

## 1992~2023 年白洋淀水质变化特征及影响因素分析\*

李琳琳<sup>1,2</sup>, 张瑞<sup>3,4</sup>, 苗飞虎<sup>5</sup>, 程兵芬<sup>3,4\*\*</sup>, 张玥<sup>1,2</sup>, 王永强<sup>1,2</sup>, 卢少勇<sup>1,2</sup>, 石祖泰<sup>1,2</sup>

- (1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012;
- (2. 中国环境科学研究院湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室, 北京 100012;
- (3. 华北科技学院应急技术与管理学院, 廊坊 065201;
- (4. 河北省多场景水害链生事故智慧应急技术创新中心, 廊坊 065201;
- (5. 北京正和恒基滨水生态环境治理股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 研究基于白洋淀 5 个站点近 30 年水质监测数据, 运用多源统计分析方法, 结合文献调研, 系统揭示了白洋淀水质演变趋势、影响因素和控制对策。结果表明, ①2005 和 2015 年前后为近 30 年白洋淀水质较差时段; 2022~2023 年淀区稳定在 III 类, 2023 年水质为近 30 年最好水平, 淀区主要污染指标为 COD 和总磷。大规模生态补水、大力开展水环境综合治理和生态修复是近年白洋淀水质大幅改善的主要原因。②Mann-Kendall 趋势检验结果显示 2009~2023 年淀区 COD、TN 和 TP 均呈明显下降趋势, 年变化速率分别为 $-0.611\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.05$ )、 $-0.21\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.01$ ) 和 $-0.013\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.05$ )。③各站点水质指标空间上聚为 3 类, 西部的南刘庄站点水质最差; 富营养化指标可聚为 2 类, 呈现出北部站点高于南部站点的特征; 近年白洋淀整体为磷限制特征, 但为氮污染型湖泊。④入淀水量和水位是近年影响白洋淀水质的关键因素; 分区域看, 西部南刘庄站点应重点关注外源输入, 北部站点应重点降低总氮浓度, 南部站点重点治理化学需氧量和总磷污染。下一步, 应进一步结合多站点多要素观测数据, 应用水动力-水质耦合模型进行模拟溯源分析, 多方位保障淀区水质综合决策, 为生态补水和底泥等内源污染控制和流域协同污染治理提供支撑。

**关键词:** 白洋淀; 水质; 影响因素; 疫情; 富营养化; Mann-Kendall; PCA

## Analysis of the Evolution Characteristics and Influencing Factors of Water Quality in Baiyangdian lake

Li Linlin<sup>1,2</sup>, ZHANG Rui<sup>3</sup>, MIAO Feihu<sup>5</sup>, CHENG Bingfen<sup>3,4\*\*</sup>, ZHANG Yue<sup>1,2</sup>, WANG Yongqiang<sup>1,2</sup>, Lu Shaoyong<sup>1,2</sup>, SHI

Zuqin<sup>1,2</sup>

- (1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;
2. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China;
3. College of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science & Technology, Langfang, 065201, China
4. Multi-scene water chain accident wisdom emergency technology innovation center of Hebei, Langfang, 065201, China.
5. Beijing Zhenghe Hengji Waterfront Ecological Environment Management Co., Ltd., Beijing, China, 100085)

**Abstract:** Based on the monitoring data of water quality at 5 stations in Baiyangdian lake in recent 30 years, this study

\*2024-11-18 收稿; 2025-04-08 收修改稿。

中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2023YSKY-06; 2024YSKY-16)、中央高校基本科研业务费专项基金项目 (3142021002, 3142023017)、河北省廊坊市科技支撑计划项目 (2024013020, 2024013033, 2023013101)、长江生态环境保护修复岳阳驻点跟踪研究项目 (二期) (2022-LHYJ-02-0207-02) 联合资助。

\*\*通信作者, E-mail: bingfenlove@126.com

comprehensively applied multi-source statistical analysis methods and literature research to systematically reveal the trend of water quality evolution, influencing factors, and control measures in Baiyangdian lake. Results showed that: ①The year of 2005 and 2015 were the periods of poor water quality in Baiyangdian lake over the past 30 years. From 2022 to 2023, the water quality of the lake area remained stable at Class III, and by 2023, the water quality was at its best level over 30 years. The main pollution indicators were COD and TP in recent years. The large-scale ecological water replenishment, vigorous comprehensive water environment management, and ecological restoration are the main reasons for the significant improvement in water quality in Baiyangdian Lake in recent years. ② From 2009 to 2023, the COD, TN, and TP concentrations in the Dianqu area were in significant downward trends, with annual decrease rate of  $0.611\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.01$ ),  $0.21\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.01$ ), and  $0.013\text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.05$ ), respectively. ③The water quality indicators across various monitoring stations in Baiyangdian Lake can be spatially categorized into three groups, with the Nanliuzhuang station in the western region showing the poorest water quality. Eutrophication indicators are further classified into two categories, with northern sites exhibiting a higher nitrogen-to-phosphorus ratio compared to the southern sites. Over recent years, Baiyangdian Lake has become predominantly phosphorus-limited, despite being a nitrogen-polluted system overall. ④The inflow and water level are the key factors affecting the water quality of Baiyangdian Lake in recent years. From a regional perspective, targeted management strategies are necessary for different areas of the lake. In the western region, particularly at the Nanliuzhuang site, efforts should focus on controlling external nutrient inputs. In the northern sites, priority should be given to reducing total nitrogen concentrations, while in the southern sites, the main focus should be on controlling chemical oxygen demand and total phosphorus levels. In the next step, the multi-site and multi-factor observation data should be further combined with the application of hydrodynamic-water quality coupling model for simulation and traceability analysis, which can guarantee the comprehensive decision-making of water quality in Baiyangdian Lake, and provide support for the ecological water replenishment and the control of endogenous pollution such as substrate and humus, as well as the synergistic pollution management in the watershed.

**Key words:** Baiyangdian Lake; Water quality; Influencing factors; Epidemic; Eutrophication; Mann-Kendall ;PCA

湖泊作为重要的水生系统,对促进地区经济发展与改善生态环境具有重要意义。如湖泊可以为人类社会发展提供饮用水、渔业与旅游业资源,具有调节气候、净化环境、维护生态与生物多样性等多种生态服务功能<sup>[1-2]</sup>。尽管近年我国许多地区的湖泊水环境质量虽已有所改善,但仍呈现富营养化状态。许多因素可能导致不同时空尺度下湖泊水环境质量的变化,如点源和非点源输入、气候、水动力条件和大气沉降等因素;受这些因素的影响,不同时空尺度下湖泊水质变化的驱动因素较为复杂<sup>[3-4]</sup>。

白洋淀是华北平原最大的湿地系统,为浅水型、草型湖泊。白洋淀不仅为人民生产生活提供各种资源,还具有行洪滞沥、灌溉等多种生态功能,可调节当地气候,改善周边环境<sup>[5]</sup>。与世界各地干旱或半干旱地区的许多湖泊一样,这个浅水湖的水质容易受到高强度人类活动和气候变化的双重影响,必须从上游水库和跨流域调水设施输送足够的水,以维持湿地生态系统的健康发展<sup>[6]</sup>。自 1988 年白洋淀恢复蓄水有监测记录以来,它一直面临和遭遇着水源不足、湿地萎缩、水污染、泥沙淤积、生物多样性减少等问题<sup>[7]</sup>。2017 年党中央、国务院设立雄安新区以来,白洋淀作为雄安新区的生态支撑,以淀兴城、城淀共荣”成为雄安新区建设的一个重点,为了“把白洋淀修复好、保护好”,国家和地方政府也采取了一系列举措,近年白洋淀水质显著改善,“华北明珠”重现光彩。

白洋淀是研究自然变化和人为因素叠加导致的水质变化的理想场所。当前,国内外针对白洋淀水质的研究,主要集中在白洋淀局部水环境质量分析及影响因素、生态需水核算及评价、生物多样性分析与水环境状况与治理保护对策上,采用的方法主要为指数计算、统计评价等,有限的研究也涉及 WASP、MIKE 等水质模型模拟、遥感反演等,这些研究时段绝大多数集中在 2020 年之前<sup>[8]</sup>。自 2017 年白洋淀开展综合治理以来,缺少对整个淀区较长时间序列、整体和局部差异化水质的综合分析和评估,同时采用多源时间序列分析方法对主要水质指标变化趋势及溯源分析仍有限<sup>[9]</sup>。本研究基于多年白洋淀 5 站点水质监测数据,综合运用 Mann-Kendall 统计检验、时空聚类分析、PCA 主成分分析和相关性统计等分析方法,结合文献调研,系统揭示了白洋淀流域水质演变趋势、影响因素和疫情管控等特殊事件对水质的影响;综合考虑了水质时间序列的长度、点位分布的空间差异、影响因素的多样性、非线性和复杂性,以期对白洋淀“十五五”水质改善工作提供技术支撑,也可为国内其他湖泊或河流开展水质研究与评价提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与监测数据

