

2017—2024年小塔山水库水质变化特征 及富营养化研究

刘庆竹¹,王德维¹,王震¹,王崇任¹,王梦莹²

(1. 江苏省水文水资源勘测局连云港分局,江苏 连云港 222000;

2. 正大天晴药业集团股份有限公司,江苏 连云港 222000)

摘要:小塔山水库是连云港市一座兼具多种功能的大型人工水库,对维护城市水资源安全和供水稳定起到重要支撑作用。采用单因子评价法和营养状态指数法对小塔山水库2017—2024年水质和水体富营养化程度进行分析,利用SPSS Pro对水库营养状态指数影响因子进行了Pearson相关性分析。结果表明,小塔山水库近年来各项水质指标呈现不同表现结果,水质状况总体优良,对比2020—2022年间水质,2024年出现明显好转,水温和氮、磷等营养盐元素被认为是水库富营养化的重要影响因子。

关键词:水质特征;富营养化;营养状态指数;小塔山水库

中图分类号:X524 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)03-0019-0005

Water quality variation characteristics and eutrophication of Xiaotashan Reservoir from 2017 to 2024

LIU Qingzhu¹, WANG Dewei¹, WANG Zhen¹, WANG Chongren¹, WANG Mengying²

(1. Lianyungang Branch of Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Lianyungang 222000, China;

2. Chia Tai Tianqing Pharmaceutical Group Co., Ltd., Lianyungang 222000, China)

Abstract: Xiaotashan Reservoir is a large artificial reservoir in Lianyungang City with multiple functions, playing a crucial role in maintaining urban water resource security and stabilizing water supply. Water quality and eutrophication level of Xiaotashan Reservoir from 2017 to 2024 were evaluated using the single-factor evaluation method and the Trophic State Index (TSI) method. Pearson correlation analysis of the factors influencing the trophic state index was carried out using SPSS Pro. The results show that water quality indicators in Xiaotashan Reservoir exhibited different trends in recent years. The overall water quality was generally good, and a significant improvement was observed in 2024 compared with the period 2020—2022. Water temperature and nutrient salts such as nitrogen and phosphorus were identified as key factors affecting reservoir eutrophication.

Key words: water quality characteristics; eutrophication; trophic state index; Xiaotashan Reservoir

收稿日期: 2025-11-06

基金项目: 江苏省水利科技项目(2022031)

作者简介: 刘庆竹(1997—),女,助理工程师,硕士,主要从事水质评价、分析工作。E-mail:954094820@qq.com

小塔山水库位于江苏省连云港市赣榆区西北部的塔山镇,地处苏北鲁南交界处,是一座以防洪为主,兼具农业灌溉、城镇供水、水力发电、生态养殖及旅游观光等综合功能的大型人工水库^[1]。作为重要的饮用水源地,小塔山水库的水质安全至关重要。然而,近年来相关监测与研究表明,受水库底泥、水文、气象、周边居民生活等相关因素影响,小塔山水库面临着富营养化威胁^[2-3]。因此,本文采取合理的水库水质评价方法和标准,分析小塔山水库2017—2024年间主要水质指标变化特征及富营养化水平,直观了解近年来水库的水体状况,为连云港市水资源安全和供水稳定提供重要的理论依据和数据支撑。

1 数据来源与评价方法

1.1 数据来源

本文数据来源为江苏省水环境监测中心连云港分中心2017—2024年连云港市小塔山水库水质监测成果。水质样品的采集、保存和运输符合《水环境监测规范》(SL 219—2013)相关技术要求,监测分析项目为《地表水环境监测质量标准》(GB 3838—2002)表1表2中29项以及透明度、叶绿素a等水质指标,水质标准参照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),将Ⅲ类水作为水质达标标准,监测频次为每月1次。

达标率计算公式为

$$L = \frac{\text{达标次数个数}}{\text{总监测次数个数}} \times 100\% \quad (1)$$

1.2 水质评价方法

本次研究采取Excel、Origin 2021、SPSS Pro等软件进行数据处理和绘图。采用单因子评价法对小塔山水库水质进行评价,并以水质最差的指标确定水体水质类别。本次主要评价项目包括《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)表1中除水温、总氮、粪大肠菌群外的21项指标。

湖库营养状态评价方法采用《地表水资源质量评价技术规程》(SL 395—2007),用0~100的连续数字对湖泊(水库)营养状态进行分级,评价标准见表1。营养状态影响因子采用SPSS Pro进行Pearson

