

调水前后南四湖藻密度及水环境要素变化特征*

谭浪^{1,2}, 王宗志^{1,3**}, 白莹¹, 舒博宁⁴, 王卫光²

(1: 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029)

(2: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

(3: 长江保护与绿色发展研究院, 南京 210098)

(4: 山东省济宁市水文中心, 济宁 272004)

摘要: 为探究大规模调水输入背景下南四湖生态环境演变特征, 采用多种非参数统计方法综合分析 2010—2020 年南四湖藻密度、总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮、叶绿素 *a* (Chl.*a*)、五日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{Mn}) 年际年内变化规律和影响因素。结果表明: 2010—2020 年南四湖上、下级湖水水质综合污染指数年均值范围分别为 0.759~0.945、0.719~0.926, 水质总体逐渐改善, 但 TN 单项污染指数存在超标现象, 主要可能与入湖河流中高浓度氮输入有关。受南水北调东线工程运行初期与严峻旱情的影响, 南四湖藻密度、TP、氨氮、Chl.*a* 在 2013—2015 年发生突变, 随后均呈增加趋势。南水北调东线工程的运行对南四湖藻密度的年内波动影响强烈, 调水工程运行后每年 10 月份出现峰值, 其中 2016 年上级湖藻密度高达 520.0×10^4 cells/L。湖区藻密度不仅与氮磷质量比(TN/TP)、TP、COD_{Mn}、Chl.*a* 呈显著相关, 还与降雨、水温密切相关。在南四湖生态环境保护治理过程中, 应强化关键水质指标的污染监管与治理, 完善调水方案和水生态危机应急管理办。

关键词: 水质; 藻密度; 趋势分析; 调水工程; 浅水湖泊; 南四湖

Variation characteristics of algae density and water environment factors in Lake Nansi before and after division of the water transfer*

Tan Lang^{1,2}, Wang Zongzhi^{1,3**}, Bai Ying¹, Shu Boning⁴ & Wang Weiguang²

(1: State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, P.R.China)

(2: College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China)

(3: Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, P.R.China)

(4: Jining Municipal Hydrology Center in Shandong Province, Jining 272004, P.R.China)

Abstract: In order to explore the characteristics of the algae density and its water environment factors in Lake Nansi under the context of water transfer, non-parametric statistical methods are used to comprehensively analyze the inter-annual and intra-annual distribution trends of algae density and its key water environment factors (total nitrogen(TN), total phosphorus(TP), ammonia nitrogen, chlorophyll-*a*, BOD₅, COD_{Mn}). The results show the annual average of comprehensive pollution index of water quality fluctuates in the range of 0.759–0.945, 0.719–0.926 in upper and lower lakes from 2010 to 2020, but the TN in Lake Nansi still exceeds the standard, which was mainly related to the high input of nitrogen into the lake. TP, ammonia nitrogen, chlorophyll-*a* and algae density had a sharp turning during 2013–2015 because of drought and the early operation of the South-to-North Water Transfer Project. The water quality indicators all increased afterward. The east route of the South-to-North Water Transfer Project has a strong impact on the intra-annual fluctuation of algae density. The peak value occurs in October when the algae density was $520.0 \times$

* 2021-12-10 收稿; 2022-03-26 收修改稿。

江苏省“333 高层次人才培养工程”科研项目(BRA2020088)和中央级公益性科研院所基本科研业务费重点项目(Y521006)联合资助。

** 通信作者; E-mail: zzwang@nhri.cn.

10^4 cells/L in upper lake in 2016. Algae density was not only significantly related to ratio of nitrogen to phosphorus, TP, COD_{Mn} , chlorophyll-*a*, but also closely related to rainfall and water temperature. In the process of environmental protection and management of Lake Nansi, the supervision of key water quality needs to be strengthened. The management of water diversion and ecological crisis should be improved.

Keywords: Water quality; algae density; trend analysis; water diversion project; shallow lake; Lake Nansi

南四湖是我国华北地区最大的淡水湖泊,是鲁南、苏北地区的重要水源地,也是南水北调东线工程的重要调蓄场所,其水生态稳定性对沿线水质安全及调水效益起决定性作用^[1]。南水北调东线工程在2013年12月正式开始运行后,增加了湖泊水量补给和物质输入,也改变了水动力条件、水文循环过程与水生动植物栖息环境^[2]。在2002年南水北调东线工程建设初期,由于围湖造田、过度捕捞、工业排放等活动影响,南四湖入湖河流和湖区污染严重^[3]。徐好等^[4]在南四湖水质时空变化特征研究中,强调了“治”“用”“保”并举等流域综合治理措施,发现2006—2016年间南四湖水质有所改善,基本稳定在地表Ⅲ类水标准。在浅水湖泊富营养化波动与高强度治理发展互动的态势下^[5],湖泊水生态环境的演变是亟需关注的重大问题。

受流域内外源污染、外调水、水文、气象多重影响,南四湖水环境水生态安全面临严峻挑战。在调水影响方面,调水工程的建设及其常态化运行,对庞大而复杂的湖泊生态系统有何影响是目前研究中还未解决的难点。对南水北调东线6个调蓄湖泊水质状况的研究表明^[6],从上游至下游湖泊水质呈改善趋势,调水期存在TN浓度较高,非调水期TP浓度较高;李庆等^[7]对比分析调水期与非调水期,湖泊浮游植物与水质状况,发现调水引起的水文脉冲对浮游植物有明显影响;张春梅等^[8]认为应优化调水方式,调控水动力条件,从而有效防控藻类突增。在水文气象影响因素方面,气温升高、极端天气增多、日照时间延长等均有利于藻类生长^[9];邓文文等^[10]讨论了气候变化和人类活动导致的生物扰动、水位波动增强等变化,会造成突变阈值减小,并对湖泊稳态造成影响。藻密度作为湖泊富营养化水平的关键指标之一^[11],其长序列年内、年际变化趋势及水环境要素演变特征对识别调水的生态效应具有重要指示作用。董贯仓等^[12]在南水北调东线工程运行3年后对东平湖浮游植物及水质的调查,发现调水工程可能通过物质带入影响水质,进而引起藻密度较通水初期稍有升高;2015—2019对南水北调中线干渠的研究表明^[13],藻密度每年都有一致性季节变化,在春季增长,随后从夏季到冬季持续下降,藻密度最大值的夏季和最小值的冬季分别为 572.95×10^4 和 157.09×10^4 cells/L,氨氮是影响藻类生长的最关键水质参数,其次是COD。大规模调水背景下,浅水湖泊营养水平发生剧烈波动,藻类生长与相关水环境要素的互馈关系不确定性增加。目前,少见周期性调水行为前后湖泊藻类生长趋势对比及其影响因素识别研究。

