

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.06.003

2020年太湖流域洪水及太湖总磷变化趋势分析

朱伟¹, 吕艺², 薛宗璞³, 施维⁴, 金丽君⁴, 沈伟⁴, 张昱²

(1. 河海大学太湖研究中心, 江苏南京 210098; 2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 3. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 4. 南京恒创智云计算科技有限公司, 江苏南京 210098)

摘要:收集整理了2000—2020年太湖水量、总磷数据,对2020年太湖流域洪水以及其后太湖总磷的变化规律进行了分析,并与2016年洪水进行了比较。从洪水特征、出入湖磷通量、环湖河道磷质量浓度、太湖磷存量及组成等方面进行了研究,明确了2020年洪水对太湖总磷的影响。结果表明:2020年洪水并未造成太湖总磷污染的反弹,2020年后太湖总磷污染情况出现明显好转;与2016年洪水不同,2020年洪水并没有造成入湖磷通量的增加;2020年入湖总磷质量浓度较2007年以来的平均值下降了21.5%,这是入湖磷通量未增加的主要原因。

关键词:总磷;2020年洪水;磷通量;水质结构;太湖

中图分类号:X524 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)06-0016-07

Analysis of Taihu Lake Basin flood in 2020 and total phosphorus change trend in Taihu Lake//ZHU Wei¹, LYU Yi², XUE Zongpu³, SHI Wei⁴, JIN Lijun⁴, SHEN Wei⁴, ZHANG Yu² (1. Taihu Lake Research Center, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Nanjing Hengchuangzhiyun Computing Technology Co., Ltd., Nanjing 210098, China)

Abstract: The water volume and total phosphorus data of Taihu Lake from 2000 to 2020 were collected and sorted out. The the Taihu Lake Basin flood in 2020 and the change trend of total phosphorus pollution in Taihu Lake thereafter were analyzed and compared with the flood in 2016. The characteristics of flood, phosphorus flux in and out of the lake, phosphorus concentration in rivers around the lake, phosphorus stock and composition of Taihu Lake were studied, and the impact of the flood in 2020 on total phosphorus pollution in Taihu Lake was clarified. The results show that the flood in 2020 did not cause the rebound of total phosphorus pollution in Taihu Lake, and the total phosphorus pollution in Taihu Lake improved significantly after 2020. Unlike the flood in 2016, the flood in 2020 did not cause an increase in lake-inlet phosphorus flux. The total phosphorus mass concentration entering the lake in 2020 has decreased by 21.5% compared to the average value since 2007, which is the main reason why the phosphorus flux into the lake has not increased.

Key words: total phosphorus; flood in 2020; phosphorus flux; water quality pattern; Taihu Lake

2020年太湖流域发生流域性大洪水^[1],是继1954年、1991年、1999年和2016年后第5次超标准大洪水^[2]。2020年太湖流域降水量较常年偏多27%,受持续降雨的影响,太湖水位迅速上升,最大单日涨幅达0.16 m,超过2016年洪水最大单日涨幅,至7月21日涨至最高水位,达4.79 m^[3],与1991年并列为1954年后第3高水位^[4],仅次于2016年。2020年太湖超警戒水位计48 d,超保证水

位9 d,最多有78个河道、闸坝站水位超警戒水位,其中55个站点水位超保证水位,部分站点最高水位创历史新高^[5]。

2007年太湖暴发影响巨大的水危机事件后,全流域开展了全面的治理工作,到2015年太湖的各项指标都有所好转,治理显现出一定的成效^[6-7]。但2016年太湖总磷(TP)质量浓度出现反弹现象^[8],朱伟等^[9-10]研究表明,2016年洪水带入超量磷负荷

基金项目:江苏省水利科技项目(2021009);江苏省研究生培养创新工程研究生科研创新计划项目(B200203049)

作者简介:朱伟(1962—),男,教授,博士,主要从事水环境及疏浚资源利用研究。E-mail: zhuweiteam.hhu@gmail.com

通信作者:薛宗璞(1993—),男,博士研究生,主要从事湖泊水环境研究。E-mail: xzp_hhu@163.com

入湖是反弹的主要原因。王华等^[11]对 2010—2017 年太湖入湖污染负荷和 TP 质量浓度进行了相关性分析,指出 2016 年 TP 质量浓度反弹的根本原因是入湖污染负荷量大。翟淑华等^[12]认为洪水的持续高水位不利于水草生长^[13],也是造成太湖 TP 质量浓度升高的原因之一。但是 2020 年后太湖 TP 质量浓度并没有出现由洪水引起的上升,反而出现水质好转现象,而且 2020 年后太湖 TP 质量浓度较 2019 年下降了 16.1%^[14],其内在机理值得研究。

