

## 塘门浜、十字河水质变化特征及主成分分析

葛建伟<sup>1</sup> 黄柯<sup>2\*</sup> 周璐璐<sup>3</sup>

1.常州百特环保科技有限公司, 江苏 常州 213164

2.江苏龙垚环境科学研究所有限公司, 江苏 常州 213164

3.常州大学环境科学与工程学院, 江苏 常州 213164

**[摘要]**塘门浜、十字河是太湖的重要入湖河流, 其水质变化的优劣会影响太湖的生态环境及生产发展。为探究塘门浜、十字河水质的季节性变化特征, 本研究于2025年4月中旬(春季, 平水期)、8月中旬(夏季, 丰水期)和12月中旬(冬季, 枯水期)对河道固定监测断面进行了水质采样。监测结果表明: 水体整体污染严重, 呈现典型的有机污染和富营养化特征。溶解氧(DO)在春季出现异常低值(断面最低均值0.91 mg/L), 化学需氧量(COD)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)、总氮(TN)在春、冬季浓度较高, 而总磷(TP)则在夏季浓度最高, 揭示了不同污染来源和季节驱动过程的差异。相关性分析及主成分分析表明, 水温与营养盐转化是驱动水质变化的关键, 并识别出氮污染、物理-生化状态及酸碱平衡三大主导因子。重金属检测显示, 铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)、砷(As)在监测断面上均有不同程度检出, 浓度低于地表水 III 类标准限值; 然而汞(Hg)浓度(0.00258~0.00532 mg/L)显著超标, 成为潜在环境风险因子。本研究为认识该区域水体污染的季节性规律及制定针对性治理措施提供了数据支撑。

**[关键词]**塘门浜; 十字河; 水质监测; 季节性变化; 主成分分析; 重金属

DOI: 10.33142/hst.v9i2.19156

中图分类号: X824

文献标识码: A

## Seasonal Variation Characteristics and Principal Component Analysis of Water Quality in Tangmenbang and Shizihe Rivers

GE Jianwei<sup>1</sup>, HUANG Ke<sup>2\*</sup>, ZHOU Lulu<sup>3</sup>

1. Changzhou Better Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213164, China

2. Jiangsu Longyao Environmental Science Research Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu, 213164, China

3. School of Environmental Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou, Jiangsu, 213164, China

**Abstract:** Tangmenbang and Shizihe Rivers are important inflow rivers of Taihu Lake, and the quality of their water directly affects the ecological environment and production development of Taihu Lake. To explore the seasonal variation characteristics of water quality in Tangmenbang and Shizihe Rivers, this study conducted water sampling at fixed monitoring sections of the rivers in mid-April 2024 (spring, normal water period), mid-August 2024 (summer, wet season), and mid-December 2025 (winter, dry season). The monitoring results showed that the water body was severely polluted overall, exhibiting typical characteristics of organic pollution and eutrophication. Dissolved oxygen (DO) reached an abnormally low value in spring (the minimum average concentration at monitoring sections was 0.91 mg/L). Chemical oxygen demand (COD), ammonia nitrogen (NH<sub>3</sub>-N), and total nitrogen (TN) concentrations were relatively high in spring and winter, while total phosphorus (TP) concentration was the highest in summer, indicating differences in pollution sources and seasonal driving processes. Correlation and principal component analysis (PCA) revealed that water temperature and nutrient transformation were the key drivers of water quality changes, and three dominant factors were identified: nitrogen pollution, physical-biochemical status, and acid-base balance. Heavy metal detection showed that lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn), and arsenic (As) were detected at different monitoring sections, with concentrations lower than the Class III standard limit for surface water; However, the concentration of mercury (Hg) (0.00258~0.00532 mg/L) significantly exceeded the standard, making it a potential environmental risk factor. This study provides data support for understanding the seasonal patterns of water pollution in the region and formulating targeted control measures.

