J. Lake Sci.(湖泊科学),2025,**37**(6):1996-2008
DOI 10.18307/2025.0621

1992—2023 年白洋淀水质变化特征及影响因素分析*

李琳琳[1,2],张　瑞[3,4],苗飞虎[5],程兵芬[3,4**],张　玥[1,2],王永强[1,2],卢少勇[1,2],石祖泰[1,2]
(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,运用多元统计分析方法,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,(1)2005 年和 2015 年前后为近 30 年白洋淀水质较差时段,2022—2023 年淀区水质稳定在Ⅲ类,2023 年水质为近 30 年最好水平,淀区主要污染指标为化学需氧量(COD)和总磷(TP)。(2)Mann-Kendall 趋势检验结果显示,2009—2023 年淀区 COD、总氮(TN)和 TP 浓度均呈明显下降趋势,年变化速率分别为-0.611 mg/(L·a)(α=0.05)、-0.212 mg/(L·a)(α=0.01)和-0.013 mg/(L·a)(α=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 TN 浓度,南部站点应重点治理 COD 和 TP 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及流域协同污染治理提供支撑。
关键词:白洋淀;水质;影响因素;富营养化;Mann-Kendall;主成分分析

The evolution characteristics and influencing factors of water quality in Lake Baiyangdian during 1992-2023*

Li Linlin[1,2], Zhang Rui[3,4], Miao Feihu[5], Cheng Bingfen[3,4**], Zhang Yue[1,2], Wang Yongqiang[1,2], Lu Shaoyong[1,2] & Shi Zuqin[1,2]
(1: *State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing* 100012, *P. R. China*)
(2: *National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing* 100012, *P. R. China*)
(3: *College of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science & Technology, Langfang* 065201, *P. R. China*)
(4: *Multi-scene Water Chain Accident Wisdom Emergency Technology Innovation Center of Hebei, Langfang* 065201, *P. R. China*)
(5: *Beijing Zhenghe Hengji Waterfront Ecological Environment Management Co., Ltd., Beijing* 100085, *P. R. China*)

Abstract: Based on the monitoring data of water quality at 5 stations in Lake Baiyangdian in the past 30 years, this study comprehensively applied multivariate statistical analysis methods and literature research to systematically reveal the trends of water quality

---

* 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)和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。

evolution, influencing factors, and control measures in Lake Baiyangdian. Results showed that: ①The years 2005 and 2015 were the periods of poor water quality in Lake Baiyangdian 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 in recent years have been COD and TP. ② From 2009 to 2023, the COD, TN, and TP concentrations in the Dianqu area were in significant downward trends, with an annual decrease rate of 0.611 mg/(L·a) (α=0.05), 0.212 mg/(L·a) (α=0.01), and 0.013 mg/(L·a) (α=0.05), respectively. ③The water quality indicators across various monitoring stations in Lake Baiyangdian could be spatially categorized into three groups, with the Nanliuzhuang station in the western region showing the poorest water quality. Eutrophication indicators were further classified into two categories, with northern sites exhibiting a higher nitrogen-to-phosphorus ratio than the southern sites. Over recent years, Lake Baiyangdian has become predominantly phosphorus-limited despite being a nitrogen-polluted system overall. ④The inflow and water level were the key factors affecting the water quality of Lake Baiyangdian in recent years. From a regional perspective, targeted management strategies were 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 a hydrodynamic-water quality coupling model for simulation and traceability analysis, which can guarantee the comprehensive decision-making of water quality in Lake Baiyangdian, 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.

Keywords: Lake Baiyangdian; water quality; influencing factors; 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。例如,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[1-2]。尽管近年我国许多地区的湖泊水环境质量已有所改善,但仍呈现富营养状态。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[3-4]。

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,改善周边生态环境[5]。与世界各地水资源供需矛盾突出区域的许多湖泊一样,白洋淀水质容易受到气候变化和高强度人类活动的双重影响,同时出现资源型缺水和水质型缺水,需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[6]。自 1988 年恢复蓄水以来,白洋淀一直面临水源不足、湿地萎缩、水污染、泥沙淤积和生物多样性降低等问题[7]。2017 年党中央、国务院设立雄安新区,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重点发展理念。为了“把白洋淀修复好、保护好”,国家和地方政府采取了一系列举措,近年白洋淀水质显著改善,“华北明珠”重现光彩。