本文收集整理了全太湖 31 个测点逐月磷质量浓度以及 23 个巡测段逐月出入湖水量、磷通量、TP 质量浓度数据,以期能够对 2020 年洪水对太湖总磷造成的影响及原因进行清晰的阐述,明确洪水对于太湖总磷的影响。

1 研究区概况及数据来源

太湖按照自然形态和水质特征划分为 8 个湖区,湖区内布设了 31 个湖内监测点位,主要出入湖河道上有 23 个巡测段^[15](图 1)。2020 年太湖各断面逐月出入湖水量、磷通量、主要出入湖河道及湖内 TP 质量浓度、逐日水位和 2000—2020 年太湖出入湖水量、磷通量、TP 质量浓度数据收集自江苏省水文局和水利部太湖流域管理局。2012 年、2016 年、2020 年研究区逐日的气温、风速、风向、降水量数据收集自中国气象网。

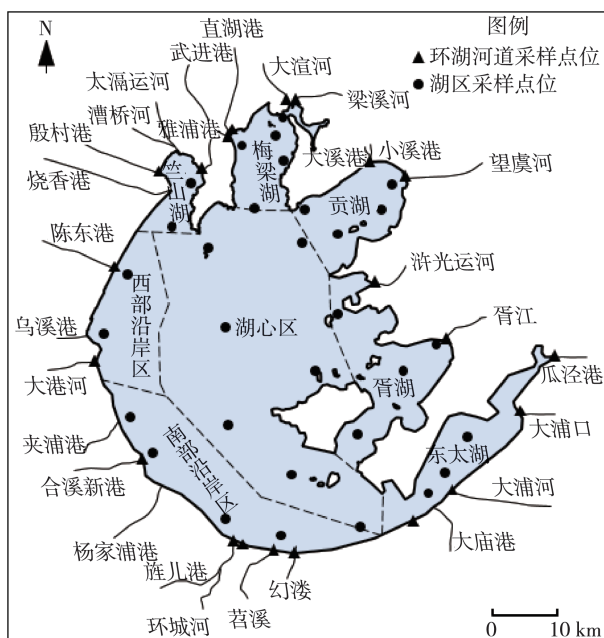


图 1 太湖湖区划分、出入湖河道及湖内采样点布置

Fig.1 Lake division, channel and sampling point layout in Taihu Lake

2 研究方法

a. TP 质量浓度计算方法。湖区 TP 质量浓度

均值为各监测点的面积加权平均值,再以各湖区 TP 质量浓度的面积加权平均值作为太湖平均值,计算公式为

$$\rho = \sum_{i=1}^8 \rho_i \frac{S_i}{S} \quad (1)$$

其中

$$\rho_i = \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \frac{S_{ij}}{S_i}$$

式中: ρ 为太湖 TP 质量浓度; ρ_i 为湖区 i 的 TP 质量浓度; S 为太湖面积; S_i 为湖区 i 的面积; ρ_{ij} 为湖区 i 监测点 j 的 TP 质量浓度; S_{ij} 为监测点代表面积; n 为湖区内监测点数。

b. 磷存量计算方法。根据对应水体的 TP 质量浓度和水体体积计算磷存量,计算公式为

$$M = \sum_{i=1}^8 \rho_i V_i \quad (2)$$

$$m_i = \sum_{j=1}^n \rho_{ij} V_{ij} \quad (3)$$

式中: M 为太湖 TP 存量; m_i 为湖区 i 的 TP 存量; V_i 为湖区 i 的体积; V_{ij} 为湖区 i 监测点 j 代表的水体体积。

c. 磷通量计算方法。采用太湖 23 个巡测段的出入湖水量和水质指标数据,每月 1 次的水质监测结果作为当月的平均水质数据进行计算。计算公式为

$$W = \sum_{i=1}^{23} W_i \quad (4)$$

其中

$$W_i = \sum_{n=1}^{12} \rho_{ni} Q_{ni}$$

式中: W 为太湖 TP 年出(入)湖总量; W_i 为巡测段的 TP 年出(入)湖量; ρ_{ni} 为该巡测段月出(入)湖 TP 质量浓度代表值; Q_{ni} 为该巡测段月出(入)湖水量。

d. 平水年选取。将 2010—2020 年太湖入湖水量、磷通量进行降序排列,根据皮尔逊 III 型曲线进行频率分析,2012 年是入湖水量、磷通量的平水年,可以代表太湖的多年平均状态,因此选取 2012 年作为对照年研究洪水年对太湖总磷造成的影响。

