

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.011

环太湖各水资源分区入出湖水量及贡献分析

林 鹏¹, 陈启慧¹, 李琼芳^{1,2}, 皋 云¹, 朱玉婷¹, 许树洪¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;

2. 江苏省“世界水谷”与水生态文明协同创新中心, 江苏 南京 210098)

摘要:基于1986—2018年环太湖入出湖水量、降水量、引排水量资料,采用TFPW-MK趋势检验法分析了环太湖各水资源分区年入出湖水量及太湖换水周期的变化特征,并讨论了湖西区年入湖水量以及望虞河和太浦河年出湖水量显著变化的影响因素。结果表明:环太湖年入出湖水量、净入湖水量与各水资源分区年入出湖水量及占比呈现不同的变化趋势;望虞河年入湖水量、出湖水量、入湖水量占比及湖西区出湖水量占比的年际变化最显著;不同年代湖西区年入湖水量及占比均值为各分区最大,太浦河在20世纪80年代后年出湖水量及占比均值为各分区最大;湖西区入湖水量增长贡献率最大,浙西区出湖水量增长贡献率最大;降雨对湖西区年入湖水量及望虞河、太浦河年出湖水量的年际波动影响均较大;太湖换水周期呈递减趋势,从20世纪80年代平均200 d减小为21世纪10年代的154 d。

关键词:水资源分区;入出湖水量;水量贡献;TFPW-MK;换水周期;太湖

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0066-08

Analysis on inflow and outflow of water resources zones around Taihu Lake and its contribution // LIN Peng¹, CHEN Qihui¹, LI Qiongfang^{1,2}, GAO Yun¹, ZHU Yuting¹, XU Shuhong¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Provincial Collaborative Innovation Center of World Water Valley and Water Ecological Civilization, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the data of inflow and outflow, precipitation, and water diversion of Taihu Lake from 1986 to 2018, the TFPW-MK trend test method and other statistical methods were used to analyze the variation characteristics of inflow and outflow water volume of water resources zones around the Taihu Lake and the water exchange period of Taihu Lake. The influence factors of significant changes of annual inflow water volume of Huxi Zone and annual outflow water volume of Wangyu River and Taipu River were discussed. The results show that the annual water inflow and outflow, net water inflow and the annual water inflow and outflow of each water resources zone and its proportion show different trends. The interannual variations of the annual inflow and outflow water volume and proportion of inflow of Wangyu River and proportion of outflow of Huxi Zone are the most significant. The average annual inflow and proportion of the Huxi Zone was the largest in the water resources zones in different decades, and the average annual outflow and its proportion of Taipu River after 1980 s was the largest. Huxi Zone has the largest contribution rate to the growth of water inflow, and Zhexi Zone has the largest contribution rate to the growth of water outflow. Rainfall has great influence on the interannual fluctuation of inflow water volume of Huxi Zone and outflow water volume of Wangyu River and Taipu River. The average water exchange period of Taihu Lake showed a decreasing trend, which decreased from 200 d in 1980 s to 154 d in 2010 s.

Key words: water resources zone; inflow and outflow water volume; contribution of water volume; TFPW-MK; water exchange period; Taihu Lake

太湖流域地处长江三角洲南翼,是我国经济最发达、投资增长最具活力的地区之一。太湖是流域

的重要水源地,且与周边河网水量交换频繁,是流域内水资源调蓄和调度的中枢。随着太湖流域社会经

基金项目:江苏省水利科技项目(2018001);国家自然科学基金面上项目(51879069)

作者简介:林鹏(1996—),男,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。E-mail: 1299467594@qq.com

通信作者:陈启慧(1974—),女,副教授,博士,主要从事生态水文及水生态保护研究。E-mail: chenqh@hhu.edu.cn

济的快速发展,流域用水总量逐年增加,水资源问题十分突出^[1]。同时,太湖流域近年来开展的治太工程及水环境综合治理等一系列工程、非工程措施使太湖入出湖水量发生重大变化,影响了太湖水位,改变了换水周期等重要湖泊水环境参数。长期以来环太湖水文情势、水资源变化特征等问题都备受关注,很多学者围绕太湖入出湖水量、换水周期进行了相关研究。申金玉等^[2]收集整理 1986—2007 年环太湖河道入出湖水量实测资料,对太湖入出湖水量进行计算分析,总结了入出湖水量影响因素;闻余华等^[3]通过整理 1986—2010 年水文巡测资料,对太湖及各分区入出湖水量变化情势进行了分析,探明了入出湖水量变化原因;陈方等^[4]对湖西区入湖水量变化趋势进行了分析,并通过主成分回归建立了湖西区巡测段入湖水量估算模型;沈国华等^[5]分析了 2000 年前后 3 个水资源分区入出湖水量变化对太湖水环境的影响;季海萍等^[6]从行政区划层面研究了环太湖入出湖水量的变化规律及成因;王洗民等^[7]根据 2010 年实测水文气象资料,采用 EcoTaihu 模型模拟了太湖及各湖区营养盐状况,计算了太湖适宜换水周期。但值得一提的是,以往的相关研究通常基于行政区分析入出湖水量变化趋势,而基于水资源分区分析的相关研究鲜见报道。然而,从太湖水资源保护和生态安全管理角度,更需要基于水资源分区角度精细化解析环太湖各水资源分区入出湖水量及其贡献,并揭示引排水工程和降雨径流对重要河道、水资源分区入出湖水量变化的影响机制,从而为削减不同水资源分区的入湖污染物负荷、优化不同水文年太湖引排水格局提供重要支撑。