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及影响因素分析、生态需水核算及评价、生物多样性分析、水环境状况及其治理保护对策等方面,采用的方法主要为指数计算、统计评价等,少数研究也涉及 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[8]。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,且采用长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不够深入[9]。本研究基于白洋淀 5 个站点多年水质监测数据,综合运用 Mann-Kendall 统计检验、时空聚类分析、主成分分析(principal component analysis,PCA)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以及影响因素和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,以期为白洋淀“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(38°44′~38°59′N,115°45′~116°07′E),是海河流域面积最大的淡水湖。白洋淀

地势西高东低,水域面积为 336 km^2,流域面积为 31199 km^2,平均蓄水量为 3.2 亿 m^3,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 ℃之间,年平均降水量为 500 mm 左右,以主汛期 7 月下旬—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域。

白洋淀历史水质监测数据包括电导率(EC)、水温(WT)、pH 值、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、氨氮(NH_3-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[6-8],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)获得。人工监测每月一次,自动监测每 4 小时一次,均按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—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 COD、TN、TP 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 月为丰水期、12 月至次年 2 月为枯水期。

白洋淀承接大清河水系潴龙河、孝义河、唐河、瀑河、府河、萍河和白沟引河等河流来水,其中一些河流已干涸或停止流动(如萍河);仅有赵王新河从白洋淀流出(图 1)。白洋淀流域除府河和孝义河常年有水外,其余大部分河道已出现季节性甚至长期干涸的现象。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。

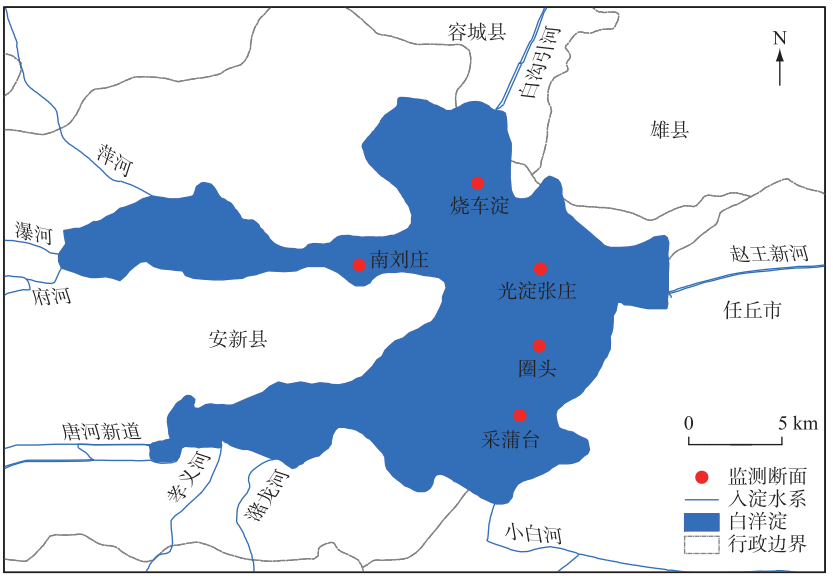


图 1 白洋淀淀区水质监测断面分布

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

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素众多,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[10]。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[11]。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 $X(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ 是 n 个独立的、随机观测值,通过构建统计变量 S:

$$S = \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} \mathrm{sign}(X_i - X_j) \tag{1}$$

进一步比较所有观测值的大小(($X_i - X_j$)<0、=0 或> 0),符号函数 S 即 sign($X_i - X_j$)计为-1、0 或 1。当 $S>0$、$S=0$、$S<0$ 时,进一步计算 MK 统计量 Z:

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

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(α)0.1、0.05、0.01 的显著性检验。

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 于 1957 年提出并于 1982 年正式发表[12],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 空间聚类方法不同,双向聚类的主要原理是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 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(principal component analysis,PCA)识别主要的污染物和关键污染因子。主成分分析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。Hotelling[13]对主成分的发展做出了重要贡献,主成分分析用较少的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 年和 2015 年前后为近 30 年水质较差时段。王欢欢等[14]也研究指出 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[15]研究指出 2005－2006 年淀区连续两年水质为劣Ⅴ类,为 1973－2007 年间水质最差时段。段茂庆等[16]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》[17]显示白洋淀水体中主要污染物为 COD 和 TP,2017 年淀区水质为劣Ⅴ类、2018 年为Ⅴ类、2019 年为Ⅳ类,2020 年全域为Ⅳ类、局部为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[18]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极大改善的主要原因。