3 结果与分析

3.1 太湖 TP 质量浓度

以 2012 年作为对照年,对 2016 年和 2020 年太湖 TP 质量浓度进行分析,太湖及各湖区 TP 质量浓度见表 1。从全太湖的平均值来看 2016 年显然偏高,但 2020 年与 2012 年比较接近,没有明显的上升。各湖区的 TP 质量浓度存在空间差异,主要入湖的西部湖区 2020 年的波动幅度虽然较大,但平均值不但小于 2016 年,也小于 2012 年。而主要出湖

湖区 2020 年的 TP 质量浓度接近于 2016 年,比 2012 要高。湖心及南部沿岸区域 2020 年的 TP 质量浓度更接近于 2012 年,比 2016 年要略低一些。从两次洪水年湖内 TP 质量浓度的组成来看,2016 年全湖的溶解态总磷(dissolved total phosphorus, DTP)占比是 33.6%,2020 年 DTP 占比是 32.2%,没有显著区别。各湖区的 DTP 占比存在空间差异,竺山湖和东太湖在 2016 年的 DTP 比例更高,其他湖区则大致相当。2020 年全湖 TP 质量浓度为 0.075 mg/L,低于 2016 年的 0.087 mg/L,与 2000—2015 年的均值(0.073 mg/L)相近。从 TP 质量浓度的年际变化来看,2020 年没有反弹,反而降低到了 2016 年洪水前的水平。

表 1 太湖及各湖区 TP 质量浓度

Table 1 Phosphorus mass concentration in Taihu Lake and lake regions			
湖区	年份	TP 质量浓度 均值/(mg/L)	DTP 质量浓度 均值/(mg/L)
全 湖	2012	0.070	
	2016	0.087	0.029
	2020	0.075	0.024
竺山湖	2012	0.182	
	2016	0.203	0.101
	2020	0.136	0.060
梅梁湖	2012	0.055	
	2016	0.111	0.038
	2020	0.092	0.030
贡 湖	2012	0.055	
	2016	0.072	0.022
	2020	0.054	0.017
西部沿岸区	2012	0.096	
	2016	0.123	0.036
	2020	0.108	0.032
南部沿岸区	2012	0.072	
	2016	0.086	0.023
	2020	0.076	0.020
湖心区	2012	0.070	
	2016	0.083	0.031
	2020	0.073	0.026
胥 湖	2012	0.036	
	2016	0.039	0.012
	2020	0.039	0.012
东太湖	2012	0.037	
	2016	0.052	0.015
	2020	0.048	0.010

3.2 水位和水量

图 2 为 2012 年、2016 年和 2020 年太湖逐日水位。2020 年洪水作为仅次于 2016 年的流域性大洪水^[4],最高月均水位出现在 7 月,超过 4.4 m,洪峰从 6 月 28 日开始超过警戒水位,7 月 17 日涨至保证水位 4.65 m,7 月 21 日达到最高水位 4.79 m,一直到 8 月 14 日退至警戒水位以下,洪峰持续 48 d。全年来看,2020 年水位高于 2012 年,与 2016 年接近。

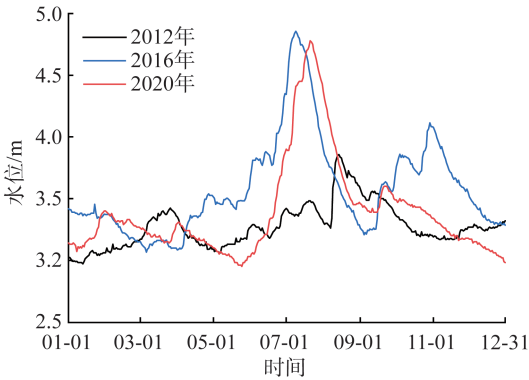
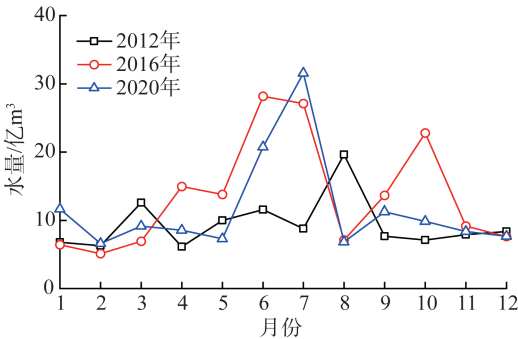