**Keywords:** Tangmenbang; Shizihe; water quality monitoring; seasonal variation; principal component analysis; heavy metals

## 引言

塘门浜、十字河属常州市永安河支流，永安河流经太湖运河等河道，最终注入太湖的梅梁湖与竺山湖之间的湖湾。塘门浜、十字河流域地区有多家工业企业聚集于此，由于工业废水及生活污水直排进入河流，造成河流黑臭，水质恶化。2021年，中共中央发布了《中共中央国务院关于深入打好污染防治攻坚战的意见》，指出要持续打好城市黑臭水体治理攻坚战，因地制宜开展水体内源污染治理和生态修复，增强河湖自净功能。本研究旨在通过对塘门浜、十字河的水质变化进行监测，探究塘门浜、十字河的水质变化特征。为进一步认识该水域污染的变化规律及水域环境治理提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

塘门浜、十字河位于江苏省常州市，两条河流均为永安河支流，经永安河汇入太湖运河，再流入太湖。此地属于北亚热带季风气候区，降水丰沛但季节分配不均，多集中在夏季。其水文分期通常划分如下：丰水期为6月~9月；平水期为4月~5月和10月~11月；枯水期为12月~次年3月。

### 1.2 采样点与采样方法

根据塘门浜、十字河水系的区位、流向及河道形态设置9个监测断面，其中塘门浜设置4个监测断面，记为St1-St4，十字河设置5个监测断面，记为St5-St9。于2025年4月、8月及12月用有机玻璃采水器对监测断面进行水质采样，监测点分布图见图1。监测指标包括水温(T)、pH、DO、COD、NH<sub>3</sub>-N、TN、TP及重金属物质，每个断面采集3个水样。

其中水温、pH、DO浓度在现场进行测定，其他监测指标采样后带回实验室测定。水温采用温度计法；pH值采用玻璃电极法(GB/T 6920—1986)；DO采用电化学探头法(HJ 506—2009)；COD采用快速消解分光光度法(HJ/T 399—2007)；NH<sub>3</sub>-N采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)；TN采用碱性过硫酸钾紫外分光光度法(GB/T 11894—1989)，TP浓度采用钼锑抗分光光度法比色法测定采用钼酸铵分光光度法(GB/T 11893—1989)；重金属采用电感耦合等离子体质谱法(HJ 700—2014)。

### 1.3 数据处理

使用Origin 2021软件对水质监测数据进行整理、描述性统计及Pearson相关性分析。采用SPSS Statistics 27.0.1.0软件进行主成分分析(Principle Component

Analysis, PCA)。

## 2 水质总体状况与季节性变化规律

### 2.1 水质总体污染状况

对9个断面三个季节的监测数据进行统计，变化规律如图2所示。塘门浜、十字河水体污染极其严重。年平均水温为19.03℃，pH值在7.3~8.9之间，呈弱碱性。溶解氧的范围在0.91~10.72 mg/L，年均值为4.36 mg/L，COD的范围在7.13~21.39 mg/L，年均值为12.63 mg/L。NH<sub>3</sub>-N的范围在0.01~0.44 mg/L，年均值为0.15 mg/L，TN范围在0.12~1.48 mg/L，年均值为0.73 mg/L，TP的范围在0.05~0.44 mg/L，年均值为0.15 mg/L。根据《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)，溶解氧、TP的部分时段点位浓度均超过V类水标准限值，水体处于富营养化状态严重，存在较高的黑臭风险<sup>[1]</sup>。

### 2.2 水质指标季节性变化规律

#### 2.2.1 基本理化指标

通过对水温和DO进行分析(图3)。发现水温呈现出预期的季节性变化规律，夏季最高，冬季最低。然而，DO的变化趋势则较为复杂。在夏季水温升高，DO显著下降；冬季水温降低，DO升高。符合冬高夏低的趋势<sup>[2]</sup>。然而在春季，水温已回升至适宜的温度，DO却呈现低值，并远低于水温更高的夏季。这种现象表明除了物理驱动因素之一，水体中还存在耗氧机制主导着DO的变化。其原因可能与春季藻类的大量繁殖与衰亡有关<sup>[3]</sup>。此外，春季农业面源污染的输入也为水体带来了额外的耗氧物质。这两个过程的协同作用从而导致了春季的极端低氧事件。

#### 2.2.2 营养盐与有机污染指标

对COD、NH<sub>3</sub>-N、TP和TN等关键指标的监测结果表明(图2)，塘门浜、十字河营养盐与有机污染严重，且各指标呈现出显著的季节性变化差异。这些指标的差异性变化揭示了污染来源与迁移转化过程复杂性和动态性。

COD在春季与冬季维持较高水平，而在夏季相对较低。冬季枯水期降水减少，河流的稀释能力降低，导致COD浓度变高。相比之下，夏季丰水期巨大的环境水量对污染物产生了强烈的稀释，因此COD浓度的相对低值<sup>[4]</sup>。