白洋淀位于华北平原（北纬 38° 44′ -38° 59′，东经 115° 45′ -116° 07′），是海河流域面积最大的淡水湖。白洋淀地势西高东低，水域面积 336 平方公里，流域面积 31199 平方公里，平蓄水量 3.2 亿立方米，由 143 个较小的湖泊和 3700 多条海沟组成，周围环绕着芦苇台田和 225 个村庄。白洋淀地区属暖温带大陆性季风气候，年平均气温在 7~12° C 之间，年平均降水量为 500mm 左右，以主汛期 7 月下旬至 8 月上旬降水最为集中。白洋淀归雄安新区管辖，是雄安新区总体规划中的重要生态水体。

白洋淀历史水质监测数据包括水温（WT）、pH 值、溶解氧（DO）、化学需氧量（COD）、氨氮（NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N）、总氮（TN）和总磷（TP）等，相关历史监测数据主要来自有关文献，近年水质自动和人工监测数据从国家地表水水质数据发布系统（<http://waterpub.cnemc.cn:10001/>）和上海青悦数据中心（[https://data.epmap.org/product/province\\_water](https://data.epmap.org/product/province_water)）获得。人工监测每月一次，自动监测每 4 小时一次一组，均按照《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)要求进行采样分析及评价。本研究收集分析了淀区内 5 个监测点位烧车淀、南刘庄、光淀张庄、圈头和采蒲台（具体分布见图 1）水质监测数据，5 个站点数据的平均值用来评估分析淀区水质情况。收集的水质指标监测数据主要为，1992~2023 年淀区各项水质指标年均值，2009~2023 年淀区各站点水质指标年均值，2019~2023 年淀区各站点水质指标月均值和小时值。白洋淀气温（T）、降水量（Precip）等气象数据来自国家气象信息中心网站（<http://data.cma.cn/>），河流化学需氧量、总氮、总磷等水体污染物排放量数据来自河北省统计年鉴（<http://tjj.hebei.gov.cn/hbstjj/sj/sjcx/tjnj/>）。白洋淀入淀水量(WIL)、水位(WL)等水文数据从河北省水利厅发布的历年水资源公报（<http://slt.hebei.gov.cn>）获取。按照水文特征统计惯例，5~9 月划分为丰水期、12~2 月为枯水期。

白洋淀承接着大清河水系潞龙河、孝义河、唐河、瀑河、府河、萍河、漕河、白沟引河等八条河流来水，其中一些河流干涸或停止流动，如萍河；仅有赵王新河从白洋淀流出（图 1）。白洋淀流域除了府河和孝义河常年有水外，其余大部分河道已经变成季节性干涸或持续性干涸。府河主要承接上游保定市区和清苑区部分再生水，孝义河主要承接上游蠡县和高阳县再生水。

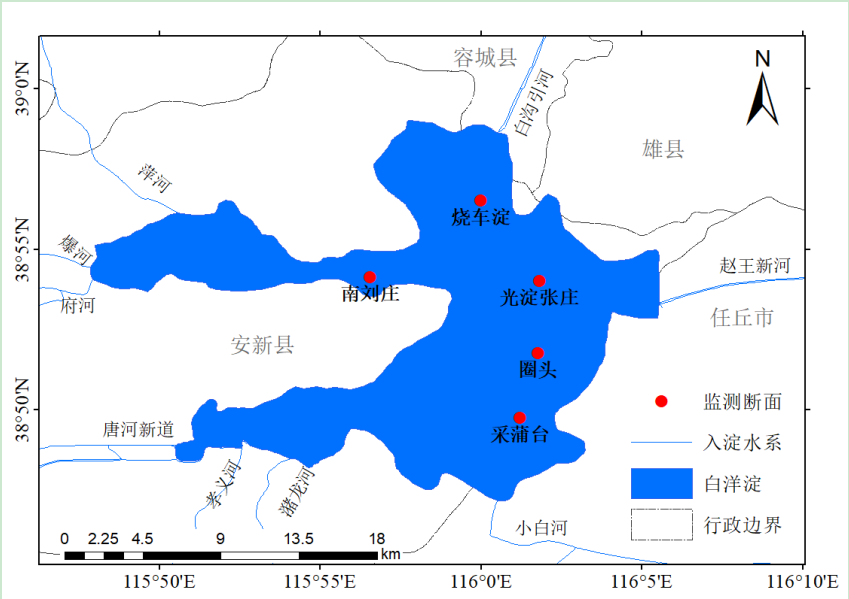


图 1 白洋淀淀区水质监测断面位置和分布

Fig.1 Distribution of water quality monitoring sites in Baiyangdian Lake

### 1.2 研究方法

水质指标变化具有很强的非线性特征，且影响水环境质量的因子众多，如采用简单的数理统计并不能全面反映水污染与环境因子之间的特征、响应和规律<sup>[10]</sup>。本研究结合趋势统计定量分析、空间聚类、相关性统计及因子分析等统计方法，全面评价白洋淀地表水水质状况及其成因。

#### 1.2.1 Mann-Kendall趋势检验

Mann-Kendall(MK)趋势检验法是一种非参数统计方法，最初由曼(H.B.Mann)和肯德尔(M.G.Kendall)提出并发展，主要用于检测时间序列数据上升和下降的变化趋势<sup>[11]</sup>。该方法不需要样本遵从特定的分布，适用性强，计算较为方便。主要原理

为：假设时间序列数据即某一水质指标  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  是  $n$  个独立的、随机观测值，通过构建统计变量  $S$ ：

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (\text{式 1})$$

进一步比较所有观测值的大小 ( $X_i - X_j < = \text{或} > 0$ )，符号函数  $S$  即  $\text{sign}(X_i - X_j)$  计为 -1、0 或 1。当  $S > 0$ 、 $= 0$ 、 $< 0$

时，进一步计算 MK 统计量  $Z$ ：

$$\begin{cases} Z = (S-1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} (S > 0) \\ Z = 0 (S = 0) \\ Z = (S+1) / \sqrt{n(n-1)(2n+5)/18} (S < 0) \end{cases} \quad (\text{式 2})$$

针对 MK 统计量  $Z$ ， $|Z| > 1.28$ 、 $|Z| > 1.64$ 、 $|Z| > 2.32$  分别表示某一水质指标时间变化趋势显著，且分别通过了置信度 ( $\alpha$ ) 0.1、0.05、0.01 显著性检验。

### 1.2.2 时空聚类分析

研究采用 K-means 非层次聚类方法进行某一水质指标的空间聚类分析，K-means 算法由美国 Stuart Lloyd 1957 年提出并于 1982 年正式发表<sup>[12]</sup>，而后经过数十年发展并广泛应用完善。K-means 算法主要通过重复计算空间数据的聚类中心并降低聚类中心个数实现。在 K-means 空间聚类的基础上，进一步采用双向聚类方法进行水质指标的时空聚类分析。与 K-means 空间聚类方法有所不同，双向聚类的主要原理是将构建时空序列相似性矩阵，通过归一化处理并进行降维分析，最后提取  $K$  个特征值进行聚类分析。双向聚类考虑更加全面，使矩阵内部各要素尽可能相似，实现行和列同时聚类，更具有综合性和全面性，更能体现流域水质指标的空间异质性。

### 1.2.3 PCA 主成分分析

为综合分析白洋淀不同淀区流域水质指标的影响因素，本研究基于主成分分析识别其识别主要的污染物和关键污染因子。主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 方法通过正交变换和数据映射、降维分析，将线性相关变量转换为线性无关变量 (主成分)，同时计算数据方差 (Variance)。Hotelling 等<sup>[13]</sup>对主成分的发展做出了重要贡献，主成分分析用较少综合变量保留尽可能多的原始信息，同时简化了计算过程。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水质时间变化趋势

