

吴丁, 方平, 李照全, 等. 东洞庭湖总磷浓度时空变化与污染成因分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(3): 97-105. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.012

WU D, FANG P, LI Z Q, et al. Temporal and Spatial Variation of Total Phosphorus Concentration and Polluting Effects in East Dongting Lake [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(3): 97-105. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.012

东洞庭湖总磷浓度时空变化与污染成因分析

吴丁¹, 方平², 李照全^{1*}, 刘淑军³, 庄琼华¹, 王波⁴

(1.湖南省岳阳生态环境监测中心, 湖南 岳阳 414000; 2.湖南省洞庭湖生态环境监测中心, 湖南 岳阳 414000;
3.中国农业科学院衡阳红壤实验站, 祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南 祁阳 426182;
4.岳阳市生态环境事务中心, 湖南 岳阳 414000)

摘要:洞庭湖是我国第二大淡水湖, 研究洞庭湖水质总磷(TP)浓度变化规律对其水环境管理意义重大. 基于2017年—2021年东洞庭湖及入湖、出湖共12个水质断面数据, 研究了东洞庭湖总磷浓度时空分布特征与污染成因. 研究表明: 2017年—2021年东洞庭湖总磷质量浓度 ρ (TP)年均值在0.058~0.088 mg/L, 湘江、环湖河流及南洞庭湖入湖 ρ (TP)年均值在0.051~0.125 mg/L; 出湖 ρ (TP)年均值在0.062~0.079 mg/L, 均超过湖库Ⅲ类水质标准. 其中, 东洞庭湖以轻度、偏中度污染为主, 洞庭湖出口以轻度污染为主. 各入湖水水质中, 湘江以轻度、偏中度污染为主, 环湖河流以中度污染为主, 南洞庭湖为轻度污染. 东洞庭湖及入湖水水质 ρ (TP)空间分布和时间变化差异明显. 空间分布上, 环湖河流明显大于湘江, 东洞庭湖明显大于洞庭湖出口和南洞庭湖入水; 时间变化上, 东洞庭湖、洞庭湖出口、汨罗江、新墙河与华容河枯水季节(年初和年末) ρ (TP)明显偏高, 达到0.082~0.117 mg/L, 但藕池河东支 ρ (TP)高峰期却出现在丰水季节, 达到0.094~0.115 mg/L; 湘江及南洞庭湖入湖 ρ (TP)波动幅度较小, 基本保持在0.049~0.090 mg/L. 相关性分析与RDA分析结果进一步表明: 东洞庭湖及出湖水水质受外源污染物输入和水文条件的叠加影响, 其中洞庭湖出口水位及流量、湘江及藕池河东支水位变化, 以及新墙河、横岭湖入湖 ρ (TP)对东洞庭湖及出湖 ρ (TP)影响较大. 上述研究结果表明: 在不同水文阶段积极开展水文调控工作对改善东洞庭湖水质有重要作用, 同时, 加强对重点河段入湖外源污染物的管控能进一步改善东洞庭湖磷浓度的调控效果.

关键词: 东洞庭湖; 总磷; 时空分布; 污染评价; 水环境管理

中图分类号: X524 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2023)03-0097-09

Temporal and Spatial Variation of Total Phosphorus Concentration and Polluting Effects in East Dongting Lake

WU Ding¹, FANG Ping², LI Zhaoquan¹, LIU Shujun³, ZHUANG Qionghua¹, WANG Bo⁴

(1. Yueyang Eco-Environmental Monitoring Centre of Hunan Province, Yueyang 414000, China;

2. Eco-Environmental Monitoring Central of Dongting Lake of Hunan Province, Yueyang 414000, China;

3. Red Soil Experimental Station of CAAS in Hengyang, National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang 426182, China; 4. Yueyang Eco-Environmental Affairs Center, Yueyang 414000, China)

Abstract: Dongting Lake is the second largest freshwater lake in China. To study the variation law of total phosphorus (TP) concentration is of great significance to its water environment management. Based on the water

收稿日期: 2022-04-25

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40291)

*通信作者, E-mail: lizhaoquan010203@163.com

quality data of twelve sections in East Dongting Lake and its influx and outflux from 2017 to 2021, the temporal and spatial distribution characteristics and polluting causes of total phosphorus concentration in East Dongting Lake are studied. Results show that the annual average of $\rho(\text{TP})$ from 2017 to 2021 in East Dongting Lake ranges from 0.058 to 0.088 mg/L, and the annual average of $\rho(\text{TP})$ ranges from 0.051 to 0.125 mg/L in Xiangjiang River, the rivers around East Dongting Lake and South Dongting Lake. The annual average of $\rho(\text{TP})$ of the outflux of Dongting Lake ranges from 0.062 to 0.079 mg/L. The above all exceed the class III Water quality standards for lakes and reservoirs. Among them, the East Dongting Lake is mainly slightly and moderately polluted, but the outlet of Dongting Lake is mainly slightly polluted. As regards the water quality influx of East Dongting Lake, the Xiangjiang River is mainly slightly polluted and moderately polluted, the rivers around East Dongting Lake are mainly moderately polluted, and the South Dongting Lake is slightly polluted. The average of $\rho(\text{TP})$ in East Dongting Lake and its influx and outflux shows obvious differences in spatial distribution and temporal variation. In terms of spatial distribution, the rivers around East Dongting Lake are significantly larger than the Xiangjiang River, and the East Dongting Lake is significantly larger than the outlet of Dongting Lake and the inlet of South Dongting Lake. In terms of time change, the content of $\rho(\text{TP})$ shows high in dry season (at the beginning and the end of the year) in East Dongting Lake, outflux of the Dongting Lake, Miluo River, Xinqiang River and Huarong River, reaching 0.082~0.117 mg/L. However, the peak concentration of east branch of Ouchi River appears in the wet season, reaching 0.094~0.115 mg/L. Xiangjiang River and South Dongting Lake fluctuate slightly and remain at 0.049~0.090 mg/L. Results of correlation analysis and redundancy analysis further show that the water quality of East Dongting Lake and its outflux is affected by the superposition of external pollutant inputs and hydrological conditions. Changes in the water level and flux at the outlet of the Dongting Lake, the water level of Xiangjiang River and the east branch of Ouchi River, and the $\rho(\text{TP})$ of influx of Xinqiang River and Hengling Lake all have a great impact on the East Dongting Lake and its outflux. The above research results show that carrying out hydrological regulation actively in different hydrological stages play important role in improving the water quality of the East Dongting Lake. At the same time, strengthening the control of external pollutants from key river sections will further improve the control effect of phosphorus concentration in the East Dongting Lake.