本文依据2010—2020年长系列监测资料,综合分析南水北调东线一期工程正式运行前后,南四湖藻密度及相关环境因子年内、年际变化特征,在此基础上识别南四湖水生态水环境的关键影响因素,以为南四湖科学管理及南水北调东线工程良性运行提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

南四湖位于山东西南部,南北狭长约125 km,东西宽5~25 km,湖内面积1266 km²。湖泊中部建有二级坝枢纽工程,分成上级湖和下级湖,其中上级湖由南阳湖、独山湖和昭阳湖(大部分)组成,下级湖由昭阳湖(小部分)和微山湖组成。南四湖入湖河流合计53条,河流同时用于行洪、农灌、纳污,主要入流河道宽浅,水流较缓,并且南四湖各入湖河流上修建了较多的水库及闸坝工程,起到拦蓄调洪作用,湖滨区沟渠串通严重,引进、引出水量不能全面控制,大部分河流无记录年径流量,无法精确控制入湖水量。

南水北调东线工程将长江水通过各级泵站提水向北输送,经南四湖等多个调蓄湖泊后,流至胶东地区和天津。南水北调东线一期工程调水期在上半年,调水量逐年增加,工程拟利用南四湖进行输、蓄水。南四湖地势北高南低,天然水流方向是从上级湖至下级湖,在调水工程中,上级湖建长沟泵站抽水入梁济运河,二级坝建泵站抽水入上级湖,下级湖建韩庄闸泵站,上级湖起到只输水不调蓄的功能,下级湖入流较少,作为调蓄湖泊。《南水北调总体规划》对输水干线的水质要求达到地表水Ⅲ类标准,由于输水干线穿过城市人口

密集区、工农业区、航运区等,目前输水水质保障工作仍面临着挑战.

1.2 采样与监测

在南四湖设置 10 个采样点,空间分布见图 1,包括 3 个上级湖点位(S1、S2、S3)、3 个下级湖点位(S4、S5、S6)、4 个距离工业区和生活区较近的主要入湖河流断面(S7、S8、S9、S10). 总氮(TN)、总磷(TP)、氨氮、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、五日生化需氧量(BOD₅)采样点为 S1~S10. 藻密度、叶绿素 *a* (Chl.*a*) 采样点为 S1、S2、S3、S5. 水文气象数据由济宁市水文中心提供,水文气象站点位置与水质监测站点位置一致. 监测时段为 2010 年 1 月—2020 年 12 月,频率为月度监测,每月上旬采样及送样检测.

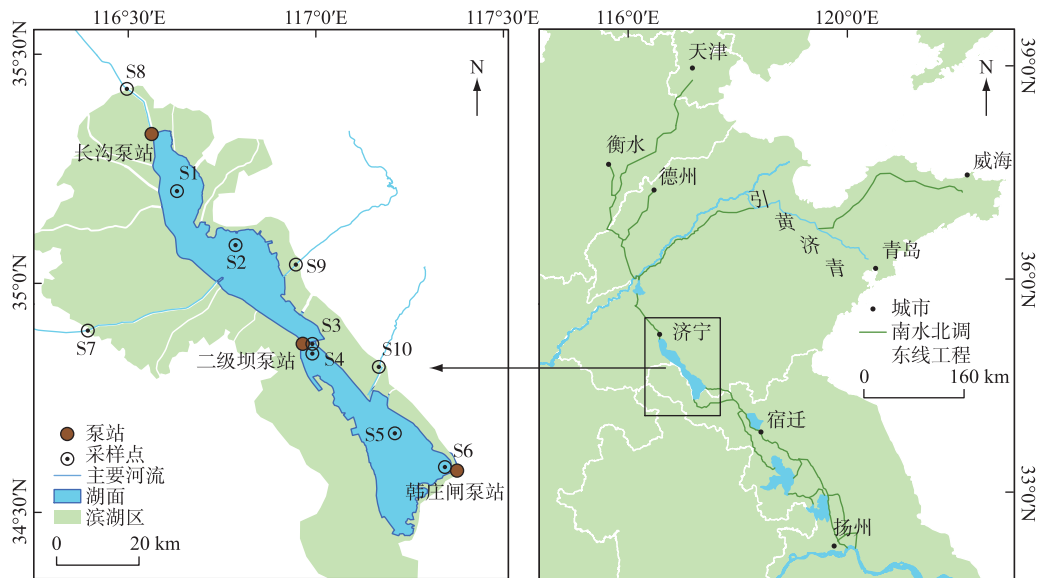


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling sites

柱状采水器采集水面下 0.5 m 处水样 4 L, 2 L 聚乙烯采样瓶低温避光保存,用于水质测定;2 L 加入鲁哥试剂固定后在实验室内静置 24~48 h,用虹吸管缓慢吸走上清液,保留 50 mL 浓缩样品. TN 浓度采用硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定;TP 浓度采用钼锑抗分光光度法测定;氨氮浓度采用纳氏试剂光度法测定;COD_{Mn}采用酸性高锰酸钾法测定;BOD₅采用稀释接种法测定;Chl.*a* 浓度参照《水质叶绿素 *a* 的测定分光光度法》(SL 88—2012)进行测定;藻密度参照《内陆水域浮游植物监测技术规程》(SL 733—2016)移液样品至浮游植物计数框中,用 40~600 倍光学显微镜计数. 取上级湖各样点检测平均值代表上级湖指标;取下级湖各样点检测平均值代表下级湖指标.

1.3 分析方法

1.3.1 污染指数计算 综合污染指数是一种常用的水质评价方法,是利用实测数据和评价标准的比值来综合评价水质状态,评价标准采用《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类水质标准,计算公式:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

$$P = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (2)$$

式中, P_i 为 i 污染物的污染指数; C_i 为 i 污染物实测平均值, mg/L; S_i 为《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中水质因子 i 的 III 类水质标准值, mg/L; n 是选取污染物的项数; P 为综合污染指数.

1.3.2 时间序列分析方法 采用 Mann-Kendall (M-K) 检验法分析时间序列趋势^[14]. 可以利用构造检验统计量 Z , 判断序列在置信水平上, 时间序列数据是否存在明显的上升或下降趋势, 当 Z 的绝对值大于等于 1.28、1.64、2.32 时, 分别表示通过了信度 90%、95%、99% 的显著性检验. 也可以利用 M-K 检验对各项水质参数进

行突变检验,建立统计序列 UF_k 和 UB_k ,进一步分析水质序列的变化,明确突变的区域, UF_k 为 M-K 统计值正向序列, UB_k 为逆向序列, $(-1.96, 1.96)$ 为显著水平置信区间,若 UF_k 超过显著水平置信区间(临界线),表明上升或下降趋势显著,若 UF_k 和 UB_k 序列出现交点且交点在临界直线之间,那么交点即为突变点. 在 Mann-Whitney-Pettitt(MWP) 检验中^[15],确定显著水平 $\alpha=0.05$ 后,寻找具有显著性的变异点并可求得整个变异区间. 本文使用 M-K 检验法与 MWP 检验法找出逐月时间序列所有变化节点,并应用累积距平曲线法^[16] 对变化趋势和突变点进行识别和综合诊断,确定水质指标序列中最合理的突变年份. 时间序列自相关性对趋势检验结果有重要影响,所以在本次趋势检验之前,先进行了时间序列的自相关性分析,各序列具有良好的独立性. 采用 Spearman 相关系数分析南四湖与主要入湖河流之间水质指标的相关性、藻密度与相关环境因子的相关性. 采用独立样本 t 检验分析指标浓度不同时间段的差异性,其中统计量 P 值为原假设为真时所得到的样本观察结果或更极端结果出现的概率. 数据统计及分析在 Excel 2010、MATLAB、SPSS 20.0 中完成.