1992－2023 年淀区主要水质指标 COD、DO、TN、TP 和氮磷比(N/P 比)分别为(21.1±7.1)mg/L、(8.0±1.4)mg/L、(3.24±1.27)mg/L、(0.225±0.116)mg/L 和(18.95±11.79);2021－2023 年淀区 COD、DO、TN、TP 和 N/P 比分别为(17.1±1.5)mg/L、(8.0±0.2)mg/L、(1.55±0.40)mg/L、(0.034±0.004)mg/L 和(44.61±7.54)。与 1992 年相比,2023 年淀区 COD、DO、TN、TP 和 N/P 比累计变化分别为 79.9%、16.7%、2.6%、-73.4%和 285.6%;其中淀区 COD 和 N/P 比呈现明显上升趋势,年变化速率分别为 0.4 mg/(L·a)($\alpha=0.01$)和 0.642 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 mg/(L·a)($\alpha=0.01$)(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 mg/(L·a)($\alpha=0.05$)。从富营养化指标结果看,2009－2023 年淀区 TN、TP 和 N/P 比分别为(3.10±

1.34)mg/L、(0.174±0.099)mg/L、(23.73±12.85),TN、TP 和 N/P 比累计变化分别为-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 mg/(L·a)(α=0.01)和-0.013 mg/(L·a)(α=0.05),近 15 年 N/P 比年变化趋势不明显。分站点来看,15 年来 5 个站点 TP 浓度(年均值)均呈明显下降趋势,TN 和 N/P 比各站点变化趋势不一致。

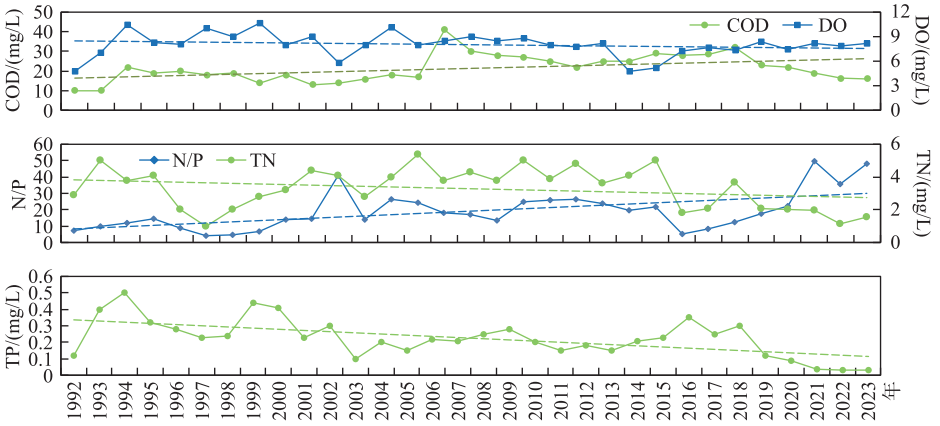


图 2 1992－2023 年白洋淀淀区主要水质指标年际变化

Fig. 2 Variations of water quality indicators in Lake Baiyangdian 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 0.85~2.59 mg/L 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 0.025~0.054 mg/L 范围波动;N/P 比由大到小排序为:烧车淀>南刘庄>光淀张庄>采蒲台>圈头,N/P 比在 33.76~102.49 范围波动,北部站点 N/P 比明显高于南部站点。枯水期 TN 浓度和 N/P 比均高于丰水期,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[19]研究发现淀区 TP 与 NH_3-N 浓度主要与入淀河流——府河来水水质的影响密切关联,其他水质指标如 COD、TN 等受来水水质影响小,主要与淀区内源释放有关。

研究选取不同 K 值进行重复训练,根据簇内误方差(SSE)确定最优 K 值,基于肘部法则分析发现,水质指标和富营养化指标最优 K 值分别为 3 和 2。从各站点水质指标的空间聚类上看(图 3),5 个站点总体可分为三类:第一类是位于淀区西北部的南刘庄站点;第二类是位于淀区北部的烧车淀和光淀张庄 2 个站点;第三类是位于淀区南部的采蒲台和圈头 2 个站点。从富营养化指标的聚类结果上看,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为严重),其余 3 个站点可以聚类为第二类,整体呈现出北部站点水质差于南部站点的空间分布特征。陈靓等[20]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>南部的特征;孔凡青等[21]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,这可能与入淀河流主要位于白洋淀西、南部有关;佟霁坤[8]研究指出,南刘庄站点受府河水质影响较大,导致氮磷污染远高于其他点位,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 等[9]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。

