

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.010

鄱阳湖水文情势演变对水质的驱动作用

窦佳瑶^{1,2}, 王 华^{1,2}, 王世岩³, 韩 祯³, 闫雨婷^{1,2}

(1. 河海大学环境学院; 2. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室;
3. 中国水利水电科学研究院生态环境研究所)

摘要: 基于鄱阳湖长期观测数据,采用多种数理统计方法探究了水文情势演变的趋势性、突变性和周期性特征,选取高锰酸盐指数、氨氮和总磷指标解析了水质波动过程,剖析了不同水文参数对水质的驱动作用。结果表明:1962—2022年水位普遍下降,平均变化速率达 -0.0135 m/a ,突变年份集中于2003年左右,水位变化周期约为36 a;1988—2022年水质呈先下降后稳定趋势,总磷为主要超标因子,超标倍数范围为 $0.02\sim 2.31$,自2015年以来各站点水质指标的小幅波动态势预计在未来大部分站点仍将持续;高锰酸盐指数与水文参数关联性较弱,氨氮和总磷则与多项水文参数显著相关,水位是影响氮磷的首要因素,水温、降水量及入湖水量对水质变化有重要调控作用,水位变化对氨氮有显著单向影响,对总磷影响相对复杂。

关键词: 水文情势;水质变化;驱动作用;鄱阳湖

Driving effect of hydrological regime evolution on water quality in Poyang Lake

Dou Jiayao^{1,2}, Wang Hua^{1,2}, Wang Shiyan³, Han Zhen³, Yan Yuting^{1,2}

(1. College of Environment, Hohai University;

2. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University;

3. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research)

Abstract: Based on the long-term observation data of Poyang Lake, various mathematical statistical methods were used to explore the trend, mutation, and periodic characteristics of the hydrological regime evolution, and the fluctuation process of water quality was analyzed by selecting the indicators of permanganate index, ammonia nitrogen, and total phosphorus. Moreover, the driving effects of different hydrological parameters on water quality were analyzed. The results show that the water level of Poyang Lake has generally decreased from 1962 to 2022, with an average rate of change of -0.0135 m/a , and the abrupt change year is concentrated around 2003, with a water level change cycle of about 36 years; the water quality shows a decreasing-and-then-stabilizing trend from 1988 to 2022, with total phosphorus as the main exceedance factor, and the exceedance multiples range from 0.02 to 2.31; the slight fluctuating trend of water quality indicators at each station since 2015 is expected to continue in the future at most stations; the permanganate index is weakly correlated with hydrological parameters, and ammonia nitrogen and total phosphorus are significantly correlated with many hydrological parameters. The water level is the main factor influencing the concentration of nitrogen and phosphorus. Water temperature, precipitation amount, and inflow volume of water have significant regulatory effects on water quality changes. Water level changes have a significant unidirectional effect on ammonia nitrogen and a relatively complex effect on total phosphorus.

Key words: hydrological regime; water quality change; driving effect; Poyang Lake

鄱阳湖位于江西省北部、长江中下游南岸,是中国第一大淡水湖泊,具有重要的生态意义^[1-2]。作为亚洲规模最大的候鸟越冬地和国际重要湿地之一,鄱阳湖展现了极高的生物多样性^[3-4]。该湖泊在长江流域水资源调控、水环境保护和水生态安全中发挥着重要作用,其水体状况直接关系到区域生态系统稳定与可持续发展。因此,研究鄱阳湖水文情势与水质状况对维护生态系统安全具有重要意义。

随着气候变化与人类活动的加剧,鄱阳湖水文情势与水质状况正面临前所未有的挑战。近年来,鄱阳湖的水位异常变化引起了广泛关注。受全球气候变暖、长江径流减少、上游水库调蓄及人为采砂活动等因素影

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC320900001);国家自然科学基金项目(52179064);江西省“科技+水利”联合计划项目(2023KSG003);2024年度江西省水利厅科技项目(202426ZDKT17)

作者简介: 窦佳瑶(2002—),女,硕士研究生,主要从事流域水环境治理研究。E-mail:doujiayao@hhu.edu.cn

通信作者: 王华(1983—),男,教授,博士,主要从事流域水环境治理研究。E-mail:wanghua543543@163.com

响,鄱阳湖水位屡创新低^[5],呈现枯水期提前、枯水时间延长和枯水程度加剧的态势^[6]。这些剧烈变化不仅影响了居民日常生活,更对湿地植被和生态系统健康构成威胁^[7]。此外,鄱阳湖的年际和年内水位波动也导致了湖泊水环境的动态变迁,对水质造成了深远影响^[8]。在此背景下,分析鄱阳湖水文情势演变对水质的驱动作用显得尤为重要。已有部分学者围绕湖泊水文与水质关系开展了研究。例如:李冰等^[9]分析了 2004—2014 年鄱阳湖出流水质对水位的响应,发现水位波动与水质呈显著负相关关系,且湖相状态下水质良好的概率比河相状态更大;Li 等^[10]基于 2009—2014 年鄱阳湖水文与水质数据,探讨了湖泊水情对水质的影响,发现污染物指标与水位呈显著负相关关系(特别是总氮、高锰酸盐指数及悬浮物),调节支流污染物排放与湖泊水位可有效改善水质;李海辉^[11]对比了 2014—2015 年鄱阳湖主湖区和碟形湖水质对水位变化的响应,发现主湖区多项水质指标与水位呈负相关关系,而碟形湖仅 pH 与水位存在关联;朱利英等^[12]分析了 2019—2021 年赣江和鄱阳湖水位、降水量及浊度等要素对水质的影响,相关性分析表明水位是影响水质指标的首要因素,其次是降水量和浊度;孙继万等^[13]探究了 2010—2022 年鄱阳湖氮磷时空特征及其影响因子,指出入湖污染负荷、水位变化及水量分布格局是导致污染物浓度时空差异的主要原因。然而,上述研究大多基于短期数据,难以呈现长时间尺度下水文与水质的复杂演变过程,无法全面揭示长期水文变化对水质的深远影响。此外,现有研究虽指出水文条件变化对水质存在影响,但对于水文因素如何具体驱动水质的变化,尚缺乏系统性和多维度的深入分析。

本文基于鄱阳湖主要站点的实测水文与水质数据,探究了长时间序列水文情势的演变特征,解析了关键水质指标的变化过程,并通过一系列统计分析方法,由二者的相关性、关联程度到因果关系进行逐一剖析,多维度揭示出水文情势变化对水质的驱动作用,以期为湖泊管理与规划、水环境治理修复提供科学依据,促进鄱阳湖流域及周边区域的可持续发展。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

鄱阳湖(28°22'N~29°45'N,115°47'E~116°45'E)位于江西省北部,横跨九江、南昌和上饶三市(图 1),流域面积 16.2 万 km²^[14]。作为典型的通江湖泊,鄱阳湖上游承接修水、赣江、抚河、信江和饶河 5 条河流及区间小河流的来水,经湖区调蓄后由湖口注入长江,五河向鄱阳湖输入的流量占湖泊总输入量的 85.4%^[15]。鄱阳湖处于亚热带湿润季风气候区,年内降水分布不均,洪季降雨占全年的 44%,而枯季仅占全年的 24%^[16]。受长江及五河水文过程综合影响,鄱阳湖水文情势年内变化明显,丰水期湖泊水位上升,湖区库容与面积显著大于枯水期,具有“高水是湖、低水似河”的季节性特点^[17]。