2 结果

2.1 水文气象要素变化特征

2010—2020 年南四湖湖区平均水温为 15.7°C ,夏季最高月平均水温为 29.5°C ,出现在 2013 年 8 月. 2010—2020 年南四湖湖区年降水量均值为 686 mm ,流域内 75% 的降水和入湖径流集中在 6—9 月份的汛期,其中 2013 年与 2014 年降水量分别为 $597, 610\text{ mm}$,属于偏枯水年份(图 2). 南四湖径流分布格局基本符合降水的分布规律^[17],而且入湖径流量与湖区水位涨幅基本对应,湖泊水位是反映水体水情变化较为直观的指标^[18]. 由于 2013 年与 2014 年沂沭泗流域降水量较同期偏少,入湖径流量减少,湖区蓄水量持续减少,2014 年 6 月 12 日下级湖水位降至死水位(33.0 m)以下,7 月 28 日南四湖下级湖降至生态水位(31.05 m)以下,部分湖区裸露干裂. 在持续的干旱后有较强降雨,2016 年南四湖湖区年降水量为 794 mm ,出现旱涝交替的现象.

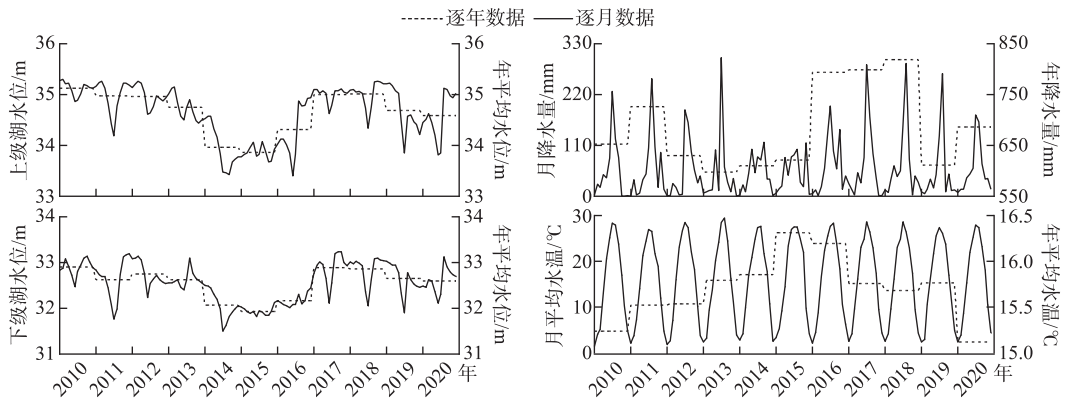


图 2 2010—2020 年南四湖水文气象因素变化

Fig.2 Changes in hydrometeorological factors in Lake Nansi from 2010 to 2020

2.2 藻密度及水环境要素年际变化特征

根据 2010—2020 年南四湖藻密度及其水环境要素的统计结果(表 1),南四湖藻密度变幅最大,其中上级湖藻密度变异系数为 2.046,藻密度最大值是最小值的 120 倍. 对 2010—2020 年南四湖上、下级湖藻密度进行 M-K 趋势性检验,诊断结果中统计量 Z 分别为 $-2.02, -1.04$,其中上级湖藻密度序列通过了信度 95% 的显著性检验,序列存在明显下降趋势. 但在 M-K 检验方法中,趋势性只受到样本秩与样本个数 n 的影响,从而忽略了样本中排序靠后的较大数据值^[19],从图 3 可见,南四湖藻密度具有显著的季节特征,上级湖藻密度在 2016 年后部分月份出现极大值,且远远高于其他月份,故不能得出上级湖藻密度在 2010—2020 年呈显著减少趋势. 其中上级湖 2016—2020 年 10 月藻密度分别为 $520.0 \times 10^4, 515.0 \times 10^4, 500.0 \times 10^4, 480.0 \times 10^4, 470.0 \times 10^4$ cells/L.

表 1 2010—2020 年南四湖藻密度及其水环境要素统计量*

Tab.1 The statistical values of monthly algae density and water environment factors in Lake Nansi from 2010 to 2020

指标	Ⅲ类水 标准 限值	上级湖				下级湖			
		平均值	最低值	最高值	变异 系数	平均值	最低值	最高值	变异 系数
TN/(mg/L)	1	1.75	1.07	3.62	0.277	1.79	1.10	3.42	0.281
TP/(mg/L)	0.05	0.030	0.010	0.061	0.341	0.031	0.010	0.078	0.448
氨氮/(mg/L)	1	0.266	0.025	0.794	0.736	0.215	0.025	0.641	0.680
BOD ₅ /(mg/L)	4	3.12	2.00	6.36	0.319	2.89	2.00	5.01	0.316
COD _{Mn} /(mg/L)	6	5.12	4.01	6.01	0.083	4.75	3.86	5.68	0.082
综合污染指数 P	N/A	0.86	0.66	1.14	0.117	0.83	0.62	1.10	0.120
Chl.a/(mg/L)	N/A	0.019	0.009	0.030	0.305	0.015	0.007	0.026	0.290
藻密度/($\times 10^4$ cells/L)	N/A	62.3	4.3	520.0	2.046	31.3	3.1	89.0	0.867