依据《地表水环境质量标准》和《地表水环境质量评价办法 (试行)》，结合监测结果与历史文献数据统计分析可知，近 30 年淀区水质呈现明显波动性特征，其中 2005 和 2015 年前后为近三十年水质较差时段；如王欢欢等<sup>[14]</sup>研究指出 1988~2016 年期间，淀区水质 2015 年最差，水质综合污染指数为 2.229，1992 年水质最好，水质综合污染指数为 0.833。张婷等<sup>[15]</sup>研究指出 2005~2006 年淀区连续两年水质劣 V 类，为 1973~2007 年间水质最差时段。段茂庆等<sup>[16]</sup>研究指出，2016~2020 年淀区水质整体逐年改善，主要水质指标浓度 (年均值) 呈逐年下降趋势。近年《河北省生态环境状况公报》<sup>[17]</sup>显示白洋淀水体中主要污染物为 COD 和 TP，2017 年淀区水质劣 V 类、2018 年 V 类、2019 年 IV 类，2020 年全域 IV 类、局部 III 类，2021 年淀区全部达到 III 类及以上标准，2022~2023 年稳定在 III 类，2023 年淀区水质为 30 多年以来最好水平，稳居全国良好湖泊行列。徐蓉桢等<sup>[18]</sup>发现 COD、TP 和 TN 是影响白洋淀水质的关键因素，且近年“引黄济淀”工程、上游水库等大规模生态补水是白洋淀水质得到很大程度改善的主要原因。

采样期间，1992~2023 年淀区主要水质指标 COD、DO、TN、TP 和氮磷比 (N/P) 分别为  $(21.1 \pm 7.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(8.0 \pm 1.4) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(3.24 \pm 1.27) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.225 \pm 0.116) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(18.95 \pm 11.79)$ ；2021~2023 年淀区 COD、DO、TN、TP 和 N/P 分别为淀区 COD、DO、TN、TP 和 N/P 分别为  $(17.1 \pm 1.5) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(8.0 \pm 0.2) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(1.55 \pm 0.40) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.034 \pm 0.004) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(44.61 \pm 7.54)$ 。与 1992 年相比，2023 年淀区 COD、DO、TN、TP 和 N/P 累计变化 79.9%、16.7%、2.6%、-73.4%、285.6%；其中淀区 COD 和 N/P 呈现明显上升趋势，年变化速率分别为  $0.4 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.01$ ) 和  $0.642 \text{ a}^{-1}$

( $\alpha=0.01$ )，TP 呈现明显的下降趋势，年变化速率分别为 $-0.008\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.01$ ) (见图 2 和表 1)；TN 和 DO 年变化趋势不明显。2009~2023 年，淀区 COD 呈现明显下降趋势，年变化速率分别为 $-0.611\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.05$ )。从富营养化指标结果看，2009~2023 年淀区 TN、TP 和 N/P 分别为 $(3.10 \pm 1.34) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.174 \pm 0.099) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(23.73 \pm 12.85)$ ，TN、TP 和氮磷比累计变化-59.5%、-88.6%、255.2%，其中 TN 和 TP 均呈现明显下降趋势，年变化速率分别为 $-0.21\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.01$ ) 和 $-0.013 \text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.05$ )，近 15 年 N/P 年变化趋势不明显。分站点看，15 年来 5 个站点 TP 浓度 (年均值) 均呈明显下降趋势，TN 和氮磷比各站点变化趋势不一致。

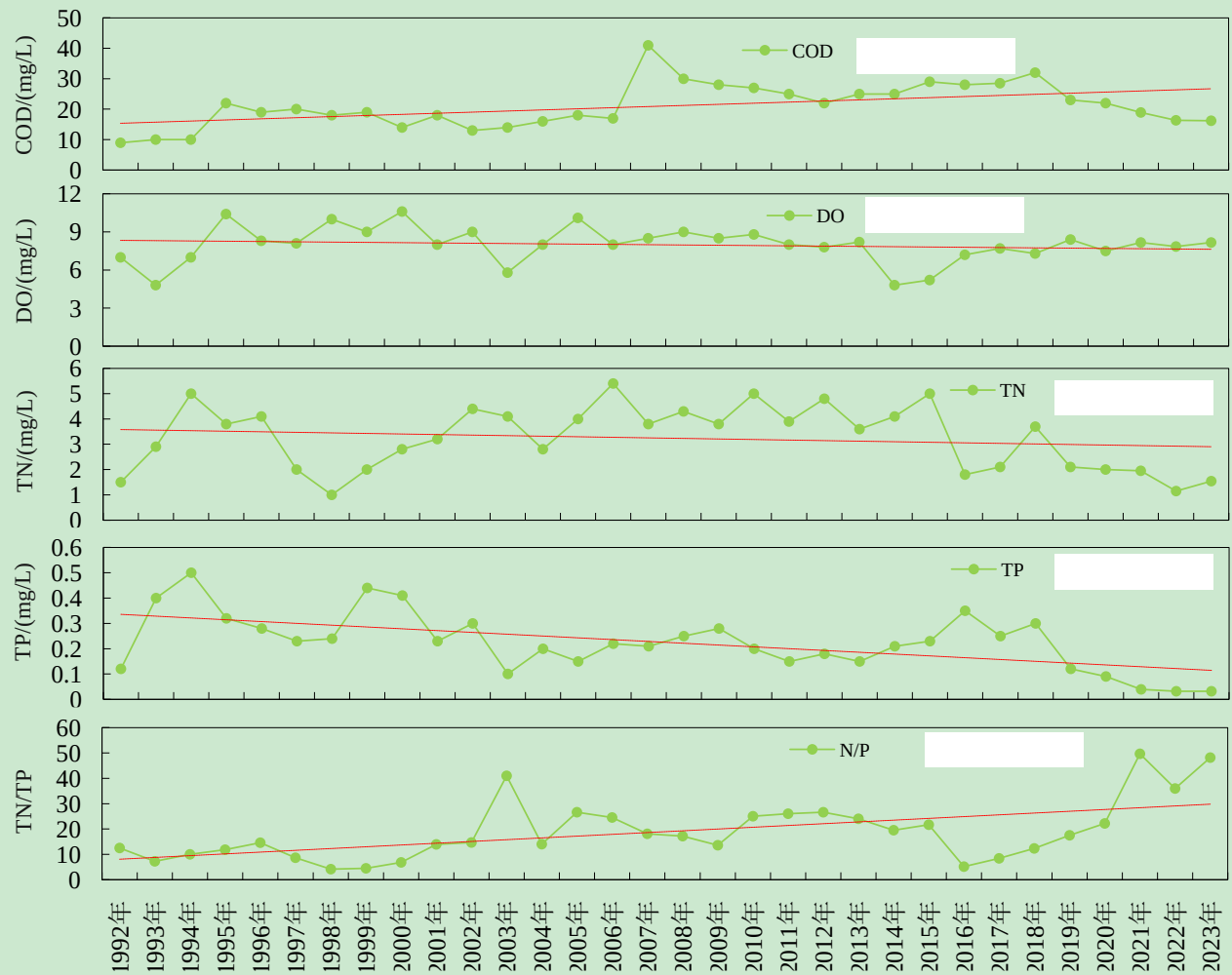


图 2 1992~2023 年白洋淀淀区主要水质指标年际变化

Fig.2 Variations of water quality indicators in Baiyangdian Lake from 1992 to 2023

2.2 水质空间演变分析

从各站点水质指标空间差异分布上看 (表 2)，2019~2023 年 TN 浓度由大到小排序为：烧车淀>南刘庄>光淀张庄>圈头>采蒲台，年均浓度在  $0.85 \sim 2.59 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  范围波动；TP 浓度由大到小排序为：南刘庄>光淀张庄>圈头>烧车淀>采蒲台，年均浓度在  $0.025 \sim 0.054 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  范围波动；N/P 值由大到小排序为：烧车淀>南刘庄>光淀张庄>采蒲台>圈头，比值在  $33.76 \sim 102.49\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  范围波动，北部站点 N/P 值明显高于南部站点。枯水期 TN 浓度和 N/P 均高于丰水期，但 TP 总体上呈现枯水期低于丰水期的特征 (圈头站点除外)。孙添伟等<sup>[19]</sup>研究发现淀区 TP 与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度主要与入淀河流-府河来水水质的影响密切相关，其它水质指标如 COD 与 TN 等受来水水质影响小，主要与淀区内源污染源释放有关。