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 6.5~7.0 m 之间,每年接收生态补水达 3 亿~4 亿 m^3。2009－2018 年白洋淀处于轻度富营养状态,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 3 种判断依据计算白洋淀藻类生长氮磷控制概率

表 1 白洋淀各监测断面主要水质指标 MK 趋势检验

Tab. 1 The Mann-Kendall trend tests of the main water quality indicators in Lake Baiyangdian at different monitoring sections

站点	时间段	水质指标	N	Z	变化速率/(mg/(L·a))	变化趋势	α 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	−
	2009－2023 年	COD	15	−1.930	−0.611	下降趋势	**
南刘庄	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	***
	2009－2023 年	N/P	15	2.029	1.213	上升趋势	**
烧车淀	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	***
	2009－2023 年	N/P	15	2.079	3.333	上升趋势	**
光淀张庄	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	−
	2009－2023 年	N/P	15	0.495	0.471	变化趋势不明显	−
圈头	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	**
	2009－2023 年	N/P	15	−0.891	−0.694	变化趋势不明显	−
采蒲台	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	**
	2009－2023 年	N/P	15	−1.188	−0.759	变化趋势不明显	−

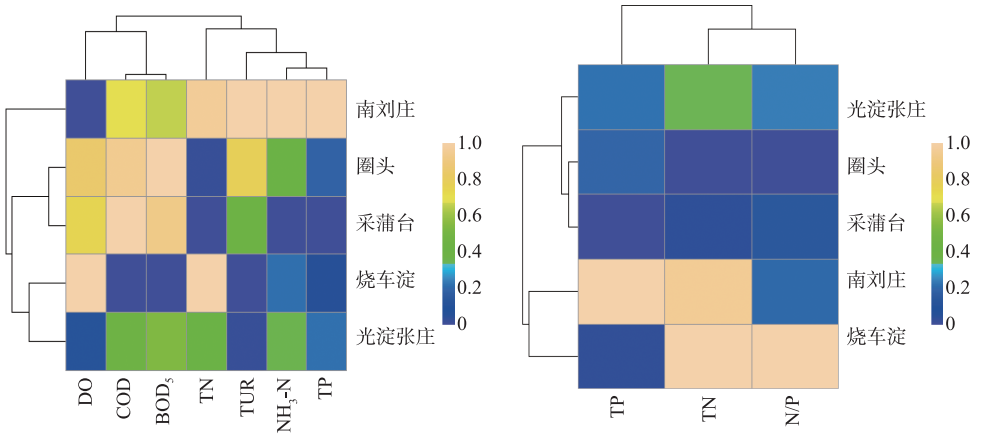
*、**、*** 分别表示通过 α=0.1、0.05、0.01 显著性检验;N/P 比的变化速率单位为 a^{-1}。

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

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

站点	年均值			丰水期			枯水期			两时期差值		
	TP	TN	N/P 比	TP	TN	N/P 比	TP	TN	N/P 比	TP	TN	N/P 比
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

(表 3)。方法 1 为 Redfield 比值统计,N/P 比>16 时为磷限制;N/P 比<16 时为氮限制[22];方法 2 为 Schanz and Juon 比值统计,N/P 比≥20 时为磷限制,N/P<10 时为氮限制,10≤N/P 比<20 为氮磷共同控制[23];方法 3 为 Guildford and Hecky 比值统计,N/P 比≥23 时为磷限制,N/P 比<9 时为氮限制,9≤N/P 比<23 为氮



(a) 主要水质指标 (b) 富营养化指标

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 Lake Baiyangdian from 2019 to 2023

磷共同控制[24]。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 75.0%~100.0%、67.5%~95.0%、32.5%~90.0%,说明白洋淀整体上以磷限制占主导地位,是氮污染型湖泊(表 3)。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[8]指出淀区站点 N/P 比呈现出春冬季高、夏秋季低的特征,即磷限制时段冬、春季高于夏、秋季;季鹏飞[25]研究表明湖泊富营养化程度越低,N/P 比越高,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对白洋淀中的氮进行治理。