本文基于 1986—2018 年环太湖入出湖水量资料,以水资源分区为研究单元,分析环太湖及水资源分区年入出湖水量与太湖换水周期的变化趋势、年际和年代际变化特征,分析水资源分区入出湖水量增长贡献率,并结合降水量、引排水量资料探讨典型区湖西区年入湖水量以及望虞河和太浦河年出湖水量显著变化的影响因素。

1 资料与方法

1.1 资料来源

本文使用的环太湖入出湖水量资料来源于 1986—2018 年环太湖水文巡测,资料由江苏省水文水资源勘测局提供。1990—2018 年沿江引排水量和降水量资料来源于《近年来环太湖进出水量规律分析》报告^[8]及 2005—2018 年太湖流域水情年报^[9],沿江引排水量包括沿长江江苏段谏壁闸、九曲河闸等 14 个口门和常熟水利枢纽全年引排水量。

1.2 分析方法

依据水资源分区原则,将环太湖巡测线划分成湖西区、浙西区、杭嘉湖区、阳澄淀泖区、武澄锡虞区 5 个水资源分区和望虞河、太浦河 2 条主要入出湖河流(图 1)。基于 1986—2018 年环太湖水文巡测流量数据,整理换算得到环太湖各水资源分区与主要入出湖河道年入出湖水量,整合各水资源分区与主要入出湖河道年入出湖水量得到太湖年入出湖总水量,据此计算各水资源分区与两条河道的年入出湖水量占比。由于 TFPW-MK 法^[10-11]相对于其他趋势分析法可以降低序列中自相关性对检验结果的影响,本文所有的趋势分析均采用 TFPW-MK 法。在分析入出湖水量受降水量、引江水量的影响时,选用 Pearson 相关系数来判断入出湖水量与降水量、引江水量的相关程度。分区入出湖水量增长贡献率和换水周期(单位:d)的计算公式^[6-7]为

$$I_i = W'_i/W' \quad (1)$$

$$T = 365W/Q \quad (2)$$

式中: I_i 为分区入出湖水量的增长贡献率; W'_i 为分区入出湖水量增量; W' 为环太湖入出湖水量增量; T 为换水周期; W 为湖泊贮水量; Q 为湖泊年出湖水量。



图 1 环太湖水资源分区

Fig. 1 Water resources zones around Taihu Lake

2 结果与分析

2.1 环太湖年入出湖水量变化特征

图 2 为 1986—2018 年环太湖年入出湖水量。由图 2 可见,1991 年、1999 年、2016 年 3 次流域特大型洪水发生时,年净入湖水量都处在邻近时期的相对最低点。2001 年之前,年出湖水量总体而言大于年入湖水量,但之后情况正好相反。太湖年入湖水量 TFPW-MK 统计值为 4.30,呈增加趋势,且达到了 99% 的显著性水平;年出湖水量 TFPW-MK 统计值为 1.61,呈增加趋势,但没有达到 90% 的显著性水平;年净入湖水量 TFPW-MK 统计值为 3.62,呈增加趋势,并达到了 99% 的显著性水平。环太湖年入

出湖水量的变化趋势与已有研究成果基本一致^[6]。

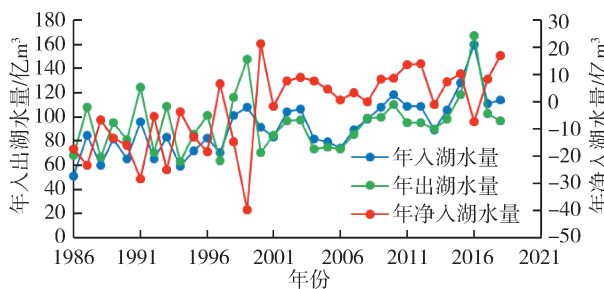


图2 太湖年入出湖水量及年净入湖水量变化过程

Fig.2 Variation of inflow, outflow and net water inflow of Taihu Lake

图3为各年代太湖年入出湖水量及年净入湖水量变化。由图3可见,入湖年平均水量随年代变化而增加,而出湖年平均水量随年代变化呈现增加或减少的波动。20世纪80至90年代太湖入湖水量小于出湖水量,但在21世纪初则相反。太湖年净入湖水量总体上经历了一个由负到正的变化过程,20世纪80至90年代净入湖水量保持在 -15 亿 m^3 左右,而在21世纪前10年增加至 6 亿 m^3 左右。2002年开始实施的引江济太工程的引水可能是导致净入湖水量增加的原因。