相关性分析,相关系数为正时表示正相关,为负时表示负相关,其绝对值越高表示相关性越强。

2 结果与分析

2.1 主要水质指标变化特征

水库水质的演变过程可通过关键水质指标的动态变化得到清晰表征。为了解2017—2024年小塔山水库水质变化特征,本文选取了12项对评价水库水质和富营养状态具有关键影响作用的水质指标,时序变化结果如图1所示。

研究期间,小塔山水库水温(WT)在1.0~33.0℃之间,多年平均值为17.7℃,并呈现出明显的季节性变化(如图1(a)所示)。夏秋季水温(平均24.5℃)普遍高于冬春季水温(平均11.2℃)。而溶解氧(DO)则呈现完全相反的变化趋势。溶解氧是水生生物生存必需的物质,其含量水平直接反映水体的自净能力和污染程度^[4]。溶解氧过低会导致水体厌氧,产生硫化氢等恶臭物质,威胁水生生物生存。如图1(b)所示,小塔山水库溶解氧质量浓度在4.23~13.66 mg/L之间,多年平均值为9.35 mg/L,且冬春季溶解氧(平均10.03 mg/L)明显高于夏秋季(平均8.66 mg/L)。这可能是冬季低温时溶解氧溶解度增大,而夏秋季高温时溶解氧溶解度减小且生物耗氧量增加导致的^[5]。如图1(c)所示,pH值维持在7.71~8.97之间,多年平均值为8.26,水体呈现弱碱性。

氨氮(NH₃-N)是水体富营养化的重要前体物质,也是评价水体有机污染和自净能力的重要指标。研究期间,小塔山水库氨氮多年平均浓度值为0.25 mg/L,整体呈现稳定波动趋势,年均最高值(0.65 mg/L)出现在2018年,年均最低值(0.04 mg/L)出现在2022年(如图1(d))。氟化物(F⁻)是天然存在于水体中的无机阴离子,高浓度氟化物主要来源于特定地质背景、工业废水、燃煤排放以及含氟农药的使用。如图1e所示,小塔山水库氟化物质量浓度多年平均值为0.45 mg/L,质量浓度范围介于0.18~0.97 mg/L之间,整体呈现略微下降并趋于稳定的态势。

化学需氧量(COD)能够反映水体受有机物污染的程度,其质量浓度值越高,污染越严重。五日生化需氧量(BOD₅)能够反映水体中有机物进行生物氧化分解的难易程度和总量,是评价水体有机污染程度和自净能力的关键指标。研究期间,COD质量浓度最低值为未检出状态,最高值为27.3 mg/L,

表1 湖泊(水库)营养状态评价标准

贫营养	中营养	富营养 $I > 50$		
		轻度富营养	中度富营养	重度富营养
$0 \leq I \leq 20$	$20 < I \leq 50$	$50 < I \leq 60$	$60 < I \leq 80$	$80 < I \leq 100$