NH<sub>3</sub>-N浓度表现为春季和冬季较高、夏季最低的特征。水体的物理环境(温度)通过影响微生物生态过程，从而决定氮污染物的形态与转化路径。夏季高温增强了硝化细菌的活性，加速了水体中NH<sub>3</sub>-N向硝酸盐氮的转化。在春、冬季，低温显著抑制了硝化菌的代谢速率，使得NH<sub>3</sub>-N的转化过程受阻<sup>[5]</sup>。



图1 监测点分布图

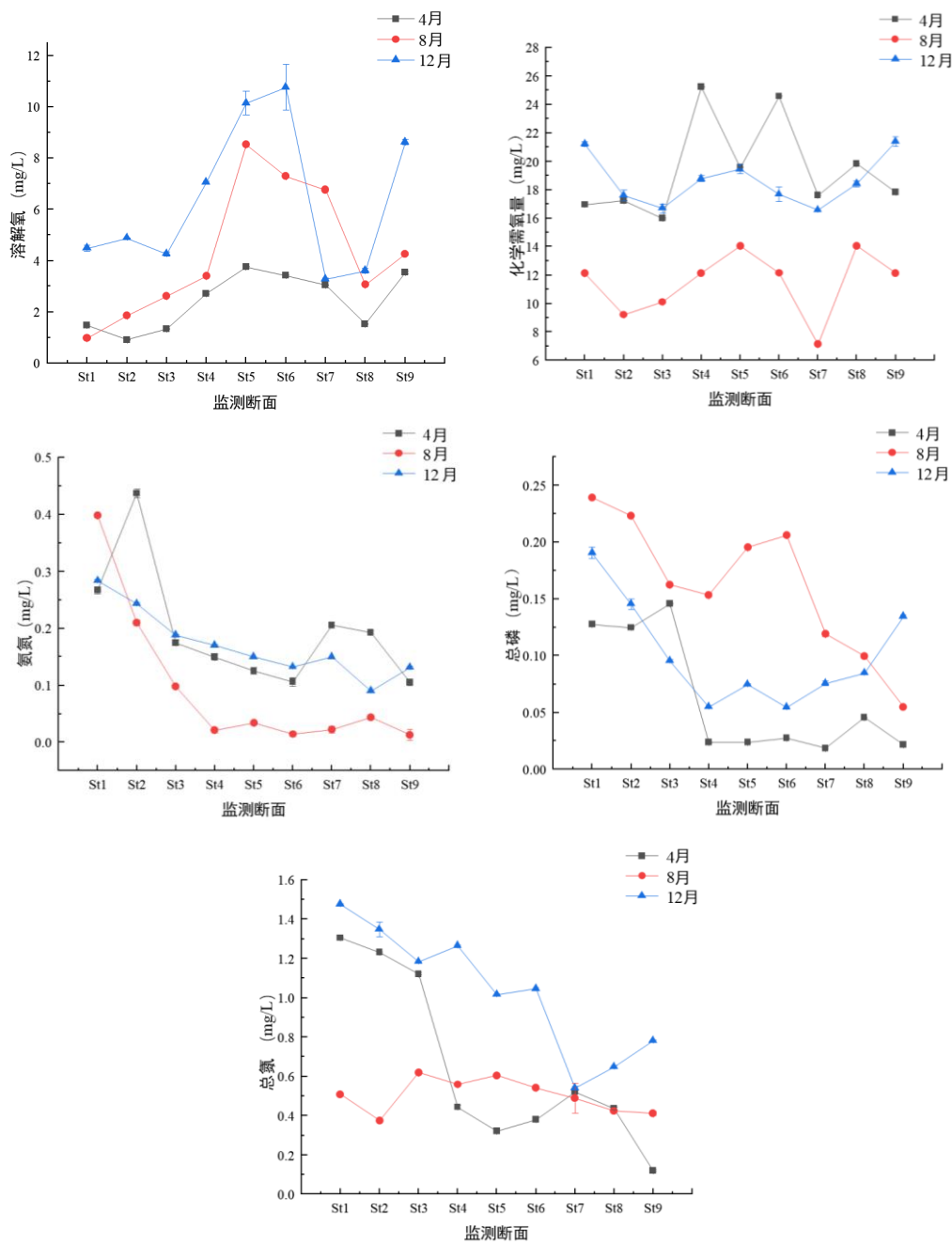


图2 塘门浜、十字河水质时间变化趋势

与  $\text{NH}_3\text{-N}$  不同, TN 浓度在冬季达到峰值。这主要归因于冬季枯水期水文条件的改变。一方面, 冬季降水减少; 另一方面, 上游及沿岸持续输入的城镇污水、工业废水、农业面源污染, 造成 TN 在水体中不断浓缩与积累。TP 浓度在夏季出现明显高值, 这与氨氮和总氮的变化趋势形成鲜明对比。该现象指示降雨径流所驱动的面源污染是磷素的主要来源<sup>[6]</sup>。

总之, 水体不仅常年承受着巨大的点源与面源污染压力, 其内部的水文条件、物理环境与生物化学过程共同构成了一个复杂的调控网络。其中, 总磷污染与夏季降雨关联密切, 总氮污染在冬季枯水期效应最为突出, 而氨氮则典型地受到水温控制的生物转化过程调节。

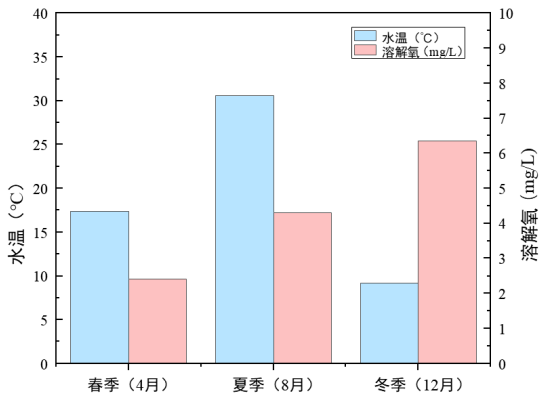


图 3 水质指标季节性变化图

### 3 相关性分析与主成分分析

#### 3.1 水质参数相关性分析

为探究塘门浜、十字河水体中各水质指标间的内在联系与相互作用机制, 本研究对塘门浜、十字河 2025 年 4 月、8 月、12 月的 9 个监测断面均值矩阵进行双尾检验 ( $n=27$ ), 采用皮尔逊相关系数 (Pearson Correlation Coefficient) 进行了相关性分析 (图 4)。结果显示:

