

洞庭湖出入湖氮磷通量特征及滞留效应研究

赵子豪^{1,2}, 袁静¹, 田泽斌¹, 储昭升^{1,2}, 汪星¹

(1. 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, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 北京 100012; 2. 南昌大学 资源与环境学院, 鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 江西 南昌 330031)

摘要: 采用2013—2017年洞庭湖主要出入湖断面水质、水量监测数据, 估算洞庭湖经由“四水”(湘江、资水、沅江、澧水)和长江“三口”(松滋口、太平口、藕池口)入湖及城陵矶出湖氮、磷通量, 分析其时空变化特征及滞留效应。结果表明: 时间上, 2013—2016年“四水”“三口”年均入湖氮、磷通量总体呈增加趋势, 但2017年受入湖水水质改善、水量减小的同步影响, 相比2016年入湖氮、磷通量分别减小了19.93%、23.14%, 受水情影响, 入湖氮、磷通量在年内分配不均, 70%以上集中在4—9月; 空间上, 入湖氮、磷通量主要来源于“四水”水系, 分别占78.48%和71.77%, 其中湘江和沅江的贡献较大。“四水”受点、面源污染的综合作用, 而“三口”的面源污染是其主要污染来源。此外, 洞庭湖氮、磷滞留率很低, 藻类浓度不高, 但湖区氮、磷浓度(1.73、0.075 mg/L)仍远高于湖泊藻类暴发的临界值(0.20、0.02 mg/L)。为降低湖泊水华的发生风险, 关键是保持湖泊的连通性, 警惕长江“三口”区域总磷风险, 并兼顾湖滨区污染物控制。

关键词: 氮、磷污染物; 污染物通量; 滞留效应; 污染物控制; 湖泊水华; 洞庭湖

中图分类号: X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2023)03-0074-09

Characteristics analysis and retention effect of phosphorus and nitrogen fluxes in Dongting Lake

ZHAO Zihao^{1,2}, YUAN Jing¹, TIAN Zebin¹, CHU Zhaosheng^{1,2}, WANG Xing¹

(1. National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, State Environment Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resources Utilization, Ministry of Education, School of Resources & Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Based on the hydrological and water quality data in the main monitoring sections of Dongting Lake from 2013 to 2017, influxes of TN and TP from the four upstream branches (Xiang River, Zi River, Yuan River and Li River) and three water inlets (Songzi, Taiping and Ouchi) of Dongting Lake, as well as the outflux of Chenglingji outlet were estimated to analyze the spatio-temporal characteristics and retention effect of the two pollutants. The results show that the annual nitrogen and phosphorus fluxes into Dongting Lake showed an overall increasing trend during 2013 – 2016; but in 2017, influenced by the synchronous change of water quality and water quantity, the nitrogen and phosphorus influxes decreased by 19.93% and 23.14%, respectively, compared with 2016. Controlled by seasonal variation of water quantity, the nitrogen and phosphorus influxes distributed unevenly in the year, with more than 70% from April to September. In terms of spatial distribution, the nitrogen and phosphorus influxes mainly came from the four upstream branches, accounting for 78.48% and 71.77%, with the greatest contribution from the Xiang and Yuan Rivers. The four upstream branches were affected by the comprehensive effect of point and non-point source pollution whereas the three water inlets were mainly influenced by non-point source pollution. Apart

收稿日期: 2022-08-28; 修回日期: 2023-03-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201003); 三峡工程运行对洞庭湖水环境影响及保护技术研究项目(2017HXXY-05)

作者简介: 赵子豪(1998—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要从事湖泊富营养化模拟研究。

通讯作者: 田泽斌(1989—), 女, 河北秦皇岛人, 博士, 助理研究员, 主要从事湖库水生态模拟与生态修复研究。

from these, pollutant retention rate of these two pollutants in Dongting Lake were low, so the concentration of phytoplankton was not high, but the nitrogen and phosphorus concentrations in the lake (1.73 and 0.075 mg/L) were still much higher than the critical value of algae outbreak (0.2, 0.02 mg/L). In order to reduce the risk of water bloom, it is vital to maintain the connectivity of the lake, pay attention to the risks of TP in the three water inlets and the control of pollutants around the lake.

Key words: nitrogen and Phosphorus pollutant; pollutant flux; retention effect; pollutant control; lake water bloom; Dongting Lake

1 研究背景

入湖污染物通量代表着一定时间内污染物的入湖量,由入湖水量、水质指标浓度共同决定^[1]。入湖、出湖通量的差值为污染物的入湖总量,其与入湖污染物通量的比值也被称为污染物的滞留率,表征着污染物在湖泊的蓄积情况^[2]。洞庭湖是我国第二大淡水湖泊,承担着调蓄滞洪、生物多样性保护等多种生态功能,是保障长江中下游水生生态安全不可缺少的屏障。近年来,洞庭湖区域城镇化进程加快,农业产业快速发展,污染物排放量日益增加。长江中上游及洞庭湖支流修建了多个梯级水库^[3],长江-洞庭湖关系发生了较大改变,给湖泊保护带来更多的不确定性^[4]。

目前对洞庭湖污染物的研究主要集中在湖体局部区域的沉积物特征^[5-6]、富营养化特征^[7-8]等方面,研究主要阐述了自然条件变化和人类经济活动对湖区生态的影响。亦有学者利用水体总氮(TN)、总磷(TP)、综合营养指数等对洞庭湖水质进行评价^[8-9],揭示了湖泊不同区域的水质情况。对于洞庭湖这类通江湖泊,河流污染物通量输入是湖泊污染物的重要来源,在一定程度上决定了湖泊水质,然而综合考虑入湖支流量、水质的影响,对入湖污染物通量进行分析的文章较少。一些研究虽然揭示了洞庭湖出入湖通量的变化^[4,10],但研究时期较早。2013年之后,三峡上游梯级水库逐步建成并投入运行,使得三峡出库水沙条件发生改变^[11-12];2013年9月,湖南省提出把湘江的污染防治作为“一号重点工程”,严控污染物排放,大力提升流域水环境质量,这将改变湘江的入湖通量水平。三峡下泄水和湘江均为洞庭湖水量的重要来源,其变化势必影响入湖污染物变化,因此有必要对氮、磷入湖通量特征进行重新评估。此外,长江中下游许多湖泊出现不同程度的湖泊水华,氮、磷是藻类重要的营养来源^[13-15],通过对氮、磷通量及浓度进行研究,分析湖泊氮、磷污染及滞留率特征,可进一步探讨出入湖氮、磷通量对湖泊水华的影响。