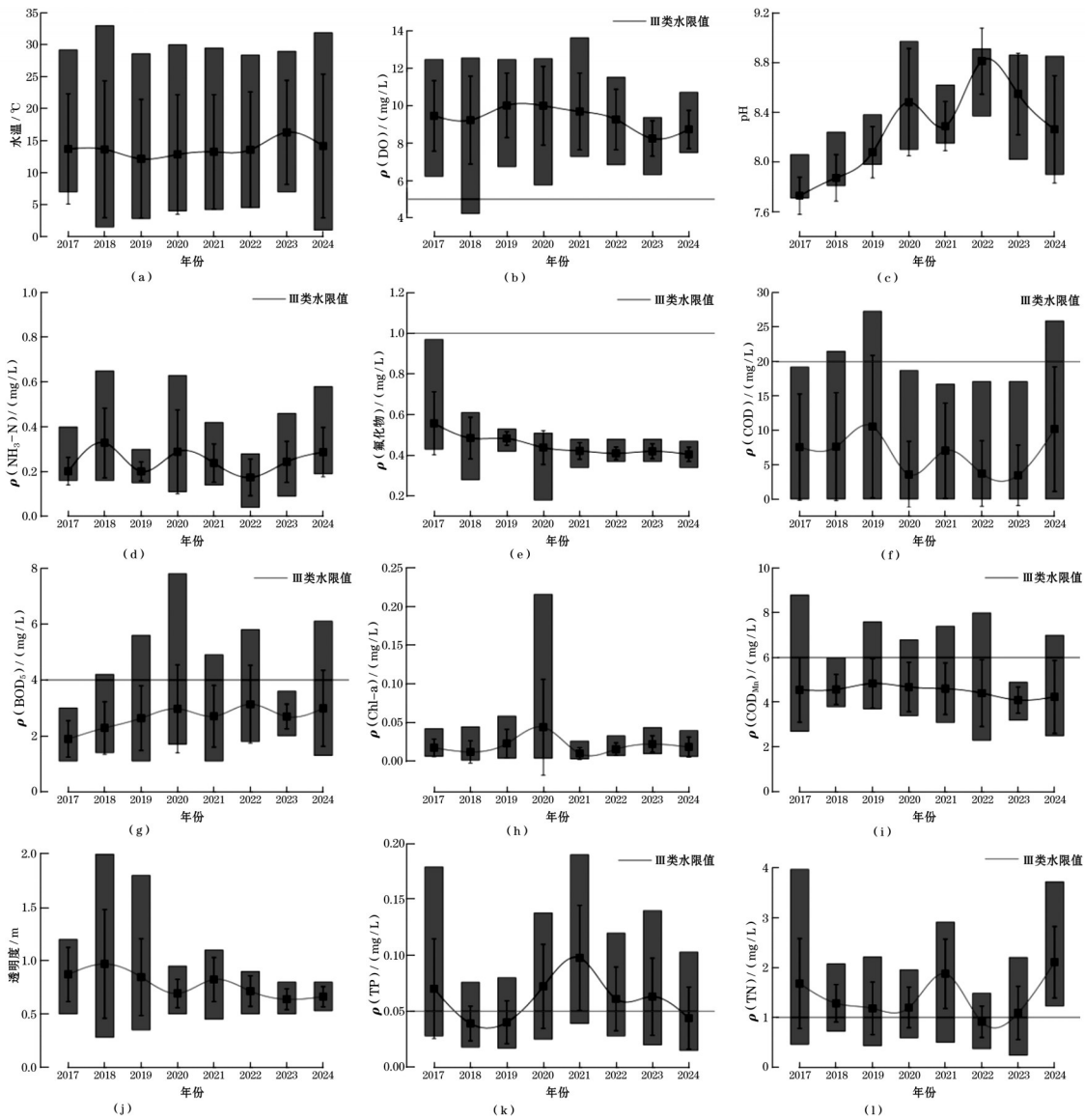


图1 2017—2024年小塔山水库主要水质指标时序变化情况

BOD₅质量浓度范围在1.1~7.8 mg/L之间,二者均呈现轻微上升趋势(如图1(f)、图1(g)所示)。

与湖库营养状态相关的水质参数包括叶绿素a(Chl-a)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、透明度(SD)、总磷(TP)和总氮(TN)等^[6]。其中,叶绿素a是浮游植物进行光合作用的主要色素,其浓度能直接指示水体富营养化状态;高锰酸盐指数是衡量水体受有机物污染程度的重要综合指标;总磷和总氮是水体富营养化的关键限制性营养盐,高浓度总磷、总氮会刺激藻类过度繁殖,引发水华^[1];透明度能直观反映水体的浑浊程度,富营养化水体藻类暴发时透明度显著降低。如图1(h)~图1(l)所示,叶绿素a的质量浓度范围在0.0009~0.2158 mg/L之间,质量浓度多年平均值为0.0200 mg/L,其中最高值出现

在2020年6月;高锰酸盐指数质量浓度介于2.3~8.8 mg/L,多年质量浓度平均值为4.5 mg/L,近年来其质量浓度值趋于稳定;透明度处于0.28~2.0 m之间,多年平均值为0.78 m;总氮和总磷质量浓度分别介于0.24~3.98 mg/L以及0.015~0.190 mg/L之间,近年来前者上升约25.5%,后者下降约37.5%。

2.2 水库水质评价及主要污染因子分析

采用单因子评价法对2017—2024年小塔山水库水质情况进行分析评价,水库水质类别和主要指标水质类别占比结果如图2所示。

由图2(a)可知,2017—2024年间,小塔山水库水质类别达Ⅲ类比例在16.7%~91.7%之间,2021年占比最低,2024年占比最高。其中,Ⅱ类占比为0.0%~25.0%;Ⅲ类占比为8.3%~75.0%,其占比变化