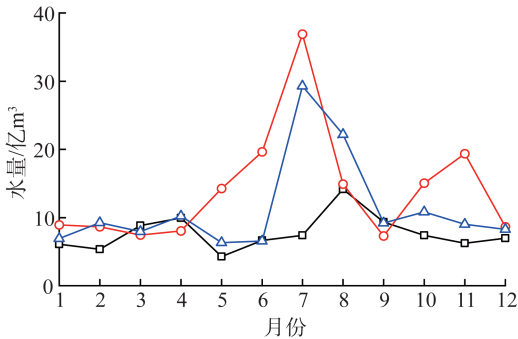
图 2 太湖逐日水位

Fig. 2 Daily water level of Taihu Lake

图 3 为 2012 年、2016 年和 2020 年太湖逐月入、出湖水量。由图 3(a)可见,2020 年入湖水量为 139.4 m³,比 2016 年少 23.3 亿 m³,相差 -16.7%;2020 年洪水期(6—8 月)入湖水量比 2016 年少 3.3 亿 m³,相差 -5.5%。由图 3(b)可见,2020 年出湖水量为 135.8 亿 m³,比 2016 年少 33.2 亿 m³,相差 -24.4%;出湖水量峰值相对滞后 1 月,2020 年洪水期(7—9 月)出湖水量比 2016 年多 1.6 亿 m³,相差 2.6%。与 2012 年相比,2020 年入湖水量比 2012 年多 26.8 亿 m³,2020 年洪水期(6—8 月)入湖水量比 2012 年多 19.2 亿 m³;2020 年出湖水量比 2012 年多 43.3 亿 m³,2020 年洪水期(6—8 月)出湖水量比 2012 年多 29.8 亿 m³。2016 年出现 2 次洪峰,洪水量大,年入湖水量比平水年多出 50.1 亿 m³,



(a) 入湖



(b) 出湖

图 3 太湖逐月出入湖水量

Fig. 3 Monthly water inflow and outflow of Taihu Lake

滞留时间长达 4 月;2020 年只有 1 次洪峰,年入湖水量比平水年多 26.8 亿 m^3 水量,滞留时间在 2 月左右。

以太湖入湖水量显著变化的 2007 年为界,绘制太湖 2000—2020 年入湖水量和 水体交换周期变化曲线及其均值,如图 4 所示。从入湖水量上看,2007 年之前入湖水量均值为 88.5 亿 m^3 ,2007 年之后逐渐增加,2007—2020 年平均入湖水量为 115.1 亿 m^3 ,增加了 26.6 亿 m^3 ,2020 年入湖水量仅次于 2016 年居于近 20 年的第 2 位。从水体交换周期上看,2007 年以前太湖水体交换平均为 210 d;2007 年后平均为 181 d,减少了 29 d。而 2016 年的交换周期达到 127 d,2020 年为 153 d。

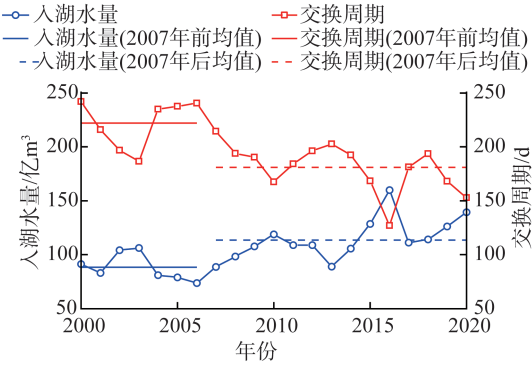


图 4 太湖年际入湖水量和 水体交换周期

Fig.4 Inter annual water inflow and water exchange cycle of Taihu Lake

3.3 磷 通 量

图 5 为太湖逐月入、出湖磷通量。由图 5(a) 可见,2020 年洪水期(6—8 月)入湖磷通量为 845 t,占全年的 41.4%,比 2016 年同期少入湖 130 t,比 2012 年同期少入湖 89 t。由图 5(b) 可见,2020 年洪水期(6—8 月)出湖磷通量 384 t,占全年的 45.9%,比 2016 年同期多 36 t,比 2012 年同期多 200 t。2020 年相比 2016 年入湖磷通量少,低于多年平均值,出湖磷通量多,出入湖磷通量均集中在洪水期。

图 6 为 2000—2020 年太湖逐年出入湖磷通量。2000 年以来,入湖磷通量在波动中上升,2007 年以后年均入湖磷通量为 2 102 t,比 2007 年前多 456 t。2020 年入湖磷通量为 2 042 t,低于 2007 年后均值,2016 年入湖磷通量为 2 569 t,是 2000 年后最多的一年。2000 年以来,出湖磷通量也在上升,2007 年后年均出湖磷通量为 630 t,比 2007 年前多 217 t。2020 年出湖磷通量为 836 t,远高于多年平均值,仅次于 2016 年的 886 t。