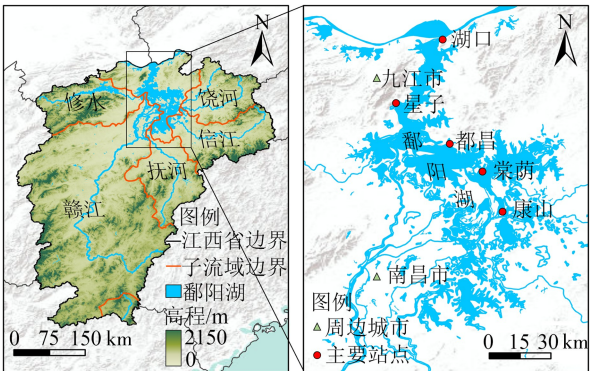


图 1 鄱阳湖概况

Fig. 1 Overview of Poyang Lake

1.2 研究数据

选取湖口站、星子站、都昌站、棠荫站和康山站为代表性站点,1962—2020 年逐日水位数据和 2008—2020 年逐月水温、降水、入湖水量数据来自《中华人民共和国水文年鉴》;2021—2022 年逐月水文数据和 1988—2022 年逐月高锰酸盐指数、氨氮、总磷数据来自江西省水文局和江西省水文监测中心,各项指标含量的测定均遵循国家标准,其中高锰酸盐指数测定采用高锰酸盐指数法(GB 11892—1989《水质 高锰酸盐指数的测定》),总磷测定采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》),氨氮测定采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》)。

2 研究方法

2.1 水文统计分析方法

2.1.1 趋势性分析

考虑到不同方法的优势及适用场景,运用线性倾向估计法、Mann-Kendall 趋势检验法分析水文序列的趋

势演变特征。线性倾向估计法通过线性回归建立水文参数与时间的关系,旨在量化水文变化的长期趋势^[18],但对数据分布存在假设,易受异常值影响。Mann-Kendall 趋势检验法无需假定样本数据的特定分布,计算流程简便,适用于各种类型和顺序变量的趋势分析^[19-20]。

2.1.2 突变性分析

Mann-Kendall 突变检验法是识别水文序列突变点的有效方法,通过构建秩序列,分析统计量序列,可有效定位时间序列的突变点^[21]。该方法对数据预处理要求低,对样本量适应性强。滑动 t 检验法通过比较滑动窗口前后两组数据子集均值差异,判断其是否超过显著性水平,以检测特定时间段内的突变点^[22]。该方法对均值差异明显的突变较敏感,能精准确定突变时间点。两种方法相互补充,Mann-Kendall 突变检验初步筛选了潜在突变时间,滑动 t 检验进一步确定了突变具体时间,可有效提高准确性与可靠性。

2.1.3 周期性分析

小波分析法常用于评估水文要素的周期性变化^[23]。通过对基础小波函数的伸缩和平移变换,构建一系列小波函数,进而对信号进行逼近处理。通过计算信号在不同时间尺度下的小波系数,并基于可视化结果判断其主要周期^[24]。

2.2 水质综合评价方法

2.2.1 单因子指数法

单因子指数法通过比较各项水质指标的实测数据与国家标准限值,识别出最劣单项指标所属的水质类别,实现对水质类别的科学划分^[25]。污染物 i 的单因子指数 $P_i > 1$ 表示水质超标,超标倍数 $B = P_i - 1$ 。参照《江西省地表水(环境)功能区划》规定,鄱阳湖湖区水质管理遵循 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》中的Ⅲ类水质标准:高锰酸盐指数小于或等于 6 mg/L,氨氮质量浓度小于或等于 1 mg/L,总磷质量浓度小于或等于 0.05 mg/L。

2.2.2 R/S 分析法

在运用单因子指数法快速评估水质现状的基础上,利用 R/S 分析法揭示水质变化的长期趋势,为水质规划与管理提供科学依据。 R/S 分析法将原始序列划分为多个子区间,计算每个子区间的极差与标准差,并采用最小二乘法建立线性回归方程,得到的斜率即为 Hurst 指数(H)^[26]。根据 H 对水质变化特征进行定量分析,当 $H = 0.5$ 时,表示时间序列遵循独立分布的随机过程;当 $0 \leq H < 0.5$ 时,表示时间序列倾向于在短期内发生逆转;当 $0.5 < H \leq 1$ 时,表示时间序列在较长时间内保持一致变化^[27]。

2.3 水文情势与水质关系的定量分析方法

2.3.1 Pearson 相关性分析

Pearson 相关性分析用于量化不同变量之间的线性关系强度与方向。相关系数的取值范围为 $-1 \sim 1$,当相关系数为正值时,表明两个变量存在正相关关系;当相关系数为负值时,表明存在负相关关系;相关系数为零,表明两个变量不存在线性相关性^[28]。

2.3.2 灰色关联分析

通过 Pearson 相关性分析初步揭示水文与水质的关系后,采用灰色关联分析评估不同水文参数对水质指标影响的相对重要性。Pearson 相关性分析提供了线性关系的量化指标,灰色关联分析通过比较各因素之间的关联度,全面评估水文情势对水质的影响。灰色关联分析作为一种多因素统计分析方法,通过序列几何曲线相似度定量评估系统中各因素关系的强弱、大小和次序^[29]。

2.3.3 Liang-Kleeman 信息流

在分析水文-水质动态关系的基础上,运用 Liang-Kleeman 信息流法,定量解析二者之间的信息传递,厘清水文参数与水质指标的因果关联。该方法基于信息流理论,通过量化两个时间序列的信息流传递,揭示因果效应^[30-31]。

3 结果与分析

3.1 鄱阳湖水文情势演变特征

水位作为衡量湖泊水文状况的关键指标,直接影响着湖泊水量、水质及生态系统健康^[32]。本文以水位为代表性指标,探究鄱阳湖水文情势演变规律,分析其趋势性、突变性和周期性,这些特征对于理解水文情势

对水质产生的长期效应与短期影响至关重要。鄱阳湖 1962—2022 年各站点水位呈一致下降趋势(图 2),湖口站、星子站、都昌站、棠荫站和康山站的水位变化速率分别为-0.006 5、-0.013 6、-0.023 1、-0.015 3、-0.009 0 m/a,平均变化速率达-0.013 5 m/a,都昌站的下降趋势最显著。通过 Mann-Kendall 趋势检验法进一步分析,五站 Z 统计量分别为-0.90、-1.79、-2.72、-2.21 和-1.88,均小于 0,特别是都昌站和棠荫站的 $|Z|>1.96$,通过显著性检验($p<0.05$),表明水位下降趋势较为显著。值得注意的是,自 2003 年三峡水库蓄水运行以来,鄱阳湖水位发生明显下降:工程运行前(1962—2002 年)湖区平均水位为 14.06 m,运行后(2003—2022 年)水位下降至 13.25 m,降幅达 0.81 m。分段趋势分析结果显示,大坝建设前后水位变化均较为平稳,两个时期的 $|Z|$ 别为 1.13 和 0.03($p>0.05$),表明工程运行虽加剧水位下降趋势,但未改变原有非显著演变特征。上述结果揭示了鄱阳湖近 60 年来水位的普遍下降趋势,预示湖泊可能会进入偏低水位态势。