Keywords: East Dongting Lake; total phosphorus; temporal and spatial distribution; pollution assessment; water environment management

洞庭湖位于长江荆江河段南岸,湖南省北部,是长江中下游重要的调节湖泊和全国第二大淡水湖,兼具调蓄长江洪水、提供饮用水和生物多样性保护等重要生态功能^[1-2]。洞庭湖南和西接湘、资、沅、澧四水,北纳松滋、太平、藕池三口来水,东汇汨罗江、新墙河水,并最终由岳阳城陵矶注入长江,属典型的过水性洪道型湖泊^[3]。湖区水系繁杂,入湖尾闾河段纵横交织,相互顶托,水流紊乱。20世纪50年代以来,通过堵支并流、合修大垸,形成了新的湖区水系格局。自澧水河口(小渡口)至城陵矶构成一条不规则的U型带状水域,按形态可划分为西洞庭湖、南洞庭湖和东洞庭湖3个不同的湖泊水域,其水流方向大致为西洞庭湖→南洞庭湖→东洞庭湖→长江^[4]。

氮磷是湖泊富营养化发生和水质定类的主要限制因子^[5-6],一直是学者们研究的热点。洞庭湖被誉为湖南省的“母亲湖”,承纳流域范围内农业生产与城乡生活等产生的污染,氮磷污染尤为严重^[7-9]。现行水质评价体系中,总磷(TP)被认定为洞庭湖水水质最重要的考核指标,已纳入地方职能部门重点管控目标。研究认为,洞庭湖入湖污染负荷主要来源于四水水系^[10],TP作为主要污染物之一^[11-12],湘、资、沅、澧四水占入湖河流输入总量的65.0%^[13]。受三峡工程影响,洞庭湖水文节律变化,加之气候变化与人类活动影响^[14],TP呈现明显的时空差异性变化,表现为西洞庭湖、南洞庭湖、东洞庭湖和出湖 $\rho(\text{TP})$ 在年内和年际之间的差异,其中东洞庭湖 $\rho(\text{TP})$ 变幅相对较大^[1,15-16],且污染成因复杂,已成为洞庭湖水水质持续改善的重点关注区域。因此,研究东洞庭湖TP污染状况及其变化规律对其水环境管理具有重要意义。近年来,关于洞庭湖的研究主要集中在水质和沉积物中氮磷及重金属含量的时空分布与风险评价等方面^[17-20],结合

水文数据关联分析较少.周琴等^[2]和郭晶等^[13]结合四水入湖污染物通量分析了洞庭湖 TP 来源,但未考虑区间河流对洞庭湖水质的影响;黄代中等^[21]和田琪等^[22]从磷的形态组成及其分布特征方面,对洞庭湖污染成因进行了探索,但研究时间较短(分别为 1 a、2 个月).该研究以东洞庭湖为研究对象,通过对 2017 年—2021 年东洞庭湖及各入湖、出湖水水质连续监测与现状调查,结合入湖河流及洞庭湖出口水文数据,分析了东洞庭湖 $\rho(\text{TP})$ 时空变化及污染成因,同时利用 RDA 分析法对 2021 年 2 月—6 月水质加密监测及相应水文数据进行深入分析,以为洞庭湖水环境保护提供科学的决策依据.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

东洞庭湖位于磊石山以北,湖口城陵矶以南,是洞庭湖各子湖面积最大的天然湖泊,水面高程 34 m 时,最大水深 18 m,水域面积约 920 km².1982 年东洞庭湖自然保护区成立,1994 年升为国家级自然保护区,是中国首批加入“国际重要湿地公约”的湿地之一^[23].东洞庭湖水系复杂,湘江、南洞庭湖来水在湘阴境内汇合,沿洞庭湖东岸经磊石山、鹿角、扁山、岳阳楼等地至城陵矶注入长江.汨罗江、新墙河及华容河、藕池河分东、西两侧注入湖体.

1.2 水样采集与分析

该研究水质监测数据来源于湖南省岳阳生态环境监测中心.共布设水质断面 12 个(见图 1),在主要河流入湖口布设断面,其中湘江樟树港(S1)、汨罗江南渡(S2)、新墙河八仙桥(S3)、华容河六门闸(S4)、藕池河东支团州(S5)各 1 个;南洞庭湖入湖 2 个,分别为横岭湖(S6)、虞公庙(S7);东洞庭湖及出湖共 5 个,分别为鹿角(S8)、君山(S9)、扁山(S10)、岳阳楼(S11)和洞庭湖出口(S12).研究时段为 2017 年 1 月—2021 年 12 月,监测频次每月 1 次;加密监测时段为 2021 年 2 月—6 月,每 7~10 d 监测 1 次.各断面设左、中、右 3 条或左、右 2 条垂线,使用柱状采水器分别采集表层 0~50 cm 水样,置于 500 ml 玻璃瓶冷藏保存,24 h 内完成分析,按不小于 10% 的比例采集现场平行样.TP 用钼酸铵分光光度法,实验室采用国家标准样品进行质控.同时收集湘江(湘阴)、汨罗江(伍市)、新墙河(新墙)、华容河(钱粮湖)、藕池河东支(藕池)入湖河流及洞庭湖出口(城陵矶)相应时段的水位数据和洞庭湖出口流量数据.