水温与 COD ( $r = -0.72$ ) 和 TN ( $r = -0.55$ ) 呈极强负相关, 表明水温升高可能会显著促进水体中有机物的降解或微生物代谢活动, 驱动了氮素的形态转化或挥发过程。 $\text{NH}_3\text{-N}$  与 TP ( $r = 0.64$ ) 和 TN ( $r = 0.50$ ) 之间均呈显著正相关, 结合断面分布特征, St1-St3 为居民密集区, 表明生活污水及农业面源是二者共同来源, 并在水体中发生协同迁移和转化。

DO 与 TP ( $r = -0.49$ ) 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  ( $r = -0.43$ ) 均呈显著负相关, 耗氧有机物分解及藻类繁殖消耗大量 DO, 同时底泥在厌氧条件下会将固定的磷 (如铁磷复合物) 释放出来, 转化为可被生物利用的正磷酸盐, 并将含氮有机物通过氨化作用转化为  $\text{NH}_3\text{-N}$ <sup>[7]</sup>。因此, 低 DO 往往伴随

着高 TP 和高  $\text{NH}_3\text{-N}$ 。

塘门浜、十字河水体的水质参数间构成了一个相对复杂的相互作用网络。水温是驱动有机物和氮循环的关键物理因子;  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP、TN 等营养盐指标间的强关联性揭示了共同的外源输入或内源释放风险; 而溶解氧与多项指标的负相关关系则凸显了水体耗氧过程对整体水质的重要影响。