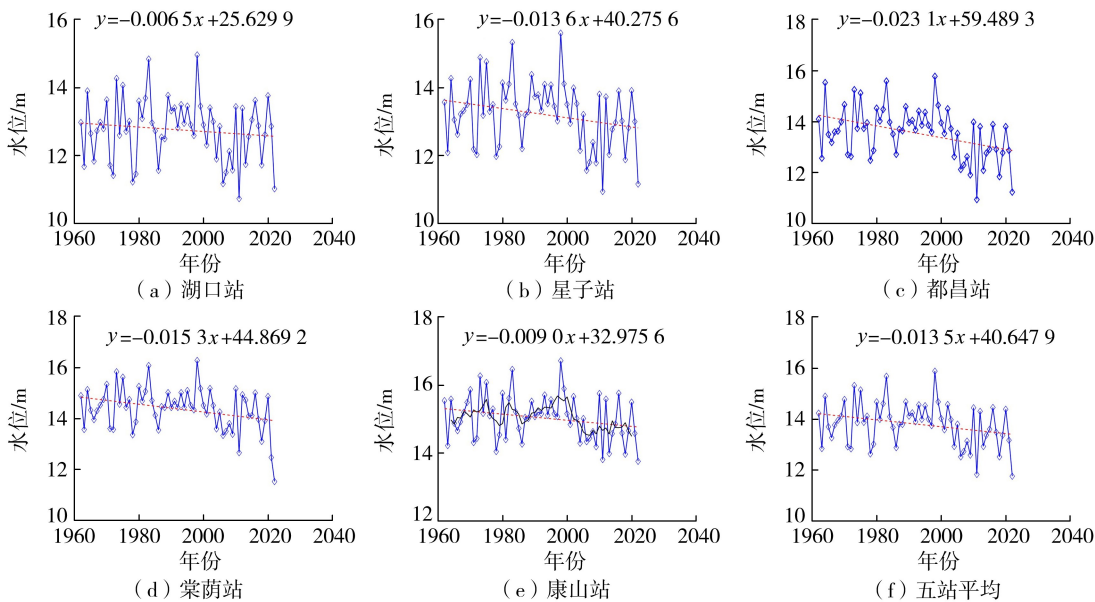


图 2 鄱阳湖 1962—2022 年各站点年均水位变化趋势

Fig. 2 Trend of annual average water level changes at various stations of Poyang Lake from 1962 to 2022

鄱阳湖 1962—2022 年各站点水位突变模式具有相似性(图 3)。Mann-Kendall 突变检验结果显示(图 3(a)),湖口站和康山站在 2003 年、2015 年和 2020 年前后发生突变;星子站在 2003 年和 2020 年左右出现显著突变;都昌站在 2003 年左右发生显著突变;棠荫站在 2017 年发生突变。为进一步验证突变点,采用滑动 t 检验法进行分析,结果显示(图 3(b)),湖口站、星子站和都昌站在 1988 年经历水位突变上升后,在 2003 年转为突变下降;棠荫站和康山站主要在 2003 年经历突变下降。综合两种方法可知,鄱阳湖各站点水位变化的突变年份主要集中在 2003 年左右,此后鄱阳湖水文情势显著变化,表现为整体水位值较 2003 年前明显下降,与戴雪等^[33]研究结果一致。这一变化主要归因于 2003 年三峡水库正式开始蓄水运行,改变了长

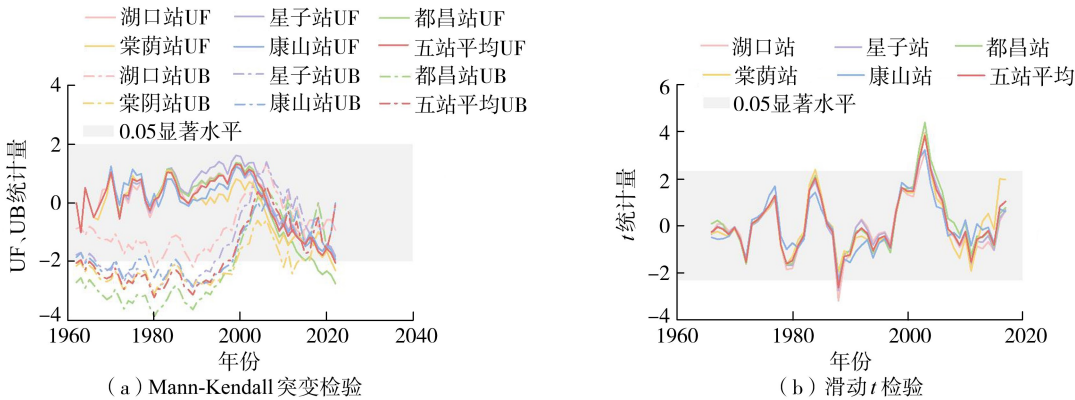


图 3 鄱阳湖 1962—2022 年各站点年均水位突变检验结果

Fig. 3 Test results of sudden change of annual average water level at various stations of Poyang Lake from 1962 to 2022

江中下游径流节律,导致鄱阳湖枯水期水位显著下降、枯水期提前且持续时间延长^[34-35]。Mann-Kendall 检验揭示的次生突变点虽未通过滑动 t 检验,但这些时间点与区域环境事件存在关联,例如 2015 年超强厄尔尼诺事件导致流域降水异常,进而影响了入湖径流和水位波动,而 2020 年则受到长江流域特大洪水事件的显著影响。

鄱阳湖 1962—2022 年各站点水位存在相似的周期性特征。通过小波系数实部等值线分析(图 4),湖口站、星子站和都昌站存在 41~44 a 和 55~57 a 两个主要的时间尺度,而棠荫站和康山站对应 42~45 a 和 54~56 a 两个时间尺度。小波方差分析进一步确认了水位变化的周期特征(图 5(a)),各站点均存在两个相对明显的峰值,湖口站、星子站和都昌站为 56 a 和 43 a,棠荫站和康山站则为 55 a 和 44 a。其中,最大峰值对应于 56 a 和 55 a 的时间尺度,表明该时间尺度上的周期震荡最显著。基于主周期趋势分析(图 5(b)),可以确定不同时间尺度下水位变化的平均周期及水位转换特征。在 55~56 a 特征时间尺度上,各站点水位变化的平均周期均为 36 a 左右,大约经历了两个高-低水位转换期。总体而言,鄱阳湖不同站点在水位变化周期特征上表现出高度一致性,这种周期性变化规律可能与湖泊自然循环过程密切相关,为理解水文情势对水质的长期效应奠定了基础。