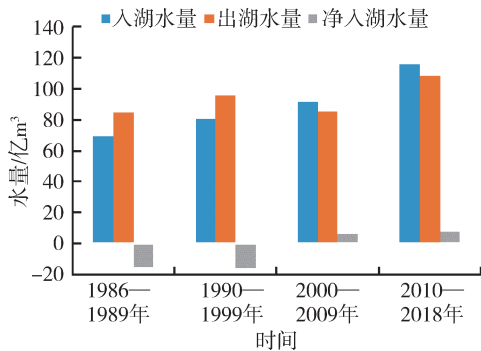


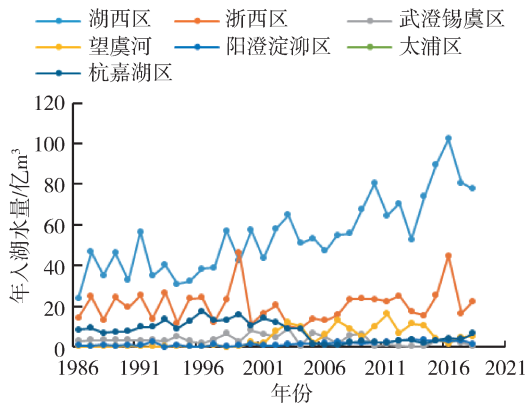
图3 各年代太湖年入出湖水量及年净入湖水量变化

Fig.3 Variation of inflow, outflow and net water inflow in different decades of Taihu Lake

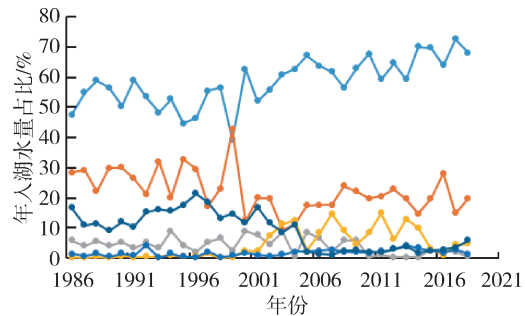
2.2 各水资源分区入出湖水量及贡献变化

2.2.1 各水资源分区入出湖水量变化特征

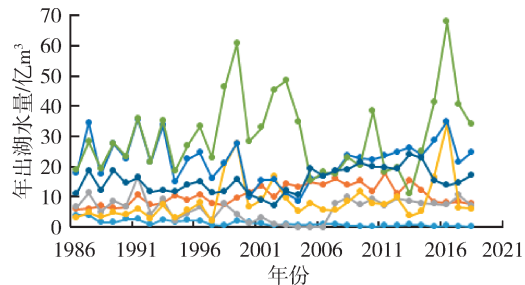
图4为环太湖各水资源分区年入出湖水量及其占比,表1为各水资源分区年入出湖水量及其占比的TFPW-MK检验结果。由图4和表1可见,湖西区、望虞河和阳澄淀泖区年入湖水量及其占比均呈增加趋势,而杭嘉湖区年入湖水量及其占比呈减少趋势,都达到了99%的显著性水平;湖西区年出湖水量及其占比呈减少趋势,浙西区年出湖水量呈增加趋势,都达到了99%的显著性水平。浙西区、武澄锡虞区的年入湖水量占比均呈减少趋势,都达到了95%的显著性水平;杭嘉湖区年出湖水量呈增加趋势,阳澄淀泖区的年出湖水量占比呈减少趋势,都



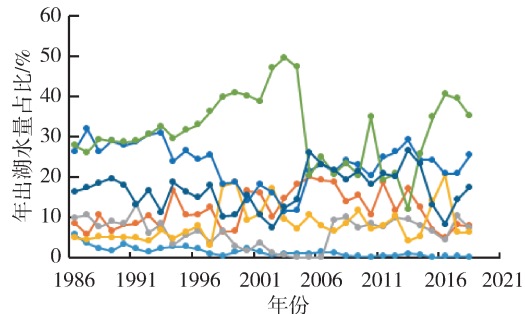
(a) 年入湖水量



(b) 年入湖水量占比



(c) 年出湖水量



(d) 年出湖水量占比

图4 各水资源分区年入出湖水量及占比

Fig.4 Annual inflow and outflow of each water resources zone and its proportion

达到了95%的显著性水平。其他变量的变化趋势均未达到95%的显著性水平。各水资源分区入出湖水量及其占比总体呈现相同的增减趋势,但浙西区年入湖水量增加趋势不显著,而环太湖年入湖总水量显著增大,这就使得浙西区年入湖水量占比呈现减少趋势,武澄锡虞区和阳澄淀泖区年出湖水量及其占比也出现了同样的情况。

表 1 各水资源分区年入出湖水量及其占比的

TFPW-MK 统计值

Table 1 TFPW-MK statistics of annual inflow and outflow of each water resources zone and its proportion

分区	年入湖水量	年出湖水量	年入湖占比	年出湖占比
湖西区	5.08 **	-5.08 **	4.39 **	-5.30 **
浙西区	0.31	3.06 **	-2.25 *	1.15
武澄锡虞区	-1.28	0.66	-2.42 *	-0.11
望虞河	4.43 **	1.67	3.84 **	1.74
阳澄淀泖区	4.78 **	0.89	3.45 **	-2.09 *
太浦河		0.24		1.41
杭嘉湖区	-3.97 **	2.32 *	-5.04 **	1.41