研究选取不同 k 值，进行重复训练，根据簇内误差 (SSE) 获取最适合 k 值，基于肘部法则，发现水质指标和富营养化指标最优 k 值分别为 3 和 2。从各站点水质指标空间聚类上看 (图 3)，5 个站点总体可分为三类，第一类是淀区西北部的南刘庄站点，第二类是淀区北部的烧车淀和光淀张庄 2 个站点，第三类是淀区南部的采蒲台和圈头 2 个站点。从富营养化指标聚类结果上看，5 个站点总体可以聚为 2 类，第一类是偏北部的南刘庄和烧车淀 2 个站点南刘庄站水质污染最重，剩下的 3 个站点可以聚类为第二类，呈现出北部站点高于南部站点的富营养化特征。陈靓等<sup>[20]</sup>指出 1998~2016 年入淀河流府河携带的污染物以入口为中心向东部和南部扩散，导致水体污染物浓度呈现出西部>北部>南部站点的特征；孔凡青等<sup>[21]</sup>研究发现



2022 年淀区水质状况整体分布为东、北部区域优于西、南部区域，这可能与淀河流主要位于白洋淀的西、南部有关；佟霁坤等<sup>[8]</sup>研究指出，南刘庄站点受府河水水质影响较大导致氮磷污染远高于其它点位，圈头水质易受水乡居民活动等影响，白洋淀出口附近枣林庄位受外源污染最小，湖心区的烧车淀、光淀张庄、采蒲台等站点水质差异较小。Liu et al.<sup>[9]</sup>指出淀区西部站点水质差于东部站点，北部站点差于南部站点。本研究水质空间聚类结果与这些研究基本一致，聚类结果与实际情况较为符合，统计结果差异主要与监测时段不一致、指标数量有关。

表 1 白洋淀各监测断面主要水质指标 MK 趋势检验

| Table 1 The Mann-Kendall trend tests of the main water quality indicators in Baiyangdian Lake at different monitoring sections |             |      |    |        |        |         |               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|------|----|--------|--------|---------|---------------|
| 站点                                                                                                                             | 时间段         | 水质指标 | N  | Z      | 速率     | 变化趋势    | $\alpha$ 置信水平 |
| 淀区                                                                                                                             | 1992~2023 年 | COD  | 32 | 2.433  | 0.400  | 上升趋势    | ***           |
|                                                                                                                                | 1992~2023 年 | DO   | 32 | -1.151 | -0.026 | 变化趋势不明显 | -             |
|                                                                                                                                | 1992~2023 年 | TN   | 32 | -0.892 | -0.024 | 变化趋势不明显 | -             |
|                                                                                                                                | 1992~2023 年 | TP   | 32 | -3.227 | -0.008 | 下降趋势    | ***           |
|                                                                                                                                | 1992~2023 年 | N/P  | 32 | 3.081  | 0.642  | 上升趋势    | ***           |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TN   | 15 | -3.068 | -0.212 | 下降趋势    | ***           |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TP   | 15 | -2.029 | -0.013 | 下降趋势    | **            |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | N/P  | 15 | 0.791  | 0.927  | 变化趋势不明显 | -             |
| 南刘庄                                                                                                                            | 2009~2023 年 | COD  | 15 | -1.930 | -0.611 | 下降趋势    | **            |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TN   | 15 | -4.206 | -1.667 | 下降趋势    | ***           |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TP   | 15 | -3.860 | -0.086 | 下降趋势    | ***           |
| 烧车淀                                                                                                                            | 2009~2023 年 | N/P  | 15 | 2.029  | 1.213  | 上升趋势    | **            |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TN   | 15 | 0.000  | 0.000  | 变化趋势不明显 | -             |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TP   | 15 | -2.425 | -0.003 | 下降趋势    | ***           |
| 光淀张庄                                                                                                                           | 2009~2023 年 | N/P  | 15 | 2.079  | 3.333  | 上升趋势    | **            |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TN   | 15 | -0.495 | -0.019 | 变化趋势不明显 | -             |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TP   | 15 | -1.336 | -0.001 | 变化趋势不明显 | -             |
| 圈头                                                                                                                             | 2009~2023 年 | N/P  | 15 | 0.495  | 0.471  | 变化趋势不明显 | -             |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TN   | 15 | -3.514 | -0.087 | 下降趋势    | ***           |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TP   | 15 | -1.831 | -0.003 | 下降趋势    | **            |
| 采蒲台                                                                                                                            | 2009~2023 年 | N/P  | 15 | -0.891 | -0.694 | 变化趋势不明显 | -             |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TN   | 15 | -2.969 | -0.073 | 下降趋势    | ***           |
|                                                                                                                                | 2009~2023 年 | TP   | 15 | -1.782 | -0.002 | 下降趋势    | **            |
| 淀区                                                                                                                             | 2009~2023 年 | N/P  | 15 | -1.188 | -0.759 | 变化趋势不明显 | -             |

注：\*、\*\*、\*\*\*分别表示通过 $\alpha=0.1$ 、0.05、0.01显著性检验

表 2 2019~2023 年不同时期白洋淀各监测断面 TP、TN 及 N/P 统计

Table 2 Statistics of total phosphorus, total nitrogen, and nitrogen phosphorus ratio in monitoring sections of Baiyangdian Lake during different periods from 2019 to 2023

| 站点   | 年均    |      |        | 丰水期   |      |       | 枯水期   |      |        | 枯丰差    |      |        |
|------|-------|------|--------|-------|------|-------|-------|------|--------|--------|------|--------|
|      | TP    | TN   | N/P    | TP    | TN   | N/P   | TP    | TN   | N/P    | TP     | TN   | N/P    |
| 南刘庄  | 0.054 | 2.53 | 61.70  | 0.085 | 1.20 | 14.77 | 0.034 | 3.94 | 135.69 | -0.050 | 2.75 | 120.92 |
| 烧车淀  | 0.026 | 2.59 | 102.49 | 0.028 | 1.73 | 60.47 | 0.027 | 3.64 | 146.96 | -0.001 | 1.91 | 86.49  |
| 光淀张庄 | 0.031 | 1.57 | 59.98  | 0.040 | 1.24 | 34.19 | 0.032 | 2.47 | 87.15  | -0.008 | 1.23 | 52.96  |
| 圈头   | 0.030 | 0.89 | 33.76  | 0.034 | 0.71 | 21.72 | 0.037 | 1.14 | 35.96  | 0.004  | 0.44 | 14.24  |
| 采蒲台  | 0.025 | 0.85 | 57.46  | 0.037 | 0.77 | 23.01 | 0.016 | 0.89 | 83.80  | -0.021 | 0.12 | 60.79  |
| 淀区   | 0.033 | 1.69 | 63.08  | 0.045 | 1.13 | 30.83 | 0.029 | 2.41 | 97.91  | -0.015 | 1.29 | 67.08  |

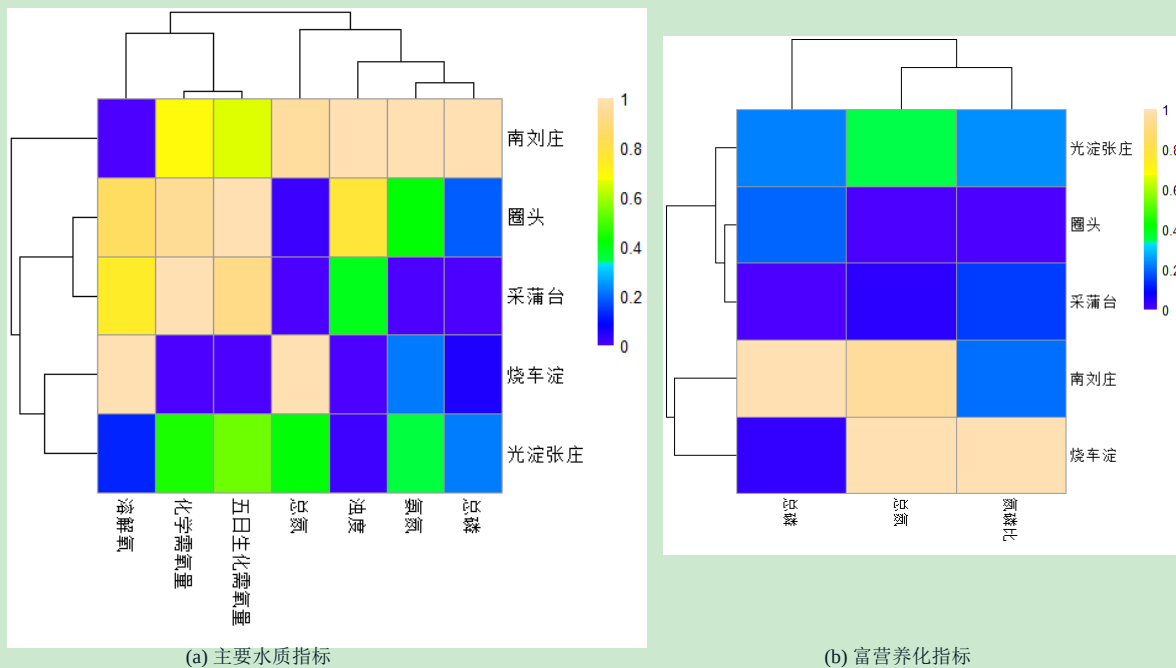


图3 2019~2023年白洋淀各监测断面及主要水质指标聚类分析

Fig.3 Cluster analysis of monitoring sections and main water quality indicators in Baiyangdian Lake from 2019 to 2023