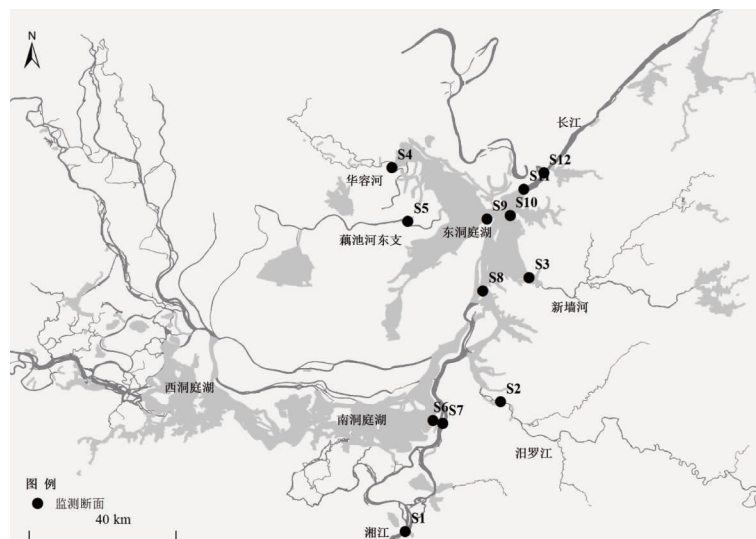


图 1 水质采样点分布

1.3 数据统计与分析

TP 按各断面算术平均值参与统计.运用 SigmaPlot10.0 软件作图,运用 SPSS19.0 软件统计数据.年际变化趋势采用秩相关系数表示,差异分析采用单因素方差分析,相关性分析采用 Pearson 相关系数表示.TP 空间分布按环湖河流 4 个断面(S2~S5)的算术平均值,南洞庭湖入湖 2 个断面(S6~S7)的算术平均值,东洞庭湖 4 个断面(S8~S11)的算术平均值与湘江(S1)、洞庭湖出口(S12)比较.时间分布采用变化图表示

各断面 TP 逐月变化趋势及变幅.水期按枯水期 1 月—3 月、12 月,平水期 4 月—5 月、10 月—11 月,丰水期 6 月—9 月划分^[24]. TP 水质类别评价按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)湖库标准(0.05 mg/L).

1.4 评价方法

采用单项污染指数法评价 TP 污染程度,计算公式为

$$S_i = C_i / C_s$$

式中: S_i 为污染物单项指数; C_i 为污染物在水中的含量,mg/L; C_s 为对应评价标准值,0.05 mg/L.污染程度分级参考朱灵峰^[25]的研究,并结合洞庭湖总磷考核要求,具体分级见表 1.

表 1 TP 污染程度分级

等级划分	S_{TP}	类别	等级
1	≤ 0.5	I ~ II	好
2	(0.5, 1.0]	III	较好
3	(1.0, 1.5]	IV	轻度污染
4	(1.5, 2.0]	IV	偏中度污染
5	(2.0, 4.0]	V	中度污染
6	>4.0	劣 V	重度污染

2 结果与讨论

2.1 TP 含量与时空分布

2.1.1 TP 含量

2017 年—2021 年东洞庭湖与各入湖、出湖 ρ (TP) 平均值及变化范围见表 1.东洞庭湖(S8~S11) ρ (TP) 年均值在 0.058 ~ 0.088 mg/L,最大年均值出现在岳阳楼断面(S11)(2021 年);湘江(S1)、环湖河流(S2~S5)及南洞庭湖入湖(S6~S7) ρ (TP) 年均值在 0.051 ~ 0.125 mg/L,最大年均值出现在藕池河东支(S5)(2017 年);出湖(S12) ρ (TP) 年均值在 0.062 ~ 0.079 mg/L 之间,最大值出现在 2017 年.总体上,东洞庭湖及出湖 ρ (TP) 控制在 III ~ IV 类标准,以 IV 类水质为主.湘江(S1)及环湖河流(S2~S5) ρ (TP) 高于东洞庭湖,南洞庭湖(S6~S7) ρ (TP) 与东洞庭湖主湖体(S9)相当,略低于出湖(S12)水质.采用湖库标准评价,东洞庭湖体(S8~S11) ρ (TP) 月平均值在 III, IV, V 类各占 19.17%, 72.08%, 8.75%;出湖(S12) ρ (TP) 月平均值在 III, IV, V 类各占 26.67%, 65.00%, 8.33%;湘江(S1) ρ (TP) 月平均值在 III, IV, V 类各占 16.67%, 75.00%, 8.33%;环湖河流(S2~S5) ρ (TP) 月平均值在 II, III, IV, V, 劣 V 类各占 1.28%, 5.53%, 57.02%, 34.89%, 1.28%;南洞庭湖(S6~S7) ρ (TP) 月平均值在 III, IV, V 类各占 15.83%, 83.34%, 0.83%.可见,环湖河流 ρ (TP) 及水质类别变化相对较大,说明水体更易受外部因素影响.

秩相关系数表明,2017 年—2021 年各断面中六门闸(S4)、扁山(S10)、洞庭湖出口(S12) ρ (TP) 年均值呈显著负相关($r_s < -0.9$),除樟树港(S1)、君山(S9)外,其余断面均呈负相关但无显著相关性.表明近 5 年洞庭湖出口 ρ (TP) 呈现显著下降趋势,东洞庭湖体及入湖 ρ (TP) 总体呈下降趋势但不显著,尤其岳阳楼断面(S11) ρ (TP) 在 2021 年出现最大值,应引起高度重视.