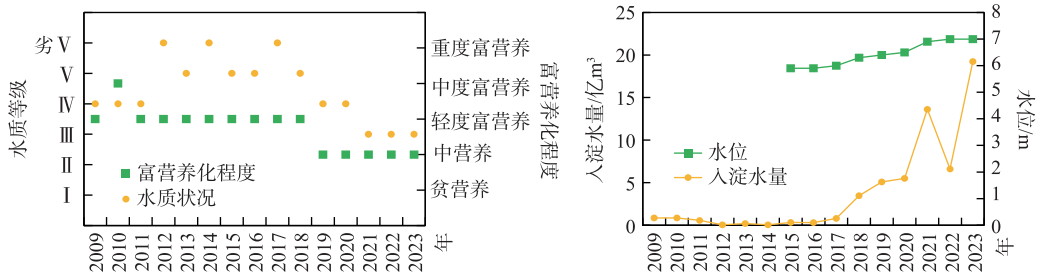


图 4 2009－2023 年白洋淀淀区水质、富营养化情况以及入淀水量、水位

Fig. 4 The water quality and eutrophication status, inflow and water level of Lake Baiyangdian from 2009 to 2023

2.4 水质影响因素分析

白洋淀各站点水质变化影响因素较为复杂,主要因素包括点源和非点源输入、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,由于涉及监测数据共享问题,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,因此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,本文主要对白洋淀近年水质监测结果进行比对统计分析,同时采用空间分析(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。水文参数中与 COD 相关性较强的是水位,相关系数为-0.897(P<0.01);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-0.614(P<0.05)。入淀水量、水位与水质指标的相关性更强,

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(%)

Tab. 3 The percentage differences in N limit, N-P limit and P limit in Lake Baiyangdian waters from 2019 to 2023

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

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

Tab. 4 Correlation analysis and statistics of water quality indicators and influencing factors in Lake Baiyangdian from 2009 to 2023

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

*、** 分别表示 α 在 0.05、0.01 水平(双侧)上显著相关。

表明来淀水量、水位是影响淀区水质的主要因素。Wang 等[26]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[18]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。

2009－2023 年年均温度与淀区水质参数无明显相关性。Han 等[27]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,极端低温改变了湖泊中的 DO 浓度,温度升高增加了氧气含量,同时 DO、TP 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 等[27]针对气温对水质的研究结果存在一定的差异,可能与研究时段的时间尺度有关,短周期内水温影响的季节差异更为显著。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<0.01),TN 与 TN 全省排放量呈正相关(R = 0.781,P<0.01),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类断面比例呈显著负相关,与全省劣Ⅴ类断面比例呈显著正相关,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[15]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 等[9]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 等[28]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、搬迁等措施协同作用下,白洋淀水质在 2021 年达到近十年最好[29]。

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 3 个区域的水质数据进行 KMO 检验和 Bartlett 检验,整体来看,3 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 3 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,3 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 比绝对值较大,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,3 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 比、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,3 个因子的方差解释率分别为 44.53%、14.16% 和 12.79%。成分 1 中正负负荷量 COD、TP、N/P 比绝对值较大,分别为 0.907、0.843、−0.738,表明南部区域 COD、TP 污染占主导。因而,西部南刘庄站点应重点关注外源输入,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[30]研究指出白洋淀淀区换水周期存在明显的时空差异,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−圈头附近水域位于淀区中部,换水时间最长,因而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 3−5 月,我国实施半封锁疫情管控[31],主要实施“动态清零”的方针,执行严格的隔离和社区管控措施,以应对新冠病毒的传播。同时,查阅相关报道可知,2021 年,白洋淀生态补水工作从 6 月 7 日开始,至 7 月 9 日结束,历时 33 d,补水量为 2.21 亿 m^3;2022 年,白洋淀生态补水工作始于 5 月 27 日,至 6 月底结束,实施补水 7.21 亿 m^3;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。本研究以 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,EC、TUR、COD、NH_3-N 指标分别同比下降 10.0%、16.5%、11.8%、10.6%,而 TN、TP 和 N/P 比分别同比上升 5.1%、8.6%、80.6%。与 2023 年同时段相比,EC、TUR、COD、NH_3-N 指标分别同比下降 5.1%、40.3%、10.5%、16.2%,而 TN、TP 和 N/P 比分别同比上升 99.6%、17.6%、265.7%;由此可见,疫情管控措施显著降低了 COD、NH_3-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 比变化较为复杂,同比反弹情况可能与较高的农业源排放和底泥污染有关[8,32]。