3.4 环湖河道 TP 质量浓度

图 7 为 2000—2020 年太湖出入湖 TP 质量浓

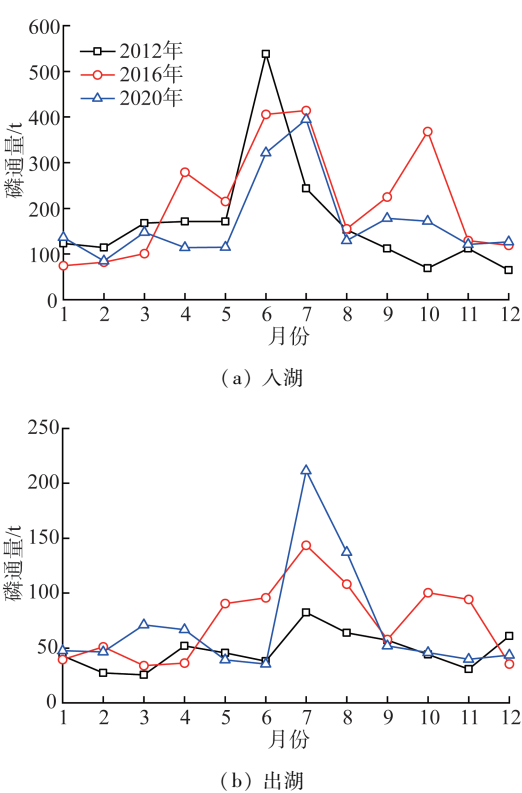


图 5 太湖逐月出入湖磷通量

Fig.5 Monthly phosphorus flux into and out of Taihu Lake

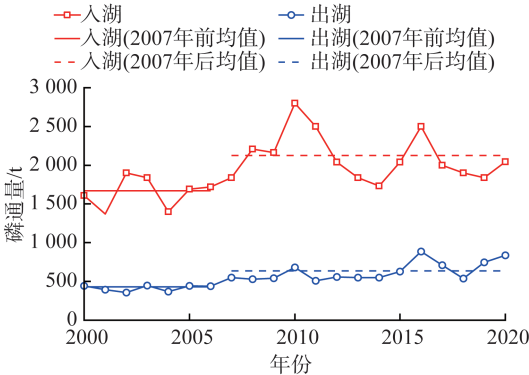


图 6 2000—2020 年太湖逐年出入湖磷通量

Fig.6 Annual phosphorus flux into and out of Taihu Lake from 2000 to 2020

度平均值。可见,2010 年以来入湖 TP 质量浓度呈下降趋势,2007 年后入湖 TP 质量浓度均值为 0.186 mg/L,2020 年入湖 TP 质量浓度为 0.146 mg/L,比 2007 年后的平均值低 21.5%,也低于 2016 年入湖 TP 质量浓度。从出湖 TP 质量浓度来看,出湖 TP 质量浓度无明显变化,近年来在 0.060 mg/L 左右波动,2020 年出湖 TP 质量浓度为 0.062 mg/L,与 2010—2020 年的平均值接近,稍高于 2016 年出湖 TP 质量浓度。

为分析 2020 年主要出入湖河道的 TP 质量浓度水平,将 2016 年、2020 年数据与 2010—2019 年均值

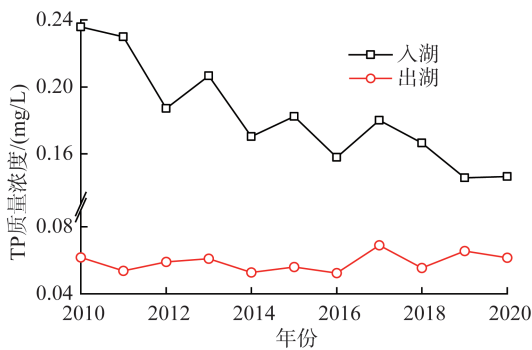


图7 出入湖 TP 质量浓度平均值

Fig.7 Average of TP mass concentration of inlet and outlet lake

进行比较,结果见表2。可见,2020年入湖河道的TP质量浓度低于2010—2019年均值;除太浦河外,2020年其他河道出湖TP质量浓度均低于2010—2019年均值。整体来看,2020年入湖水质优于2010—2019年均值,出湖水质与2010—2019年均值水平相当。另外,除陈东港外,2020年入湖河道TP质量浓度低于2016年,2020年出湖河道TP质量浓度比2016年稍高。

表2 主要出入湖河道TP质量浓度对比

Table 2 Comparison of TP mass concentrations in major lake access channels

出入湖	河道	TP 质量浓度/(mg/L)		
		2020 年	2016 年	2010—2019 年均值
入湖	陈东港	0.201	0.175	0.221
	殷村港	0.139	0.225	0.246
	雅浦港	0.145	0.164	0.198
	梁溪河	0.082	0.120	0.107
	幻溇港	0.082	0.092	0.097
	苕溪	0.072	0.086	0.093
	旌儿港	0.074	0.084	0.106
	长兴港	0.122	0.138	0.160
	望虞河	0.081	0.060	0.116
出湖	瓜泾口	0.047	0.046	0.059
	大浦口	0.058	0.049	0.070
	太浦河	0.049	0.044	0.041
	幻溇港	0.073	0.074	0.097
	苕溪	0.077	0.081	0.093