* N/A 表示此处不属于《地表水环境质量标准》基本项目。

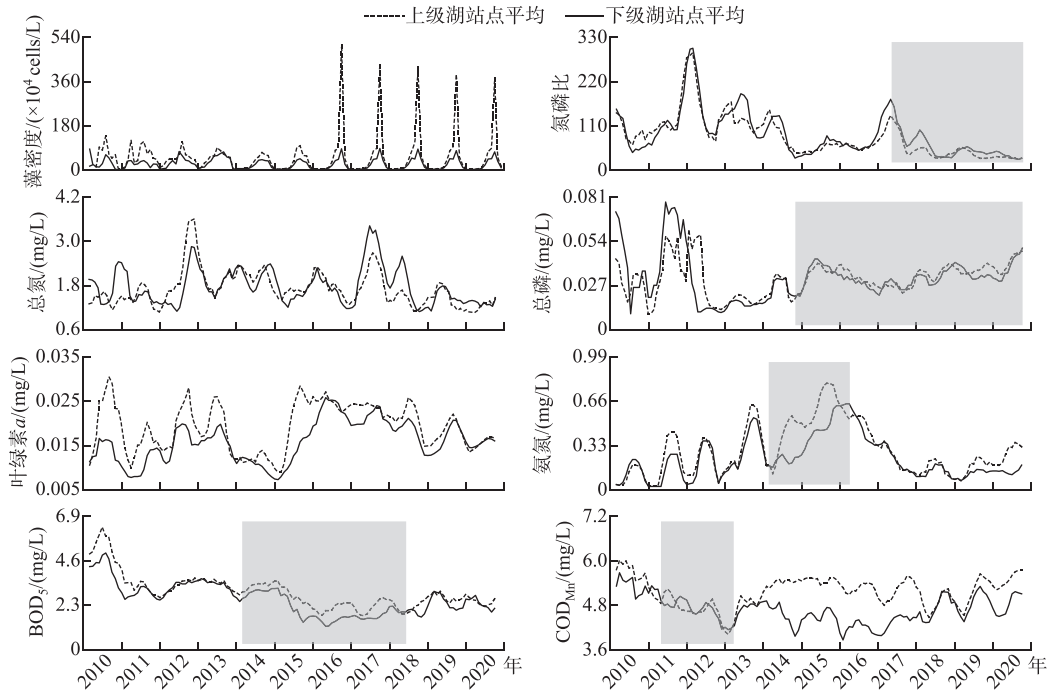


图 3 2010—2020 年南四湖藻密度及水环境要素变化
(灰色区域表示上、下级湖 UF_k 同时超越临界线的范围)

Fig.3 Changes of algae density and water environment factors in Lake Nansi from 2010 to 2020
(The gray area indicates the range where the UF_k exceeds the critical line)

在突变点分析过程中,全部样本数据序列两端的部分样本点就不能做突变点的判断,故靠近 2010 年与 2020 年两端的突变点不予采信. 结合 M-K 检验、MWP 检验、累积距平曲线法(图略)分析各站点水质序列的突变点,其中在 M-K 检验中,若 UF_k 超越临界直线,表示上升或下降趋势显著. 藻密度及水环境要素序列在 2010—2020 年间存在多个突变点(表 2),局部年份变化明显,突变点主要集中在 2013—2015 年. 南四湖上级湖藻密度在 2013 年 12 月出现突变点,下级湖在 2014 年 4 月出现突变点,均在突变发生后开始增长至

2016年,但不显著;上、下级湖TP、氨氮浓度分别在2014年、2013年有突变点,且均在突变点后一直保持显著上升趋势;Chl.a浓度在2015年存在突变点,随后浓度有所上升;TN、氮磷质量比(TN/TP)、BOD₅、COD_{Mn}在上、下级湖中没有识别出突变点.

表2 南四湖藻密度及其水环境要素序列趋势突变点*

Tab.2 Trend mutation nodes of monthly algae density and water environment factors in Lake Nansi

站点		藻密度	TN	TP	氮磷比	Chl.a	氨氮	BOD ₅	COD _{Mn}
上级湖	M-K	2013-12	2018-6	—	2017-10	2012-4	2012-2	—	2020-9
	MWP	2016-5	2017-8	2014-9	2017-8	2015-6	2013-7	2013-11	2014-3
	最合理突变年	2013	—	2014	—	2015	2013	—	—
下级湖	M-K	2014-3	2019-10	—	2018-4	2013-4	2012-4	2013-7	2010-9
	MWP	2013-11	2018-5	2014-8	2014-8	2015-8	2013-7	2014-1	2012-9
	最合理突变年	2014	—	2014	—	2015	2013	—	—

* —表示没有找到突变点的序列.

南四湖水质总体良好(图4),2010—2020年南四湖上、下级湖水水质综合污染指数年均值范围分别为0.759~0.945、0.719~0.926,基本达到了东线工程输水水质地表Ⅲ类水要求,但仍有个别污染物的污染指数出现较大值,造成总体水质不能稳定达标,其中上、下级湖水水质综合污染指数最大值均出现在2013年.上、下级湖BOD₅污染指数部分年份超过1,TN污染指数一直大于1,TN单项指标污染情况最严重.对2010—2020年南四湖上、下级湖水水质综合污染指数进行M-K趋势性检验,诊断结果中统计量Z分别为-4.11、-3.36,通过了信度99%的显著性检验,序列存在明显下降趋势.2020年南四湖上、下级湖水水质综合污染指数年均值分别为0.796、0.767,2010年分别为0.886、0.907,与2010年相比分别下降10.2%、15.4%,湖泊水环境质量总体出现一定程度的好转.

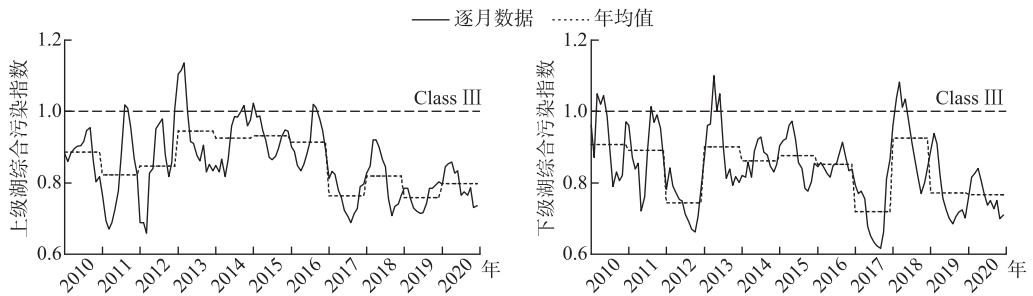


图4 2010—2020年南四湖水质综合污染指数变化

Fig.4 Changes of comprehensive pollution index of water quality in Lake Nansi from 2010 to 2020

2.3 藻密度及水环境要素年内变化特征

根据南水北调东线一期工程的运行规则和南四湖流域的水文气象特征,将南四湖藻密度及水环境要素从年际划分为南水北调东线一期工程运行前后两个部分(2010年1月—2013年12月、2014年1月—2020年12月),从年内划分为汛前、汛中、汛后(2—5月、6—9月、10—1月),从而明晰南四湖湖区2010—2020年藻密度及水环境要素年内分布情况(图5).