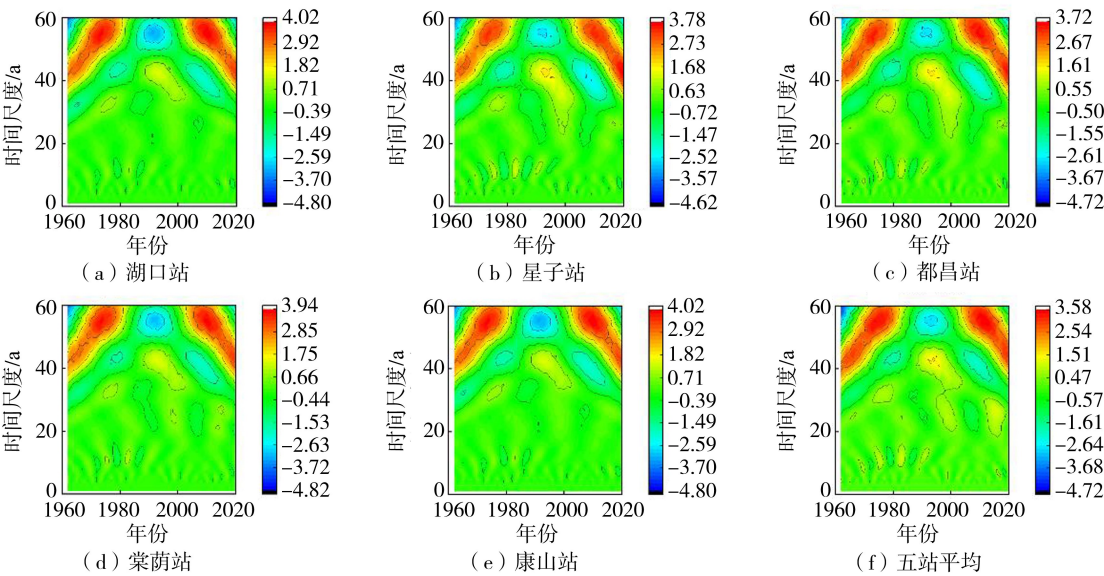


图 4 鄱阳湖主要站点小波实部等值线

Fig. 4 Wavelet real part contour map of main stations in Poyang Lake

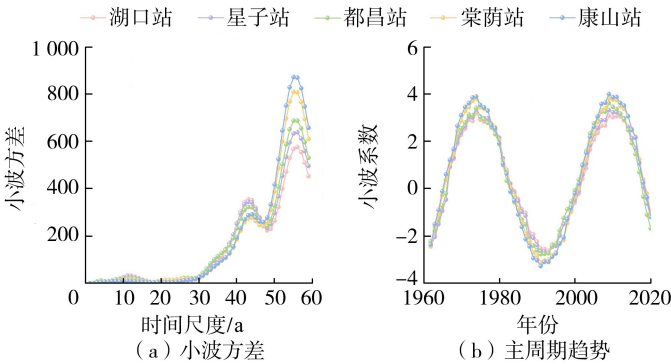


图 5 鄱阳湖主要站点小波分析结果

Fig. 5 Wavelet analysis results of main stations in Poyang Lake

3.2 鄱阳湖水水质状况变化特征

鄱阳湖 1988—2022 年各站点水质变化趋势如图 6 所示, $\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$ (ρ 为质量浓度) 年均值在 1.65 ~ 4.75 mg/L 之间波动,除个别年份外,总体保持在 II 类标准以上,显示出较好的水质状况; $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 年均值范围为 0.02~0.87 mg/L,波动较为显著,具体表现为 1996 年前维持较低水平,1996—2016 年波动上升,之后

又逐渐降低; ρ_{TP} 年均值范围为 0.005~0.165 mg/L,1993 年前处于较高水平,1993—2000 年有所下降,2000—2016 年再次波动上升,2016 年之后虽有下降趋势但基本未达到Ⅲ类标准。此外,各站点水质在 2003 年左右均经历了短暂上升,与水位突变年份高度吻合,结合水文分析结果可知,2003 年受三峡水库蓄水运行等因素影响,鄱阳湖水位发生突变性下降,这一水文节律的突变导致湖泊水体环境容量在短时间内急剧缩减,在污染负荷输入相对稳定的情况下,产生了显著的污染物浓缩效应,从而导致 2003 年水质指标浓度的异常升高,进一步证实了水文情势突变对水质具有显著的短期冲击作用。总体而言,鄱阳湖水质状况经历了先下降后趋于稳定的过程,造成这一变化的原因是当化工企业和农业面源为主要污染源时,鄱阳湖水环境质量呈下降趋势;随着工业污染对水质影响逐渐减弱,生活用水对水质影响逐渐显现,此时水质虽有所改善但富营养化问题仍然存在^[36]。采用单因子指数法对鄱阳湖不同区域进行水质评价,结果显示研究时段内各站点频繁出现水质超标现象,其中总磷污染是导致水质未能维持在Ⅲ类标准以上的关键因素。各站点总磷超标倍数分别在 0.17~2.06、0.07~1.74、0.06~1.77、0.14~2.31 和 0.02~2.08 之间波动,进一步反映出总磷污染问题的普遍性与严重性,因此控制和削减总磷污染是解决鄱阳湖水质问题的关键。

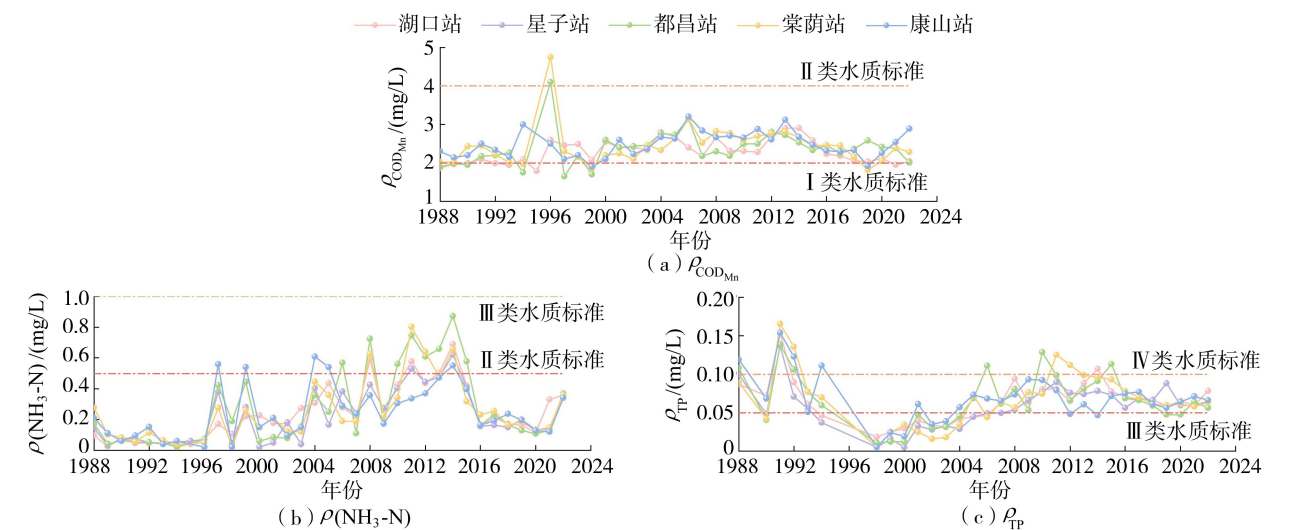


图 6 鄱阳湖 1988—2022 年各站点水质变化趋势

Fig. 6 Trend of water quality change at various stations of Poyang Lake from 1988 to 2022

为探究鄱阳湖水质变化趋势的持续性强弱,运用 R/S 分析法计算各站点水质 Hurst 指数(图 7, n 为子区间长度)。对高锰酸盐指数而言,五站 Hurst 指数分别为 0.47、0.33、0.92、0.99 和 0.66,除湖口站和星子站外,其余站点的 Hurst 指数均超过 0.50,表明这些站点的高锰酸盐指数序列具有长期记忆性,即过去的变化趋势在未来可能会持续存在;对氨氮而言,五站 Hurst 指数分别为 0.19、0.51、0.57、0.68 和 0.58,其中湖口站显示出反持续性,尽管湖口站水位下降趋势较小 (-0.0065 m/a),但其江湖交汇点的特殊位置使水位波动更易通过改变水动力条件影响氨氮迁移,同时季节性降水冲刷、间歇性工业污染源排放等因素共同作用于氨氮浓度的变化,导致该站点难以形成稳定的长期趋势,而其余 4 个站点均表现出明显的持续性;对总磷而言,五站 Hurst 指数分别为 0.94、0.58、0.71、0.73 和 0.39,除康山站外,其余站点的 Hurst 指数均显著高于 0.50,表明这些站点的总磷序列具有强烈的长期记忆性。各站点水质分形差异与自然环境、污染源及污染控制措施等多重因素密切相关,不同水文条件、地形地貌、气候因素以及污染源排放都会对其产生深远影响^[37]。总体而言,多数站点的水质参数均显示出长期记忆性。由于 2015 年以来各站点水质指标普遍呈小幅波动态势,预计未来一段时间内大部分站点将维持这一趋势。

3.3 鄱阳湖水文情势演变对水质的驱动作用

水文参数,如水位、水温、降水量和入湖水量等,影响着水体污染物浓度。水位变化直接作用于湖泊水动力条件并影响水质;水温影响水生生物代谢及化学物质溶解度;降水在补充水体同时,通过地表径流携带污染物进入水体;水量波动则影响水体自净与污染物稀释。为了研究鄱阳湖水文条件对水质的驱动作用,对 2008—2022 年各站点月均水位、水温、降水量、入湖水量与水质进行 Pearson 相关性分析,结果见表 1。高锰酸盐指数与水文参数相关性不显著,说明各站点水文变化对该指标影响程度普遍较弱,这与其表征水体可氧