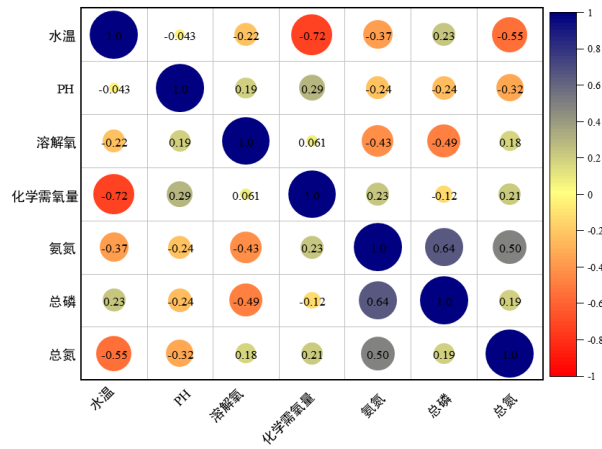


图 4 塘门浜、十字河水质指标相关性图

#### 3.2 水质主导因子识别——主成分分析

PCA 是一种常用的多元统计分析方法, 其核心思想把原来多个变量划为少数几个综合指标 (即主成分) 的一种统计分析方法<sup>[8]</sup>。塘门浜、十字河水体的水质影响因子是复杂多样的, 由于本研究涉及的水质指标较多, 因此采用 PCA 分析方法。

##### 3.2.1 可行性检验

在进行主成分分析之前, 需要对数据进行 KMO (Kaiser-Meyer-Olkin) 检验和 Bartlett 球形度检验 (Bartlett's test of sphericity)。结果表明 (表 1), KMO 值为 0.504, 同时, Bartlett 检验达到极显著水平 ( $p < 0.001$ ), 该数据适合进行主成分分析。

表 1 KMO 和 Bartlett 检验结果

KMO 和 Bartlett 检验		
KMO 检验结果		0.504
Bartlett 检验	近似卡方	83.121
	显著性	0.0001

##### 3.2.2 总方差解释

应用 SPSS 统计软件得到降维后各主成分的特征值、方差贡献率和累积方差贡献率 (表 2)。第一主成分 (PC1) 的特征值为 2.394, 方差贡献率的 34.200%; 第二主成分 (PC2) 的特征值为 2.156, 方差贡献率为 30.796%; 第三主成分 (PC3) 的特征值为 1.172, 方差贡献率为 16.742%。

三个主成分的累积方差贡献率达到了 81.739%。表明本次主成分分析实现了极佳的降维效果,极大地简化了后续分析的复杂性。

表 2 特征值及方差贡献率

因子	旋转前			旋转后		
	特征值	方差%	累积%	特征值	方差%	累积 %
1	2.394	34.200	34.200	2.394	34.200	34.200
2	2.156	30.796	64.997	2.156	30.796	64.997
3	1.172	16.742	81.739	1.172	16.742	81.739
4	0.640	9.139	90.877			
5	0.320	4.565	95.442			
6	0.225	3.207	98.649			
7	0.095	1.351	100.000			

### 3.2.3 主成分载荷与因子解释

成分矩阵(表 3)可以体现每个原始变量与主成分之间的相关关系,绝对值越大(越接近 1 或-1),说明关系越紧密。据此可以对主成分的物理意义进行解释。

表 3 成分矩阵

变量	PC1	PC2	PC3
NH <sub>3</sub> -N	0.894	-0.227	0.163
TN	0.736	0.244	-0.487
T	-0.596	-0.74	-0.007
COD	0.434	0.671	0.454
TP	0.542	-0.668	0.174
DO	-0.306	0.651	-0.485
PH	-0.349	0.421	0.661

PC1 在 NH<sub>3</sub>-N (0.894) 和 TN (0.736) 上有显著正载荷,同时在水温 (-0.596) 上有较高的负载荷。高 NH<sub>3</sub>-N 和 TN 通常与生活污水、农业径流等有机污染有关,水温升高提高微生物活性,从而加快氮循环过程。

PC2 在水温 (-0.740) 和 COD (0.671)、DO (0.651) 上载荷显著。其中水温为显著负相关, COD 和 DO 为正相关。揭示温度升高后水体耗氧有机物降解速率加快、DO 消耗增加。总磷 TP (-0.668) 负载为负,表明磷可能与有机颗粒共沉降,呈现稀释效应。

PC3 在 PH (0.661) 上有较高的正载荷,在 TN (-0.487) 和 DO (-0.485) 上有较高的负载荷。这主要反映了水体的酸碱平衡特征。pH 值与 DO、TN 的负相关可能指示了水体中藻类光合作用或硝化/反硝化过程对水体酸碱度和溶氧量的影响。

通过主成分分析,将 7 个水质指标简化为 3 个相互独立的主成分,累计贡献率达 81.739%。这三者不仅验

证了水质参数之间存在的复杂内在联系,也为后续的水质评价、分类和污染源解析提供了明确的综合指标和科学依据。分析表明,氮污染是影响该水体的首要因素,而水温和 pH 值则在调节水体的化学和生物状态中扮演着关键角色。