4 讨 论

a. 2020年太湖TP质量浓度变化。从全湖TP质量浓度来看,2020年为0.075 mg/L,低于2016年(0.087 mg/L),与2012年(0.070 mg/L)接近。以2012年为基准,从各湖区TP质量浓度的逐月对比来看,2016年全湖逐月TP质量浓度平均上升了26%,梅梁湖上升了115%,西部沿岸区上升了66%,东太湖上升了56%,是上升比较明显的3个湖区,显然是洪水带来磷通量的上升产生了影响^[9]。洪水后,2017年全湖逐月TP质量浓度仍上升了24%,梅梁湖上升了116%,西部沿岸区上升了74%,东太湖上升了68%,3个湖区仍居高不下。2019年全湖TP质量浓度为0.087 mg/L,与2016年接近,高于2012年。这说明2016年TP质量浓度反弹后,一直到2019年都维持在高水平上。2020年后全湖TP质量浓度明显下降,平均值从2019年的0.087 mg/L下降到0.075 mg/L,消除了反弹效应。与2012年相比,2020年TP质量浓度月均值高出了9%,偏高明显的湖区仍是梅梁湖(高出73%)、西部沿岸区(高出49%)和东太湖(高出46%),竺山湖的TP质量浓度相比2012年低了22%。比较2016年和2020年各湖区TP质量浓度的逐月差异,有入湖河道的竺山湖、梅梁湖、贡湖、西部沿岸区、南部沿岸区,2020年比2016年降低了17%~42%,东太湖和湖心区降低不明显,在7%左右。可见,与2016年洪水不同,2020年洪水后太湖TP质量浓度有所下降,各湖区存在空间差异,西北部入湖河道的湖区TP质量浓度显著偏低。

b. 2016和2020年洪水的差异。从水量上来看,2020年入湖水量为139.4亿m³,比2016年少了23.3亿m³,是2000年以来的第二位^[16]。从洪水过程来看,2020年有1次洪峰,2016年有2次洪峰。从入湖磷通量来看,2016年为2569 t,比2010—2019年平均值多500 t左右,2020年为2042 t,与2010—2019年平均值持平。从出湖磷通量来看,2016年为886 t,2020年为836 t,仅比2016年减少了50 t,高于2010—2019年平均值557 t。正因为2020年的洪水出现了入湖磷通量少,出湖磷通量多的现象,不仅没有造成湖区TP质量浓度的上升,反而出现了下降的现象。因此,2020年和2016年洪水的差异最主要差异是出入湖磷通量,太湖的TP质量浓度水平与净入湖磷通量有明显的对应关系。

c. 入湖河道水质对洪水差异的影响。磷通量是由入湖水量、水质所决定的,因此入湖河道水质对出入湖磷通量有直接影响^[17]。太湖主要入湖河道在西北部,主要出湖河道在东南部^[18]。由表2可知,2020年主要入湖河道的TP质量浓度达到了2000年以来的最低水平,比2007年后的平均值下降了21.5%^[19]。一般认为洪水初期会出现流域积蓄污染物集中入湖的现象,洪水后期入湖水质会有所好转。2016年洪水初期入湖水质较差,中后期入湖水质也没明显的好转,2020年洪水从初期到中后期水期的入湖水质均较好^[20]。这是因为,2020年初期洪水通过新沟河北排可能减少了差水入湖^[21-22];流域污水管网提质增效可能发挥了一定的

效能^[23-24];对涉磷企业的严格监管可能产生了作用^[25];疫情发生后太湖流域的地表水水质普遍明显好转,也是一个重要的可能因素。另外,从出湖河道的水质来看,2020年最大的出湖河道太浦河的TP质量浓度高于2010—2019年平均值^[26]。太湖入湖水经过湖泊系统净化后,出湖水质一般优于入湖水质,形成“东清西浊”的水质结构^[27]。洪水造成的湖泊交换周期快速下降会造成较脏的入湖水更快的到达出湖河道^[28],使得太湖水质均一化,造成洪水年的出湖河道水质差于多年平均值。从这些分析可以看出,2016年和2020年洪水对太湖TP质量浓度产生了截然不同的效应,其原因在于入湖水质截然不同。

5 结 论

- a. 2020年洪水并没有造成太湖TP质量浓度的反弹,并且2020年后太湖水质出现了好转的趋势,好转明显的湖区为入湖河道对应的西北部湖区。
- b. 2020年洪水与2016年洪水的主要差异在于出入湖磷通量,2020年入湖磷通量为2 042 t,与2010—2019年平均值相当。
- c. 2020年洪水期以及洪水后期入湖水质都有一定好转,入湖TP质量浓度比2007年后的平均TP质量浓度下降了21.5%。