2.1.2 TP 时空分布

2017 年—2021 年不同水期东洞庭湖与各入湖、出湖 ρ (TP) 平均值见表 3.从空间分布上看, ρ (TP) 由高至低依次为环湖河流(0.096 mg/L) > 湘江(0.074 mg/L) > 东洞庭湖(0.073 mg/L) > 出湖(0.069 mg/L) > 南洞庭湖(0.065 mg/L).不同水期比较,枯水期入湖水水质与湖体之间差异相对较大, ρ (TP) 由高至低依次为环湖河流(0.107 mg/L) > 东洞庭湖(0.085 mg/L) > 出湖(0.084 mg/L) > 湘江(0.079 mg/L) > 南洞庭湖(0.062 mg/L);平水期依次为环湖河流(0.097 mg/L) > 湘江(0.078 mg/L) > 东洞庭湖(0.071 mg/L) = 南洞庭湖(0.071 mg/L) > 出湖(0.065 mg/L);丰水期依次为环湖河流(0.085 mg/L) > 湘江(0.064 mg/L) > 南洞庭湖(0.063 mg/L) > 东洞庭湖(0.062 mg/L) > 出湖(0.059 mg/L).各水期均以环湖河流入湖 ρ (TP) 最高,

且枯水期明显高于平水期和丰水期,湘江入湖 $\rho(\text{TP})$ 在平水期和丰水期仅次于环湖河流,南洞庭湖入湖 $\rho(\text{TP})$ 枯水期低于东洞庭湖,平水期与东洞庭湖相当,丰水期略高于东洞庭湖。

表2 东洞庭湖与各入湖、出湖 TP 质量浓度

mg/L

区域	取值	$\rho(\text{TP})$					总体
		2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	
湘江	S1 范围	0.068~0.088	0.050~0.100	0.040~0.090	0.034~0.139	0.060~0.107	0.034~0.139
	S1 平均	0.076	0.076	0.065	0.070	0.082	0.074
	S2 范围	0.070~0.142	0.070~0.180	0.020~0.150	0.030~0.105	0.065~0.111	0.020~0.180
	S2 平均	0.113	0.100	0.093	0.069	0.091	0.094
环湖河流	S3 范围	0.056~0.192	0.060~0.200	0.040~0.240	0.041~0.125	0.060~0.143	0.040~0.240
	S3 平均	0.108	0.103	0.108	0.078	0.090	0.099
	S4 范围	0.055~0.204	0.020~0.160	0.060~0.160	0.052~0.211	0.054~0.113	0.020~0.211
	S4 平均	0.119	0.097	0.100	0.087	0.080	0.101
	S5 范围	0.070~0.155	0.040~0.160	0.020~0.110	0.050~0.127	0.058~0.185	0.020~0.185
	S5 平均	0.125	0.120	0.066	0.076	0.100	0.097
南洞庭湖	S6 范围	0.040~0.093	0.040~0.100	0.050~0.120	0.055~0.075	0.043~0.093	0.040~0.120
	S6 平均	0.065	0.069	0.072	0.062	0.063	0.067
	S7 范围	0.046~0.088	0.060~0.090	0.040~0.080	0.047~0.080	0.040~0.077	0.040~0.090
	S7 平均	0.068	0.072	0.062	0.063	0.057	0.066
	S8 范围	0.068~0.129	0.050~0.100	0.040~0.090	0.035~0.115	0.060~0.086	0.035~0.129
	S8 平均	0.084	0.073	0.058	0.059	0.070	0.068
	S9 范围	0.045~0.113	0.050~0.100	0.030~0.090	0.035~0.150	0.070~0.125	0.030~0.150
	S9 平均	0.069	0.071	0.058	0.061	0.084	0.065
东洞庭湖	S10 范围	0.050~0.122	0.060~0.110	0.040~0.150	0.040~0.125	0.045~0.092	0.040~0.150
	S10 平均	0.084	0.079	0.079	0.068	0.065	0.078
	S11 范围	0.054~0.110	0.040~0.120	0.040~0.100	0.040~0.115	0.070~0.136	0.040~0.120
	S11 平均	0.085	0.073	0.077	0.067	0.088	0.076
	S8~S11 范围	0.045~0.129	0.040~0.120	0.030~0.150	0.035~0.150	0.045~0.136	0.030~0.150
	S8~S11 平均	0.080	0.074	0.068	0.064	0.077	0.072
洞庭湖出口	S12 范围	0.054~0.113	0.040~0.110	0.040~0.110	0.040~0.140	0.032~0.090	0.032~0.140
	S12 平均	0.079	0.072	0.070	0.064	0.062	0.071

图2和图3分别为东洞庭湖各入湖 $\rho(\text{TP})$ 和东洞庭湖 $\rho(\text{TP})$ 年内变化特征。从时间变化上看,东洞庭湖各入湖 $\rho(\text{TP})$ 年内变化趋势出现较大差异。藕池河东支入湖 $\rho(\text{TP})$ 呈现枯水季节(年初、年末)低,丰水季节高的变化趋势,可能与藕池河东支输沙量的年内变化有关。洞庭湖泥沙主要来自长江三口^[2,24],每年汛期是三口主要泄洪时段,而输沙量与 TP 关系密切^[26]。汨罗江、新墙河与华容河入湖 $\rho(\text{TP})$ 年内变化趋势基本一致,呈现枯水季节高,丰水季节低,这与其水环境容量变化基本吻合。湘江及南洞庭湖入湖 $\rho(\text{TP})$ 年内呈小幅波动变化。年际间比较,2月—3月及12月各入湖 $\rho(\text{TP})$ 变幅相对较大,其中新墙河变幅最大,可能受水位及局部污染变化等因素影响较大。东洞庭湖及出湖 $\rho(\text{TP})$ 年内变化趋势基本一致,总体呈现枯水季节高,丰水季节低的变化趋势,与汨罗江、新墙河等环湖河流变化趋势相近,分析东洞庭湖及出湖 $\rho(\text{TP})$ 可能在枯水期受环湖河流的影响较大。年际间比较,1月—2月及12月东洞庭湖及出湖 $\rho(\text{TP})$ 变幅相对较大,可能与枯水期湖体水环境容量下降及局部污染负荷变化相关。