## 4 重金属污染特征分析

对水体中 Pb、Cd、Cr、Cu、Zn、As 及 Hg 的监测结果表明(图 5),除 Hg 外,其余重金属的季度平均浓度均远低于《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002) III 类水标准限值<sup>[1]</sup>。其中, Hg 在三个季度的浓度 (0.00258~0.00532 mg/L) 显著超过其标准限值 (0.0001 mg/L),表明汞污染是该水域一个突出的环境风险。

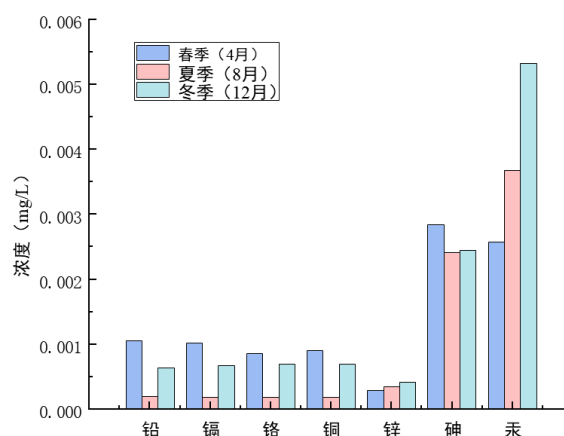


图 5 水体重金属浓度分布图

## 5 结论

本研究通过对塘门浜、十字河 2024—2025 年不同水期的水质监测与多元统计分析,得出以下结论。研究水体整体污染严重,呈现典型的有机污染与富营养化特征。DO 在春季出现极端低值, COD、NH<sub>3</sub>-N、TN 在春、冬季浓度较高, TP 则在夏季达到峰值,反映了不同污染源与季节驱动过程的差异。相关性分析表明,水温与 COD、TN 呈显著负相关, NH<sub>3</sub>-N 与 TP、TN 具有较强正相关, DO 与多项营养盐呈负相关,揭示了污染物之间存在复杂的协同与转化关系。主成分分析提取出三个主导因子,累计贡献率达 81.739%,分析结果表明氮污染是该水域首要问题,水温和 pH 在调控水质状态中具有关键作用。重金属污染方面,除 Hg 在三个季度均显著超标外,其余重金属浓度均低于 III 类水标准限值,表明汞污染是当前值得关注的风险。

综上,塘门浜、十字河水质受多重污染源与季节性环境过程的共同影响,治理策略应重点控制氮、磷输入,加强夏季面源污染防治与春季缺氧调控,并关注 Hg 等重

属的潜在生态风险。

#### [参考文献]

- [1]国家环境保护总局,国家质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [2]劳齐斌,卞培旺,曾珍,等.湖光岩玛珉湖溶解氧的时空分布特征及其影响因素[J].矿物岩石地球化学通报,2018,37(4):714-723.
- [3]蒋友,朱奇锋,陈婷,等.藻类代谢对水体 pH 值及溶解氧影响的分析[J].浙江水利科技,2025,53(4):41-47.
- [4]张肖静,位登辉,陈召,等.城市河道有机物、氮、硫污染物的分布规律研究[J].轻工学报,2021,36(1):51-57.
- [5]刘明辉,丁陈龙,朱敏,等.温度及外源  $\text{CaCO}_3$  对砂滤微生物氨氮降解的影响特性[J].中国环境科学,2025,43(9):4896-4904.
- [6]左韧,李海波,刘芑,等.大冶湖沉积物-上覆水界面氮磷交换通量的冬夏对比[J].环境工程学报,2024,18(6):1520-1530.
- [7]胡梦辰,朱滔,蒋青松,等.滇池溶解氧浓度变化的氮磷循环响应模拟研究[J].北京大学学报(自然科学版),2021,57(3):481-488.
- [8]胡冰涛,陈玉东.基于聚类分析和主成分分析的长江下游稻田氮磷监测指标筛选[J].生态与农村环境学报,2020,36(11):1495-1504.

作者简介:葛建伟(1987.8—),男,助理工程师,常州百特环保科技有限公司,研究方向为环境监测与治理;  
\*通讯作者:黄柯(1999.1—)女,硕士,毕业于常州大学,研究方向为土壤与水环境污染治理。