本文以2013—2017年洞庭湖“四水”“三口”及

城陵矶站点流量与氮、磷浓度数据为基础,通过污染物通量估算方法,计算了5年期间不同月份氮、磷在各区域的出入湖通量,揭示了通量在时间、空间上的分布规律;在此基础上,同步分析水情、区域营养盐排放特征、三峡水库建设等因素对分布规律的影响。在准确分析洞庭湖入湖氮、磷通量规律的基础上,对比不同湖泊的换水周期和氮磷滞留率,进一步探究湖泊水文条件对水华发生的影响,以为发现洞庭湖氮磷通量规律、解析洞庭湖水华发生机理、制定洞庭湖流域保护措施提供参考依据。

2 研究区域及研究方法

2.1 研究区概况

洞庭湖位于荆江南岸(111°53'E~113°05'E, 28°44'N~29°35'N),是由西洞庭湖、南洞庭湖和东洞庭湖组成的浅碟状季节性调蓄湖泊^[16]。洞庭湖承纳经由松滋口、太平口、藕池口“三口”流入的长江水量,以及本地湘江、资江、沅江、澧水“四水”的汇入,经湖泊调蓄后,由城陵矶处重新汇入长江^[17]。

基于洞庭湖各水文站的流量数据,以及上文出入湖8个断面的水质氮、磷浓度数据进行分析,所得结果可代表洞庭湖主要出入流情况。洞庭湖出湖数据来源于城陵矶站;湘江、资水、沅江、澧水“四水”入湖流量数据分别来自湘潭、桃江(二)、桃源、石门水文站;松滋口流量数据来自新江口和沙道观水文站;太平口流量数据来自弥陀寺水文站;藕池口流量数据来自康家岗和管家铺站;湘江、资水、沅江、澧水、松滋口、太平口、藕池口氮、磷浓度数据分别来自樟树港、万家嘴、汉寿坡头、沙河口、马坡湖、安生、官垱断面。图1为洞庭湖流域水系及采样断面分布示意图。

研究监测时段为2013—2017年,监测频率为每月一次,水文、水质同步监测,监测指标为流量及总氮(TN)、总磷(TP)浓度,方法依照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[18]和《河流流量测验规范》(GB 50179—2015)^[19]。

2.2 数据分析方法

采用洞庭湖入湖河流流量与污染物浓度数据进

行相关性分析,除松滋口总氮浓度与流量呈显著正相关($P < 0.05$)外,其余大部分站点相关性不显著($P > 0.05$),通量可采用相关文献^[20]中的通量计算方法进行计算,公式如下:

$$F_{ij} = C_{ij} \times Q_i \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: F_{ij} 为第*i*月污染物*j*的通量,t; C_{ij} 为第*i*月污染物*j*的浓度,mg/L; Q_i 为第*i*月的径流量, m^3 。

利用上述计算方法,可求得2013—2017年各月各支流的通量值,相加求和得到各支流的年总通量,求平均后得到各支流月平均通量值。进而对各支流通量进行分析,揭示其在年际、年内的变化规律。求得总出入湖通量后,即可计算污染物的滞留率,计算公式如下^[21]:

$$RET = (F_{in} - F_{out}) / F_{in} \times 100\% \quad (2)$$

式中: RET 为污染物滞留率,%; F_{in} 为入湖污染物通量,t; F_{out} 为出湖污染物通量,t。

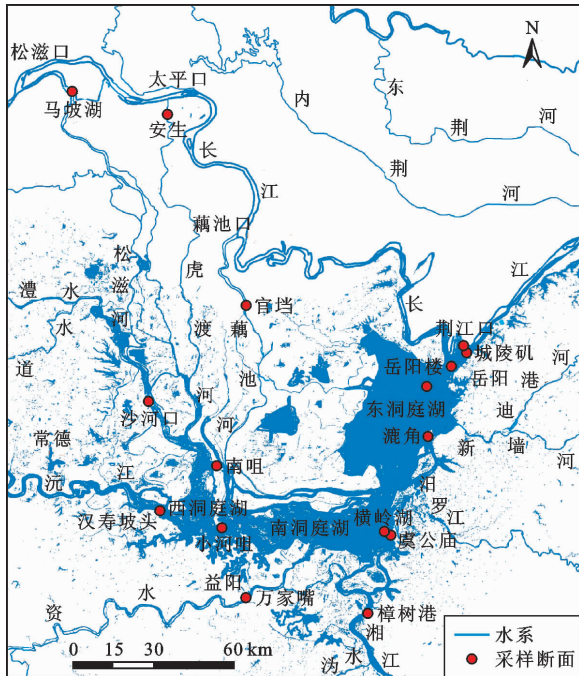


图1 洞庭湖水系及采样断面分布示意图

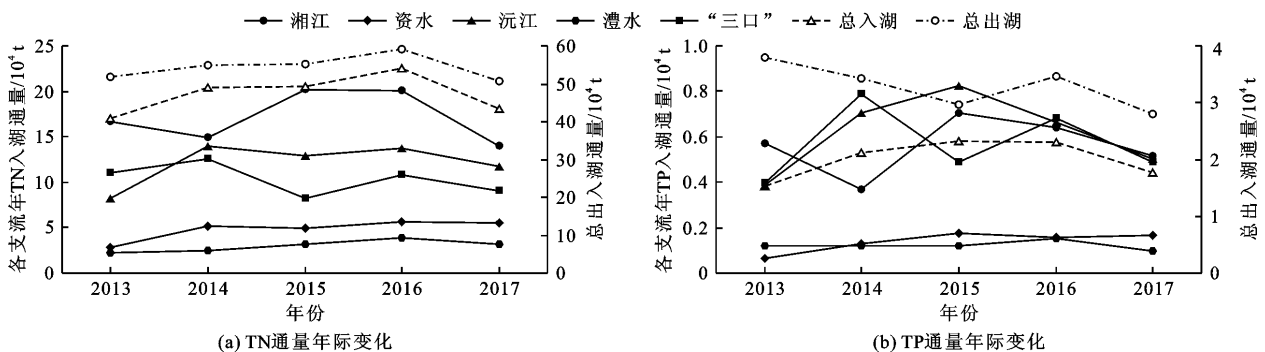


图3 2013—2017年洞庭湖各入湖支流年入湖氮、磷通量及其总出入湖通量变化

3 结果与分析

3.1 洞庭湖出入湖通量年际变化特征

3.1.1 洞庭湖出入湖水量年际变化特征 图2为2013—2017年洞庭湖各入湖支流年入湖水量及总出湖水量的变化,其值为该年各月水量之和,反映了出入湖水量的年际变化情况。