参考文献:

[1] 中国水旱灾害防御公报编写组. 中国水旱灾害防御公报 2020 概要[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(11): 26-32. (Compilation Group of China Flood and Drought Disaster Prevention Bulletin. Summary of China flood and drought disaster prevention bulletin 2020 [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(11): 26-32. (in Chinese))

[2] 吴浩云, 孙海涛. 太湖流域洪水与水量调度方案的制定和认识[J]. 中国防汛抗旱, 2012, 22(2): 5-7. (WU Haoyun, SUN Haitao. Formulation and understanding of flood and water dispatching plan in Taihu Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2012, 22(2): 5-7. (in Chinese))

[3] 吴娟, 林荷娟, 姜桂花, 等. 超标特大洪水风险预警系统建设及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 164-170. (WU Juan, LIN Hejuan, JIANG Guihua, et al. Risk warning system construction and application under excessive extreme flood [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 164-170. (in Chinese))

[4] 朱威, 章杭惠, 甘月云, 等. 2020年太湖洪水调度实践与思考[J]. 中国水利, 2021(15): 46-48. (ZHU Wei,

ZHANG Hanghui, GAN Yueyun, et al. Practices of flood regulation in the Taihu Lake in 2020 and considerations [J]. China Water Resources, 2021(15): 46-48. (in Chinese))

[5] 刘涛, 叶婷, 沈浩. 对2020年太湖流域性洪水的分析与思考[J]. 水资源开发与管理, 2021, 19(7): 80-84. (LIU Tao, YE Ting, SHEN Hao. Analysis and thinking on the flood in Taihu Lake Basin in 2020 [J]. Water Resources Development and Management, 2021, 19(7): 80-84. (in Chinese))

[6] 张伊佳, 陈星, 许钦, 等. 太湖下游河网区水质变化特征与引水调控效果[J]. 水资源保护, 2020, 36(5): 79-86. (ZHANG Yijia, CHEN Xing, XU Qin, et al. Characteristics of water quality change in the downstream river network area of Taihu Lake and effect of water diversion control [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(5): 79-86. (in Chinese))

[7] YANG Z, ZHANG M, SHI X L, et al. Nutrient reduction magnifies the impact of extreme weather on cyanobacterial bloom formation in large shallow Lake Taihu (China) [J]. Water Research, 2016, 103: 302-310.

[8] 朱伟, 谈永琴, 王若辰, 等. 太湖典型区2010—2017年间水质变化趋势及异常分析[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 296-305. (ZHU Wei, TAN Yongqin, WANG Ruochen, et al. The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, 30(2): 296-305. (in Chinese))

[9] 朱伟, 胡思远, 冯甘雨, 等. 特大洪水对浅水湖泊磷的影响: 以2016年太湖为例[J]. 湖泊科学, 2020, 32(2): 325-336. (ZHU Wei, HU Siyuan, FENG Ganyu, et al. Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: a case study of Lake Taihu in 2016 [J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(2): 325-336. (in Chinese))

[10] 吴林锋, 朱云, 朱喜. 2007—2020年太湖蓝藻持续暴发影响因素分析[J]. 水资源开发与管理, 2023, 9(2): 43-49. (WU Linfeng, ZHU Yun, ZHU Xi. Analysis on influencing factors of continuous cyanobacteria outbreak in Taihu Lake from 2007 to 2020 [J]. Water Resources Development and Management, 2023, 9(2): 43-49. (in Chinese))

[11] 王华, 陈华鑫, 徐兆安, 等. 2010—2017年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨[J]. 湖泊科学, 2019, 31(4): 919-929. (WANG Hua, CHEN Huaxin, XU Zhaoan, et al. The trend of total phosphorus concentration variation analysis and reason discussion in Lake Taihu, 2010-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 919-929. (in Chinese))

[12] 翟淑华, 周娅, 程媛华, 等. 2015—2016年环太湖河道进出湖总磷负荷量计算及太湖总磷波动分析[J]. 湖泊科学, 2020, 32(1): 48-57. (ZHAI Shuhua, ZHOU