在枯水期水位下降明显,东洞庭湖水面严重萎缩,航运船舶对水体沉积物扰动再悬浮,加速了沉积物中 TP 的释放,此时为湖区渔业养殖尾水排放的高峰时段,各类外源污染叠加导致湖体 $\rho(\text{TP})$ 升高。

表3 不同水期东洞庭湖与各入湖、出湖 TP 质量浓度(2017年—2021年平均值)

水期	入湖 ρ (TP)			东洞庭湖 ρ (TP)	洞庭湖出口 ρ (TP)
	湘江	环湖河流	南洞庭湖		
枯水期	0.079	0.107	0.062	0.085	0.084
平水期	0.078	0.097	0.071	0.071	0.065
丰水期	0.064	0.085	0.063	0.062	0.059
平均	0.074	0.096	0.065	0.073	0.069

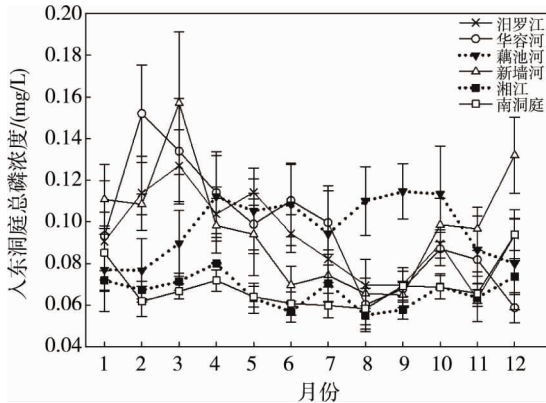


图2 东洞庭湖各入湖 TP 质量浓度年内变化(2017年—2021年平均值)

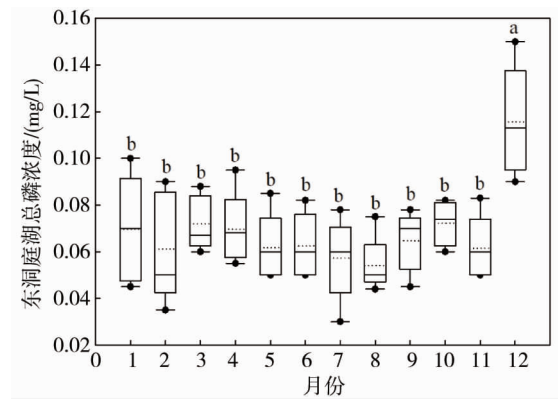


图3 东洞庭湖 TP 质量浓度年内变化(2017年—2021年平均值)

2.1.3 不同水期 TP 差异性分析

由表4可见,不同水期东洞庭湖(S8~S11)、出湖(S12)及南洞庭湖的横岭湖(S6) ρ (TP)差异均达显著或极显著水平,表明水期变化对 ρ (TP)影响明显.湘江(S1)、汨罗江(S2)及新墙河(S3) ρ (TP)差异达显著或极显著水平,但在华容河(S4)、藕池河东支(S5)差异不显著,说明水期变化对入湖河流 ρ (TP)影响存在差异.除藕池河东支(S5)及南洞庭湖(S6~S7)外,其余各断面 ρ (TP)均表现为枯水期>平水期>丰水期.藕池河上游呈现季节性断流,丰水期水质主要受长江支配,但枯水期水质主要来源于雨水及沿岸污水补给.藕池河东支(S5) ρ (TP)表现为丰水期>平水期>枯水期,可能与丰水期泥沙输入量较大相关^[26].横岭湖(S6) ρ (TP)表现为平水期>丰水期>枯水期,可能与西洞庭水质变化及南洞庭湖水位变化导致航运影响有关.虞公庙(S7) ρ (TP)表现为平水期>枯水期>丰水期,主要受湘江、资江水质影响.

表4 不同水期东洞庭湖与各入湖、出湖 TP 差异性

点位	P	差异性	点位	P	差异性
S1	0.043	显著	S7	0.072	不显著
S2	0.025	显著	S8	0.025	显著
S3	0.000	极显著	S9	0.001	极显著
S4	0.139	不显著	S10	0.009	极显著
S5	0.085	不显著	S11	0.000	极显著
S6	0.002	极显著	S12	0.000	极显著

注: $P < 0.05$ 为显著相关; $P < 0.01$ 为极显著相关

2.2 TP 污染成因分析

2.2.1 相关性分析

运用 Pearson 相关分析研究东洞庭湖 TP 与各入湖、出湖 TP 及水位之间的相互关系(见表5).结果表明:湘江入湖(S1)与东洞庭湖(S8,S10)呈极显著正相关($P < 0.01$);新墙河入湖(S3)与东洞庭湖(S9,S11)呈极显著正相关,与东洞庭湖(S8)呈显著正相关($P < 0.05$);东洞庭湖(S8~S11)与出湖(S12)之间均呈极显著或显著正相关.表明湘江、新墙河 TP 输入与下游东洞庭湖体 TP 变化关系密切,东洞庭湖与出湖 TP 污染有同源性或受其他相同因素影响.

由 TP 与水位相关分析可知,洞庭湖出口水位变化与南洞庭湖(S7)、东洞庭湖及出湖(S8~S12)、汨罗江(S2)及新墙河(S3)入湖 $\rho(\text{TP})$ 呈极显著或显著负相关;新墙河水位变化与其入湖 $\rho(\text{TP})$ 呈极显著负相关.水位之间相关分析表明,洞庭湖出口与湘江、汨罗江、新墙河、华容河、藕池河东支水位两两之间呈极显著或显著正相关.可见,洞庭湖出口水位变化与东洞庭湖及入湖河流水位关系密切,水位变化是影响东洞庭湖及入湖河流 $\rho(\text{TP})$ 的重要因素.