### 2.3 水质富营养化分析

按照《白洋淀生态环境治理和保护规划》要求，近年白洋淀水位稳定保持在 6.5~7.0m，每年接收生态补水达 3~4 亿立方米。2009~2018 年，白洋淀为轻度富营养状态，2019~2023 年降至中营养状态，近 5 年富营养状态呈显著下降的趋势（图 4）。研究进一步采用三种统计方法计算白洋淀藻类生长氮磷控制概率（表 3）。方法 1 为 Redfield 比值统计， $N/P \geq 16$  时为磷限制； $N/P \leq 16$  时为氮限制<sup>[22]</sup>；方法 2 为 Schanz and Juon 比值统计， $N/P > 20$  时为磷限制， $N/P < 10$  时为氮限制， $10 \leq N/P < 20$  为氮磷共同控制<sup>[23]</sup>；方法 3 为 Guildford and Hecky 比值统计， $N/P \geq 23$  时为磷限制， $N/P < 9$  时为氮限制， $9 \leq N/P < 23$  为氮磷共同控制<sup>[24]</sup>。利用统计方法 1~3，对近 5 年 60 次监测数据分析可知，各站点磷限制的概率分别为 80.0~100.0%、67.5~95.0%、32.5~90%，说明白洋淀整体上以磷限制占主导地位，是氮污染型湖泊。基于不同方法圈头、采蒲台等站点氮磷限制空间差异性较大，这两个站点呈现出一定氮磷双限的趋势。佟霁坤等<sup>[8]</sup>指出淀区站点  $N/P$  呈现出春冬高、夏秋低的特征，即磷限制时段冬、春季高于夏、秋季；季鹏飞<sup>[25]</sup>研究表明湖泊富营养化程度越低， $N/P$  越高，磷对浮游植物生长的限制越明显。下一步，针对白洋淀 TP 限制主导的特征，要结合补水调度、底泥疏浚、优化渔业产业结构等方式针对白洋淀氮进行治理。

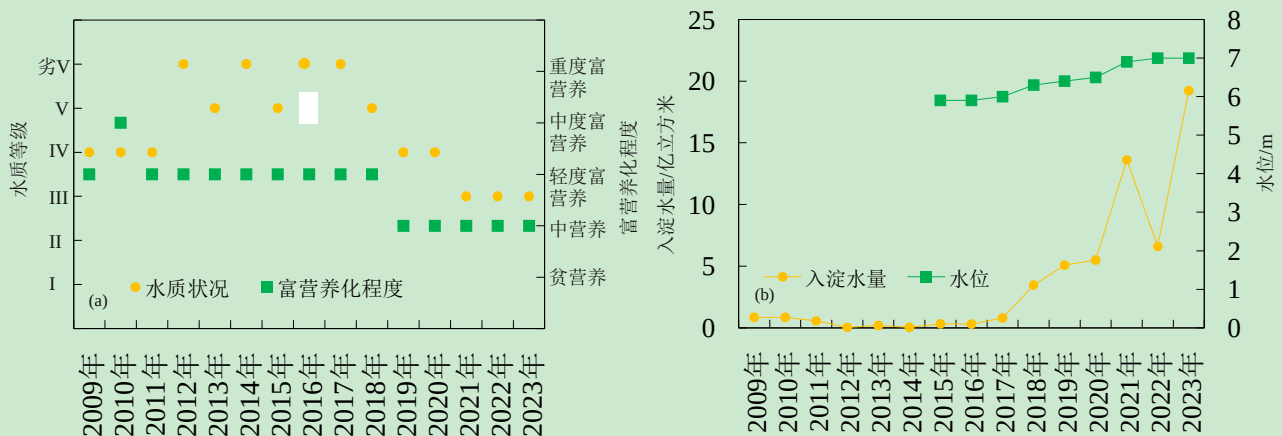


图 4 2009~2023 年白洋淀淀区水质及富营养化情况

Fig.4 The water quality and eutrophication status of Baiyangdian from 2009 to 2023

表 3 2019~2023 年白洋淀水体氮限制、氮磷双限、磷限制的空间差异/%

| 站点   | 统计方法 1 |      |      | 统计方法 2 |      |     | 统计方法 3 |      |     |
|------|--------|------|------|--------|------|-----|--------|------|-----|
|      | 磷限制    | 共同控制 | 氮限制  | 磷限制    | 共同控制 | 氮限制 | 磷限制    | 共同控制 | 氮限制 |
| 南刘庄  | 82.5   | 0.0  | 17.5 | 72.5   | 27.5 | 0.0 | 57.5   | 35.0 | 7.5 |
| 烧车淀  | 100.0  | 0.0  | 0.0  | 95.0   | 5.0  | 0.0 | 90.0   | 10.0 | 0.0 |
| 光淀张庄 | 75.0   | 0.0  | 25.0 | 70.0   | 30.0 | 0.0 | 42.5   | 52.5 | 5.0 |
| 圈头   | 80.0   | 0.0  | 20.0 | 67.5   | 32.5 | 0.0 | 32.5   | 62.5 | 5.0 |
| 采蒲台  | 80.0   | 0.0  | 20.0 | 75.0   | 25.0 | 0.0 | 55.0   | 40.0 | 5.0 |
| 淀区   | 95.0   | 5.0  | 0.0  | 87.5   | 12.5 | 0.0 | 72.5   | 27.5 | 0.0 |

2.4 水质影响因素分析

影响白洋淀各站点水质变化影响因素较为复杂，主要因素有点源和非点源输入、气候与水动力条件、大气沉降、生态补水等。针对水质影响因素的分析，因涉及监测数据共享的问题，本研究未能采用更多水质监测站点的数据进行水质空间变异和溯源分析，因而进一步基于水污染物排放量数据进行补充说明。受研究条件限制未采用水动力和水质模型进行模拟预测分析，研究主要对白洋淀近年水质监测结果进行比对统计分析，同时进一步采用了空间分析如主成分分析法对淀区水质进行差异化分析。

由表 4 可知，2009~2023 年降水量、入淀水量、水位与水质指标具有相关性，气象水文参数中与 COD 相关性较强的是水位，相关系数为-0.897 ( $p<0.05$ )，与 TP 相关性较强的是水位，相关系数为-0.895 ( $p<0.05$ )，与 TN 相关性较强的是入淀水量，相关系数为-0.897 ( $p<0.05$ )；入淀水量、水位与水质指标相关性更强，表明来淀水量、水位是影响淀区水质的主要因素。Wang et al.<sup>[26]</sup>指出，环境水分配对湖泊水位波动有显著影响，因此可将湖泊水位视为水分配的重要指标。徐蓉桢等<sup>[18]</sup>指出在生态补水背景下，白洋淀水中污染物浓度水平显著下降，水质得到明显改善。