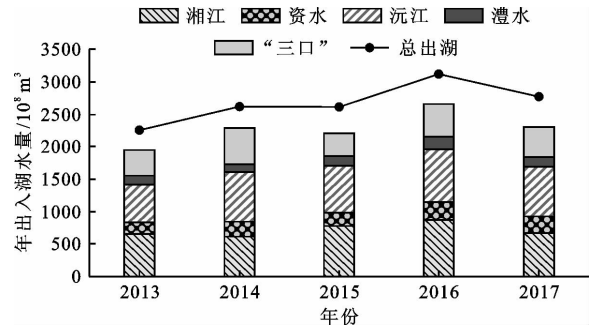


图2 2013—2017年洞庭湖各入湖支流年入湖水量及总出湖水量变化

由图2可知,2013—2017年洞庭湖由“四水”“三口”年入湖水量变化范围为 $1\,949.44 \times 10^8 \sim 2\,660.76 \times 10^8 m^3$,均值为 $2\,293.96 \times 10^8 m^3$;年出湖水量变化范围为 $2\,258.63 \times 10^8 \sim 3\,119.44 \times 10^8 m^3$,均值为 $2\,696.24 \times 10^8 m^3$ 。其中“四水”年入湖水量为 $1\,552.50 \times 10^8 \sim 2\,153.04 \times 10^8 m^3$,均值为 $1\,839.78 \times 10^8 m^3$,占入湖水量均值的80.20%,湘江、资水、沅江和澧水分别占31.46%、10.10%、32.06%和6.58%;“三口”年入湖水量为 $353.73 \times 10^8 \sim 553.48 \times 10^8 m^3$,均值为 $454.18 \times 10^8 m^3$,占入湖水量均值的19.80%。

3.1.2 洞庭湖出入湖氮、磷通量年际变化特征 图3为2013—2017年洞庭湖各入湖支流年入湖氮、磷通量及总出入湖氮、磷通量的变化;图4为年入湖氮、磷浓度的变化。年通量为各月通量之和,年平均浓度为年总通量除以年总水量,反映了氮、磷通量的年际变化情况。

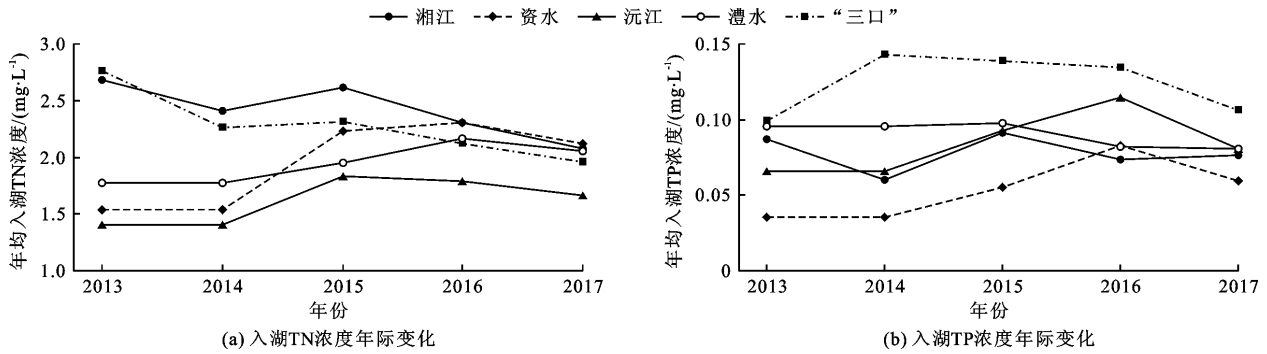


图4 2013—2017年洞庭湖各入湖支流年均入湖氮、磷浓度变化

图3显示,2013—2017年洞庭湖年入湖氮、磷通量变化范围分别为 $41.88 \times 10^4 \sim 54.19 \times 10^4$ 、 $1.538 \times 10^4 \sim 2.315 \times 10^4$ t,均值分别为 47.86×10^4 、 2.020×10^4 t;年出湖氮、磷通量变化范围分别为 $50.57 \times 10^4 \sim 59.17 \times 10^4$ 、 $2.795 \times 10^4 \sim 3.801 \times 10^4$ t,均值分别为 54.35×10^4 、 3.295×10^4 t。其中,“四水”入湖氮、磷通量分别占“四水”“三口”入湖氮、磷通量的78.48%和71.77%，“三口”分别占21.52%和28.23%。氮通量占比最高的是湘江(36.25%)和沅江(25.58%),磷通量占比最高的是沅江(30.70%)和“三口”(28.36%)。由图3还可以看出,2013—2016年“四水”“三口”入湖氮、磷通量总体呈增加趋势,而2017年相比2016年分别下降了19.93%、23.14%。其中2017年湘江入湖氮通量下降明显,比前4年年均值下降了22.10%;磷通量贡献较大的湘江、沅江、“三口”2017年入湖磷通量不同程度下降,比前4年年均值分别下降了9.73%、21.90%、17.30%;而资水氮、磷通量增长,相比前4年年均值,氮、磷通量分别增加了18.91%和26.93%。出湖氮通量和入湖氮通量呈相似的先增加后减小趋势,而出湖磷通量总体呈减小趋势。