注: ** 表示达到 99% 显著性水平, * 表示达到 95% 显著性水平。

计算各水资源分区 1986—2018 年入出湖水量及占比的变差系数 (C_v)、极值比等统计特征值,结果见表 2~5。由表 2、表 3 可见,武澄锡虞区出湖水量的极值比最大,其原因是自然条件下该分区出湖水量最小值仅为 0.03 亿 m^3 ,但 2007 年梅梁湖泵站和 2013 年大渲河泵站的建设运行,使该区出湖水量的最大值达到 16.54 亿 m^3 。望虞河入湖水量极值比最大,其原因是引江济太工程运行前该河入湖水量最小值仅为 1.89 亿 m^3 ,但 2002 年引江济太工程运行后使该河入湖水量的最大值达到 34.47 亿 m^3 。

表 2 各水资源分区年入湖水量统计特征值

Table 2 Statistical characteristic value of annual water inflow in each water resources zone

分区	均值/ 亿 m^3	C_v	最大值/ 亿 m^3	最小值/ 亿 m^3	极值比
湖西区	54.62	0.34	102.19	24.07	4.25
浙西区	20.39	0.41	46.11	9.01	5.12
武澄锡虞区	3.53	0.67	9.13	0.16	57.81
望虞河	4.37	1.09	16.22	0.06	260.38
阳澄淀泖区	1.57	0.68	3.77	0.03	132.67
太浦河					
杭嘉湖区	7.56	0.63	17.67	0.81	21.76

表 3 各水资源分区年出湖水量统计特征值

Table 3 Statistical characteristic value of annual water outflow in each water resources zone

分区	均值/ 亿 m^3	C_v	最大值/ 亿 m^3	最小值/ 亿 m^3	极值比
湖西区	1.28	0.81	3.94	0.12	32.75
浙西区	10.66	0.31	17.86	5.87	3.04
武澄锡虞区	6.17	0.62	16.54	0.03	547.29
望虞河	8.74	0.82	34.47	1.89	18.20
阳澄淀泖区	22.09	0.31	35.74	8.61	4.15
太浦河	30.37	0.43	68.03	10.9	6.24
杭嘉湖区	15.42	0.27	24.09	7.21	3.34

由表 4、5 中各水资源分区入出湖水量及占比的 C_v 值和极值比可见,望虞河年入出湖水量及占比的年际变化最明显。

表 4 各水资源分区年入湖水量占比统计特征值

Table 4 Statistical characteristic value of proportion of annual water inflow in each water resources zone

分区	均值	C_v	最大值	最小值	极值比
湖西区	0.58	0.13	0.73	0.39	1.85
浙西区	0.22	0.31	0.43	0.09	4.52
武澄锡虞区	0.04	0.66	0.09	0	50.26
望虞河	0.04	1.07	0.15	0	242.17
阳澄淀泖区	0.02	0.62	0.04	0	124.35
太浦河					
杭嘉湖区	0.09	0.68	0.21	0.01	23.41

表 5 各水资源分区年出湖水量占比统计特征值

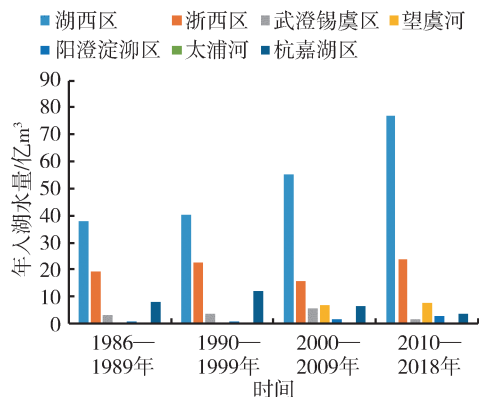
Table 5 Statistical characteristic value of proportion of annual water outflow in each water resources zone

分区	均值	C_v	最大值	最小值	极值比
湖西区	0.01	0.84	0.06	0	56.98
浙西区	0.12	0.38	0.20	0.05	4.11
武澄锡虞区	0.06	0.56	0.13	0	329.15
望虞河	0.09	0.53	0.21	0.03	6.93
阳澄淀泖区	0.23	0.22	0.32	0.12	2.75
太浦河	0.32	0.28	0.50	0.12	4.11
杭嘉湖区	0.17	0.28	0.27	0.07	3.58