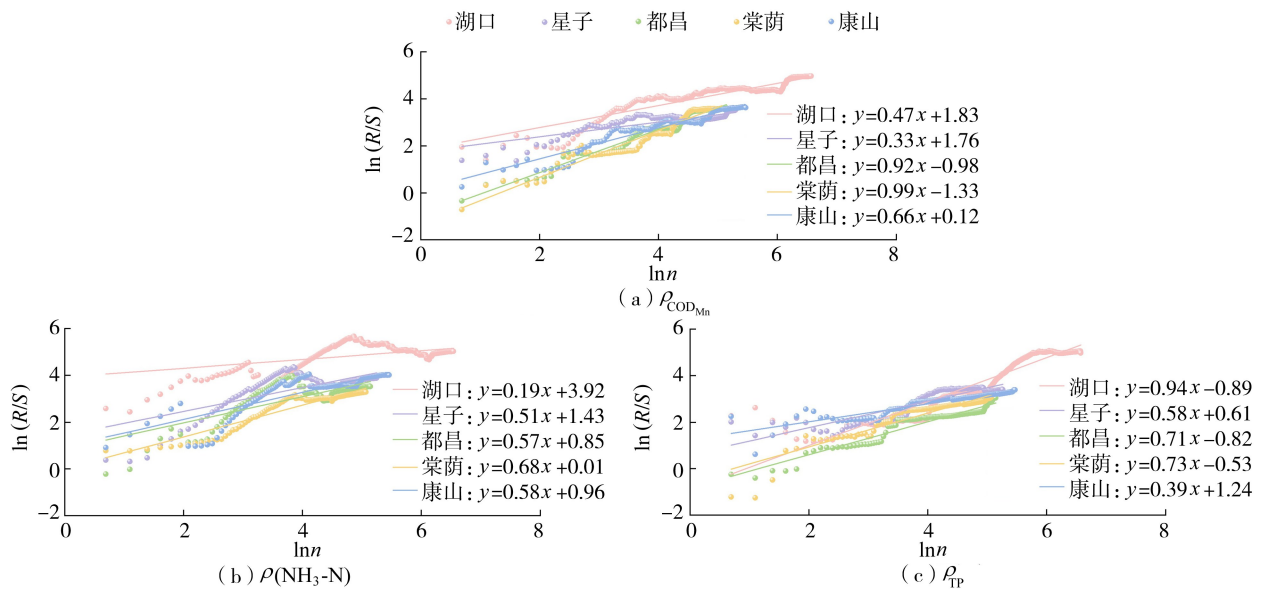


图7 鄱阳湖1988—2022年各站点水质R/S分析结果

Fig.7 Results of R/S analyses of water quality at various stations of Poyang Lake from 1988 to 2022

表1 鄱阳湖水文参数与水质指标 Pearson 相关性分析结果

Table 1 Results of Pearson correlation analysis between hydrological parameters and water quality indicators in Poyang Lake

站点	水质指标	水位	水温	降水量	入湖水量
湖口站	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	-0.06	-0.01	-0.05	-0.02
	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	-0.50**	-0.53**	-0.20**	-0.26**
	ρ_{TP}	-0.39**	-0.35**	-0.19*	-0.27**
星子站	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	0.13	0.11	0.07	0.08
	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	-0.46**	-0.44**	0.03	-0.24**
	ρ_{TP}	-0.15	0.08	-0.31**	-0.27**
都昌站	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	-0.11	-0.06	-0.14	-0.21**
	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	-0.49**	-0.51**	-0.18*	-0.27**
	ρ_{TP}	-0.25**	-0.16*	-0.28**	-0.29**
棠荫站	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	0.09	0.09	-0.05	-0.02
	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	-0.30**	-0.45**	-0.06	-0.19*
	ρ_{TP}	-0.22**	-0.31**	-0.18*	-0.24**
康山站	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	-0.11	0.01	-0.15	-0.21**
	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	-0.37**	-0.43**	-0.13	-0.20*
	ρ_{TP}	-0.08	-0.12	0.02	-0.05
五站平均	$\rho_{\text{COD}_{\text{Mn}}}$	-0.04	0.03	-0.08	-0.12
	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	-0.51**	-0.57**	-0.15	-0.27**
	ρ_{TP}	-0.38**	-0.29**	-0.29**	-0.33**

注：* 表示在 0.05 水平上显著相关，** 表示在 0.01 水平上显著相关。

化物质污染的特性有关^[38],水文要素虽能改变水体物理环境,但对氧化过程不产生直接影响。氨氮平均质量浓度与水位、水温和入湖水量呈显著负相关($p<0.01$),相关系数分别为-0.51、-0.57和-0.27,表明湖泊水文条件变化对氨氮迁移转化具有重要影响,三者增加会降低氨氮浓度,沈帅等^[39]研究也表明季节性水文变化对氮含量及形态有显著影响;空间异质性分析显示,湖口、都昌站氨氮与所有水文参数显著负相关,其余站点仅与部分参数显著相关,如棠荫站与水位($r=-0.30$)、水温($r=-0.45$)显著相关,这种空间分异与不同湖区水动力条件差异有关。总磷平均质量浓度与水位、水温、降水量和入湖水量均呈显著负相关($p<0.01$),相关系数依次为-0.38、-0.29、-0.29和-0.33,即随着四者增加,总磷质量浓度下降,这与Wu等^[40]关于鄱阳湖水质与水位变化关系的研究一致,枯水期总磷质量浓度显著高于丰水期,钱进等^[41]研究发现,降水、河水水位及地下水水位会影响磷素空间分布,证实了水文条件对磷素迁移转化的重要性;空间响应模式显示,湖口、都昌和棠荫站总磷与全部水文参数显著负相关,星子站仅与降水量($r=-0.31$)、入湖水量($r=-0.27$)

相关,康山站未表现出显著水文驱动特征,可能是因为人类活动干扰了水文因子的自然驱动作用。

表 1 揭示了鄱阳湖氮磷波动与水文情势的显著相关性。为进一步明确不同水文参数对特定水质指标的影响程度,以氨氮和总磷为研究对象,基于水位、水温、降水量和入湖水量 4 项指标进行灰色关联分析(表 2)。结果显示,各水文参数对氨氮平均质量浓度的影响程度由大到小依次为水位(0.772)、降水量(0.746)、水温(0.738)、入湖水量(0.728),对总磷平均质量浓度的影响程度由大到小依次为水位(0.827)、水温(0.775)、降水量(0.729)、入湖水量(0.715),其中水位是影响氮磷浓度的首要因素,这与朱利英等^[12]研究结果一致。从平均关联度来看,棠荫站水位对氨氮质量浓度的关联度(0.842)最高,而康山站水位对总磷质量浓度的关联度(0.895)最高,表明不同站点水位对氮磷质量浓度的响应存在差异。在此基础上,分别按丰水期(6—9 月)和枯水期(11 至次年 3 月)开展灰色关联分析。丰水期各站点水温对氨氮的影响较为显著,这与高水温有利于水体污染物的稀释降解有关^[42];而枯水期各站点水位影响更为突出,马翔宇等^[43]研究表明,枯水期低水位会削弱水体的稀释能力,进而影响氨氮质量浓度。对总磷平均质量浓度而言,两阶段水位影响最为显著,其中丰水期关联度为 0.846,枯水期为 0.811,表明丰水期影响更突出,这与大量水体稀释作用以及水动力条件改变有关。尽管水位对总磷质量浓度的综合影响居于首位,但不同站点的水文参数关联特征存在空间异质性,如星子、都昌站两阶段水温对氨氮质量浓度关联度异常偏高,可能与局部水文条件和周边人类活动影响有关。