图4显示,“四水”“三口”入湖氮、磷浓度的最高值多出现在2015和2016年,而2017年总氮浓度均明显降低,总磷浓度除湘江外均降低。其中总氮浓度均降至地表水V类限值(2 mg/L)附近,沅江最低,为1.67 mg/L,湘江下降明显,由前4年年均值的2.5 mg/L降至2.08 mg/L;“四水”各支流2017年总磷浓度降至地表水IV类限值(0.1 mg/L)以下,而“三口”的总磷浓度虽也降低,但仍显著高于“四水”,保持在0.1 mg/L以上。“四水”“三口”各支流入湖氮、磷在通量、浓度上均有极显著的空间差异性($P < 0.01$)。

3.2 洞庭湖入湖通量年内变化特征

3.2.1 洞庭湖入湖水量年内变化特征 图5为

2013—2017年洞庭湖各入湖支流月入湖水量的变化,其值为各年该月入湖水量的平均值,反映了入湖水量在年内的变化情况。

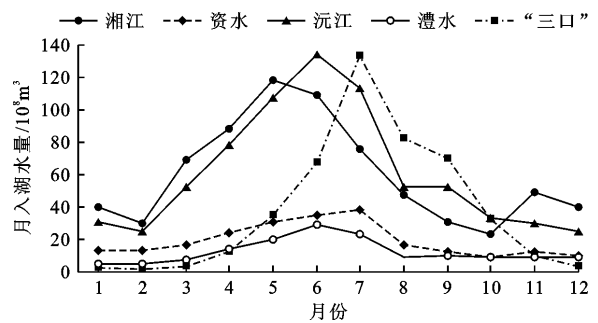


图5 2013—2017年洞庭湖各入湖支流月入湖水量变化

图5显示,“四水”“三口”入湖水量在年内分配不均,主要集中在4—9月。其中,“四水”入湖水量主要集中在4—7月,占其入湖总水量的56.51%;“三口”在枯水期几乎断流,入湖水量主要集中在6—9月,占其入湖总水量的77.79%。洞庭湖总入湖水量最大值的7月入湖水量为 $384.56 \times 10^8 \text{ m}^3$,是入湖水量最小值2月的5.14倍。

3.2.2 洞庭湖入湖氮、磷通量年内变化特征 图6为2013—2017年洞庭湖各入湖支流月入湖氮、磷通量的变化;图7为月入湖氮、磷浓度的变化。氮、磷通量及浓度为各年该月的平均值,反映了入湖氮、磷的年内变化情况。

图6显示,因年内水量分配的差异,“四水”“三口”4—9月入湖氮、磷通量占年入湖通量的72.42%、73.16%。其中“四水”4—7月入湖氮、磷通量占其全年入湖通量的56.36%、54.96%，“三口”6—9月的入湖氮、磷通量占其全年入湖通量的78.12%、78.32%。此外,湘江11月一次年1月的入湖氮、磷通量较高,占该时期“四水”“三口”总入湖通量的52.88%和46.61%。

图7显示,“四水”汛期总氮浓度低于非汛期,

“三口”则相反。“四水”入湖总氮浓度峰值多出现在1月,如:湘江浓度达3.07 mg/L,澧水达2.51 mg/L,远超V类水的限值2.0 mg/L。而“三口”入湖总氮浓度峰值出现在5月,最高达2.64 mg/L。

总磷浓度方面,“四水”中水量占比较大的湘江、沅江总磷浓度分别在1、3月出现峰值,达到0.1 mg/L,而“三口”各月总磷浓度均超过0.1 mg/L,最高的4月达0.17 mg/L。