结果表明,调水工程使湖区藻密度年内分布发生了明显变化,汛前藻密度平均值由 33.96×10^4 cells/L(工程运行前)下降至 6.42×10^4 cells/L(工程运行后),并具有显著性差异.调水工程引起的汛中、汛后藻密度平均值变化并没有通过差异显著性检验,但南四湖藻密度每年峰值主要集中在汛中(工程运行前),转为出现在汛后(工程运行后).TN、TP的年内各时期浓度在调水工程前后变化规律并不相同,但从氮磷比的角度分析,调水对南四湖湖区氮磷比造成了较大影响,氮磷比汛前、汛中、汛后在工程运行后相对工程运行前显著下降,分别降低了30.7%、45.3%、39.5%,没有改变氮磷比汛前高、汛后低的分布情况. BOD₅年内各时期

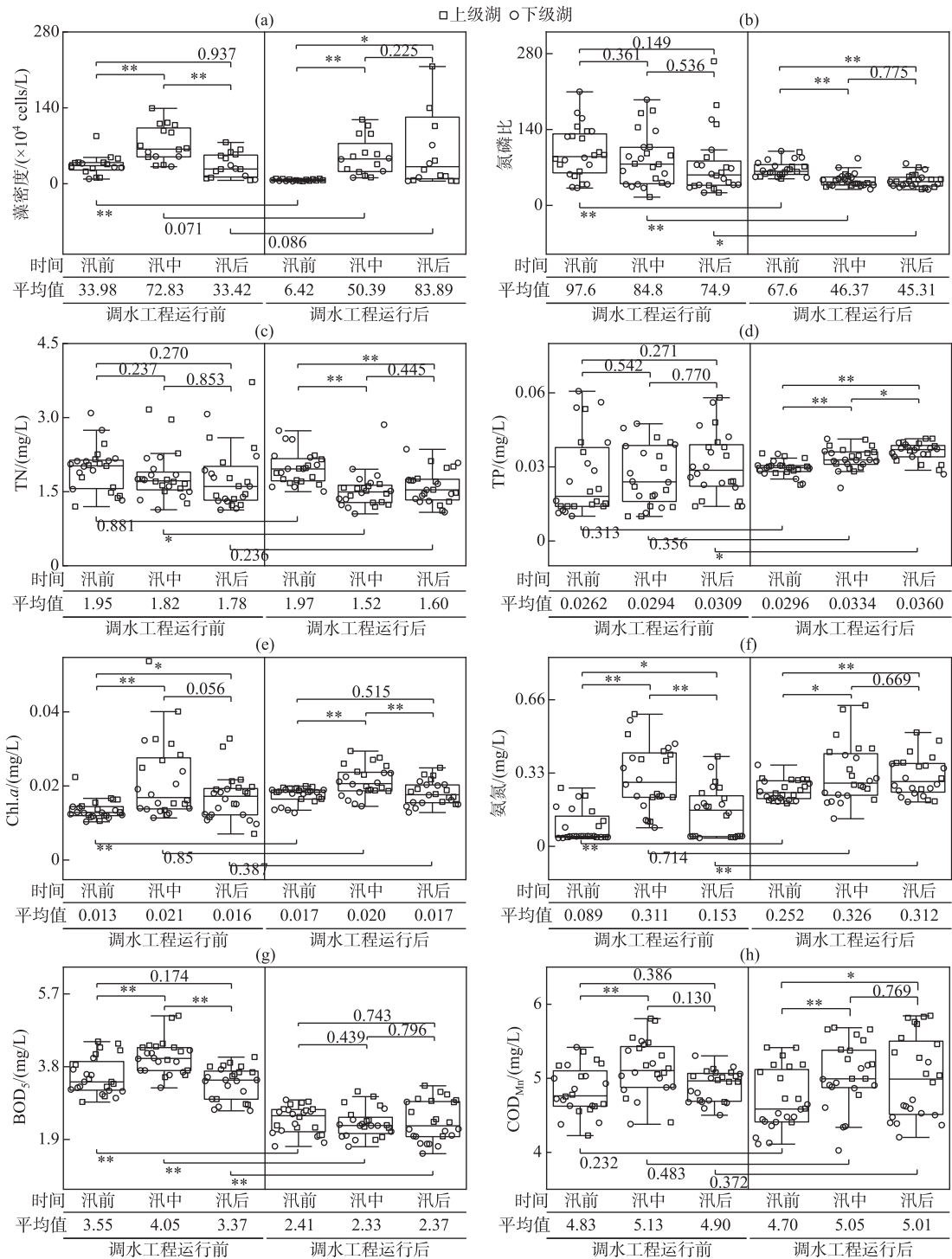


图5 调水前后南四湖藻密度及其水环境要素年内分布特征对比 (图中横括弧显示统计量 P 值, ** 表示在 0.01 级别呈显著差异, * 表示在 0.05 级别呈显著差异)

Fig.5 Comparison of the distribution characteristics of algae density and water environment factors in Lake Nansi before and after water transfer

在调水工程前后也显著下降,分别降低了 32.1%、42.5%、29.7%。Chl.a、氨氮、COD_{Mn}在工程运行前后,年内分布没有明显变化,均在汛中出现较高值。

3 讨论

3.1 南四湖营养元素变化原因分析

对比 2006—2010 年^[20],2010 年以来南四湖整体水质明显改善,但较高浓度的氮使东线一期工程水质保护问题凸显。林雪原等^[21]指出流域 TN 排放中,农田化肥和畜禽养殖贡献率达到 85.39%,而农业面源污染型治理难度大,短期内改善程度较低;二级坝的建立,使南四湖分为上、下级湖,湖中水体流速减缓、污染物滞留时间增加,使水质进一步恶化。南四湖湖面狭长,受纳苏、鲁、豫、皖 4 省 32 县(市)来水, TN 污染发生随机、机理复杂、时空差异性大、来源多和来量大让南四湖流域的 TN 污染治理问题难以突破。

水文气象通过影响水体中污染源的来源、迁移、生态效益等过程直接或间接对水生态环境造成影响。南四湖在 2013—2015 年水文气象条件有所变化(图 2),在人为干预下,2014 年与 2015 年二级湖闸站全年未开闸放水,下级湖总出湖年径流量为“0”。上、下级湖与运河之间阻隔,减少湖泊的连通性与流动性,大大增加了流域入湖污染物在水体滞留时间,水体自净能力和纳污能力都会减弱,加之高温与水浅,水质持续恶化,生态环境受到严重威胁^[22]。为应对严峻的旱情,紧急制定了 2014 年南四湖生态应急调水方案,通过南水北调东线从长江向南四湖实施调水。调水工程引起的外源输入变化,同时南四湖的严重旱情、水体隔绝、营养丰富集,可能是 2013 年与 2015 年期间南四湖水环境指标的时序发生突变和突变点后上升趋势的原因。

3.1.1 入湖河流的影响 入湖河流的水质状况是南四湖水水质状况优劣的决定性因素^[23]。分析 2010—2020 年南四湖上、下级湖水质与对应入湖河流水质相关程度(表 3),南四湖主要入湖河流水质对南四湖整体水质影响显著,其中上级湖与入湖河流的 TN、BOD₅呈显著相关,下级湖与入湖河流的各水质指标都呈显著相关。并结合图 3 和表 4,上、下级湖 TN 处于较高水平,这与入湖河流长期的高浓度氮输入有一定关系。解文静等^[24]也认为南四湖水体接纳入湖河流的污染,河流中有机物污染相对严重,含氮量高。