表 5 东洞庭湖 TP 与各入湖、出湖 TP 及水位的 Pearson 相关系数

项目	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	城陵矶	湘阴	新墙	钱粮湖	藕池	伍市	
S1	1																		
S2	0.235	1																	
S3	0.207	0.502 **	1																
S4	-0.058	0.372 *	0.501 **	1															
S5	0.158	0.277	0.045	0.014	1														
S6	0.108	-0.043	0.110	0.024	0.150	1													
S7	0.154	0.243	0.101	0.061	0.208	0.033	1												
S8	0.510 **	0.252	0.334 *	-0.196	0.154	-0.150	0.311	1											
S9	0.076	0.110	0.484 **	-0.016	-0.163	0.131	0.231	0.337 *	1										
S10	0.503 **	0.213	0.320	-0.204	0.076	-0.185	0.124	0.922 **	0.344 *	1									
S11	0.249	0.112	0.474 **	0.096	-0.151	0.019	0.247	0.464 **	0.813 **	0.486 **	1								
S12	0.280	0.004	0.266	0.014	-0.060	-0.165	0.050	0.646 **	0.386 *	0.717 **	0.688 **	1							
城陵矶	-0.196	-0.398 *	-0.485 **	-0.239	0.074	-0.045	-0.374 *	-0.524 **	-0.533 **	-0.494 **	-0.610 **	-0.571 **	1						
湘阴	-0.194	-0.358 *	-0.468 **	-0.216	0.045	-0.061	-0.349 *	-0.539 **	-0.520 **	-0.505 **	-0.602 **	-0.603 **	0.994 **	1					
新墙	-0.179	-0.360 *	-0.432 **	-0.345	0.019	-0.129	-0.409 *	-0.427 **	-0.523 **	-0.364 *	-0.607 **	-0.486 **	0.868 **	0.856 **	1				
钱粮湖	-0.044	-0.210	-0.330 *	-0.338	0.163	-0.197	-0.324	-0.196	-0.373 *	-0.189	-0.493 **	-0.379 *	0.707 **	0.689 **	0.818 **	1			
藕池	-0.189	-0.407 *	-0.424 **	-0.272	0.133	-0.089	-0.438 **	-0.410 *	-0.541 **	-0.392 *	-0.601 **	-0.461 **	0.922 **	0.893 **	0.918 **	0.771 **	1		
伍市	-0.193	0.101	0.157	-0.044	0.008	-0.170	-0.106	-0.265	0.062	-0.206	-0.159	-0.508 **	0.429 **	0.483 **	0.441 **	0.485 **	0.391 *	1	

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

2.2.2 RDA 分析

运用冗余分析(RDA)研究东洞庭湖各入湖 $\rho(\text{TP})$ 、入湖河流及出湖相应水文数据与东洞庭湖 $\rho(\text{TP})$ 之间的关系,进一步分析东洞庭湖 TP 污染成因.根据 2021 年 2 月—6 月湘江(X1)、汨罗江(X2)、新墙河(X3)、华容河(X4)、藕池河东支(X5)、南洞庭湖横岭湖(X6)和虞公庙(X7)入湖水质加密监测 TP 数据,结合各入湖河流相应时期的水位数据(X8~X12),以及洞庭湖出口水位(X13)和流量(X14)数据.TP 和水文因素的 RDA 分析结果表明(见图 4):各入湖 $\rho(\text{TP})$ 和入湖河流水位,以及洞庭湖出口水位和流量对东洞庭湖 $\rho(\text{TP})$ 变化总的解释度为 77.65%.其中洞庭湖出口水位变化(X13)对东洞庭湖及出湖 $\rho(\text{TP})$ 的影响最大,其次为新墙河(X3)入湖 $\rho(\text{TP})$,其后依次为湘江水位变化(X8)、洞庭湖出湖流量变化(X14)、横岭湖入湖 $\rho(\text{TP})$ (X6)、藕池河东支水位变化(X11)、新墙河水位变化(X9)、华容河水位变化(X10)、藕池河入湖 $\rho(\text{TP})$ (X5)、虞公庙入湖 $\rho(\text{TP})$ (X7)、汨罗江入湖 $\rho(\text{TP})$ (X2)、汨罗江水位变化(X12)、湘江入湖 $\rho(\text{TP})$ (X1)和六门闸入湖 $\rho(\text{TP})$ (X4).

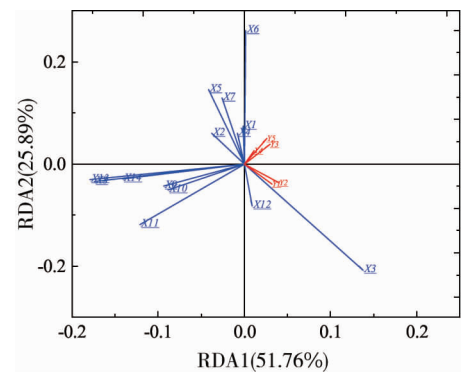


图 4 TP 和水文因素的 RDA 排序

水文条件变化对东洞庭湖及出湖 $\rho(\text{TP})$ 影响较大,其中洞庭湖出口水位及流量变化、湘江及藕池河东支水位变化的影响相对明显.同时,新墙河、横岭湖入湖 $\rho(\text{TP})$ 对东洞庭湖及出湖水质影响也较大,表明东洞庭湖及出湖水质受外源污染物输入和水文条件的叠加影响.由表 5 相关性分析来看,新墙河入湖 $\rho(\text{TP})$ 与东洞庭湖扁山、岳阳楼断面呈极显著正相关,结合 $\rho(\text{TP})$ 年内变化规律,分析新墙河在枯水期对入湖口

下游湖体断面影响较大.横岭湖断面主要监测南洞庭出湖水质,其污染物浓度、污染物输入量直接影响东洞庭湖水质状况,结合不同水期时空分布差异结果,发现南洞庭湖在丰水期对东洞庭湖水质影响较大.