呈现先降低后升高的趋势；IV类占比为0.0%~58.3%，V类占比为0.0%~41.7%，分别于2023年和2021年达至顶峰；I类及劣V类占比均为0.0%。从整体来看，小塔山水库于2020—2022年间水质较差，2024年出现明显好转。

为进一步分析小塔山水库主要水质污染指标，本文选取了8个对水质达标情况影响较大的指标进行分类统计，分析结果如图2(b)所示。其中，pH值、溶解氧、化学需氧量、氨氮和氟化物达Ⅲ类比例介于95.7%~100%之间，高锰酸盐指数和五日生化需氧量达Ⅲ类比例分别为93.6%和90.4%，而总磷达Ⅲ类比例最低，仅为53.2%，其IV类和V类占比却分别高达33.0%和13.8%。综上所述，总磷可被认为是影响小塔山水库水质状况的主要污染因子，须重点关注。

2.3 富营养化评价

水体富营养化是指氮、磷等营养元素超量进入

水体中，促使藻类等水生生物迅速生长，导致水体的营养状态由贫转为富^[3,7-8]。通过富营养化评价，分析得到2017—2024年小塔山水库营养状态如图3所示，小塔山水库营养状态介于中营养—中度富营养之间。其中，轻度富营养占比最高(25.0%~83.3%)，为主要类型，其次是中营养和重度富营养，分别占比0.0%~58.3%和0.0%~25.0%。值得注意的是，2020年富营养状态占比为100.0%。同时，小塔山水库营养状态总评分值为41.9~63.3，整体呈现波动态势，近年来较稳定。其中，2020年出现最高值为55.3，2018年出现最低值为50.8。

小塔山水库汛期与非汛期营养状态指数的年际变化特征如图4所示。可以看出，汛期时营养状态指数介于51.2~56.9之间，非汛期指数介于50.4~55.4之间，汛期时波动范围较非汛期时更大。其次，汛期时多年平均值为54.0，非汛期时多年平均值为53.6，汛期时要略高于非汛期。值得注意的是，