表 4 2009~2023 年白洋淀淀区水质指标与影响要素相关性分析统计

Table4 Correlation analysis and statistics of water quality indicators and influencing factors in Baiyangdian from 2009 to 2023

| 参数  |     | 气象要素     |        | 水文参数            |          | 排放量      |         |         | 区域水质            |                |
|-----|-----|----------|--------|-----------------|----------|----------|---------|---------|-----------------|----------------|
|     |     | 年降水量     | 年均温度   | 入淀水量            | 水位       | 全省       | 全省      | 全省      | 全省 I-III 类      | 全省劣 V 类        |
|     |     |          |        |                 |          | COD 排放量  | TN 排放量  | TP 排放量  | 断面比例            | 断面比例           |
| COD | R   | -0.703** | 0.212  | <b>-0.724**</b> | -0.897** | -0.668** | -0.016  | -0.015  | <b>-0.760**</b> | <b>0.679**</b> |
|     | p 值 | 0.003    | 0.449  | <b>0.002</b>    | 0.001    | 0.009    | 0.961   | 0.964   | <b>0.001</b>    | <b>0.005</b>   |
| TN  | R   | -0.470   | -0.145 | <b>-0.614*</b>  | -0.579   | 0.082    | 0.781** | 0.723** | <b>-0.718**</b> | <b>0.734**</b> |
|     | p 值 | 0.077    | 0.605  | <b>0.015</b>    | 0.102    | 0.782    | 0.003   | 0.008   | <b>0.003</b>    | <b>0.002</b>   |
| TP  | R   | -0.660** | 0.255  | <b>-0.708**</b> | -0.895** | -0.685** | -0.081  | -0.092  | <b>-0.701**</b> | <b>0.731**</b> |
|     | p 值 | 0.007    | 0.359  | <b>0.003</b>    | 0.001    | 0.007    | 0.801   | 0.776   | <b>0.004</b>    | <b>0.002</b>   |
| N/P | R   | 0.835**  | -0.169 | <b>0.785**</b>  | 0.874**  | 0.773**  | 0.249   | 0.252   | <b>0.685**</b>  | <b>-0.594*</b> |
|     | p 值 | 0.000    | 0.547  | <b>0.001</b>    | 0.002    | 0.001    | 0.435   | 0.430   | <b>0.005</b>    | <b>0.020</b>   |

注: \*、\*\*分别表示在  $\alpha$  在 0.05,0.01 水平（双侧）上显著相关

2009~2023 年年均温度与淀区水质参数无明显相关性。Han et al.<sup>[27]</sup>认为气候变化影响了淀区水质，降水量的增加稀释了 COD 但增加了湖中的 TP，温度升高增加了氧气含量，同时溶解氧、总磷浓度与年均温度和最低气温呈显著正相关，气温的变化影响了湖水温度，进而影响了生化反应速率。本研究与 Han et al.针对气温对水质的研究结果存在一定的差异可能与时间尺度大小有关，短周期内水温的影响主要体现在季节差异上。水温升高、降雨量变化、极端降雨等显著影响着淀区水质环境，但气候因素如何影响水质环境仍有待深入研究，因为气候变化对湖泊水质的影响往往是非线性的。2017 年以来白洋淀受人工控制影响较大，如水库修建、闸坝、生态补水等，因此气温和降水对水质指标的影响显示出很强的复杂性。

淀区 COD 与 COD 全省排放量呈负相关( $r= -0.668$ ,  $p<0.05$ )，TN 与 TN 全省排放量呈正相关( $r=0.781$ ,  $p<0.05$ )，TP 与 TP 全省排放量无明显相关性。需要说明的是人为排放量因素中，研究没有收集到白洋淀流域水污染物排放量统计数据，进



而采用河北省全省的水污染物排放量进行简要相关分析。从区域水质分布上看,淀区水质指标与全省河流 I-III 类断面比例呈明显负相关,与全省劣 V 类断面比例呈明显正相关,表明淀区水质除了受内源污染影响外更易受到区域较差来水的影响。张婷等<sup>[15]</sup>认为浅水型湖泊更易受到外界环境影响,保定市人口与经济增长对淀区水质影响显著;Liu et al<sup>[9]</sup>指出淀区污染物主要来源于泥沙释放、降雨径流以及芦苇和荷花的分解;Han et al.<sup>[28]</sup>指出淀区东部家禽、水产养殖和分散村庄的生活废水对东部站点水质影响显著。2017 年以来,随着雄安新区设立,白洋淀生态环境治理和保护攻坚战同步打响。从流域治理角度出发,统筹考虑了水量、水质、生态三大要素,除大力实施白洋淀生态补水外,坚持内源治理与外源截污并重,全力推进重点污染源管控,对白洋淀流域实施涉水企业清洁化改造、建设并升级改造现有城镇污水处理厂污水处理能力、加大村庄生活污水治理等措施,扎实推进白洋淀生态环境治理保护,大力开展河道治理工程,清理淀底淤泥、平衡收割芦苇、打捞水草,切实提升河道通蓄水能力,保护生物多样性,在补水、治污、清淤、搬迁等措施共同发力和影响下,白洋淀水质近十年最好<sup>[29]</sup>。

研究进一步基于主成分分析法识别白洋淀不同区域的主要污染物,为了判断主成分分析方法的可行性,对三个区域的水质数据进行 KMO 检验和 Bartlett 检验,整体来看,三个区域的 KMO 值分别为 0.624、0.605 和 0.713,满足因子分析对数据的要求,可进行主成分分析;Bartlett 检测的 F 值小于 0.05,说明三个区域水质均服从正态分布,各因子之间有一定的相关关系,可进行主成分分析。白洋淀西部区域的主成分分析结果显示(图 5),识别出 3 个特征值大于 1 的主要因子,三个因子的方差解释率分别为 48.71%、17.66%和 12.87%;成分 1 中正负负荷量 WT、COD、N/P 绝对值较大,分别为 0.918、0.862、-0.794,表明西部区域有机污染物污染占主导,且受外源输入影响较大。白洋淀北部区域的主成分分析结果显示,识别出 4 个特征值大于 1 的主要因子,三个因子的方差解释率分别为 40.94%、20.06%和 13.71%。成分 1 中正负负荷量 TN、N/P、COD 绝对值较大,分别为-0.908、-0.904、0.861,表明北部区域 TN 污染占主导。白洋淀南部区域的主成分分析结果显示,识别出 3 个特征值大于 1 的主要因子,三个因子的方差解释率分别为 44.53%、14.16%、12.79%和 10.51%。成分 1 中正负负荷量 COD、TP、N/P 绝对值较大,分别为 0.907、0.843、-0.738,表明南部区域 COD、TP 污染占主导。因而,西部南刘庄站点重点关注外源输入,北部站点重点降低 TN 浓度,南部站点重点治理 COD 和 TP 污染。田凯等<sup>[30]</sup>研究指出白洋淀淀区换水周期存在明显的时空间差异,尽管水环境整体状况得到显著改善,但局部水域流通不畅、水体交换较差,光淀村-圈头附近水域是水环境治理的重点;同时淀区水位和入淀河流流量是影响换水周期的重要因素,这与本研究得出的入淀水量和水位是近年影响白洋淀水质的关键因素结果基本一致。

## 2.5 疫情期间水质波动分析

与水质多年变化特征相比,短期水质波动特征和溯源分析可为水质管理策略提供坚实基础。2022 年 3 月,我国经历了一次持续约 3 个月的半封锁疫情,一直持续到 2022 年 5 月底<sup>[31]</sup>。这次疫情只影响了部分省市,没有在全国范围内实施大规模封锁措施,坚持了“动态清零”的总方针,采取严格的隔离和社区管控措施,以应对新冠病毒的传播,特别是奥密克戎变异株的快速传播。同时,查阅相关报道可知,2021 年,白洋淀的生态补水工作从 6 月 7 日开始,至 7 月 9 日顺利结束,补水过程历时 33 天,补水量为 2.21 亿立方米;2022 年,白洋淀的生态补水工作始于 5 月 27 日,至 6 月底结束,实施补水 7.21 亿立方米;2023 年 6 月,河北省水利厅印发《2023 年白洋淀科学补水实施方案》,科学实施淀区水位调控;由此可知 2022 年 3~5 月疫情管控期间,白洋淀基本未开展生态补水工作。研究以 2022 年 3~5 月为参照时段,对比 2021 年和 2023 年同时段水质指标变化情况,评估疫情管控措施对水质指标的影响(图 6)。

2022 年 3~5 月期间,与 2021 年同时段相比,电导率、浊度、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  指标分别同比下降 10.0%、16.5%、11.8%、10.6%,而 TN、TP 和 N/P 分别同比上升 5.1%、8.6%、80.6%。与 2023 年同时段相比,电导率、浊度、高锰酸盐指数、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  指标分别同比下降 5.1%、40.3%、10.5%、16.2%,而 TN、TP 和 N/P 分别同比上升 99.6%、17.6%、265.7%;由此可见,疫情管控措施显著降低了有机物、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度,水体更加透明,工业和生活源活动程度明显下降,但 TP 和 TN 浓度、特别是 N/P 变化较为复杂,同比反弹情况可能与较高的农业源排放和底泥污染有关<sup>[18,32]</sup>。