表 2 鄱阳湖水文参数与水质指标灰色关联度分析结果

Table 2 Results of grey correlation analysis of hydrological parameters and water quality indicators in Poyang Lake													
站点	水文参数	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$						ρ_{TP}					
		平均		丰水期		枯水期		平均		丰水期		枯水期	
		关联度	排序	关联度	排序	关联度	排序	关联度	排序	关联度	排序	关联度	排序
湖口站	水位	0.769	1	0.733	2	0.750	1	0.808	1	0.803	2	0.794	1
	水温	0.752	3	0.735	1	0.719	2	0.777	2	0.818	1	0.773	2
	降水量	0.753	2	0.692	4	0.705	3	0.756	3	0.720	4	0.705	4
	入湖水量	0.743	4	0.712	3	0.687	4	0.748	4	0.721	3	0.723	3
星子站	水位	0.791	1	0.731	2	0.737	1	0.822	1	0.852	2	0.784	2
	水温	0.780	2	0.733	1	0.724	2	0.817	2	0.878	1	0.804	1
	降水量	0.765	3	0.713	4	0.695	3	0.728	3	0.735	4	0.668	4
	入湖水量	0.753	4	0.714	3	0.686	4	0.722	4	0.737	3	0.681	3
都昌站	水位	0.834	1	0.703	2	0.765	1	0.817	1	0.795	2	0.782	2
	水温	0.813	4	0.717	1	0.745	2	0.807	2	0.832	1	0.786	1
	降水量	0.815	3	0.655	4	0.737	3	0.722	4	0.635	4	0.684	4
	入湖水量	0.817	2	0.700	3	0.734	4	0.741	3	0.674	3	0.711	3
棠荫站	水位	0.842	1	0.698	2	0.782	1	0.849	1	0.778	2	0.829	1
	水温	0.812	2	0.713	1	0.748	2	0.806	2	0.800	1	0.777	2
	降水量	0.808	3	0.656	4	0.747	3	0.773	3	0.696	4	0.735	3
	入湖水量	0.806	4	0.693	3	0.746	4	0.769	4	0.709	3	0.728	4
康山站	水位	0.787	1	0.696	2	0.742	1	0.895	1	0.826	1	0.884	1
	水温	0.754	2	0.713	1	0.696	2	0.860	2	0.821	2	0.853	2
	降水量	0.730	3	0.661	4	0.694	3	0.837	3	0.745	3	0.844	4
	入湖水量	0.727	4	0.671	3	0.661	4	0.836	4	0.725	4	0.851	3
五站平均	水位	0.772	1	0.718	2	0.726	1	0.827	1	0.846	1	0.811	1
	水温	0.738	3	0.730	1	0.698	2	0.775	2	0.816	2	0.781	2
	降水量	0.746	2	0.673	4	0.684	3	0.729	3	0.687	4	0.686	3
	入湖水量	0.728	4	0.684	3	0.676	4	0.715	4	0.688	3	0.684	4

在对鄱阳湖水文参数与水质指标相互作用的研究中,发现水文情势变化对水质有显著影响,其中水位与氮磷关系最为密切。鄱阳湖水位的趋势性、突变性和周期性特征对水质有重要调控作用,具体表现为:水位持续下降(−0.0135 m/a)可能会削弱水动力条件,导致水化学与水环境发生改变,进而影响水质^[44];三峡工程运行后各站点水位突变下降,枯水程度加剧,与 2003 年水质短暂恶化高度同步,枯水期水量锐减凸显污染物浓缩效应;水位周期性波动通过改变水动力条件影响污染物迁移,高水位期水体交换能力增强,促进污染物扩散稀释,低水位期水动力减弱,导致污染物滞留量增加。

为验证湖泊水位对水质变化的因果效应,采用 Liang-Kleeman 信息流法计算水位与氮磷的信息流传递值

(表 3),并重点关注水位向水质的信息流传递过程。结果显示,水位到氨氮平均质量浓度的信息流为 0.088 ($p<0.05$),水位到总磷平均质量浓度的信息流为 0.036($p>0.05$)。从统计学角度来看,水位对氨氮具有显著单向影响。在信息流因果分析中,单向影响指水位序列到氨氮序列的信息流传递显著,而氨氮序列到水位序列的信息流传递不显著,表明二者之间不存在双向的互馈机制,仅存在水位变化驱动氨氮质量浓度变化的单向因果链条。其作用机制在于水位波动通过影响水-沉积物界面物质交换,并改变水体的垂向混合强度及水平扩散速率,从而影响氨氮迁移转化,而氨氮浓度的变化并不会反过来引起水位的物理波动。相较而言,水位对总磷的影响间接且复杂,水动力条件改变虽能影响磷的分布格局与内源释放,但其作用过程受吸附-解吸平衡、颗粒态磷沉降再悬浮等多重因素调控,导致因果信号在信息流分析中未能达到统计学显著性。受地理位置、水动力条件、周边环境等因素影响,各站点信息流传递值存在差异。就氨氮而言,各站点信息流依次为 0.128、0.097、0.084、0.059 和 0.089(均通过显著性检验),其中湖口站表现出最强的因果关联性;就总磷而言,各站点信息流依次为 0.062、0.013、0.013、0.017 和 0.009(仅湖口站通过显著性检验)。湖口站作为入湖河流主要通道,其较强的水动力条件增强了水位变动引发的沉积物-水界面交换强度,导致信息流传递值相对较高。

表 3 鄱阳湖水位与水质指标的因果信息流分析结果

Table 3 Results of causal information flow analysis of water level and water quality indicators in Poyang Lake					
站点	水质指标	$T_{1\rightarrow 2}$	$T_{1\rightarrow 2}$ 的 err95	$T_{2\rightarrow 1}$	$T_{2\rightarrow 1}$ 的 err95
湖口站	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	0.005	0.056	0.128	0.064
	ρ_{TP}	0.015	0.042	0.062	0.056
星子站	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	0.006	0.052	0.097	0.062
	ρ_{TP}	0.019	0.014	0.013	0.020
都昌站	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	0.008	0.059	0.084	0.057
	ρ_{TP}	0.037	0.026	0.013	0.033
荣荫站	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	0.019	0.035	0.059	0.043
	ρ_{TP}	0.003	0.025	0.017	0.035
康山站	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	0.006	0.044	0.089	0.048
	ρ_{TP}	0.006	0.010	0.009	0.013
五站平均	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$	0.025	0.054	0.088	0.051
	ρ_{TP}	0.030	0.037	0.036	0.053

注: $T_{1\rightarrow 2}$ 为水质向水位的信息流传递; $T_{2\rightarrow 1}$ 为水位向水质的信息流传递;err95 表示置信度为 95%的 t 检验值。

湖泊水质演变是水文过程与人类活动共同作用的结果,针对总磷作为鄱阳湖流域首要水质超标因子的特征,以总磷为目标变量,进一步区分人类活动(污染负荷输入)与水文条件对其浓度变化的驱动效应。基于 2013—2022 年五河入湖总量核算结果,鄱阳湖入湖总磷负荷呈显著年际波动,变化区间为 0.94 万~1.72 万 t/a,整体呈下降趋势,下降速率约为 0.04 t/a。负荷变化呈现明显阶段性特征,研究初期负荷持续上升,于 2015 年达到峰值(1.72 万 t/a),随后受流域截污控源措施加强的影响显著下降,并于 2016—2022 年间趋于稳定,维持在 0.94 万~1.20 万 t/a 之间波动。统计分析表明,入湖负荷与总磷质量浓度显著正相关($r=0.81,p<0.05$),相关系数显著高于其他水文参数,表明污染负荷输入对总磷有直接驱动作用。这一发现与王俊等^[45]关于污染负荷削减会显著改善流域生境质量的结论一致。灰色关联分析显示,总磷浓度与污染负荷关联度达 0.843,同样高于其他水文参数,说明污染负荷输入的驱动作用更为显著。综上所述,人类活动所引发的污染负荷变化已成为湖泊水质演变的关键要素。然而,水文情势波动所导致的水动力条件阶段性调整,对水质亦呈现出不可忽视的调控作用。总体而言,在流域污染负荷管控的基础上,水文动态调控对湖泊水环境管理具有重要协同效应。

