示,2 年间乌溪江水库平均综合营养指数上升了 33%。王军明(2020)研究指出,丽水市 2016 年开始大幅投资治理污染源、改善土地集约化利用水平,以期缓解土地的生态压力。但近年来,乌溪江水库的富营养化水平依然处于一个快速抬升的状态,这样的趋势应当成为评估治理效果的考察重点,为制定更详尽有效的生态文明建设策略提供方向。

3.2 乌溪江水库理化因子时空分布特点

3.2.1 营养盐的宏观分布及其成因 从上游到下游,乌溪江水库的 TN、TP 等营养盐含量逐步降低,空间上呈现明显的梯度格局。对比乌溪江富营养化程度逐月变化曲线与乌溪江水库 TN 沿程分布图、丽水市月平均降水量(浙江统计局,2019;2020)曲线(图 2、图 5 和图 9),进一步印证了前文的推测:降雨期大量地表径流冲刷,携带营养盐进入水体,造就了 4–6 月雨季乌溪江水库富营养化程度大幅加深的趋势。这也与杨梅玲等(2013)、余员龙等(2010)对千岛湖营养盐输入来源的研究结论一致。

乌溪江水库营养盐的沿程分布趋势也呈现了显著的梯度格局。S1 点位作为入库径流的汇集,常年富集大量营养盐。其水深仅 12 m 左右,无分层现象,各项调查数据均呈现出一定的异质性。沿水流方向,降水和径流带来的大量营养盐首先汇入河流区,故其营养盐浓度远高于其他点位,而下游过渡区和湖泊区流速逐步降低,细小营养盐逐步沉降、吸附于

底泥、被生物吸收利用,营养盐浓度显著降低。这也符合一般水库的规律,和韩博平等(2010)、黎慧卉等(2009)的研究结果一致。

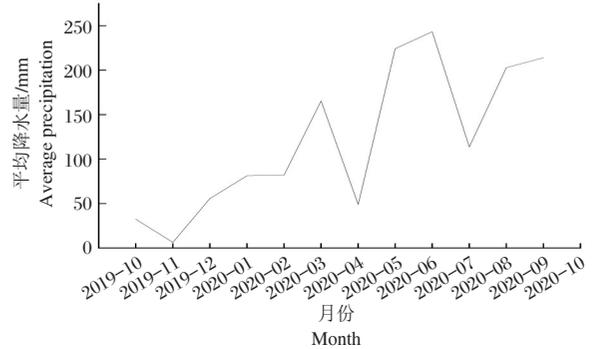


图 9 丽水市月平均降水量变化趋势

Fig.9 Average monthly precipitation in Lishui City

Chl-a 随季节(图 6)呈现了秋冬逐渐低而稳定,春夏逐步升高的明显趋势。Chl-a 一定程度上反映了浮游植物的含量,作为初级生产者的浮游植物对氮、磷等营养盐进行吸收利用,其效率也会受到温度等环境因素的影响。在 5 月,湖泊区的 TN 含量不降反升,可能是因为雨季光照弱,水生植物对氮、磷吸收缓慢。

3.2.2 环境因子的纵向剖面分布 营养盐的纵向剖面分布主要反映了其内源性营养盐的释放和吸收机制,是研究其内源性负荷与环境因子互动机制的重要参考因素。而环境因子的纵向剖面分布则一定程度上反映了水体生物活动、化学反应的程度,是间接影响营养盐消解、释放、吸收利用的重要因素。

水体的 pH 随水深增加先升高后下降,而 TP 的含量与 pH 呈现明显的相反变化趋势,先下降,在水深 20 m 以上逐步回升。有研究(Koski-Vähälä,2001)证明,上覆水的 pH 控制着表层沉积物对磷的释放程度,pH 降低时也会促进钙磷酸盐和碳酸钙的共溶解沉淀,这可能是水深增加后 TP 含量上升的原因之一。

氮在水中的各种形态变化受到许多理化因素的调控,乌溪江水库中,硝化作用在氮的循环中占主导地位、几乎不存在反硝化作用。陈黎黎(2015)研究发现,DO \geq 5 mg/L 时,对硝化作用无限制,而只有在 DO \leq 2 mg/L 时,才会出现反硝化作用,对比 DO 随深度下降曲线(图 8-b),乌溪江水库水体整体溶解氧充足,未提供反硝化作用需求的缺氧条件。而 DIN 含量在上层水体(0~10 m)变化不大,在 15 m 开始逐步增加,这可能和下层水体浮游植物含量相对较少,吸收和利用氮的能力减弱有关。