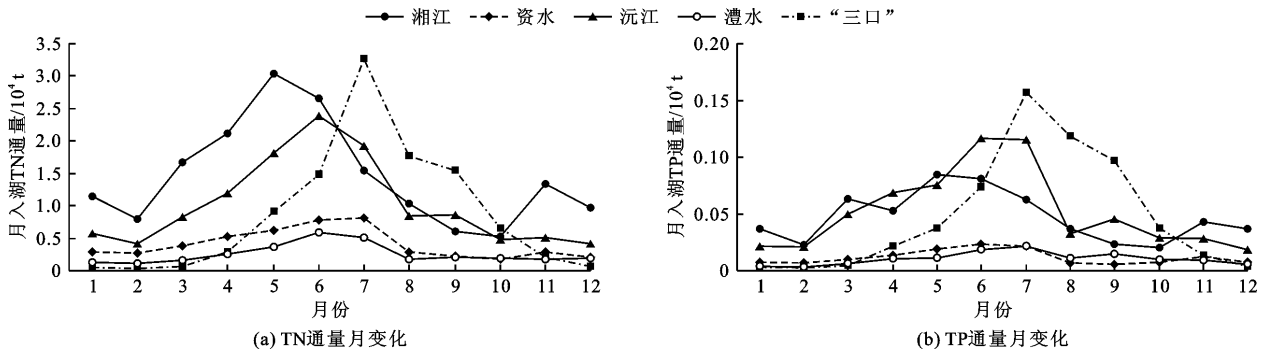


图6 2013—2017年洞庭湖各入湖支流月入湖氮、磷通量变化

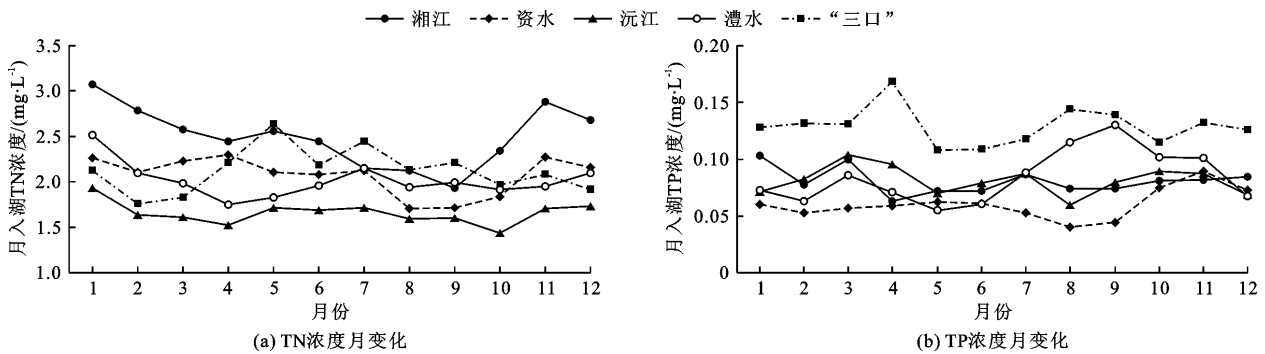


图7 2013—2017年洞庭湖各入湖支流月入湖氮、磷浓度变化

4 讨论

4.1 洞庭湖出入湖通量变化影响因素

根据全国第二次污染源普查结果,湖南省农业源氮、磷排放占比为51.59%、64.57%^[22],表明农业面源污染是造成洞庭湖氮、磷污染的主导因素,相关统计年鉴结果也验证了这一结论^[23]。在洞庭湖流域污染中,氮、磷排放占比最大的是畜禽养殖,占比分别为60.06%、41.92%,而农业种植分别占27.06%、41.48%^[24],其中畜禽养殖以生猪养殖为主要排放源,而农业种植的主要污染是化肥的使用^[25]。

从洞庭湖通量年际变化特征来看,2013—2016年洞庭湖总入湖氮、磷通量呈增加趋势,而2017年有所下降。主要原因是近年来湖南省施行的污染源防控政策,该政策的实施使得湖南省农业源氮、磷排放量下降,省内汇流“四水”污染有所改善。根据统计年鉴,湖南省农用化肥施用量由2013—2015年的849.9 × 10⁴ t下降为2016—2017年的832.3 × 10⁴ t; 畜禽养殖中整体出栏量变化不大,但主要污染种类

猪、牛的存栏量分别从2013—2015年的4 160.4 × 10⁴、389.4 × 10⁴头,减少至2016—2017年的3 975.6 × 10⁴、376.8 × 10⁴头,整体养殖规模下降明显。但通量的变化受浓度和水量的综合影响,2016年总入湖水量比2015年增加了20.61%,导致该年入湖氮、磷通量仍维持较高水平,而2017年因水质改善、水量降低的共同作用,总入湖氮、磷通量比2016年分别下降了19.93%、23.14%。2017年的下降主要发生在湘江,其入湖氮、磷通量均为5年中最代,而资水却有所增长。主要原因是湘江区域的畜禽养殖规模以及农业化肥施用量降幅大于资水区域。2017年,湘江流经的“长株潭”地区的猪肉产量从前4年年均值130 × 10⁴ t下降至85 × 10⁴ t,化肥施用量从2014年的42.9 × 10⁴ t减少至40.3 × 10⁴ t^[23],降幅较大。而资水主要流经的邵阳、益阳区域农业规模变化幅度明显较小,其化肥施用量仅从46.5 × 10⁴ t减少至46.1 × 10⁴ t,猪肉产量从前4年年均值103 × 10⁴ t下降至2017年的81 × 10⁴ t^[23]。加上2017年资水入湖水量比前4年年均值增加了

14.87%,导致其入湖通量不减反增。

除“四水”外,“三口”承接三峡下泄的长江来水,占6—9月入流水量的40%。相比于“四水”,“三口”入流的特点是总磷浓度很高,以总水量的19.80%占总入湖磷通量的28.36%。三峡水库于2010年首次

蓄水至175 m,改变了其下游区域的水文情势^[26]。文献[4]利用1999—2002年和2010年数据,比较了三峡运行前后“三口”入湖水量与污染物通量,在此基础上,进一步将2013—2017年数据进行对比分析(表1),以阐明“三口”入湖通量的年际变化。

表1 “三口”年均入湖通量及占比

年份	入湖水量		入湖 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 通量		入湖 TP 通量	
	年均值/ 10^8 m^3	占比/%	年均值/ 10^4 t	占比/%	年均值/ 10^4 t	占比/%
1999—2002	686.89	28.49	1.556	24.56	0.529	27.38
2010	454.66	19.98	0.841	12.46	0.252	16.77
2013—2017	454.20	19.80	0.977	18.30	0.570	28.23

分析表1可知,三峡工程自2003年蓄水运行后,“三口”入湖水量比运行前减少约1/3^[4],而2013—2017年“三口”入湖水量与2010年接近,入湖水量趋于稳定。蓄水运行后,2010年“三口”入湖磷通量年均值由 $5.29 \times 10^3 \text{ t}$ 降至 $2.52 \times 10^3 \text{ t}$,而2013—2017年“三口”在水量减少1/3的前提下,入湖磷通量年均值达 $5.70 \times 10^3 \text{ t}$,比蓄水运行前还增加了约7.8%。主要原因是三峡水库运行后,因大坝对泥沙的拦截效应,截留并沉淀了大量颗粒态磷,使2008—2012年三峡磷滞留率高达49.76%^[11],更多磷沉积在库内,加之分泄水量减少,使得该时段“三口”入流磷通量较低。2013年以后,排沙调度试验促进了三峡排沙排磷,使得2013—2016年三峡水库磷滞留率降低至12.03%,大量的磷由三峡水库排向下游,出库总磷浓度达 0.13 mg/L ^[11],这使得三峡出库磷浓度本底值较高^[27]。三峡水库下游宜昌区域存在多座磷化工基地,调查表明其中有25.8%的磷肥磷化工企业污水排放超过工业水污染排放限值,这使得2016年三峡下泄水总磷浓度沿程上升,最高超过 0.16 mg/L ^[28]。而“三口”承纳相关区间流入的长江来水,使得入流总磷浓度,高于“四水”。

除通量的年际变化外,年内入湖氮、磷变化也有规律,原因较为复杂。通常来说,以面源为主要污染源的湖泊,汛期污染物浓度高于非汛期,以点源为主要污染源的湖泊则相反。洞庭湖“四水”汛期入湖氮、磷浓度较低,非汛期浓度较高,但洞庭湖情况较复杂,不能因此认定点源污染明显为主要污染。因点源入湖排放较为固定,若不存在汛期冲刷入湖的面源污染,各月氮、磷通量应较为恒定,但“四水”4—7月入湖氮、磷通量比例占比超过55%,因此“四水”存在点、面源的综合污染。这种特征出现的原