“十五五”时期,打造白洋淀美丽生态环境,以推动建设雄安新区至关重要。为贯彻实施《白洋淀生态环境治理和保护规划(2018—2035)》并进一步提升水生态环境质量,下一步建议重点做好以下工作:(1)加强淀区上游面源和底泥等内源污染控制。进一步转变农田施肥方式,推进入淀流域农业面源污染治理;针对白洋淀属于草型湖泊,具有底泥较厚、淀区芦苇、水草较多的特点,需进一步强化内源污染控制;同时以水生生物为重点,彻底清理白洋淀淀区水产养殖设施。(2)完善生态用水配置。白洋淀的水源补给主要依赖黄河水济冀、南水北调等外部工程调水,外部依赖度高,长期来看难以持续。流域水资源长期稳定可持续的配置体系需要进一步完善,做好补水和放水动态平衡,让白洋淀水系“活”起来。(3)系统开展水污染预警指纹溯源研究。通过水质指纹预警与溯源技术对不同区域水体水质异常进行快速预警以及污染类型的快速诊断,针对

淀区水质空间异质的特点，因地制宜，实施精准治污，提升环境质量监控预警和应急响应能力。（4）依法进一步加强流域协同污染治理。大清河流域面积广泛，涉及多个地区，协调难度大，统一规划和行动的污染协同治理体系和机制尚未完全建立，相关协同立法、普法、执法的后续工作还需进一步加强。（5）加强饮用水水源地保护和监管。依法依规推进饮用水水源保护区“划、立、治”，强化从源头到龙头的全过程监管，全力保障人民群众饮用水安全。

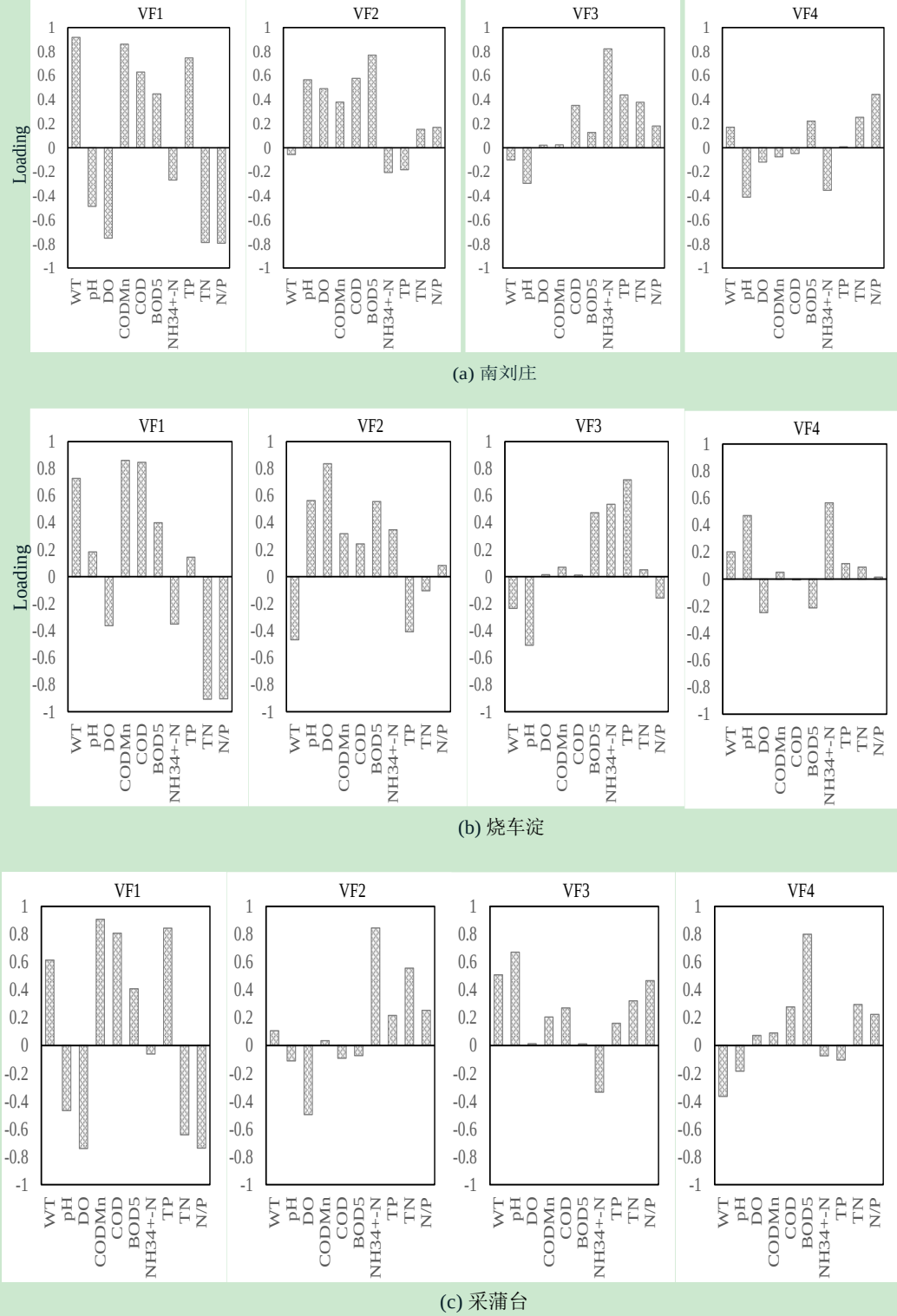


图 5 近 5 年白洋淀各站点水质监测数据变量因子分量载荷分析

Fig.5 Component loadings of varifactor (VF) for the water quality data at different stations in Baiyangdian Lake in recent five years

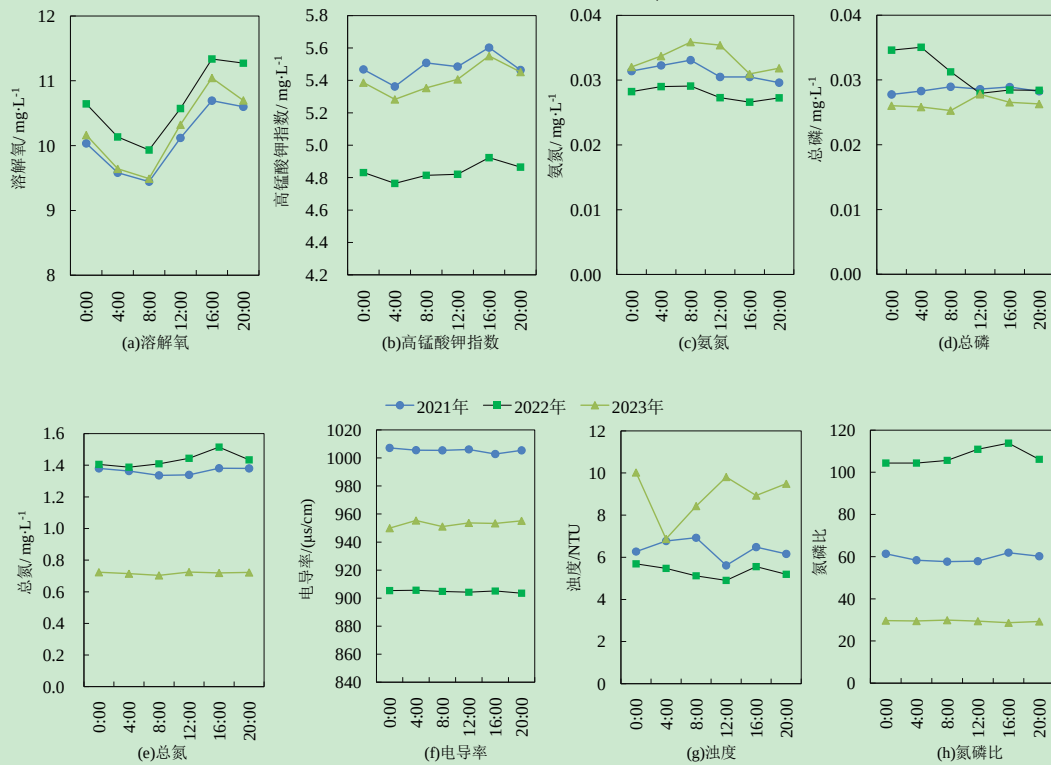


图 6 2021~2023 年 3~5 月白洋淀淀区水质指标变化分析

Fig.6 Variations in water quality indicators in Baiyangdian lake during March to May from 2021 to 2023