“十五五”时期,打造白洋淀美丽生态环境,是推动建设雄安新区的重要支撑。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,具有底泥较厚以及淀区芦苇、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

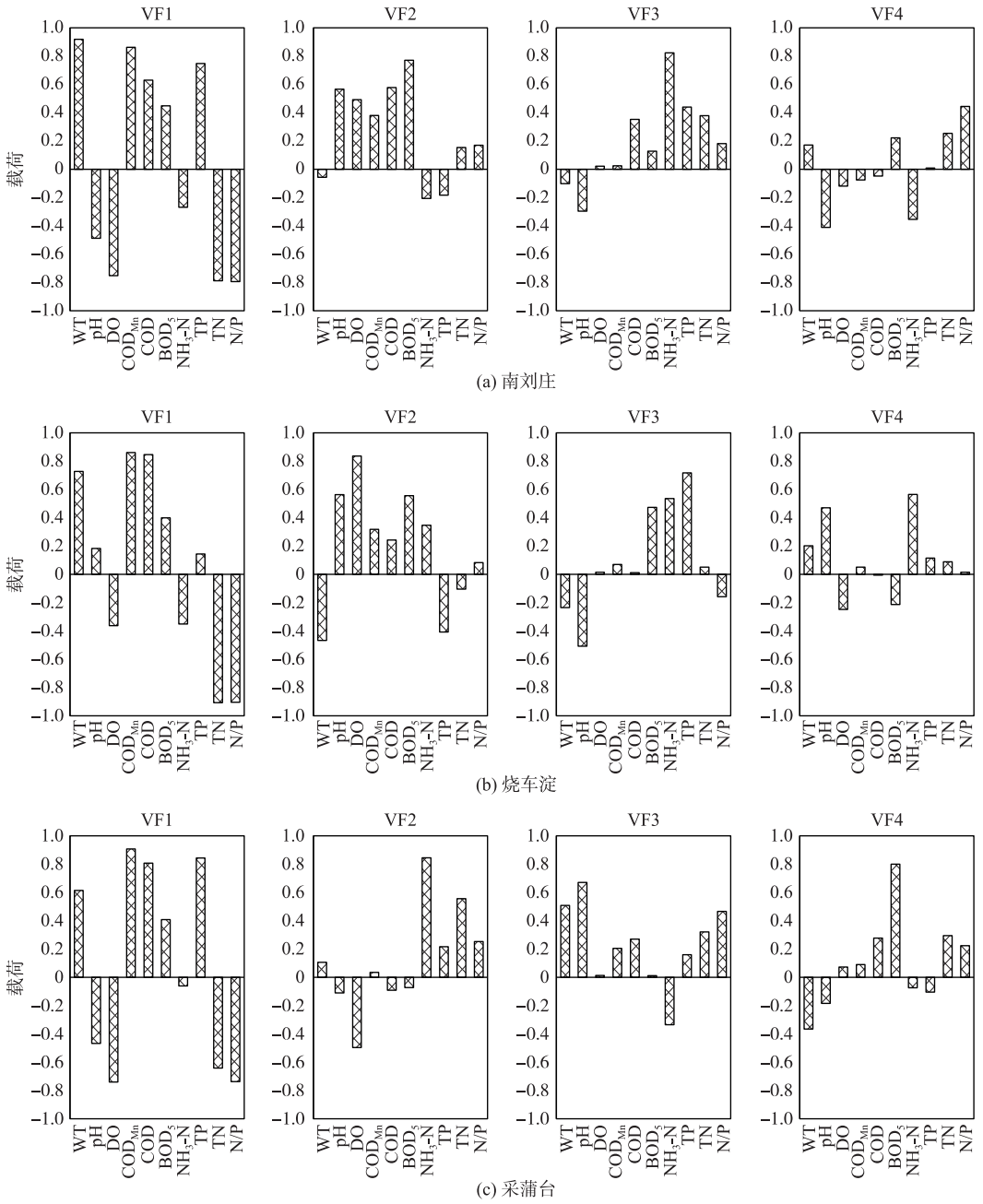


图 5 近 5 年白洋淀各站点水质监测数据变量因子分量载荷分析

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

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

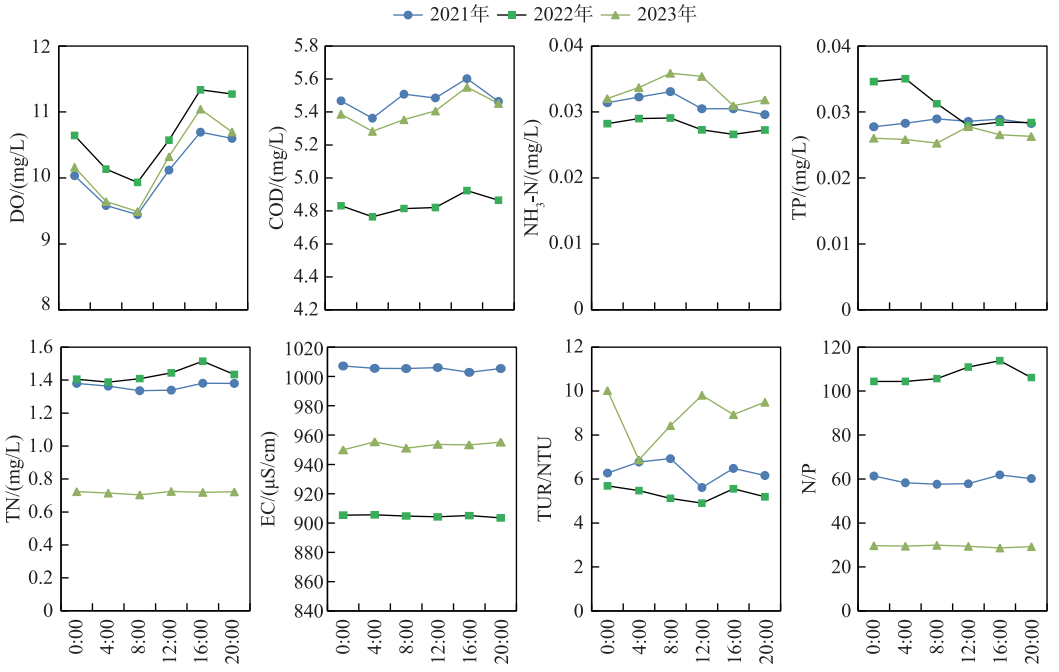


图 6 2021－2023 年 3－5 月白洋淀淀区水质指标变化分析

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

能力。(4)依法进一步加强流域治理。大清河流域面积广泛,涉及多个地区,协调难度大,在污染治理方面,尚未建立起一套有效的体系和机制,难以实现统一规划和协同行动的污染治理体系,相关立法、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。

3 结论

1)2005 年和 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Ⅲ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。白洋淀水质得以显著改善,主要得益于大规模生态补水、水环境综合治理及生态修复等措施的实施。

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 mg/(L·a)(α=0.05)、-0.212 mg/(L·a)(α=0.01)和-0.013 mg/(L·a)(α=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,但属于氮污染型湖泊。

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,南部站点应重点治理 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,通过生态补水等措施,为控制内源污染、推进流域协同治理提供支撑。

4 参考文献

[1] Dodds WK, Perkin JS, Gerken JE. Human impact on freshwater ecosystem services: A global perspective. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9061-9068. DOI: 10.1021/es4021052.

[2] Copeland HE, Tessman SA, Girvetz EH *et al*. A geospatial assessment on the distribution, condition, and vulnerability of Wyoming's wetlands. *Ecological Indicators*, 2010, **10**(4): 869-879. DOI: 10.1016/j.ecolind.2010.01.011.

[3] Huang JC, Zhang YJ, Bing HJ *et al*. Characterizing the river water quality in China: Recent progress and on-going challenges. *Water Research*, 2021, **201**: 117309. DOI: 10.1016/j.watres.2021.117309.

[4] Xia R, Wang GS, Zhang Y *et al*. River algal blooms are well predicted by antecedent environmental conditions. *Water Research*, 2020, **185**: 116221. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116221.

[5] Zhu JF, Zhou Y, Wang SX *et al*. Analysis of changes of Baiyangdian wetland from 1975 to 2018 based on remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 2019, **23**(5): 971-986. DOI: 10.11834/jrs.20198379.

[6] Mao X, Liu LJ, 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): 2609-2620. [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): 2609-2620.]

[7] Yi YJ, Lin CQ, Tang CH. Hydrology, environment and ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1333-1347, 1226. DOI: 10.18307/2020.0500. [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, 1226.]