表 3 2010—2020 年南四湖与主要入湖河流水质指标 Spearman 相关系数
Tab.3 The Spearman correlation coefficient of water quality parameters between
Lake Nansi and rivers inflowing into lake from 2010 to 2020

主要入湖河流	上级湖				
	TN	TP	氨氮	BOD ₅	COD _{Mn}
东鱼河	0.444 **	0.013	0.186	0.356 **	0.115
北沙河	0.409 **	-0.087	0.188	0.486 **	0.122
济梁运河	0.401 **	-0.158	0.117	0.611 **	0.154
主要入湖河流	下级湖				
	TN	TP	氨氮	BOD ₅	COD _{Mn}
十字河	0.398 **	0.164	0.409 **	0.336 **	0.541 **

** 表示在 0.01 水平显著相关, * 表示在 0.05 水平显著相关。

随着南四湖流域城市建设用地和农村建设用地整体分布从点到面的扩大,下垫面条件的改变^[25],导致不透水面积增加和农业面源污染加重。将含暴雨等级以上降雨强度的月份从总体时序中筛选出来,对比降雨时期河流污染程度与多年平均值,见表 4。南四湖流域存在强降水时,河流中各营养元素都存在不同程度的增加,一方面可能是南四湖作为流域内污染源排放的唯一归宿,在受汛期暴雨冲刷的影响,大量的营养元素随排水或雨水淋溶进入水体,湖泊水体污染负荷势必会增加,导致汛中整体水质较差,另一方面可能是河流中径流量与流速增大,使河道中氮磷污染物从底泥中释放再悬浮,进一步增大河流中污染负荷。

3.1.2 调水工程的影响 调水是通过改变水文条件和营养盐浓度间接影响藻类的生长与消落,而且湖泊本身存在点面源污染,湖区水生态环境不会因为调水立刻发生变化,增加了影响因子量化的困难性,导致难以具

表 4 主要河流降雨时期水质与多年均值对比

Tab.4 Water quality differences between periods of rainfall and multi-year average

河流		TN/(mg/L)	TP/(mg/L)	氨氮/(mg/L)	BOD ₅ /(mg/L)	COD _{Mn} /(mg/L)
东鱼河	强降雨时期均值	2.97	0.12	1.11	5.40	8.07
	多年均值	2.76	0.10	0.79	4.54	7.43
	统计量 <i>P</i> 值	0.038 *	0.050 *	0.013 *	0.041 *	0.268
北沙河	强降雨时期均值	3.31	0.11	0.83	2.66	5.23
	多年均值	2.69	0.09	0.77	2.65	5.06
	统计量 <i>P</i> 值	<0.01 **	0.010 **	0.878	0.525	0.076
济梁运河	强降雨时期均值	3.15	0.15	1.11	3.67	5.49
	多年均值	3.11	0.11	0.96	3.57	5.47
	统计量 <i>P</i> 值	0.053	0.015 *	0.232	0.174	0.013 *
十字河	强降雨时期均值	3.41	0.18	1.22	4.22	5.60
	多年均值	3.4	0.10	0.96	3.70	5.36
	统计量 <i>P</i> 值	0.996	<0.01 **	0.357	0.061	<0.01 **

** 表示在 0.01 级别呈显著差异, * 表示在 0.05 级别呈显著差异.

体分析受水区水环境与调水工程响应关系,但从水环境指标的长序列变化来看,上半年的规律性调水营造出了年内与年际的周期性水文脉冲,影响了水环境中各要素或各要素之间的转化和传输,改变了湖泊生态系统的自然规律^[26].

对比调水工程建设运行前后(图 5),汛前调水期氮和磷浓度有所增加,可能是调水泄流产生的水动力扰动会让底泥中大量悬浮物进入水体,而底泥作为污染物的天然蓄积池,沉积物营养盐含量远远高于背景值^[27],释放的加快造成水体二次污染.从外源污染输入方面分析,南四湖调水期水质的改善可能是经过骆马湖与京杭运河的来水量大且水质较好.从内源污染方面分析,由于南四湖窄长的湖泊形态和泵站抽排水,湖泊水位波动较大(图 2),在自然变化和人为调水的干预下,水位是受到影响最显著的水文过程^[28],有研究表明^[29-31],水位波动强烈时,会导致湖泊的自净能力和环境承载能力降低.湖泊过高水位对入湖河道的顶托和水漫坡地面积增加,导致地面径流和地质带来的营养盐增多,导致湖泊富营养化;湖泊过低水位会对污染输入响应更剧烈,水环境指标易出现峰值,增加突发环境污染事件的风险.

3.2 藻密度的影响因素

通过南四湖藻密度与各指标 Spearman 相关性分析结果表明,水温、降水对南四湖藻密度的变化起着至关重要的作用(表 5).由上述分析可知,降雨导致大量外源污染物进入南四湖水体,通过改变藻类所需营养盐浓度而间接影响藻类生长.南四湖藻密度四季变化明显,有大量研究表明^[32-34],当温度较低时,水体藻类生长受到限制,藻在春季生物量并不高,夏季日照增强、水温较高,随着温度的升高,绿藻、蓝藻等喜温浮游植物大量生长.温度升高与藻类生长消落过程会增强水体中氮的吸收利用及脱氮能力^[35],这可能是造成藻的生物量与氮呈负相关,湖体氮浓度峰值一般出现在初春的原因(图 5).

表 5 南四湖藻密度与主要水环境要素 Spearman 相关系数

Tab.5 The Spearman correlation coefficient between algae density and water environment factors in Lake Nansi

站点	TN	TP	氮磷比	Chl. <i>a</i>	氨氮	BOD ₅	COD _{Mn}	水位	水温	降水
上级湖	-0.115	0.276 *	-0.321 **	0.311 **	0.056	0.139	0.173 *	0.04	0.584 **	0.431 **
下级湖	-0.212 *	0.242 *	-0.357 **	0.244 **	0.081	0.093	0.275 **	0.057	0.545 **	0.413 **

** 表示在 0.01 水平显著相关, * 表示在 0.05 水平显著相关.

对不同营养盐的相关关系对藻密度的影响程度并不一致,其中与氮磷比呈显著负相关,与 TP 呈显著正相关.氮和磷作为藻类生长的必需营养元素,两者之比对藻密度的变化有着重要的影响^[36],Redfield 等^[37]认

为浮游植物生长最适氮磷比为 16:1,大于此值时为磷素限制状态,也有研究发现^[38]最适氮磷比根据不同水体而发生变化.南四湖氮磷比远远高于最适氮磷比,结合图 3、图 5 分析,氮磷比在调水工程建设运行后明显下降,而且藻密度在调水后的增长趋势与 TP 浓度上升基本上保持一致,表明南四湖可能为磷限制性湖泊.藻密度细胞与 Chl.a 浓度都为表征藻类生物量的 2 种重要方法,两者之间也具有显著的相关性.南四湖藻密度与 COD_{mn}呈显著正相关,与 BOD₅相关性较低,与田时弥^[39]、Qu 等^[6]的研究结果相似,水中有机物经过氧化分解后也是藻类可以利用营养盐的直接来源.