- Ya, CHENG Yuanhua, et al. Calculation of total phosphorus loads from rivers around Lake Taihu and analysis of total phosphorus fluctuation in the lake in 2015-2016[J]. Journal of Lake Sciences, 2020, 32(1): 48-57. (in Chinese))
- [13] ZHAO X F, XU H L. Study on vegetation change of Taitemar Lake during ecological water transfer [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(10): s10661.
- [14] 季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986—2017 年太湖出、入湖水量变化分析[J]. 湖泊科学, 2019, 31(6): 1525-1533. (JI Haiping, WU Haoyun, WU Juan. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(6): 1525-1533. (in Chinese))
- [15] 沈国华, 王谦. 太湖进出水量变化对水环境的影响[J]. 水资源保护, 2013, 29(1): 46-50. (SHEN Guohua, WANG Qian. Influences of input and output flow on water environment in Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2013, 29(1): 46-50. (in Chinese))
- [16] 杨金艳, 王雪松, 沈顺中, 等. 环太湖出入湖河道污染物通量[M]. 南京: 河海大学出版社, 2019.
- [17] 陆昊, 杨柳燕, 杨明月, 等. 太湖流域上游降水量对入湖总氮和总磷的影响[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 174-181. (LU Hao, YANG Liuyan, YANG Mingyue, et al. Influence of rainfall in upper reaches of the Taihu Basin on inflow fluxes of total nitrogen and total phosphorus into Taihu Lake [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 174-181. (in Chinese))
- [18] 申金玉, 石亚东, 甘升伟, 等. 太湖流域湖西区入湖水量变化趋势及成因分析[J]. 水资源保护, 2011, 27(4): 48-50. (SHEN Jinyu, SHI Yadong, GAN Shengwei, et al. Changing trend of water entering western area of Taihu Lake Basin and causal analysis [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(4): 48-50. (in Chinese))
- [19] 林鹏, 陈启慧, 李琼芳, 等. 环太湖各水资源分区入湖水量及贡献分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 66-73. (LIN Peng, CHEN Qihui, LI Qiongfang, et al. Analysis on inflow and outflow of water resources zones around Taihu Lake and its contribution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 66-73. (in Chinese))
- [20] 金相灿, 辛玮光, 卢少勇, 等. 入湖污染河流对受纳湖湾水质的影响[J]. 环境科学研究, 2007(4): 52-56. (JIN Xiangcan, XIN Weiguang, LU Shaoyong, et al. Effect of polluted inflow river on water quality of lake bay [J]. Research of Environmental Sciences, 2007(4): 52-56. (in Chinese))
- [21] 黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 等. 基于湖泊与出入湖水质关联性研究: 以鄱阳湖为例[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4450-4460. (HUANG Dongling, NI Zhaokui, ZHAO Shuang, et al. Based on the correlation analysis of water quality between lake and inflow/outflow: taking Poyang Lake as an example[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4450-4460. (in Chinese))
- [22] 白音包力皋, 许凤冉, 高士林, 等. 日本琵琶湖水环境保护与修复进展[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(12): 42-46. (BAI Yinbaoligao, XU Fengran, GAO Shilin, et al. Progress in environmental protection and restoration of Biwa Lake in Japan [J]. China Flood and Drought Management, 2018, 28(12): 42-46. (in Chinese))
- [23] 余辉. 日本琵琶湖污染源系统控制及其对我国湖泊治理的启示[J]. 环境科学研究, 2014, 27(11): 1243-1250. (YU Hui. Integrated control of pollution sources in Lake Biwa Basin, Japan and its successful experience in lake eutrophication management [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(11): 1243-1250. (in Chinese))
- [24] 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. (ZHANG Guanggui, LU Shaoyong, TIAN Qi. Analysis of spatial-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus concentrations and their influencing factors in Dongting Lake in the past two decades [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(11): 2377-2385. (in Chinese))
- [25] 刘德鸿, 余居华, 钟继承, 等. 太湖流域典型河网水体氮磷负荷及迁移特征[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 125-132. (LIU Dehong, YU Juhua, ZHONG Jicheng, et al. Characteristics of nitrogen and phosphorus loading and migration in typical river networks in Lake Taihu basin [J]. China Environmental Science, 2016, 36(1): 125-132. (in Chinese))
- [26] 毛新伟, 徐枫. 引江济太与环太湖主要河流对太湖水质影响的对比分析[J]. 水利发展研究, 2018, 18(1): 29-32. (MAO Xinwei, XU Feng. A comparative analysis of the water quality of Lake Taihu by the main rivers around Lake Taihu and the Yangtze River [J]. Water Resources Development Research, 2018, 18(1): 29-32. (in Chinese))
- [27] 朱广伟. 太湖水质的时空分异特征及其与水华的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(5): 439-445. (ZHU Guangwe. Spatio-temporal distribution pattern of water quality in Lake Taihu and its relation with cyanobacterial blooms [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(5): 439-445. (in Chinese))
- [28] LI Y P, ACHARYA K, YU Z B. Modeling impacts of Yangtze River water transfer on water ages in Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(2): 325-334.

(收稿日期: 2023-02-27 编辑: 王芳)