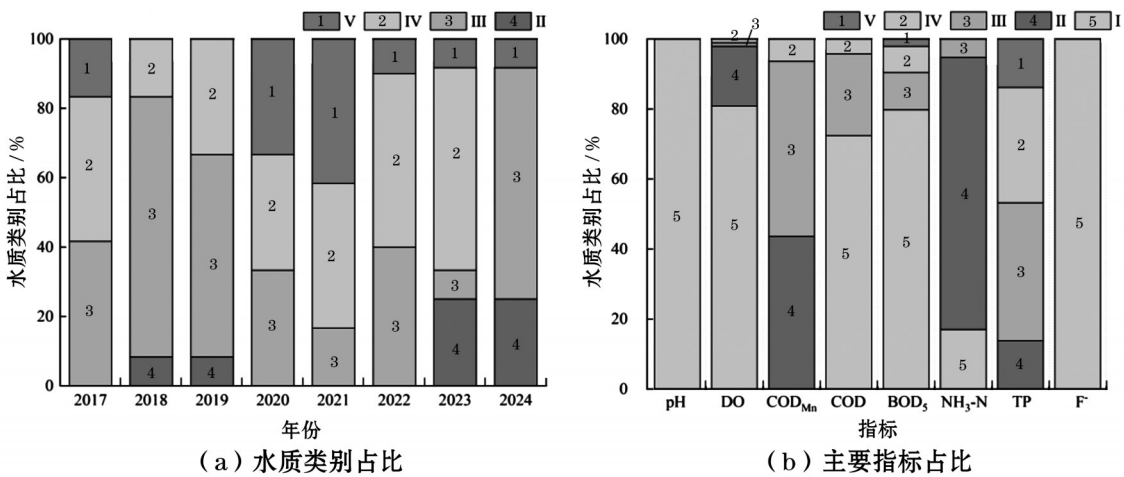


图2 2017—2024年小塔山水库水质类别和主要指标水质类别占比

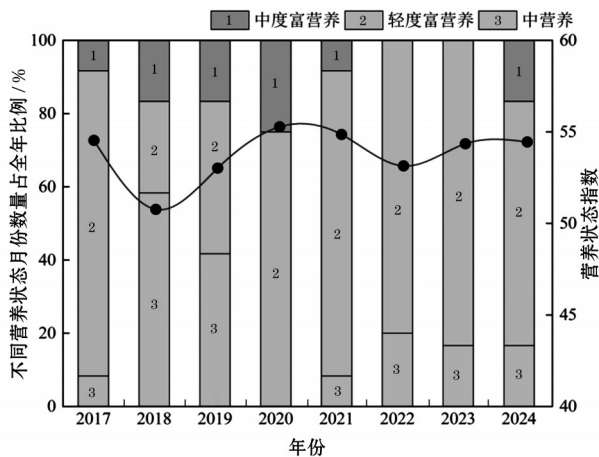


图3 2017—2024年小塔山水库营养状态占比分布及年均营养状态指数

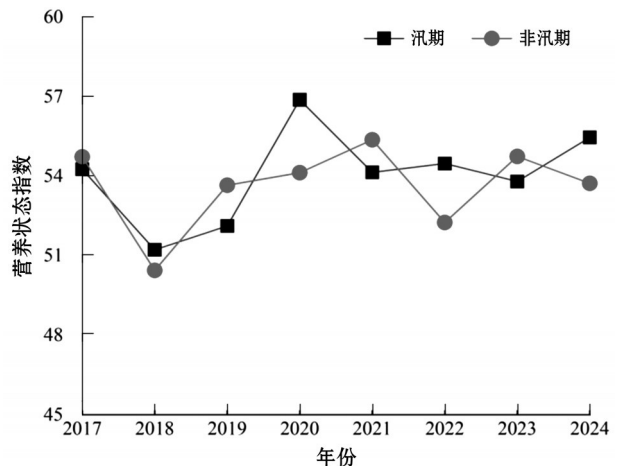


图4 2017—2024年小塔山水库汛期及非汛期营养状态指数

2020年及2022年间,汛期时期营养状态指数显著高于非汛期时期。一方面,这可能是由于暴雨携带空气中的氧气、灰尘和细菌等杂质降落到地面,同时冲刷和溶解地表腐殖质,通过污染小塔山水库上游来水,影响水库水质;另一方面,因小塔山水库属于浅层水体,在暴雨天气结合风力作用下,会干扰水库底泥释放氮、磷等营养盐,造成对小塔山水库的二次污染^[9]。

2.4 营养状态影响因子相关性分析

为了研究小塔山水库营养状态的主要影响因子,利用SPSS Pro对2017—2024年10个主要指标及营养状态指数进行了Pearson相关性分析,各相关系数如表2所示。

溶解氧与水温呈显著负相关关系($r=-0.939^{***}$),

表明溶解氧浓度受水温季节性变化的影响较强烈,这与胡鹏等^[4]研究结论一致。叶绿素a与总磷呈正相关,与透明度呈负相关,相关系数分别为0.019和-0.451,这表明磷可能促进浮游植物生物量增加,造成透明度下降。营养状态指数与总磷、总氮和叶绿素a呈正相关,相关系数分别为0.667*、0.362和0.445,与透明度呈负相关,相关系数为-0.632*,说明它们是影响水库营养状态指数的重要因子。同时,营养状态指数与水温和pH值也呈正相关,相关性系数为0.117和0.296。因此,水库富营养化可能受水体温度变化影响,温度升高促进藻类生长繁殖,消耗大量氧气,造成透明度下降,pH值相应升高。当水体中氮、磷等营养盐浓度升高时,藻类繁殖速度提高,水体营养化程度进一步加重^[6,10]。

表2 营养状态指数与水质指标Pearson相关系数

指标	WT	DO	pH	COD _{Mn}	COD	NH ₃ -N	TN	TP	SD	Chl-a	营养状态指数
WT	1 ^{***}										
DO	-0.939 ^{***}	1 ^{***}									
pH	0.257	-0.225	1 ^{***}								
COD _{Mn}	-0.922 ^{***}	0.962 ^{***}	-0.403	1 ^{***}							
COD	-0.407	0.188	-0.66 [*]	0.324	1 ^{***}						
NH ₃ -N	0.118	-0.16	-0.237	-0.09	0.09	1 ^{***}					
TN	-0.034	-0.069	-0.427	-0.095	0.591	0.263	1 ^{***}				
TP	0.027	0.210	0.230	0.041	-0.454	-0.244	0.206	1 ^{***}			
SD	-0.477	0.449	-0.777 ^{**}	0.627 [*]	0.442	0.110	0.058	-0.145	1 ^{***}		
Chla	-0.161	0.305	0.269	0.197	-0.361	0.172	-0.313	0.019	-0.451	1 ^{***}	
营养状态指数	0.117	0.044	0.296	-0.161	-0.239	-0.223	0.362	0.667 [*]	-0.632 [*]	0.445	1 ^{***}