4 结论

1)2010—2020 年南四湖上、下级湖水水质综合污染指数年均值范围分别为 0.759~0.945、0.719~0.926,2020 年南四湖上、下级湖水水质综合污染指数年均值分别为 0.796、0.767,2010 年为 0.886、0.907,与 2010 年相比分别下降 10.2%、15.4%,南四湖整体水质逐渐改善,但 TN 单项污染指数仍超标,与入湖河流长期的高浓度 TN 输入有关.南四湖水污染防治与治理可将重点落脚于入湖河流关键性水质指标污染的治理.

2)同时受南水北调东线工程运行初期与严峻旱情的叠加效应影响,南四湖藻密度、TP、氨氮、Chl.a 监测序列在 2013—2015 年有突变点,且在突变点后指标浓度均呈增加趋势.

3)南水北调东线工程的运行,改变了南四湖藻密度年内分布情况,改善了调水期总体水质情况.藻密度年内波动较为强烈,在调水期结束后的 10 月份出现峰值,其中 2016 年上级湖藻密度高达 520.0×10^4 cells/L.

4)南四湖藻密度的变化不仅仅与 TP、氮磷比、COD_{mn}呈显著相关,还与水温和降水关系密切.

5 参考文献

- [1] Yang Y, Yin L, Zhang QZ. Quantity versus quality in China's south-to-north water diversion project: A system dynamics analysis. *Water*, 2015, 7(12): 2142-2160. DOI: 10.3390/w7052142.
- [2] Zeng QH, Qin LH, Li XY. The potential impact of an inter-basin water transfer project on nutrients (nitrogen and phosphorous) and chlorophyll a of the receiving water system. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 675-686. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.07.042.
- [3] Zhang HM, Jing YD, Sun XX. Evolution of spatio-temporal pattern and prevention partition of TN and TP of non-point source pollution in nansi lake basin. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2): 19-26. DOI: 10.13961/j.cnki.stbetb.2018.02.004. [张华美, 荆延德, 孙笑笑. 南四湖流域非点源污染 TN/TP 时空格局及防治分区演变. 水土保持通报, 2018, 38(2): 19-26.]
- [4] Xu H, Sang GQ, Yang LY et al. Temporal and spatial distribution characteristics of water quality in Nansihu Lake in recent ten years. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019, 167(2): 47-52. [徐好, 桑国庆, 杨丽原等. 近十年来南四湖水质时空变化特征研究. 海洋湖沼通报, 2019, 167(2): 47-52.]
- [5] Qin BQ. Shallow lake limnology and control of eutrophication in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2020, 32(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501. [秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究. 湖泊科学, 2020, 32(5): 1229-1243.]
- [6] Qu X, Chen YS, Liu H et al. A holistic assessment of water quality condition and spatiotemporal patterns in impounded lakes along the eastern route of China's South-to-North water diversion project. *Water Research*, 2020, 185: 116275. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116275.
- [7] Li Q, Wang GQ, Xie G et al. Characteristics of phytoplankton and macrozoobenthos communities in Nansihu Lake under the influence of hydrologic pulse. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2020, 56(3): 454-461. DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020178. [李庆, 王国强, 谢刚等. 水文脉冲影响下南四湖浮游植物和大型底栖动物群落的不同变化特征. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(3): 454-461.]
- [8] Zhang CM, Zhu YX, Song GF et al. Spatiotemporal pattern of phytoplankton community structure and its determining factors in the channel of the middle route of South-to-North Water Diversion Project. *J Lake Sci*, 2021, 33(3): 675-686. DOI: 10.18307/2021.0305. [张春梅, 朱宇轩, 宋高飞等. 南水北调中线干渠浮游植物群落时空格局及其决定因子. 湖泊科学, 2021, 33(3): 675-686.]
- [9] Wu DH, Jia GH, Wu HY. Chlorophyll-a concentration variation characteristics of the algae-dominant and macro-phyte-dominant areas in Lake Taihu and its driving factors, 2007-2019. *J Lake Sci*, 2021, 33(5): 1364-1375. DOI: 10.18307/