因可能是,洞庭湖汛期来水过于充沛,是非汛期的4~5倍,初期雨水(3—4月)加强了面源冲刷,此时浓度有小高峰,但汛期中后段(6—7月),雨水的稀释作用占主要地位,因此浓度最低。而“三口”区域汛期污染浓度较高,可以说明其面源污染更明显占主要污染源地位。

洞庭湖入湖氮、磷浓度在不同月份出现峰值,总氮峰值出现在1月,总磷峰值一般在3—4月,原因主要是氮、磷污染的主要来源不同。研究显示,洞庭湖流域污染中,畜禽养殖总氮贡献达60.06%,贡献高于总磷,而农业生产对总磷贡献达41.48%,高于总氮^[25]。农业生产施肥存在明显的季节性,在实际调研过程中,存在农业排水沟渠枯水期不排水,污染物积聚在渠内,遇到降雨集中排水排出的现象。初期雨水多发生于3—4月,该时期各支流入湖水量开始增加,特别是湘江、沅江来水增幅明显,初期地表径流易将化肥以及非汛期断流时积聚的污染物冲刷入湖^[29],使得此时期总磷浓度较高。相对农业施肥,畜禽养殖季节性较弱,在年内持续排放污染物,水量较少的1月稀释能力较弱,因此总氮浓度较高。

此外,入湖水质还取决于各支流区域的环境变化,以及营养盐排放水平,各支流水质有显著性差异。湘江流域人口密集,工业、养殖业发达,点源污染较重,造成枯水期湘江污染物浓度极高,11月至次年1月氮、磷入湖通量占总通量的约50%。“三口”因区间磷化工企业的超标排放,总磷浓度显著高于“四水”。三峡水库的影响则较为复杂,其蓄水运行后“三口”年均入流减少了1/3,这使得洞庭湖水位降低,改变了区域水文生态格局;三峡水库年内对于水量的调蓄分配使“三口”入湖水量在年内分配得更加均衡,也同时改变了各水期入湖氮、磷通量

的比例;因三峡水库蓄水,洞庭湖枯水期提前及延长;三峡水库排沙调度实验直接影响了下泄水中的泥沙含量,以及氮、磷浓度水平,使得泥沙调度期间“三口”入湖磷浓度大幅增加。

4.2 洞庭湖区间径流及大气降水入湖通量估算

除“四水”和“三口”入流外,洞庭湖水量及污染物的出入变化还受洞庭湖区间径流及湖面受纳降水等因素控制^[4]。有学者利用 SWAT 和新安江模型对多年期区间径流进行模拟,表明出入湖水量平衡计算可以较好地模拟区间径流量的大小^[30]。2013—2017年洞庭湖流域“四水”和“三口”总入湖水量为 $1\,146.98 \times 10^9 \text{ m}^3$, 城陵矶总出湖水量为 $1\,348.12 \times 10^9 \text{ m}^3$, 出入湖水量差值为 $2\,011.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占总出湖水量的 14.92%。根据统计数据,洞庭湖多年区间径流及大气降水中 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 的平均值分别为 1.45、0.05 mg/L^[31], 结合水量差值,该 5 年期间,径流入湖氮、磷通量分别为 $29.15 \times 10^4 \text{ t}$ 、 $1.006 \times 10^4 \text{ t}$ 。考虑区间产流后,2013—2017 年总入湖氮、磷通量分别为 268.44×10^4 、 $11.104 \times 10^4 \text{ t}$, 但区间产流入湖氮、磷通量贡献占入流污染物的比例

仅为 10.86%、9.06%。

2013—2017 年区间产流比例为 14.92%, 相比之前文献[4]计算所得的 18.92% 有所下降,且氮、磷通量贡献比例也有所降低,表明区间径流的影响减弱,洞庭湖污染物通量主要来源仍为“四水”“三口”区域。但还存在一些不确定性因素。比如,缺乏近年来区间产流的浓度数据,仅用多年前浓度数据进行估算,其准确性有待提高。滨湖区通过降雨冲刷入湖的污染物自净时间短,浓度远高于区间产流浓度,易直接影响湖体水质。

4.3 洞庭湖氮、磷滞留率及其环境效应

叠加区间产流后,洞庭湖 2013—2017 年入湖氮、磷通量分别为 268.44×10^4 、 $11.104 \times 10^4 \text{ t}$, 而出湖氮、磷通量为 271.74×10^4 、 $16.475 \times 10^4 \text{ t}$ 。洞庭湖出湖氮、磷通量大于入湖通量,其入湖氮、磷通量的滞留率为 -1.23%、-48.37%, 滞留率很低。文献表明,氮、磷的高滞留率易导致营养物质的积累并被藻类利用,放大了流域入湖营养盐负荷的藻类生长促进效应^[32]。将不同湖泊数据^[13,20,32-37]与洞庭湖进行对比,总结其污染特征,见表 2。

表 2 不同湖泊污染物特征对比

湖泊	年入湖水量/ 10^8 m^3	换水周期/ d	污染物浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$		污染物滞留率/%		叶绿素 a 浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
			TN	TP	TN	TP	
洞庭湖	2294	18.2	1.94	0.085	-1.23	-48.37	6.0
鄱阳湖	1234	20.9	1.65	0.050	13.66	7.88	16.2
高邮湖	180.3	21.0	0.67	0.250	15.68	-25.72	21.0
太湖	88.00	192	2.62	0.148	32.62	42.49	44.4
抚仙湖	1.670	6.09×10^4		0.010	91.80	97.40	2.0

注:污染物滞留率根据文献出入湖通量计算;浓度数据为文献[13]、[33]、[35]中查得的参考值。

由表 2 可知,通江湖泊氮、磷滞留率明显低于阻隔湖泊太湖和高原湖泊抚仙湖,其中洞庭湖的氮、磷滞留率最低,太湖、抚仙湖换水周期明显长于通江湖泊。低滞留率使得洞庭湖湖区氮、磷浓度逐步下降,湖区氮、磷平均浓度从 2013 年的 2.05 mg/L、0.089 mg/L, 逐渐降至 2016 年的 1.83、0.086 mg/L 和 2017 年的 1.73、0.075 mg/L, 但氮、磷浓度仍远高于湖泊藻类暴发的临界值(0.20、0.02 mg/L)。