另外,东洞庭湖 $\rho(\text{TP})$ 变化还受解释度占22.35%的其他因素影响,这可能与其它河流及排污(渍)口等污染因素有关.因此,在年内不同水文阶段积极开展水文调控工作,同时加强对入湖污染物的管控措施,重点关注特殊时段入湖河流及入湖排污(渍)口、渔业养殖尾水排放和河道采砂作业、航运航行等因素的影响,对东洞庭湖泊水质管理具有重要意义.

2.3 TP 污染评价

由表6可见,2017年—2021年东洞庭湖(S8~S11)污染指数值(S_{TP})以轻度污染、偏中度污染为主;各入湖水水质中湘江(S1)以轻度污染、偏中度污染为主,环湖河流(S8~S11)以偏中度污染、中度污染为主,南洞庭湖(S6~S7)均为轻度污染;洞庭湖出口(S12)以轻度污染为主.不同水期比较,枯水期除南洞庭湖(S6~S7)为轻度污染外,其余断面均为中度污染或偏中度污染;平水期除藕池河东支(S5)为中度污染外,其余断面均为轻度污染或偏中度污染;丰水期除藕池河东支(S5)为中度污染、汨罗江和华容河为偏中度污染外,其余断面均为轻度污染.按 S_{TP} 平均值由大小排序依次为1.950(S3)>1.946(S5)>1.924(S4)>1.860(S2)>1.564(S11)>1.502(S9)>1.475(S1)>1.386(S12)>1.375(S8)>1.370(S10)>1.323(S6)>1.286(S7).总体上环湖河流入湖 S_{TP} 污染相对最重,其次为湘江,其后依次为东洞庭湖、洞庭湖出口和南洞庭湖.

表6 东洞庭湖与各入湖、出湖TP单项污染指数与分级

项目	S_{TP}														
	S1	S2	S3	S4	S5	S2-S5	S6	S7	S6-S7	S8	S9	S10	S11	S8-S11	S12
2017	1.517(4)	2.260(5)	2.165(5)	2.375(5)	2.502(5)	2.325(5)	1.293(3)	1.360(3)	1.327(3)	1.672(4)	1.677(4)	1.380(3)	1.705(4)	1.608(4)	1.588(4)
2018	1.517(4)	2.000(4)	2.067(5)	1.933(4)	2.400(5)	2.100(5)	1.383(3)	1.433(3)	1.408(3)	1.467(3)	1.583(4)	1.417(3)	1.467(3)	1.483(3)	1.433(3)
2019	1.300(3)	1.855(4)	2.150(5)	2.000(4)	1.317(3)	1.814(4)	1.433(3)	1.233(3)	1.333(3)	1.150(3)	1.583(4)	1.150(3)	1.533(4)	1.354(3)	1.400(3)
2020	1.392(3)	1.370(3)	1.560(4)	1.747(4)	1.510(4)	1.547(4)	1.237(3)	1.263(3)	1.250(3)	1.188(3)	1.363(3)	1.223(3)	1.348(3)	1.281(3)	1.275(3)
2021	1.648(4)	1.815(4)	1.807(4)	1.590(4)	2.000(4)	1.803(4)	1.267(3)	1.138(3)	1.203(3)	1.400(3)	1.303(3)	1.680(4)	1.768(4)	1.538(4)	1.232(3)
k	1.576(4)	2.125(5)	2.541(5)	2.24(5)	1.615(4)	2.130(5)	1.158(3)	1.331(3)	1.245(3)	1.536(4)	1.776(4)	1.592(4)	1.857(4)	1.690(4)	1.685(4)
p	1.564(4)	1.852(4)	1.937(4)	1.888(4)	2.086(5)	1.941(4)	1.488(3)	1.337(3)	1.413(3)	1.350(3)	1.489(3)	1.326(3)	1.530(4)	1.424(3)	1.296(3)
f	1.284(3)	1.590(4)	1.371(3)	1.689(4)	2.136(5)	1.696(4)	1.322(3)	1.189(3)	1.256(3)	1.240(3)	1.241(3)	1.192(3)	1.306(3)	1.245(3)	1.176(3)
平均值	1.475(3)	1.860(4)	1.950(4)	1.924(4)	1.946(4)	1.920(4)	1.323(3)	1.286(3)	1.304(3)	1.375(3)	1.502(4)	1.370(3)	1.564(4)	1.453(3)	1.386(3)

注:括号内数值为 S_{TP} 污染分级; k, p, f 分别为枯水期、平水期和丰水期

3 结论

1)2017年—2021年东洞庭湖 $\rho(\text{TP})$ 年均值在0.058~0.088 mg/L,湘江、环湖河流及南洞庭湖入湖 $\rho(\text{TP})$ 年均值在0.05~0.125 mg/L,出湖 $\rho(\text{TP})$ 年均值在0.062~0.079 mg/L.总体上洞庭湖出湖 $\rho(\text{TP})$ 呈显著下降趋势,东洞庭湖体及入湖 $\rho(\text{TP})$ 呈下降趋势但不显著.