- 2021.0506. [吴东浩, 贾更华, 吴浩云. 2007—2019年太湖藻型和草型湖区叶绿素 a 变化特征及影响因子. 湖泊科学, 2021, 33(5): 1364-1375.]
- [10] Deng WW, Wang R, Liu ZW *et al.* The influencing factors of critical transition in shallow lakes revealed by model. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(1): 83-94. [邓文文, 王荣, 刘正文等. 模型揭示的浅水湖泊稳态转换影响因素分析. 地球科学进展, 2021, 36(1): 83-94.]
- [11] Peng K, Li TM, Liu L *et al.* Community structure of phytoplankton and bio-assessment of water quality in Lake Luoma, northern Jiangsu Province. *J Lake Sci*, 2018, 30(1): 183-191. DOI: 10.18307/2018.0118. [彭凯, 李太民, 刘利等. 苏北骆马湖浮游植物群落结构及其水质生物评价. 湖泊科学, 2018, 30(1): 183-191.]
- [12] Dong GC, Leng CM, Cong XR *et al.* Phytoplankton community and driving environmental factors in Lake Dongping after 3 years implementation of the east route of South-to-North Water Diversion Project. *J Lake Sci*, 2022, 34(1): 61-73. DOI: 10.18307/2022.0107. [董贯仓, 冷春梅, 丛旭日等. 南水北调东线工程运行3年后东平湖浮游植物群落特征及环境驱动因子. 湖泊科学, 2022, 34(1): 61-73.]
- [13] Nong XZ, Shao DG, Shang YM *et al.* Analysis of spatio-temporal variation in phytoplankton and its relationship with water quality parameters in the South-to-North Water Diversion Project of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(9): 593. DOI: 10.1007/s10661-021-09391-6.
- [14] Li Y, Zhang Z, Cheng JH *et al.* Water quality change and driving forces of Lake Hongze from 2012 to 2018. *J Lake Sci*, 2021, 33(3): 715-726. DOI: 10.18307/2021.0308. [李颖, 张祯, 程建华等. 2012—2018年洪泽湖水质时空变化与原因分析. 湖泊科学, 2021, 33(3): 715-726.]
- [15] Kiely G, Albertson JD, Parlange MB. Recent trends in diurnal variation of precipitation at Valentia on the west coast of Ireland. *Journal of Hydrology*, 1998, 207(3/4): 270-279. DOI: 10.1016/S0022-1694(98)00143-7.
- [16] 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.]
- [17] Chen JX, Yan ZQ, Chen XY. Changes of precipitation and natural run-off in Nansi Lake Basin from 2000 to 2016. *Journal of China Hydrology*, 2021. [陈吉星, 颜志庆, 陈祥宇. 南四湖流域2000—2016年降水与天然径流量变化特征分析. 水文, 2021.]
- [18] He KD, Gao W, Duan CQ *et al.* Water level variation and its driving factors in Lake Dianchi, Fuxian and Yangzong during 1988–2015. *J Lake Sci*, 2019, 31(5): 1379-1390. DOI: 10.18307/2019.0504. [贺克雕, 高伟, 段昌群等. 滇池、抚仙湖、阳宗海长期水位变化(1988—2015年)及驱动因子. 湖泊科学, 2019, 31(5): 1379-1390.]
- [19] Hosking JRM. L-moments: Analysis and estimation of distributions using linear combinations of order statistics. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B: Methodological*, 1990, 52(1): 105-124. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1990.tb01775.x.
- [20] Wu ZH, Zhang K, Jin LR *et al.* Analysis of spatial distribution of water quality and assessment of water quality improvement in Nansi Lake. *Water Resources Protection*, 2012, 28(6): 1-7, 18. [武周虎, 张可, 金玲仁等. 南四湖水质空间分布特征分析与改善效果评估. 水资源保护, 2012, 28(6): 1-7, 18.]
- [21] Lin XY, Jing YD. Assessment and classified control of agricultural non-point source pollution in Nansihu Lake Basin, Shandong Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3278-3285. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2014.0290. [林雪原, 荆延德. 山东省南四湖流域农业面源污染评价及分类控制. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3278-3285.]
- [22] Cheng BF, Yan DH, Luo XX *et al.* Progresses on the study of drought impact on surface water quality. *Arid Zone Research*, 2014, 31(1): 32-37. DOI: 10.13866/j.azr.2014.01.004. [程兵芬, 严登华, 罗先香等. 干旱对地表水体水质的影响研究进展. 干旱区研究, 2014, 31(1): 32-37.]
- [23] Gao XP, Li WM, Zhang C *et al.* Impact of inflowing rivers on water quality of Nansi Lake. *Water Resources Protection*, 2013, 29(2): 1-5. [高学平, 李文猛, 张晨等. 入湖河流对南四湖水质的影响. 水资源保护, 2013, 29(2): 1-5.]
- [24] Xie WJ, Wang S, Lou SC *et al.* Evaluation of temporal water quality change (2008–2014) and the cause analysis in the upper-reach lakes of Lake Nansi, Shandong Province. *J Lake Sci*, 2016, 28(3): 513-519. DOI: 10.18307/2016.0306. [解文静, 王松, 娄山崇等. 山东南四湖上级湖水水质变化评价(2008—2014年)及成因分析. 湖泊科学, 2016, 28(3): 513-519.]
- [25] Jiang Y, Xue LF, Yu HX *et al.* Change of steam structure in the Nansi Lake Basin during the urbanization process since

- 1980s. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1): 135-142. DOI: 10.18307/2017.0115. [江燕, 薛丽芳, 于红学等. 近30年来南四湖流域城市化进程中的水系变化分析. 湖泊科学, 2017, **29**(1): 135-142.]
- [26] Ye C, Cheng XL, Zhang KR *et al.* Hydrologic pulsing affects denitrification rates and denitrifier communities in a revegetated riparian ecotone. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, **115**: 137-147. DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.08.018.
- [27] Wang LF, Xia J, Yu JJ *et al.* Spatial variation, pollution assessment and source identification of major nutrients in surface sediments of Nansi Lake, China. *Water*, 2017, **9**(6): 444. DOI: 10.3390/w9060444.
- [28] Geng MM, Niu YD, Liao XH *et al.* Inter-annual and intra-annual variations in water quality and its response to water-level fluctuations in a river-connected lake, Dongting Lake, China. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, **29**(10): 14083-14097. DOI: 10.1007/s11356-021-16739-5.
- [29] Yan XY, Zhang Y, Li YY *et al.* Hydrologic and physicochemical factors co-drive seasonal changes of phytoplankton during dynamic water diversion processes in the Danjiangkou Reservoir. *J Lake Sci*, 2021, **33**(5): 1350-1363. DOI: 10.18307/2021.0505. [闫雪燕, 张莹, 李玉英等. 动态调水过程水文和理化因子共同驱动丹江口水库库湾浮游植物季节变化. 湖泊科学, 2021, **33**(5): 1350-1363.]
- [30] Wang ZX, Wang TX, Liu XL *et al.* Water level decline in a reservoir: Implications for water quality variation and pollution source identification. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, **17**(7): 2400. DOI: 10.3390/ijerph17072400.
- [31] Ding QZ, Liu XQ, Zhang XK. Impacts of water level fluctuations on substrate environments of lakeshore zone of the lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *J Lake Sci*, 2014, **26**(3): 340-348. DOI: 10.18307/2014.0302. [丁庆章, 刘学勤, 张晓可. 水位波动对长江中下游湖泊湖滨带底质环境的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 340-348.]
- [32] Trombetta T, Vidussi F, Mas S *et al.* Water temperature drives phytoplankton blooms in coastal waters. *PLoS One*, 2019, **14**(4): e0214933. DOI: 10.1371/journal.pone.0214933.
- [33] Beaver JR, Casamatta DA, East TL *et al.* Extreme weather events influence the phytoplankton community structure in a large lowland subtropical lake (Lake Okechobee, Florida, USA). *Hydrobiologia*, 2013, **709**(1): 213-226. DOI: 10.1007/s10750-013-1451-7.
- [34] Xiao WP, Wang L, Laws E *et al.* Realized niches explain spatial gradients in seasonal abundance of phytoplankton groups in the South China Sea. *Progress in Oceanography*, 2018, **162**: 223-239. DOI: 10.1016/j.pocean.2018.03.008.
- [35] Zhao F, Xu H, Zhan X *et al.* Spatial differences and influencing factors of denitrification and ANAMMOX rates in spring and summer in Lake Taihu. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2296-2302. DOI: 10.13227/j.hjxx.202008303. [赵锋, 许海, 詹旭等. 太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素. 环境科学, 2021, **42**(5): 2296-2302.]
- [36] Schindler DW, Hecky RE, Findlay DL *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, **105**(32): 11254-11258. DOI: 10.1073/pnas.0805108105.
- [37] Kim HS, Hwang SJ, Shin JK *et al.* Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 255-267. DOI: 10.1007/s10750-006-0501-9.
- [38] 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.
- [39] Tian SM, Yang Y, Qiao YM *et al.* Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang River, Pearl River Basin. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 31-37. DOI: 10.18307/2015.0104. [田时弥, 杨扬, 乔永民等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 31-37.]