洞庭湖氮、磷浓度并不低于其他湖泊,但相比太湖等阻隔湖泊,洞庭湖藻类浓度明显较低。数据显示,2018 年春夏季洞庭湖 Chl - a 浓度仅为 6.0 $\mu\text{g}/\text{L}$, 低于同为通江湖泊的鄱阳湖(16.2 $\mu\text{g}/\text{L}$), 远低于太湖(44.4 $\mu\text{g}/\text{L}$)^[13]。这主要是因为通江湖泊

换水周期短,连通性好,水体流速快,即使有氮、磷入湖,但在湖内滞留时间短,难以被藻类充分利用。因此保持通江湖泊的连通性,保持较短的换水周期对于湖泊水华的防治有重要意义^[38]。而近年来长江中上游及洞庭湖各支流建设了水库及水利综合枢纽,在一定程度上减缓了水流速度,降低了水体的连通性,使得流速较低的东洞庭湖滩区易出现局部水华现象^[39]。

尽管洞庭湖湖区整体总磷浓度下降,“三口”入流磷通量增加的风险需要防范。相比于东洞庭湖以颗粒态磷为主要构成,文献表明,2016 年“三口”主要支流松滋河入湖总磷浓度高达 0.138 mg/L, 溶解态磷占比高达 90%^[29], 主要流入西洞庭湖。加之

三峡水库运行后,洞庭湖枯水期延长,整体水位下降,水面面积减少了 455.86 km^2 ^[40]。水位下降促进了旱生植被的生长,压缩了沉水植物的生存环境^[40],这进一步加剧了环境风险。若因建设水利综合枢纽或因长江来水水位变化使西洞庭湖流速减缓,该区域可能会爆发更严重的湖泊水华现象。

除了要积极关注入湖河流的污染物,滨湖区的污染防治也不能忽视。根据《洞庭湖生态环境专项整治三年行动计划(2018—2020年)》所述,滨湖区仍有多项污染防治措施不达标,例如,畜禽规模养殖场污染防治设施配套率仅为56.91%,农药使用总量超过全国平均水平的20%,湖区农村生活污水处理设施覆盖率仅有14%。这表明滨湖区仍存在较重的面源污染问题,需要继续完善相应设施,并提升农村生活污水集中处理率,削减污染物的入湖量。

5 结 论

(1)2013—2017年“四水”“三口”区域年均入湖水量为 $2.293.96 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均入湖氮、磷通量为 47.86×10^4 、 $2.020 \times 10^4 \text{ t}$;年均出湖水量为 $2.696.24 \times 10^8 \text{ m}^3$,年均出湖氮、磷通量为 54.35×10^4 、 $3.295 \times 10^4 \text{ t}$ 。

(2)与2013—2016年年均值相比,2017年洞庭湖主要支流湘江入湖氮、磷通量分别减小了22.10%、9.73%,且氮、磷浓度也有所下降,其中重要原因是汇水范围内畜禽养殖规模和农业化肥施用量的下降。相比三峡工程运行前(1999—2002年),研究期“三口”年均入湖水量减少了1/3,但年均入湖磷通量反而增加了7.8%,总磷污染值得关注。

(3)受入湖水量影响,入湖通量集中在4—9月,其中“四水”4—7月入湖氮、磷通量占其年总通量的56.36%、54.96%，“三口”6—9月入湖氮、磷通量占78.12%、78.32%，“四水”受点、面源污染的综合作用,而“三口”的面源污染则是其主要污染源;入湖水质亦影响入湖通量,湘江总氮浓度有所改善,但仍是洞庭湖最主要的总氮污染源,特别是非汛期污染占比近50%，“三口”来水总磷浓度较高,以仅占“四水”“三口”入湖水量的19.80%,贡献了磷通量的28.36%。

(4)考虑区间产流后,2013—2017年年均入湖氮、磷通量分别为 53.69×10^4 、 $2.221 \times 10^4 \text{ t}$,区间产流入湖氮、磷贡献占入湖氮、磷的比例仅为10.86%、9.06%,洞庭湖入湖氮、磷通量主要来源于“四水”和“三口”区域。

(5)洞庭湖作为通江湖泊,污染物滞留率低,换水周期短,自净能力相对较强,在氮、磷浓度不低的条件下叶绿素a浓度显著低于鄱阳湖、太湖等湖泊。从治理措施的角度考虑,重点是要保持湖泊的连通性,谨慎建设水利综合枢纽,防止湖水流速减缓,关注流速较缓的东洞庭湖滩区,警惕“三口”区域磷风险,同时控制滨湖区的污染物入湖量。

参考文献:

- [1]李卫平,陈阿辉,于玲红,等. 呼伦湖主要入湖河流克鲁伦河丰水期污染物通量(2010—2014)[J]. 湖泊科学, 2016,28(2):281-286.
- [2]余晓,李国强,诸葛亦斯,等. 潘家口水库氮与磷营养盐的时空变化及滞留效应分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2020,18(6):469-478.
- [3]钟小敏,帅红,李景保,等. 水利工程群对洞庭湖城陵矶特征水位的综合影响[J]. 水资源与水工程学报,2022,33(5):72-80.
- [4]田泽斌,王丽婧,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.
- [5]蔡长卿,金昌盛,陈佳,等. 东洞庭湖沉积物重金属污染及生态-健康风险[J]. 农业环境科学学报,2022,41(6):1337-1347.
- [6]李贺,王书航,车霏霏,等. 巢湖、洞庭湖、鄱阳湖沉积物重金属污染及来源的Meta分析[J]. 中国环境科学, 2023,43(2):831-842.
- [7]符哲,郭晶,黄代中,等. 洞庭湖的富营养演变特征及影响因素[J]. 环境化学,2022,41(8):2636-2645.
- [8]钟振宇,陈灿. 洞庭湖水质及富营养状态评价[J]. 环境科学与管理,2011,25(6):169-173.
- [9]殷雪妍,严广寒,汪星,等. 不同水质评价方法在通江湖泊中的适用性——以洞庭湖为例[J/OL]. 环境工程技术学报. (2022-10-09) [2023-04-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20221008.1045.002.html>.
- [10]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.
- [11]唐小娅,童思陈,黄国鲜,等. 三峡水库总磷时空变化特征及滞留效应分析[J]. 环境科学,2020,41(5):2096-2106.
- [12]常留红,覃瓶山,郑景琦,等. 水沙变化下松滋口大湖口河段健康评价及影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2022,33(6):28-34.
- [13]朱广伟,许海,朱梦圆,等. 三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J]. 湖泊科学,2019,31(6):1510-1524.
- [14]QIN Boqiang, ZHU Guangwei. The nutrient forms, cycling and exchange flux in the sediment and overlying water sys-