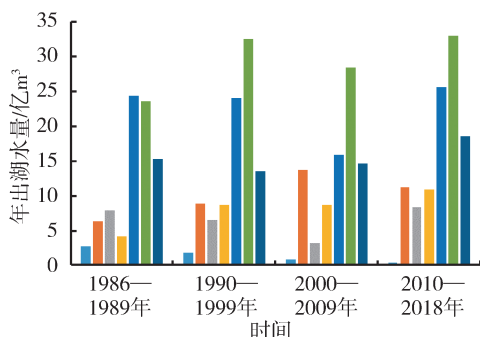
图 5 为不同年代太湖各水资源分区年入出湖水量的均值及其占比。由图 5 可见,湖西区的年入湖水量在 4 个年代中都为最大,并仍在增加;湖西区不同年代的年出湖水量一直为各水资源分区最小,并仍在持续减小。太浦河自 20 世纪 90 年代起各年代年出湖水量就超过阳澄淀泖区,各年代年出湖水量都为最大。各水资源分区入湖水量占比在 20 世纪 80 年代与 90 年代相比变化不大。湖西区入湖占比各个年代中一直高于其他分区,浙西区不同年代入湖水量占比仅低于湖西区,杭嘉湖区和武澄锡虞区近 3 个年代中入湖水量占比不断降低。由于引江济太工程实施,望虞河入湖水量在 20 世纪 90 年代至 21 世纪前 10 年间呈增加趋势,而后稳定在 7%。太浦河为出湖河流,入湖占比为 0。太浦河、阳澄淀泖区、杭嘉湖区在 4 个年代中出湖水量占比明显高于其他分区,占比之和在 70% 左右。望虞河不同年代出湖占比有一定增加趋势,但 21 世纪后 2 个年代基本维持在 9%~10%。

2.2.2 各水资源分区入出湖水量贡献率分析

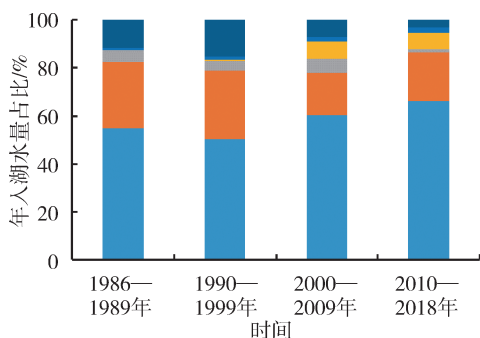
自 2002 年引江济太调水工程投入使用后,净入湖水量格局发生了变化。由图 2 可见,2002 年前年出湖水量在大部分年份大于入湖,净入湖水量年际变化较明显,而 2002 年后年出湖水量在大部分年份小于入湖,年净入湖水量维持稳定且接近于 0。因此,以 2002 年为节点,分析引江济太调水实施后各水资源分区入出湖水量的增长对环太湖入出湖水量增长的贡献。表 6 为各水资源分区入出湖水量增加



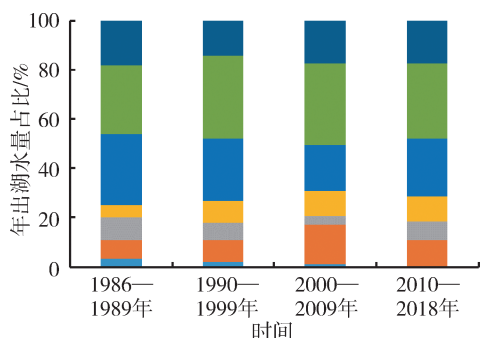
(a) 入湖水量



(b) 出湖水量



(c) 入湖水量占比



(d) 出湖水量占比

图5 各水资源分区不同年代入出湖水量及其占比
Fig.5 Inflow and outflow of each water resources zone and its proportion in different decades

量及贡献率。可见,湖西区对入湖水量的增长贡献最大,贡献率高达 98.88%;而杭嘉湖区的贡献最小,贡献率为 -26.76%;浙西区对出湖水量的增长贡献最大,贡献率为 51%;而湖西区的贡献最小,贡献率为 -19.08%。杭嘉湖区和浙西区对出湖水量

增长的贡献率均印证了伍远康等^[12]关于“引江济太抬高了太湖水位,使得环太湖浙江段出湖水量增加”的观点。就引排水工程而言,望虞河对入出湖水量增长的贡献率均在 30% 左右,而太浦河对出湖水量增长的贡献率却仅为 6.99%。

表6 各水资源分区入出湖水量增加量及贡献率
Table 6 Increase and contribution rate of water inflow and outflow in each water resources zone

分区	入湖水量增量/亿 m ³	出湖水量增量/亿 m ³	入湖增长贡献率/%	出湖增长贡献率/%
湖西区	26.27	-1.44	98.88	-19.08
浙西区	-0.58	3.85	-2.18	51.00
武澄锡虞区	-0.85	-0.28	-3.19	-3.67
望虞河	7.45	2.44	28.06	32.25
阳澄淀泖区	1.47	-1.29	5.53	-17.03
太浦河	-0.10	0.53	-0.36	6.99
杭嘉湖区	-7.11	3.74	-26.76	49.54

2.3 典型区入出湖水量年际变化影响因素

太湖各水资源分区入出湖水量主要受降水以及水利工程调度影响,根据申金玉等^[2]的研究,2000 年以前降水量是影响湖西区入湖水量的主导因素,但在 2000—2007 年,随着引江水量的增加,引江水量逐渐成为影响湖西区入湖水量的重要因素。季海萍等^[6]的研究认为水利工程调度对太湖入出湖水量的影响逐渐占据主导作用。本文对典型区望虞河、太浦河、湖西区的入出湖水量年际变化影响因素进行分析。