注:***、**、*分别代表1%、5%、10%的显著性水平。

3 总结和建议

(1)2017—2024年间,小塔山水库水温平均值为17.7℃,水体呈现弱碱性,达Ⅲ类比例在16.7%~91.7%之间,水质状况总体优良,于2020—2022年间水质较差,2024年出现明显好转,总磷被认为是影响水库水质状况的主要污染因子。

(2)小塔山水库营养状态介于中营养~中度富营养之间,营养状态总评分值为41.9~63.3,汛期时多年平均营养状态指数略高于非汛期,整体呈现波

动态势。水温和氮、磷等营养盐浓度均是水体富营养化的重要影响因子。

(3)小塔山水库作为重要饮用水源地,需进一步保障水质安全。要控制外源,着力削减水库污染负荷,特别是氮磷等营养元素的输入;要防范内源,密切关注水库沉积物中污染物的释放;要生态调度,通过优化水资源配置,提升水体交换速率与自净容量,构建更健康的水生态系统。

(下转第34页)

除上述核心控制措施外,还应配套采取中盾注浆(如克泥效工法)填充盾体间隙、优化盾构机刀盘刀具配置、严格控制掘进速度与出土量、实施同步与二次注浆、加强全过程信息化施工监测与动态反馈等一系列综合技术和监控措施,以确保堤防安全和沉降变形是可控的。

参考文献:

- [1] LEI H, LIU Y, ZHANG Y. Ground deformation behaviour induced by overlapped shield tunnelling considering vibration loads of subway train in sand[J]. Acta Geotech,

2023,18(1):519-533.

- [2] LIU B, LI T T, HAN Y H, et al. DEM-continuum mechanics coupling simulation of cutting reinforced concrete pile by shield machine [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 152(12): 327-344.
- [3] 陈海丰,袁大军,王飞,等.盾构直接切削大直径桩基的掘削参数研究[J].土木工程学报,2016,49(10):103-109,128.
- [4] 陈学东,周喜武,吴玲玲.极限平衡法和有限元边坡稳定分析法在盾构隧道穿秦淮河堤防工程中的研究与应用[J].江苏水利,2011(6):9-11.

(上接第23页)

参考文献:

- [1] 李静.小塔山水库蓝藻水华的监测分析及防治对策[J].资源节约与环保,2024(2):96-100.
- [2] 邵真真,杨传清,周娟,等.小塔山水库水生态系统修复保护规划工作探讨[J].河南科技,2021,40(31):55-57.
- [3] 季相星,王普力,王瑜.小塔山水库富营养化评价及防治对策[J].河北渔业,2020(12):52-55.
- [4] 胡鹏,杨庆,杨泽凡,等.水体中溶解氧含量与其物理影响因素的实验研究[J].水利学报,2019,50(6):679-686.
- [5] 杨春艳,施择,焦聪颖,等.2013—2020年泸沽湖溶解氧随时间变化规律及主要影响因素分析[J].中国环境监测,2022,38(4):139-145.

- [6] 蒋灵芝,赵童,张玲燕,等.青狮潭水库2015—2022年水质变化特征及富营养化分析[J].广西水利水电,2024(5):153-157.
- [7] 史密伟,王艳霞,高博,等.2013—2022年白洋淀水体富营养化时空变化特征研究[J].环境污染与防治,2024,46(10):1472-1478.
- [8] 肖洋,刘金珍,陈诺,等.鄂北工程对封江口水库浮游植物组成影响[J].水资源保护,2025,41(6):239-250.
- [9] 姚焯.基于抑制近坝支流水华的三峡水库非汛期优化调度研究[D].天津:天津大学,2014.
- [10] 刘光正,王明森,刘健,等.大明湖水污染物因子分析及富营养化评价[J].济南大学学报(自然科学版),2023,37(6):696-702.