- tem in lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River[J]. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2006, 49: 1-13.
- [15] 郑丙辉,曹晶,王坤,等. 水质较好湖泊环境保护的理论基础及中国实践[J]. *湖泊科学*,2022,34(3):699-710.
- [16] 祝云龙,姜加虎,孙占东,等. 洞庭湖沉积物中重金属污染特征与评价[J]. *湖泊科学*,2008,20(4):477-485.
- [17] 张志川. 三峡工程对洞庭湖水量的影响及应对措施[J]. *科技视界*,2012(21):55+65.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第四版)[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 河流流量测验规范:GB 50179—2015[S]. 北京:中国计划出版社,2015.
- [20] 刘发根,王仕刚,郭玉银,等. 鄱阳湖入湖、出湖污染物通量时空变化及影响因素(2008—2012年)[J]. *湖泊科学*,2014,26(5):641-650.
- [21] 余君妍,马骏,杨正健,等. 基于水体溯源的澜沧江梯级水库水体总磷来源及滞留效应分析[J]. *中国农村水利水电*,2023(3):94-101+119.
- [22] 朱坚,邵颖,彭华,等. 湖南省农业面源污染形势与综合管理对策[J]. *湖南农业科学*,2022(10):49-53.
- [23] 湖南省统计局. 湖南统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2014-2018.
- [24] 张萍. 洞庭湖氮磷污染特征及防控技术体系研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2017.
- [25] 卢少勇,张萍,潘成荣,等. 洞庭湖农业面源污染排放特征及控制对策研究[J]. *中国环境科学*,2017,37(6):2278-2286.
- [26] 付湘,赵秋湘,孙昭华. 三峡水库175 m试验性蓄水期调度运行对洞庭湖蓄水量变化的影响[J]. *湖泊科学*,2019,31(6):1713-1725.
- [27] MA Xiao, LI Ye, ZHANG Meng, et al. Assessment and analysis of non-point source nitrogen and phosphorus loads in the Three Gorges Reservoir area of Hubei Province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 412-413: 154-161.
- [28] 续衍雪,吴熙,路瑞,等. 长江经济带总磷污染状况与对策建议[J]. *中国环境管理*,2018,10(1):70-74.
- [29] 蔡佳,王丽婧,陈建湘,等. 西洞庭湖入湖河流磷的污染特征[J]. *环境科学研究*,2018,31(1):70-78.
- [30] 谢康,张晓菁,卫晓婧,等. 洞庭湖流域未控区间水量平衡分析[J]. *水资源研究*,2019,8(1):44-55.
- [31] 何介南,康文星,袁正科. 洞庭湖湿地污染物的来源分析[J]. *中国农学通报*,2009,25(17):239-244.
- [32] 翟淑华,张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000—2002年)[J]. *湖泊科学*,2006,18(3):225-230.
- [33] 陈奇,霍守亮,席北斗,等. 云贵高原湖区湖库总磷和叶绿素a浓度参照状态研究[J]. *环境工程技术学报*,2012,2(3):184-192.
- [34] 王洗民,翟淑华,张红举,等. 基于水质改善目标的太湖适宜换水周期分析[J]. *湖泊科学*,2017,29(1):9-21.
- [35] 马会娟,李茹梦,唐晟凯,等. 高邮湖轮虫群落结构分析及水质生态学评价[J]. *江苏农业科学*,2021,49(1):192-197.
- [36] 朱昕阳,蒋彩萍,马晓雁. 太湖流域浙江片区出入境水量、水质及污染物通量[J]. *湖泊科学*,2020,32(3):629-640.
- [37] 郑丙辉,王丽婧,张鸿,等. 洞庭湖江湖生态监测重点站技术报告[R]. 江湖生态监测重点站(洞庭湖),2016-2017.
- [38] HUISMAN J, CODD G A, PAERL H W, et al. Cyanobacterial blooms[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2018, 16(8): 471-483.
- [39] 王婷,王坤,王丽婧,等. 三峡工程运行对洞庭湖水环境及富营养化风险影响评述[J]. *环境科学研究*,2018,31(1):15-24.
- [40] 谢平. 三峡工程对长江中下游湿地生态系统的影响评估[M]. 武汉:长江出版社,2018.

(上接第73页)

- [20] WANG Huan, HUANG Jiejun, ZHOU Han, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: a case study of Hubei Province, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110331.
- [21] JING Peiran, SHENG Jinbao, HU Tiesong, et al. Spatio-temporal evolution of sustainable utilization of water resources in the Yangtze River Economic Belt based on an integrated water ecological footprint model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 358: 132035.
- [22] 董建红,张志斌,张怀林,等. 生态脆弱区自然资本可持续利用及驱动机制——以宁夏为例[J]. *中国人口·资源与环境*,2021,31(2):162-173.
- [23] 曾建丽,赵玉帛,李淑琪. 京津冀城市群新型城镇化水平时空格局演变及驱动因素研究[J]. *生态经济*,2021,37(10):100-107.
- [24] 韩冬. 城镇化高质量发展水平测度——基于京津冀城市群的实证[J]. *统计与决策*,2022,38(4):93-97.
- [25] 翁钢民,唐亦博,潘越,等. 京津冀旅游-生态-城镇化耦合协调的时空演进与空间差异[J]. *经济地理*,2021,41(12):196-204.