对湖西区年净引水量、年降水量与年入湖水量进行拟合。经计算湖西区年降水量与年入湖水量 Pearson 相关系数为 0.62,而湖西区年净引水量与年入湖水量 Pearson 相关系数仅为 0.10。可见,湖西区年入湖水量随湖西区年降水量增加而增加,但与湖西区净引水量无明显关系,因此湖西区年入湖水量主要受湖西区年降水量影响。2016 年太湖流域出现自 1951 年以来的最大降水,湖西区年降水量达 2025.5 mm,超过常年降水量的 73.3%,导致太湖流域发生特大洪水,太湖最高水位达到 4.87 m^[13],该年湖西区入湖水量也为 1986—2018 年最大。1999 年太湖流域梅雨期雨量极大,发生全流域特大洪水,但湖西区 1999 年入湖水量并没有明显偏大,其原因在于暴雨主要集中在太湖南部各分区,且湖西区增加了沿江排水量^[14]。湖西区、浙西区作为重要的入湖分区,入湖水量与降水量关系较紧密,而武澄锡虞区、阳澄淀泖区的入湖水量则受分区通江影响,与降水量关系可能并不密切。

对望虞河、太浦河的年出湖水量与沿江净引水量和流域降水量进行拟合分析。经计算流域年降水量与望虞河、太浦河年出湖水量 Pearson 相关系数分

别为 0.72 和 0.65,沿江净引水量与望虞河、太浦河年出湖水量 Pearson 相关系数分别为 -0.68 和 -0.65。可见,望虞河、太浦河年出湖水量随流域年降水量增加而增加,随沿江净引水量增加而减少。在流域年降水量较大的年份,太浦河年出湖水量响应明显,如 1999 年、2015 年及 2016 年太湖流域暴发全流域洪水,太浦河出湖水量相应有较大增幅。2003 年太湖流域水量偏枯,但太浦河出湖水量却并不低,其原因在于汛前为引江改善流域水环境,加大太浦闸泄水量,且 8 月黄浦江水域发生泄油污染事件,为抑制泄油上溯太浦泵站加大泄水^[15]。2010 年,在流域降水接近年均水平的情况下,出湖水量明显偏高,原因是该年为缓解太湖蓝藻暴发期水质恶化及改善下游水质多次启动引江济太调水。2013 年为太浦河出湖水量最少的年份,原因在于 2013 年流域水量偏枯,且 2012 年至 2013 年太浦河除险加固工程期间,对太浦闸泄水进行控制,使太浦河出湖水量减少^[16]。望虞河在汛期和太浦河共同承担防洪排涝,因此年出湖水量年际变化与太浦河相似(图 4)。

2.4 太湖换水周期变化特征

换水周期是湖泊水环境的一个重要参数,准确估算换水周期对于研究湖泊水体化学、生物变化以及污染物迁移、扩散、转化有着重要意义^[7]。对太湖换水周期的研究主要是针对湖区的换水周期,因此可以基于太湖出湖水量计算得到太湖历年换水周期(图 6)。对太湖换水周期进行 TFPW-MK 趋势检验,统计值为 -1.57,表明换水周期呈递减趋势,但未达到 95% 的显著性水平。1986—2018 年太湖换水周期年均值为 179.84 d, C_v 值为 0.22,最大值出现在 1994 年,其值为 258.46 d,最小值出现在 2016 年,其值为 96.63 d,极值比 2.67。

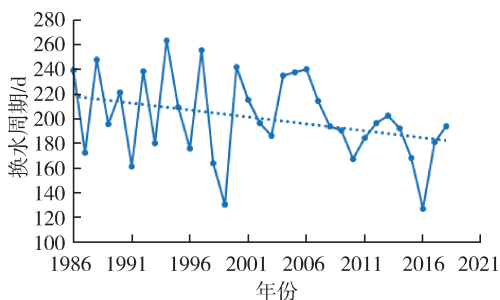


图 6 太湖换水周期变化

Fig. 6 Variation of water exchange period of Taihu Lake

太湖在 1986—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年、2010—2018 年的 4 个年代的多年平均换水周期分别为 200.31 d、181.98 d、192.72 d、154.36 d。1999 年前,太湖流域降水偏丰,而 2000—2011 年降

水总体偏枯^[13],可见 21 世纪前 10 年换水周期较长可能受流域降水偏枯影响。2010—2018 年的换水周期明显短于其他 3 个年代。在 1986—2018 年换水周期最短的 10 年中,2010—2018 年占 4 年,分别为 2010 年、2015 年、2016 年和 2017 年,表明现今太湖正处于相对丰水的时期,换水周期明显加快。

3 讨论

太湖入出湖水量的管控一般是依据太湖水位进行。太湖全年共 5 个洪水分期,太湖水位高于或低于分期内防洪控制水位时,采取洪水调度或引水措施^[12]。当太湖水位超过 3.80 m、4.20 m、4.50 m 和 4.65 m 时,对应太湖流域防汛抗旱总指挥部应急响应级别为 IV ~ I 级,太湖局同时采取相应的应急响应行动。当太湖水位超过 100 年一遇防洪设计水位(4.80 m)时,执行超标准洪水预案,引排水工程则按照《太湖流域防洪规划》中规划的排水量有序承泄太湖洪水^[17]。