2)空间分布上, $\rho(\text{TP})$ 由高至低依次为环湖河流(0.096 mg/L)>湘江(0.074 mg/L)>东洞庭湖(0.073 mg/L)>出湖(0.069 mg/L)>南洞庭湖(0.065 mg/L).时间分布上,东洞庭湖各入湖 $\rho(\text{TP})$ 年内变化趋势呈现较大差异.藕池河东支呈现苦水季节低,丰水季节高的变化趋势;汨罗江、新墙河与华容河呈现枯水季节高,丰水季节低的变化趋势;湘江及南洞庭湖入湖 $\rho(\text{TP})$ 年内呈小幅波动变化;东洞庭湖及出湖 $\rho(\text{TP})$ 呈现枯水季节高,丰水季节低的变化趋势.

3)不同水期之间,东洞庭湖(S8~S11)、出湖(S12)及南洞庭湖的横岭湖(S6) $\rho(\text{TP})$ 差异均达显著或极显著水平,湘江(S1)、汨罗江(S2)及新墙河(S3) $\rho(\text{TP})$ 差异达显著或极显著水平,华容河(S4)、藕池河东支(S5)差异不显著.

4)东洞庭湖及出湖水质受外源污染物输入和水文条件的叠加影响.其中洞庭湖出口水位及流量、湘江及藕池河东支水位变化,以及新墙河、横岭湖入湖 $\rho(\text{TP})$ 对东洞庭湖及出湖 $\rho(\text{TP})$ 影响较大.

5)2017年—2021年东洞庭湖(S8~S11) S_{TP} 值以轻度污染、偏中度污染为主;各入湖水质中湘江(S1)以轻度污染、偏中度污染为主;环湖河流(S8~S11)以偏中度污染、中度污染为主;南洞庭湖(S6~S7)均为轻度污染;洞庭湖出口(S12)以轻度污染为主。

参考文献:

- [1] 张光贵,卢少勇,田琪.近20年洞庭湖总氮和总磷浓度时空变化及其影响因素分析[J].环境化学,2016,35(11):2377-2385.
- [2] 周琴,贾海燕,卢路,等.洞庭湖水质及出入湖主要污染物通量变化趋势分析[J].三峡生态环境监测,2021,6(2):71-80.
- [3] 窦鸿身,姜加虎.洞庭湖[M].合肥:中国科学技术出版社,2000.
- [4] 张敏,张伟军.洞庭湖水质状况分析与水环境保护研究[J].长江工程职业技术学院学报,2011,28(4):16-18.
- [5] WANG H J, LIANG X M, JIANG P H, et al. TN:TP Ratio and Planktivorous Fish do not Affect Nutrient-chlorophyll Relationships in Shallow Lakes[J]. Freshwater Biology, 2008, 53(5):935-944.
- [6] 蔡龙炎,李颖,郑子航.我国湖泊系统氮磷时空变化及对富营养化影响研究[J].地球与环境,2010,38(2):235-241.
- [7] 林日彭,倪兆奎,高舒琨,等.近25年洞庭湖水质演变趋势及下降风险[J].中国环境科学,2018,38(12):4636-4643.
- [8] 王岩,姜霞,李永峰,等.洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征[J].环境科学研究,2014,27(5):33-40.
- [9] 秦迪岚,罗岳平,黄哲,等.洞庭湖水环境污染状况与来源分析[J].环境科学与技术,2012,35(8):193-198.
- [10] 田泽斌,王丽倩,李小宝,等.洞庭湖出入湖污染物通量特征[J].环境科学研究,2014,27(9):1008-1015.
- [11] 张之浩,李威,陈立伟,等.洞庭湖总磷污染现状及治理对策分析[J].湘潭大学学报(自然科学版),2021,43(4):111-117.
- [12] 潘畅,陈建湘,黄长红,等.洞庭湖区水环境现状调查与分析[J].人民长江,2018,49(8):20-24.
- [13] 郭晶,莲花,李利强,等.洞庭湖水质污染状况及主要污染物来源分析[J].水生态学杂志,2019,40(4):1-7.
- [14] 彭焕华,张静,梁继,等.东洞庭湖水面面积变化监测及其与水位的关系[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2770-2780.
- [15] 李莹杰,王丽婧,李虹,等.不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素[J].环境科学,2019,40(5):2170-2177.
- [16] 杨莲,杨梅,熊剑,等.岳阳市“十三五”生态环境质量报告书[R].岳阳:岳阳市生态环境局,2021:144-158.
- [17] 尹宇莹,彭高卓,谢意南,等.洞庭湖表层沉积物中营养元素、重金属的污染特征与评价分析[J].环境化学,2021,40(8):2399-2409.
- [18] 李芬芳,黄代中,莲花,等.洞庭湖及其入湖口表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J].生态环境学报,2018,27(12):2307-2313.
- [19] 张光贵.洞庭湖表层沉积物营养盐和重金属污染特征及生态风险评价[J].水生态学杂志,2015,36(2):25-31.
- [20] 万群,李飞,祝慧娜,等.东洞庭湖沉积物中重金属的分布特征、污染评价与来源辨析[J].环境科学研究,2011,24(12):1378-1384.
- [21] 黄代中,李芬芳,欧阳美凤,等.洞庭湖不同形态氮、磷和叶绿素 a 浓度的时空分布特征[J].生态环境学报,2019,28(8):1674-1682.
- [22] 田琪,李利强,欧伏平,等.洞庭湖氮磷时空分布及形态组成特征[J].水生态学杂志,2016,37(3):19-25.
- [23] 吴丁,方平,李照全,等.东洞庭湖区芦苇群落生长对水质的影响[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2022,35(1):63-68.
- [24] 何征,万荣荣,戴雪,等.近30年洞庭湖季节性水情变化及其对江湖水量交换变化的响应[J].湖泊科学,2015,27(6):991-996.
- [25] 朱灵峰,王燕,王阳阳,等.基于单因子指数法的海浪河水质评价[J].江苏农业科学,2012,40(3):326-327.
- [26] 罗以生,吕平毓,陈虎.长江、嘉陵江重庆主城区段悬浮泥沙与总磷浓度相关性分析[J].三峡环境与生态,34(6):14-16.