### 3 结论

(1) 2005 和 2015 年前后为近 30 年白洋淀水质较差的时段；2022~2023 年淀区稳定在三类，2023 年水质为 30 多年以来最好水平，主要污染指标为 COD 和 TP。大规模生态补水、大力开展水环境综合治理和生态修复是白洋淀水质很大程度改善的主要原因。

(2) 2009~2023 年，淀区 COD、TN 和 TP 均呈现明显下降趋势，年变化速率分别为  $-0.611\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.05$ )、 $-0.21\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.01$ ) 和  $-0.013\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{a})^{-1}$  ( $\alpha=0.05$ )。

(3) 各站点水质指标可空间聚为 3 类，西部的南刘庄站点水质最差；富营养化指标可聚为 2 类，呈现出北部站点高于南部站点的特征；近年白洋淀整体为磷限制特征，但为氮污染型湖泊。

(4) 入淀水量和水位是近年影响淀区水质的关键因素；分区域看，西部南刘庄站点应重点关注外源输入，北部站点应重点降低 TN 浓度，南部站点重点治理 COD 和 TP 污染。

(5) “十五五”时期，应进一步结合多站点多要素观测数据，应用水动力-水质耦合模型进行模拟溯源分析，多方位保障淀区水质综合决策，为生态补水和底泥和渔业养殖等内源污染控制和流域协同污染治理提供支撑。

### 4 参考文献

- [1] Dodds W K, Perkin J S, Gerken J E. Human impact on freshwater ecosystem services: A global perspective. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9061-9068.
- [2] Copeland H E, Tessman S A, Girvetz E H et al. A geospatial assessment on the distribution, condition, and vulnerability of Wyoming's wetlands. *Ecological Indicators*, 2010, **10**(4): 869-879.
- [3] Huang J H, Zhang Y J, Bing H J, et al. Characterizing the river water quality in China: Recent progress and on-going challenges. *Water Research*, 2021, **201**: 117309.
- [4] Xia R, Wang G S, Zhang Y, et al. River algal blooms are well predicted by antecedent environmental conditions. *Water Research*, 2020, **185**: 11622.
- [5] Zhu J F, Zhou Y, Wang S X, et al. Analysis of Changes of Baiyangdian Wetland from 1975 to 2018 Based on Remote Sensing. *Journal of Remote Sensing*, 2019, **23**(5): 971-986.
- [6] 毛欣, 刘林敬, 宋磊, 等. 白洋淀近 70 年生态环境演化过程及影响因素. *地球科学*, 2021, **46**(7): 2610-2617. Mao X, Liu L J, Song L, et al. A 70 Year Sedimentary Record of Eco-Environment Changes in Baiyangdian Lake and Its Influencing Factors. *Earth Science*, 2021, **46**(7): 2610-2617.

- [7] 易雨君, 林楚翘, 唐彩红.1960s 以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势.湖泊科学, 2020, **32**(5): 1333-1347. Yi Y J,Lin C Q,Tang C H.Hydrology,environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s .Journal of Lake Sciences,2020,**32**(5): 1333-1347.
- [8] 佟霁坤.近十年白洋淀水质特征及营养状态分析[D].保定, 河北大学, 2020.
- [9] Liu L,You X Y.Water quality assessment and contribution rates of main pollution sources in Baiyangdian Lake, northern China. Environmental Impact Assessment Review,2023,**98**:106965.
- [10] Cheng B F, Zhang Y, Xia R, Wang L, Zhang N, Zhang X F. Water Quality Spatiotemporal and Prediction Analyses in the Han River by an Integrated Nonparametric Diagnosis Approach. Journal of cleaner production, 2021,**328**:129583.
- [11] Mann H B. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 1945, **13** (3): 245-259.
- [12] Loyd S P. Least squares quantization in PCM. IEEE transactions on information theory, 1982, **28**(2): 129-137.
- [13] Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. Journal of Educational Psychology, 1933, **24**: 417-441.
- [14] 王欢欢,白洁,刘世存,等.白洋淀近 30 年水质时空变化特征农业环境科学学报,2020,**39** (5): 1051-1059. Wang H H,Bai J,Liu S C,*et al.* Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 yearsJournal of Agro-Environment Science,2020,**39** (5): 1051-1059.
- [15] 张婷, 刘静玲, 王雪梅.白洋淀水质时空变化及影响因子评价与分析.环境科学学报, 2010, **30** (2): 261-267.Zhang T,Liu J L,Wang X M. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake.Acta Scientiae Circumstantiae, 2010,**30**(2):261-267.
- [16] 段茂庆, 许维, 苑飞燕, 等 白洋淀近 5 年水生态环境质量变化趋势与营养状态分析 环境化学 2022, **41**(6): 1988-2000. Duan M Q,Xu W, Yuan F Y, *et al.* Analysis on the trend and nutritional status of water environment quality in Baiyangdian Lakein recent 5 years Environmental Chemistry,2022,**41**(6): 1988-2000.
- [17] 河北省生态环境厅.2023 年河北省生态环境状况公报[R].石家庄, 河北省生态环境厅.<https://hbepb.hebei.gov.cn/hbhjt/sjzx/hjzlzkgb/>.
- [18] 徐蓉桢, 王雨山, 尹德超,等.白洋淀地表水水质季节与空间变化特征及其影响因素. 环境科学.<https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202401138>. Xu R Z,Wang Y S,Yin D C,*et al.*Factors in B aiyangdian LakeSeasonal and Spatial Variation Characteristics of Surface Water Quality and Its Influencing.Environmental Science,<https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202401138>.
- [19] 孙添伟. 白洋淀府河子流域主要村落非点源污染负荷研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2012.
- [20] 陈靛, 吴文卫, 杨明祥等.白洋淀 1998-2016 年水体污染物时空分布特征分析.环境科学导刊, 2023, **42** (2): 33-40.Chen L,Wu W W,Yang M X,*et al.*The Spatiotemporal Distribution of Water Pollutants from 1998 to 2016 in Baiyangdian Lake.Environmental Science Survey,2023,**42** (2) :33-40.
- [21] 孔凡青, 解鑫, 陈珍辛等.白洋淀水生态环境质量综合评价研究.环境保护, 2024, **42**: 39-44.
- [22] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. Science Progress,1958,**11**:150-170.
- [23] Schanz F,Juon H.Two different methods ofevaluating nutrient limitations ofperiphyton bioassays, using water from the river rhine and eight of its tributaries. Hydrobiologia 1983,**102**(3):187-195.
- [24] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: is there a common relationship? . Limnology And Oceanography, 2000,**45**(6):1213-1223.
- [25] 季鹏飞, 许海, 詹旭, 等.长江中下游湖泊水体氮磷比时空变化特征及其影响因素.环境科学, 2020, **41**(9):4030-4040. Ji P F,Xu H,Zhan X,*et al.*Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River.Environmental Science,2020,**41**(9):4030-4040.
- [26] Wang F, Wang X, Zhao Y, *et al.* Long-term periodic structure and seasonaltrend decomposition of water level in Lake Baiyangdian, Northern China.Science of the Total Environment,2014,**11**:327-338.
- [27] Han Y L, Bu H M. The impact of climate change on the water quality of Baiyangdian Lake (China) in the past 30 years(1991–2020).Science of the Total Environment,2023,**870**:161957.
- [28] Han Q, Tong R Z, Sun W C,*et al.* Anthropogenic Influences on the Water Quality of the Baiyangdian Lake in North China over the Last Decade.Science of the Total Environment,2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134929>.
- [29] 京报网. “白洋淀水质如何做到十年最好?” 京报网,2021-07-23, <https://www.bjd.com.cn/index.shtml>.
- [30] 田凯, 赵彦伟, 白洁, 等 . 多源补水格局下白洋淀换水周期与示踪剂传输时间的时空特征 . 湖泊科学 . <https://link.cnki.net/urlid/32.1331.P.20250218.1125.004>. Tian K,Zhao Y W,Bai J,*et al.*Spatiotemporal characteristics of water renewal cycle and tracer transport time in Baiyangdian wetland under multi-source water supply pattern[J/OL].Journal of Lake Sciences,<https://link.cnki.net/urlid/32.1331.P.20250218.1125.004>.

- [31] Meng X B, Zhang J. Impact of COVID-19 lockdown on water quality in China during 2020 and 2022: two case surges. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**:79386-79401.
- [32] 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. *环境污染与防治*, 2024 46(10):1472-1478. Shi MW, Wang YX, Gao B, *et al.* Spatial and temporal characteristics of eutrophication in Baiyangdian Lake from 2013 to 2022. *Environmental Pollution & Control*, 2024 46(10):1472-1478.