年入湖水量的变化表明年入湖水量的大小虽然与引水量有关,但更取决于入湖的降水径流量,因此,丰平枯水文年的变化直接影响到年入湖水量的变化。太湖流域受季风气候影响,流域水量充沛,研究期内太湖流域虽出现旱灾的频率较低,但极端降雨造成的洪涝灾害却时有发生,如 1991 年、1999 年和 2016 年均发生了流域性洪水^[18]。丰水年降雨增加引起的径流增加加大了入湖水量,改善了湖体水动力条件,同时入湖水量增加使得出湖水量也增加,从而缩短了换水周期,提高了湖水自净能力^[19]。太湖南部的换水周期短于北部,南部水质好于北部^[20]。值得注意的是,入湖水量的增加也导致污染物负荷增加^[21],增加了太湖生态安全风险。水质最差的湖西区入湖水量的显著增加把大量污染物带入湖体,随水流由西北向东南输送,但因同时受夏季盛行的东南风影响,延长了污染物在湖中停留时间^[22],有损于太湖生态健康。枯水年入湖水量减少,不利于湖体水动力条件改善,且使得出湖水量也减少,从而加长了换水周期,降低了水体自净能力。但与丰水年相比,入湖负荷也相应减少。枯水年份较低的太湖水位使得底泥易受风浪的扰动而悬浮,释放的磷元素导致湖体总磷浓度增加^[23]。

为了保障太湖生态安全,有必要采取措施降低入湖污染物负荷,同时还应针对不同水文年优化调度引排水工程,缩短污染物水力停留时间,提升太湖自净能力,控制太湖生态安全风险。此外,还需要加强太湖入出湖水水质水量同步监测站网建设,为提高污染物负荷计算精度奠定基础。

4 结 论

a. 1986—2018 年,太湖年入出湖水量以及年净入湖水量均呈增加趋势,其中年入湖水量和年净入湖水量增加趋势达到了 99% 的显著性水平,年出湖水量增加趋势没有达到 95% 的显著性水平。湖西区、望虞河和阳澄淀泖区年入湖水量及其占比、浙西区年出湖水量呈增加趋势,均达到了 99% 的显著性水平;湖西区年出湖水量及其占比、杭嘉湖区年入湖水量及其占比呈减少趋势,均达到了 99% 的显著性水平。

b. 望虞河年入出湖水量及其占比的年际变化最明显。湖西区年入湖水量主要受该区年降水量影响,望虞河和太浦河年出湖水量受流域年降水量及沿江净引水量影响均较大。

c. 湖西区在 1986—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年、2010—2018 年的 4 个年代入湖水量均为各分区中最大,太浦河出湖水量除 20 世纪 80 年代外,其余年代均为各分区最大。湖西区各个年代入湖水量占比均为最高,且占比在后 3 个年代中不断上升。4 个年代中太浦河、阳澄淀泖区、杭嘉湖区出湖水量占比明显高于其他分区,占比之和在 70% 左右。

d. 湖西区对入湖水量的增长贡献最大,贡献率高达 98.88%,而杭嘉湖区的贡献最小,贡献率为 -26.76%;浙西区对出湖水量的增长贡献最大,贡献率为 51%,而湖西区的贡献最小,贡献率为 -19.08%。

e. 太湖换水周期呈递减趋势,但减少趋势未达到 95% 的显著性水平;太湖换水周期 C_v 值为 0.22,最大值出现在 1994 年,为 258.46 d,最小值出现在 2016 年,为 96.63 d,极值比 2.67。2010—2018 年换水周期 154.36 d,明显短于 1986—2009 年。

参考文献:

- [1] 陈方,盛东,高怡,等.太湖流域用水总量控制体系研究[J].水资源保护,2009,25(3):37-40. (CHEN Fang, SHENG Dong, GAO Yi, et al. Study on total water consumption control in Taihu Basin[J]. Water Resources Protection, 2009, 25(3): 37-40. (in Chinese))
- [2] 申金玉,甘升伟,陈润,等.环太湖出入湖水量影响因素分析及对策措施研究[J].水资源保护,2011,27(6):48-52. (SHEN Jinyu, GAN Shengwei, CHEN Run, et al. Analysis of influencing factors of inflow and outflow around Taihu Lake and countermeasures [J]. Water Resources Protection, 2011, 27(6): 48-52. (in Chinese))
- [3] 闻余华,王中雅,董家根.太湖入出湖水量变化情势及