[8] 佟霁坤. 近十年白洋淀水质特征及营养状态分析[学位论文]. 保定: 河北大学, 2020.

[9] Liu L, You XY. Water quality assessment and contribution rates of main pollution sources in Baiyangdian Lake, northern China. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, **98**: 106965. DOI: 10.1016/j.eiar.2022.106965.

[10] Cheng BF, Zhang Y, Xia R *et al*. Spatiotemporal analysis and prediction of water quality in the Han River by an integrated nonparametric diagnosis approach. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **328**: 129583. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.129583.

[11] Mann HB. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, **13**(3): 245. DOI: 10.2307/1907187.

[12] Lloyd S. Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1982, **28**(2): 129-137. DOI: 10.1109/TIT.1982.1056489.

[13] Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 1933, **24**(6): 417-441. DOI: 10.1037/h0071325.

[14] Wang HH, Bai J, Liu SC *et al*. Spatial and temporal variations in the water quality of Baiyangdian Lake in the recent 30 years. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, **39**(5): 1051-1059. DOI: 10.11654/jaes.2020-0196. [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.]

[15] Zhang T, Liu JL, Wang XM. Causal analysis of the spatial-temporal variation of water quality in Baiyangdian Lake. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(2): 261-267. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2010.02.023. [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.]

[16] Duan MQ, Xu W, Yuan FY *et al*. Analysis on the trend and nutritional status of water environmentquality in Baiyangdian Lakein recent 5 years. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(6): 1988-2000. [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.]

[17] 河北省生态环境厅. 2023 年河北省生态环境状况公报. 石家庄, 河北省生态环境厅. https://hbepb.hebei.gov.cn/hbhjt/sjzx/hjzlzkgb/.

[18] Xu RZ, Wang YS, Yin DC *et al*. Seasonal and spatial variation characteristics of surface water quality and its influencing factors in Baiyangdian Lake. *Environmental Science*, 2025, **46**(3): 1382-1394. DOI: 10.13227/j.hjkx.202401138. [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, 2025, **46**(3): 1382-1394.]

[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[学位论文]. 北京: 北京师范大学, 2012.

[20] Chen L, Wu WW, Yang MX *et al*. The spatiotemporal distribution of water pollutants from 1998 to 2016 in Baiyangdian Lake. *Environmental Science Survey*, 2023, **42**(2): 33-39. [陈靓, 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): 33-39.]

[21] Kong FQ, Xie X, Chen JX *et al*. Research on the comprehensive evaluation of water eco-environment quality of Baiyangdian wetland. *Environmental Protection*, 2024, **52**(S2): 42-45. [孔凡青, 解鑫, 陈矜辛等. 白洋淀水生态环境质量综合评价研究. 环境保护, 2024, **52**(S2): 42-45.]

[22] Redfield AC. The biological control of chemical factors in the environment. *Science Progress*, 1960, **11**: 150-170.

[23] Schanz F, Juon H. Two different methods of evaluating nutrient limitations of periphyton bioassays, using water from the River Rhine and eight of its tributaries. *Hydrobiologia*, 1983, **102**(3): 187-195. DOI: 10.1007/BF00006346.

[24] Guildford SJ, Hecky RE. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223. DOI: 10.4319/lo.2000.45.6.1213.

[25] Ji PF, 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): 4030-4041. DOI: 10.13227/j.hjkx.202002017. [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): 4030-4041.]

[26] Wang F, Wang X, Zhao Y *et al*. Long-term periodic structure and seasonal-trend decomposition of water level in Lake Baiyangdian, North-

ern China. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2014, **11**(2): 327-338. DOI: 10.1007/s13762-013-0362-5.

[27] Han YL, Bu HM. 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.161957.

[28] Han Q, Tong RZ, Sun WC *et al*. Anthropogenic influences on the water quality of the Baiyangdian Lake in North China over the last decade. *Science of the Total Environment*, 2020, **701**: 134929. DOI: 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] Tian K, Zhao YW, Bai J *et al*. Spatiotemporal characteristics of water renewal cycle and tracer transport time in Baiyangdian wetland under multi-source water supply pattern. *J Lake Sci*, 2025, **37**(4): 1302-1313. DOI:10.18307/2025.0424. [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, 2025, **37**(4): 1302-1313.]

[31] Meng HB, 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**(32): 79386-79401. DOI: 10.1007/s11356-023-27962-7.

[32] 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. [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.]