4 结 论

- a. 鄱阳湖 1962—2022 年水位普遍呈下降趋势,平均变化速率达-0.013 5 m/a,尤以都昌站的水位下降最为突出;水位突变年份集中在 2003 年左右,主要归因于三峡水库蓄水运行对原有水文节律产生干扰;水位变化存在相似周期性特征,在 55~56 a 特征时间尺度上,水位波动变化的平均周期约为 36 a,大致经历了两个高-低水位转换期。
- b. 鄱阳湖 1988—2022 年水质经历了先下降后趋于稳定的过程。研究期内各站点频繁出现水质超标问

c. 通过对鄱阳湖水文参数与水质指标相互作用的研究,发现高锰酸盐指数与水文参数相关性较弱,氨氮和总磷与多项水文参数显著相关。灰色关联分析指出水位是影响氨氮和总磷浓度的主要因素,水温、降水量和入湖水量等水文参数也对水质有重要影响。因果信息流分析显示,水位变化对氨氮存在显著单向影响,但对总磷的影响较为复杂,难以直接通过信息流结果明确其因果关联,未来需结合多源数据与统计模拟方法,深入探究其复杂机制,为湖泊保护与管理提供科学依据。

- [1] Xu Yuyue, Li Jin, Wang Jida, et al. Assessing water storage changes of Lake Poyang from multi-mission satellite data and hydrological models[J]. Journal of Hydrology, 2020, 590: 125229.
- [2] Feng Lian, Hu Chuanmin, Chen Xiaoling, et al. Dramatic inundation changes of China's two largest freshwater lakes linked to the Three Gorges Dam[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(17): 9628-9634.
- [3] Yang Shilun, Zhang Jing, Dai S B, et al. Effect of deposition and erosion within the main river channel and large lakes on sediment delivery to the estuary of the Yangtze River[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112(F2): F02005.
- [4] Mu Shaojie, Li Bing, Yao Jing, et al. Monitoring the spatio-temporal dynamics of the wetland vegetation in Poyang Lake by Landsat and MODIS observations[J]. Science of the total environment, 2020, 725: 138096.
- [5] 周建军, 张曼. 长江鄱阳湖问题的原因及湖口建闸的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(2): 1-12. (Zhou Jianjun, Zhang Man. Eco-problem of Poyang Lake in Yangtze River and effect of sluice gate construction at lake's outlet [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 1-12. (in Chinese))
- [6] 胡挺, 仇红亚. 鄱阳湖水位变化及其归因量化研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(9): 54-61. (Hu Ting, Qiu Hongya. Quantitative research on the water level change and its attribution of Poyang Lake[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(9): 54-61. (in Chinese))
- [7] Liu Xinggen, Zhang Qi, Li Yunliang, et al. Satellite image-based investigation of the seasonal variations in the hydrological connectivity of a large floodplain (Poyang Lake, China) [J]. Journal of Hydrology, 2020, 585: 124810.
- [8] Zhang Qinghui, Dong Xuhui, Chen Yuwei, et al. Hydrological alterations as the major driver on environmental change in a floodplain Lake Poyang (China): evidence from monitoring and sediment records[J]. Journal of Great Lakes Research, 2018, 44(3): 377-387.
- [9] 李冰, 杨桂山, 万荣荣, 等. 鄱阳湖出流水质 2004~2014 年变化及其对水位变化的响应: 对水质监测频率的启示[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(2): 289-296. (Li Bing, Yang Guishan, Wan Rongrong, et al. Temporal variability of water quality in Poyang Lake outlet and the associated water level fluctuations: a water quality sampling revelation [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(2): 289-296. (in Chinese))
- [10] Li Bing, Yang Guishan, Wan Rongrong, et al. Spatiotemporal variability in the water quality of Poyang Lake and its associated responses to hydrological conditions[J]. Water, 2016, 8(7): 296.
- [11] 李海辉. 鄱阳湖主湖区与碟形湖水位变化及其对水质的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(6): 1298-1306. (Li Haihui. Changes of water level in main lake area of Poyang Lake and in dish-shaped sub-lake and their impacts on water quality [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(6): 1298-1306. (in Chinese))
- [12] 朱利英, 郁达伟, 章美良, 等. 水位对鄱阳湖赣江三角洲典型断面水环境质量变化的影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(11): 115-124. (Zhu Liying, Yu Weida, Zhang Meiliang, et al. Impacts of water level on water quality of Ganjiang River Delta in Poyang Lake[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(11): 115-124. (in Chinese))
- [13] 孙继万, 王佳, 杨玉龙, 等. 鄱阳湖氮磷时空特征和异常变化及其影响途径[J]. 江西水利科技, 2024, 50(3): 199-205. (Sun Jiwan, Wang Jia, Yang Yulong, et al. Temporal and spatial characteristics and abnormal changes of nitrogen and phosphorus in Poyang lake and the impact pathways[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2024, 50(3): 199-205. (in Chinese))
- [14] 邓鹏, 孙善磊, 黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 39-45. (Deng Peng, Sun Shanlei, Huang Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 39-45. (in Chinese))
- [15] Huang Aiping, Liu Xiaobo, Peng Wenqi, et al. Spatiotemporal characteristics, influencing factors and evolution laws of water exchange capacity of Poyang Lake[J]. Journal of Hydrology, 2022, 609: 127717.

[16] Gao Jianhua, Jia Jianjun, Kettner A J, et al. Changes in water and sediment exchange between the Changjiang River and Poyang Lake under natural and anthropogenic conditions, China[J]. Science of the Total Environment, 2014, 481: 542-553.

[17] 姚斯洋, 林妙丽, 陈诚, 等. 拟建鄱阳湖水利枢纽对湖区水环境容量的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 200-207. (Yao Siyang, Lin Miaoli, Chen Cheng, et al. Impact of the scheduled Poyang Lake Hydraulic Project on water environment capacity in lake district[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 200-207. (in Chinese))

[18] 郝改瑞. 汉江流域陕西段非点源污染特征及模型模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.

[19] 毕可心, 董增川, 李大勇, 等. 温州市不同海拔极端降水时空演变[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(1): 31-40. (Bi Kexin, Dong Zengchuan, Li Dayong, et al. Temporal and spatial evolution of extreme precipitation at different altitudes in Wenzhou City, China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(1): 31-40. (in Chinese))

[20] 徐珂, 陈炼钢, 吴树诚, 等. 1983—2023 年漓江上游降雨时空演变特征精细解析[J]. 水利水电科技进步, 2025, 45(4): 85-93. (Xu Ke, Chen Liangang, Wu Shucheng, et al. Detailed analysis of spatiotemporal evolution characteristics of rainfall in the upper Lijiang River Basin from 1983 to 2023[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(4): 85-93. (in Chinese))

[21] 许钦, 叶鸣, 蔡晶, 等. 1956—2018 年太湖流域降水统计特征及演变趋势[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 127-132. (Xu Qin, Ye Ming, Cai Jing, et al. Precipitation statistical characteristics and evolution trend in Taihu Lake Basin from 1956 to 2018[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 127-132. (in Chinese))