- 其原因初探[J].人民长江,2014,45(1):20-23. (WEN Yuhua, WANG Zhongya, DONG Jiagen. Preliminary study on changing condition for inflow and outflow of Taihu Lake [J]. Yangtze River, 2014, 45(1): 20-23. (in Chinese))
- [4] 陈方,吴鹏飞,刘金涛,等.太湖流域湖西区入湖水量估算研究[J].水力发电,2018,44(5):8-10. (CHEN Fang, WU Pengfei, LIU Jintao, et al. Estimation of water entering the western area of Taihu Lake Basin [J]. Water Power, 2018, 44(5): 8-10. (in Chinese))
- [5] 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))
- [6] 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))
- [7] 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. (WANG Xianmin, ZHAI Shuhua, ZHANG Hongju, et al. Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(1): 9-21. (in Chinese))
- [8] 上海蓝泰信息咨询有限公司.近年来环太湖进出水量规律分析[R].上海:水利部太湖流域管理局,2015.
- [9] 太湖流域管理局水文处.水情年报[EB/OL]. [2019-10-21] <http://www.tba.gov.cn/channels/43.html>.
- [10] YUE S, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series [J]. Hydrological Processes, 2002, 16(9):1807-1829.
- [11] YUE S, WANG C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall Test [J]. Water Resources Research, 2002, 38(6):1-4.
- [12] 伍远康,陶永格,王红英.“引江济太”工程对浙江的影响分析[J].浙江水利科技,2007(6):13-15. (WU Yuankang, TAO Yongge, WANG Hongying. Influence of “Diverting Changjiang River water into Taihu Lake” engineering to Zhejiang [J]. Zhejiang Hydrotechnics, 2007(6):13-15. (in Chinese))
- [13] 吴浩云,王银堂,胡庆芳,等.太湖流域 61 年来降水时空演变规律分析[J].水文,2013,33(2):75-81. (WU Haoyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Temporal-spatial change of precipitation in Taihu Lake Basin during recent 61 years [J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(2):75-81. (in Chinese))
- [14] 吴泰来.太湖流域 1999 年特大洪水和防洪规划的思考[J].湖泊科学,2000(1):6-11. (WU Tailai. 1999

- catastrophic flood in Taihu Basin and the consideration for Taihu flood control planning [J]. Journal of Lake Sciences, 2000(1): 6-11. (in Chinese))
- [15] 陈红, 何建兵, 李蓓, 等. 调水对太浦河来水影响分析 [J]. 水利规划与设计, 2008(2): 32-35. (CHEN Hong, HE Jianbing, LI Bei, et al. Analysis of the impact of water transfer on the inflow of Taipu River [J]. Water Resources Planning and Design, 2008(2): 32-35. (in Chinese))
- [16] 郑春锋, 连振荣, 李超, 等. 太浦闸除险加固工程施工导流工作实践 [J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(7): 51-54. (ZHENG Chunfeng, ZE Zhenrong, LI Chao, et al. Construction diversion work practice of Taipu Sluice Reinforcement Project [J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(7): 51-54. (in Chinese))
- [17] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域防洪规划 [R]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2007.
- [18] 伍永年, 黄巧盟, 张祎玮, 等. 太湖流域防汛抗旱减灾体系建设与成就 [J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(10): 89-98. (WU Yongnian, HUANG Yumeng, ZHANG Yiyang, et al. Construction and achievements of flood control, drought relief and disaster reduction systems in the Taihu Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(10): 89-98. (in Chinese))
- [19] 徐彬. 引江济太调水与太湖氮磷自净能力的相关性分析 [C]// 中国水利学会. 科技创新与水利改革——中国水利学会 2014 学术年会论文集 (上册). 北京: 中国水利学会, 2014: 390-396.
- [20] 秦伯强, 罗淑葱. 太湖生态环境演化及其原因分析 [J]. 第四纪研究, 2004(5): 561-568. (QIN Boqiang, LUO Liancong. Changes in eco-environment and causes for Lake Taihu, China [J]. Quaternary Sciences, 2004(5): 561-568. (in Chinese))
- [21] 陈洁, 朱广伟, 许海, 等. 不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4924-4931. (CHEN Jie, ZHU Guangwei, XU Hai, et al. Influence of rainfall intensity on the nutrient loading from an inflowing river in the plain river network of the Taihu Catchment [J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4924-4931. (in Chinese))
- [22] 杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 18-27. (YANG Liuyan, YANG Xinyan, REN Liman, et al. Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 18-27. (in Chinese))
- [23] 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. Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 919-929. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-12-20 编辑: 王 芳)

(上接第 31 页)

- [14] 张晓宇, 董欣. 基于 SWMM 的 LID 设施对排水管网性能影响研究 [J]. 山西建筑, 2018, 44(29): 137-139. (ZHANG Xiaoyu, DONG Xin. Research on influence of LID on urban drainage system performance based on SWMM model [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(29): 137-139. (in Chinese))
- [15] 蔡庆拟, 陈志和, 陈星, 等. 低影响开发设施的城市雨洪控制效果模拟 [J]. 水资源保护, 2017, 33(2): 31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2): 31-36. (in Chinese))
- [16] 罗玉婷. 海绵城市背景下老城区低影响开发 (LID) 雨水管理设施研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [17] 张悦. 基于 SWMM 模型的海绵城市小区雨洪调控模拟研究 [D]. 西安: 西北大学, 2019.
- [18] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦, 等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese))
- [19] 王宏杰, 董文艺, 吴建立, 等. 基于 SWMM 模型的城市低影响开发水文水质效应模拟分析 [J]. 广东化工, 2019, 46(15): 18-20. (WANG Hongjie, DONG Wenyi, WU Jianli, et al. Simulation analysis of hydrological and water quality effects of low impact development in urban area based on SWMM model [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(15): 18-20. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-01-10 编辑: 熊水斌)