在理化因子与 Chl-a 的相关性分析中,TP 与 Chl-a 含量呈中等相关,TN 和 Chl-a 含量呈弱相关。

乌溪江的氮磷比范围为29.23~430.52,一定程度上说明了乌溪江水库氮的含量较为充足,而磷是限制浮游植物生长的关键因子之一。

参考文献

- 陈黎黎,2015. 珠三角典型富营养化状态湖库的氮形态研究[D]. 广州:暨南大学.
- 方娜,2020. 鄱阳湖典型湿地水质富营养化评价及其与土地利用格局之间的关系[D]. 南昌:江西师范大学.
- 韩博平,2010. 中国水库生态学研究的回顾与展望[J]. 湖泊科学,22(2):151-160.
- 国家环境保护局标准处,1989. 水质 总磷的测定:钼酸铵分光光度法:GB/T 11893-1989[S].
- 国家环境保护局规划标准处,1989. 水质 总氮的测定:碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法:GB 11894-89[S].
- 国家环境保护总局编委会,2002. 水和废水监测分析方法[M].4版. 北京:中国环境科学出版社.
- 国家环境保护总局科技标准司,2002. 地表水环境质量标准:GB 3838-2002[S].
- 黎慧卉,刘丛强,汪福顺,等,2009. 猫跳河流域梯级水库磷的夏季变化特征[J]. 长江流域资源与环境,18(4):368-372.
- 李韶慧,2021. 贵州高原平寨水库水体富营养化特征及影响因素分析[D]. 贵阳:贵州师范大学.
- 刘腊美,龙天渝,李崇明,2009. 三峡水库上游流域非点源颗粒态磷污染负荷研究[J]. 长江流域资源与环境,18(4):320-325.
- 阙子亿,王晓锋,袁兴中,等,2022. 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,34(6):1949-1967.
- 阮晓红,石晓丹,赵振华,等,2008. 苏州平原河网区浅水湖泊叶绿素a与环境因子的相关关系[J]. 湖泊科学,(5):556-562.
- 孙振刚,张岚,段中德,2013. 我国水库工程数量及分布[J]. 中国水利,(7):10-11.
- 王虹艳,2010. 丽水市城市土壤中重金属和磷的空间分布、磁学监测和污染风险评价[D]. 杭州:浙江大学.
- 王军明,2020. 生态文明建设背景下丽水市土地集约利用评价[J]. 贵州农业科学,48(8):151-154.
- 游中琼,陈森林,王放,2000. 乌溪江水库长期径流预报方案探讨[J]. 武汉水利电力大学学报,(1):59-62.
- 余员龙,任丽萍,刘其根,等,2010. 2007-2008年千岛湖营养盐时空分布及其影响因素[J]. 湖泊科学,22(5):684-692.
- 杨梅玲,胡忠军,刘其根,等,2013. 利用综合营养状态指数和修正的营养状态指数评价千岛湖水质变化(2007年-2011年)[J]. 上海海洋大学学报,22(2):240-245.
- 张小林,张靖天,迟春娟,等,2018. 乌溪江梯级水库的营养特征及水生态健康评价[J]. 环境工程技术学报,8(5):502-509.
- 浙江统计局,2019.2019年浙江统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社.
- 浙江统计局,2020.2020年浙江统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社.
- 朱广伟,秦伯强,张运林,等,2018. 2005-2017年北部太湖水体叶绿素a和营养盐变化及影响因素[J]. 湖泊科学,30(2):279-295.
- 朱广伟,许海,朱梦圆,等,2019. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学,31(6):1510-1524.
- Koski-Vähälä J, Hartikainen H, Tallberg P, 2001. Phosphorus mobilization from various sediment pools in response to increased pH and silicate concentration[J]. Journal of Environmental Quality,2001,30(2):546-552.
- Lin S, Shen S, Zhou A, et al, 2021. Assessment and management of lake eutrophication: A case study in Lake Erhai, China[J]. Science of The Total Environment 751: 141618.

(责任编辑 熊美华)

Temporal and Spatial Distribution of Eutrophication and Influencing Factors in Wuxijiang Reservoir

LI Qi-xuan¹, ZHANG Zhen¹, XU Meng-jiao¹, LIU Ke-ke¹, GE Hang¹, YAO Zi-liang², LIU Qi-gen¹

- (1. Centre for Research on Environmental Ecology and Fish, Nutrition of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P.R. China;
2. Lishui Fishery Technical Extension Station, Lishui 323000, P.R. China)

Abstract: In this study, we analyzed the spatial and temporal distribution of primary water quality indicators and the changes in trophic status in Wuxijiang reservoir of Lishui City, and then compared the comprehensive nutritional index and physicochemical factors of different periods. During 2019 and 2020, five water quality parameters [water temperature (WT), pH, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chlorophyll-a (Chl-a)] were monitored monthly at seven sampling sites (S1: riverine; S2-4: transition zone; S5-7: lake) in Wuxijiang reservoir. Results show that nutrient concentrations in the reservoir were higher in spring and summer, and lower in autumn and winter, and tended to decrease from upstream (S1) to downstream (S7). The average comprehensive nutrient index decreased gradually from 47.1 (S1) to 32.5 (S7), indicating an overall mesotrophic state. The TP range was 0.002–0.040 mg/L (mean = 0.012 mg/L) and the TN range was 0.412–2.826 mg/L, occurring primarily as nitrate. The mean Chl-a concentration was 3.77 $\mu\text{g/L}$, and it was significantly higher in the river than downstream in the transition zone and lake. Pearson correlation analysis shows that surface runoff associated with precipitation had the strongest influence on eutrophication, and was the primary source of exogenous nitrogen and phosphorus. The WT, pH and TP were moderately correlated with Chl-a concentration. While the reservoir has a strong purification ability, eutrophication in Wuxijiang reservoir has intensified in recent years. Our study provides a reference and scientific data to support water quality improvement and ecosystem conservation in Wuxijiang reservoir.

Key words: eutrophication; physicochemical parameters; chlorophyll-a; temporal and spatial distribution; Wuxijiang reservoir