[22] 张金萍, 王宇昊. 郑州市降雨-径流关系不确定性分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(6): 1-6. (Zhang Jinping, Wang Yuhao. Uncertainty analysis of rainfall-runoff relationship in Zhengzhou City[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 1-6. (in Chinese))

[23] 王雨潇, 孙营营, 张天宇, 等. 1998—2020 年三峡库区最大 1 h 降水的时空变化特征[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 10-18. (Wang Yuxiao, Sun Yingying, Zhang Tianyu, et al. Temporal and spatial variations of maximum one-hour precipitation in the Three Gorges Reservoir Region from 1998 to 2020[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 10-18. (in Chinese))

[24] 黄建雄, 冶运涛, 曹引, 等. 黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 25-33. (Huang Jianxiong, Ye Yuntao, Cao Yin, et al. Analysis of spatial and temporal variation characteristics and coordination of water-sediment in the north main reach of Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 25-33. (in Chinese))

[25] 刘瑞艳, 张建华, 刘凌, 等. 南水北调东线工程调水期洪泽湖水质变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 42-49. (Liu Ruiyan, Zhang Jianhua, Liu Ling, et al. Analysis on the water quality variation of Hongze Lake during the water transfer period of the eastern route of South-to-North Water Diversion Project[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 42-49. (in Chinese))

[26] Guo Zixun, Shui Penglang, Bai Xiaohui. Small target detection in sea clutter using all-dimensional Hurst exponents of complex time sequence[J]. Digital Signal Processing, 2020, 101: 102707.

[27] 李保, 周丰年, 高健. 基于 R/S 分析法的长江口总磷变化趋势分析[J]. 水利水电快报, 2019, 40(10): 54-58. (Li Bao, Zhou Fengnian, Gao Jian. Analysis of the trend of total phosphorus changes in the Yangtze River estuary based on R/S analysis method [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2019, 40(10): 54-58. (in Chinese))

[28] 樊嵘, 孟大志, 徐大舜. 统计相关性分析方法研究进展[J]. 数学建模及其应用, 2014, 3(1): 1-12. (Fan Rong, Meng Dazhi, Xu Dashun. Survey of research process on statistical correlation analysis[J]. Mathematical Modeling and its Applications, 2014, 3(1): 1-12. (in Chinese))

[29] 孙彦旭, 周自翔, 米朝娟. 基于土地利用覆被变化(LUCC)的人类活动与流域生物多样性灰色关联分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1782-1792. (Sun Yanxu, Zhou Zixiang, Mi Zhaojuan. Grey correlation analysis of human activities and watershed biodiversity based on land use and cover change[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1782-1792. (in Chinese))

[30] Liang X S. Unraveling the cause-effect relation between time series[J]. Physical Review E, 2014, 90(5): 052150.

[31] 文佐. 2019 年 3—6 月云南省高温干旱复合事件过程及机理研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.

[32] 淦峰, 唐琳, 郭怀成, 等. 湖泊生态水位计算新方法与应用[J]. 湖泊科学, 2015, 27(5): 783-790. (Gan Feng, Tang Lin, Guo Huaicheng, et al. New method and application of estimating ecological water level of the Lake Poyang[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(5): 783-790. (in Chinese))

[33] 戴雪, 万荣荣, 杨桂山, 等. 鄱阳湖水文节律变化及其与江湖水量交换的关系[J]. 地理科学, 2014, 34(12): 1488-1496. (Dai Xue, Wan Rongrong, Yang Guishan, et al. Temporal variation of hydrological rhythm in Poyang Lake and the associated

water exchange with the Changjiang River[J]. Scientia Geographica Sinica,2014,34(12):1488-1496. (in Chinese))

[34] Lai Xijun,Jiang Jiahu,Yang Guishan,et al. Should the Three Gorges Dam be blamed for the extremely low water levels in the middle-lower Yangtze River? [J]. Hydrological Processes,2014,28(1):150-160.

[35] 吴培军,万晓明,徐继铭,等. 鄱阳湖枯水期水位变化及应对措施[J]. 水资源保护,2019,35(6):104-108. (Wu Peijun,Wan Xiaoming,Xu Jiming,et al. Changes of water levels in low-water season in Poyang Lake and it's countermeasures[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):104-108. (in Chinese))

[36] 谢慧钰,胡梅,嵇晓燕,等. 2011—2019 年鄱阳湖水质演化特征及主要污染因子解析[J]. 环境科学,2022,43(12):5585-5597. (Xie Huiyu,Hu Mei,Ji Xiaoyan,et al. Water quality evolution characteristics and pollution factor analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019[J]. Environmental Science,2022,43(12):5585-5597. (in Chinese))

[37] 方娜,刘玲玲,游清徽,等. 不同尺度土地利用方式对鄱阳湖湿地水质的影响[J]. 环境科学,2019,40(12):5348-5357. (Fang Na,Liu Lingling,You Qinghui,et al. Effects of land use types at different spatial scales on water quality in Poyang Lake wetland[J]. Environmental Science,2019,40(12):5348-5357. (in Chinese))

[38] 兰静,吴云丽,娄保锋,等. 2004 年以来长江中下游干流水体高锰酸盐指数时空变化分析[J]. 湖泊科学,2021,33(4):1112-1122. (Lan Jing,Wu Yunli,Lou Baofeng,et al. Spatiotemporal change analysis of permanganate index in the middle and lower mainstem of the Yangtze River since 2004[J]. Journal of Lake Sciences,2021,33(4):1112-1122. (in Chinese))

[39] 沈帅,马腾,杜尧,等. 江汉平原典型地区季节性水文条件影响下氮的动态变化规律[J]. 地球科学,2017,42(5):674-684. (Shen Shuai,Ma Teng,Du Yao,et al. Dynamic variations of nitrogen in groundwater under influence of seasonal hydrological condition in typical area of Jianghan plain[J]. Earth Science,2017,42(5):674-684. (in Chinese))

[40] Wu Zhaoshi,Liu Jutao,Huang Jiacong,et al. Do the key factors determining phytoplankton growth change with water level in China's largest freshwater lake? [J]. Ecological Indicators,2019,107:105675.

[41] 钱进,沈蒙蒙,王沛芳,等. 河岸带土壤磷素空间分布及其对水文过程响应[J]. 水科学进展,2017,28(1):41-48. (Qian Jin,Shen Mengmeng,Wang Peifang,et al. Spatial distribution of riparian soil phosphorus and its response to hydrologic process [J]. Advances in Water Science,2017,28(1):41-48. (in Chinese))

[42] Liang Ximei,Chen Baowei,Nie Xiangping,et al. The distribution and partitioning of common antibiotics in water and sediment of the Pearl River Estuary, South China[J]. Chemosphere,2013,92(11):1410-1416.

[43] 马翔宇,闫峰. 鄱阳湖季节性氨氮水生生物生态风险评估[J]. 长江科学院院报,2024,41(1):66-74. (Ma Xiangyu,Yan Feng. Assessment of ecological risk of seasonal ammonia nitrogen to aquatic organisms in Poyang Lake[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2024,41(1):66-74. (in Chinese))

[44] 黄玥,黄志霖,肖文发,等. 三峡水库水位调度对出库水质影响分析与水质预测[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(4):78-85. (Huang Yue,Huang Zhilin,Xiao Wenfa,et al. Analysis and prediction of effects of Three Gorges Reservoir water level scheduling on the outflow water quality [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2020,31(4):78-85. (in Chinese))

[45] 王俊,刘超,王智源,等. 洪泽湖流域污染负荷削减对生境质量的影响[J]. 水资源保护,2023,39(1):190-199. (Wang Jun,Liu Chao,Wang Zhiyuan,et al. Effects of pollution load reduction on habitat quality in Hongze Lake Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(1):190-199. (in Chinese))

(收稿日期:2024-12-24 编辑:刘晓艳)