

## 太湖近 40 年来出入湖水量与换水周期变化及影响因素\*

崔彦萍<sup>1</sup>, 张建华<sup>2</sup>, 赖锡军<sup>3</sup>

(1: 江苏省水文水资源勘测局, 南京 210029)

(2: 江苏省水利厅, 南京 210029)

(3: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与流域水安全全国重点实验室, 南京 211135)

**摘要:** 为了厘清太湖水文演变规律, 本文选取 1986-2024 年水文整编数据, 以太湖出入湖水量和换水周期为指标, 综合运用 Mann-Kendall 趋势检验等多种数理统计方法, 分析了其变化的趋势性、周期性特征, 识别了突变年份并探究了其影响因素。结果表明: (1) 环太湖入、出湖水量均呈显著性上升趋势并于 2007 年发生突变, 且存在 23-25a、14a、9a 多时间尺度下的主周期。

(2) 空间上, 主要入湖河流量发生了重整, 湖西区入湖量及占比均呈显著性上升趋势, 浙西区略有增加, 引江济太入湖跃居第三, 武澄锡虞区和杭嘉湖区入湖量分别在 2009 年、2004 年骤降。出湖方面, 望虞河及浙西区、杭嘉湖区呈显著性上升趋势。

(3) 与之相应, 太湖换水周期呈显著的下降趋势, 2007 年同步发生突变, 从突变前的年均 227d 降至 195d; 考虑环湖取水后, 从突变前 226d 降至 172d, 下降更明显。突变后环湖取水导致换水周期年均减少 23d。进一步分析显示, 早期流域降水是换水周期首要驱动因子, 但是 2007 年突变后, 工程调度显著改变了湖西区、浙西区、武澄锡虞区的入湖驱动机制, 环湖入湖水量(降雨径流及人工调度的复合结果)取代降水成为首要驱动因子。

**关键词:** 环湖入出湖水量; 换水周期; 趋势分析; 突变分析; 小波分析

### Variation Patterns and Influencing Factors of Inflow/Outflow Volumes and Water Retention Time of Lake Taihu over the Past Four Decades

Cui Yanping<sup>1</sup>, Zhang Jianhua<sup>2</sup>, Lai Xijun<sup>3</sup>

(1: Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, P.R. China)

(2: Jiangsu Provincial Water Resources Department, Nanjing 210029, P.R. China)

(3: State Key Laboratory of Lake and Watershed Security, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, P.R. China)

**Abstract:** To elucidate the hydrological evolution patterns of Lake Taihu, this study utilized compiled hydrological data from 1986–2024, with inflow/outflow volumes and water retention time as key indicators. Mann-Kendall trend tests and other statistical methods were applied to analyze trend and periodic characteristics, identify abrupt change points, and explore driving factors. The results show that: (1) Both inflow and outflow have exhibited a significant upward trend and underwent an abrupt change in 2007, with main cycles of 23–25 years, 14 years, and 9 years. (2) Spatially, the spatial structure of inflow has been reconstructed. Inflow and its proportion in the western part of the lake (Huxi area) have shown a significant upward trend, while inflow in the western Zhejiang area (Zhexi area) has slightly increased. Inflow from the Yangtze River to Lake Taihu has risen to the third place. Inflow in the Wuchengxiyu area and the Hangjiahu area decreased sharply in 2009 and 2004, respectively. In terms of outflow,

\* 2025-08-18 收稿; 2025-12-28 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2024YFC3211700)资助。

\*\*通信作者; E-mail:cuiyanping79@163.com

the Wanyu River, Zhexi area, and Hangjiahu area have exhibited a significant upward trend. (3) Water retention time showed a significant decreasing trend with a synchronous abrupt change in 2007, dropping from 227 days annually before the change to 195 days; when accounting for peripheral water withdrawal, it decreased more sharply from 226 days to 172 days. After the 2007 abrupt change, water withdrawal caused an average reduction of 23 days in water retention time. Further analysis revealed that watershed precipitation was the primary driver in the early period (1986–2006), but after the 2007 change, engineering regulation significantly altered the inflow mechanisms in the Huxi, Zhexi, and Wucheng-Xiyu areas. Consequently, total lake perimeter inflow (a combination of rainfall-runoff and artificial regulation) replaced precipitation as the dominant driving factor of water retention time.

**Keywords:** Inflow and Outflow; Retention time; Mann-Kendall Trend analysis; Mutation test; Continuous wavelet analysis

太湖位于我国经济最为发达的长三角地区,是我国第三大淡水湖泊,也是区域内最重要的湖泊,对区域水安全保障起着关键作用。随着区域社会经济的发展,太湖流域水文水资源和水生态环境也发生了系统性的变化,洪旱灾害、水生态环境问题日益突出。太湖流域治理成了国家重点关注的事项之一。回顾太湖治理过程<sup>[1-4]</sup>,经历了两个代表性的阶段。上世纪 90 年代开启的“一轮治太”主要面向洪水灾害防治,太浦河、望虞河和环湖大堤等工程相继建成,形成了流域防洪排涝的骨干框架,初步解决了流域防洪体系的短板问题。2007 年无锡供水危机后启动“二轮治太”,主要面向水环境质量改善。在此期间太湖流域全力推进水环境综合治理工程建设,走马塘、新沟河和新孟河等工程建成,流域水资源调配水网体系进一步完善。与此同时,江苏太湖沿江九曲河、张家港、七浦塘、浏河等通江河道先后拓浚<sup>[5]</sup>,显著提升了区域引排能力。这些工程运行叠加流域土地利用变化<sup>[6-8]</sup>打破了太湖流域原有的水文平衡,直接改变出入湖水量时空分配,改变湖泊换水周期,进而调控水体环境容量与污染物迁移转化过程。

针对太湖的水文演变,不同领域学者对其变化和成因进行了不同层面阐释。季海萍等<sup>[9]</sup>从行政区划角度,系统分析太湖出入湖水量的整体变化特征;胥瑞晨等<sup>[10]</sup>则聚焦江苏片区,深入探讨了该区域入湖水量的动态规律;针对湖西区这一关键区域,陈方等<sup>[11]</sup>、吴娟等<sup>[12]</sup>、申金玉等<sup>[13]</sup>进一步剖析了入湖水量变化的驱动因素;林鹏等<sup>[14]</sup>、闻余华等<sup>[15]</sup>从水利分区维度出发,揭示了不同分区出入湖水量变化特点。换水周期作为反映湖泊水文变化且对生态环境保护有重要意义的另一关键指标,也受到了学者的关注,林鹏等<sup>[14]</sup>分析换水周期与降水丰枯相关,王洗民等<sup>[16]</sup>采用 EcoTaihu 模型研究 2010 年适宜换水周期,朱伟等<sup>[17]</sup>等探讨太湖换水周期变化趋势及成因分析。然而,既有研究多侧重单一要素,缺乏出入湖水量与换水周期的联动分析,且未充分纳入环湖取水等人类活动影响。

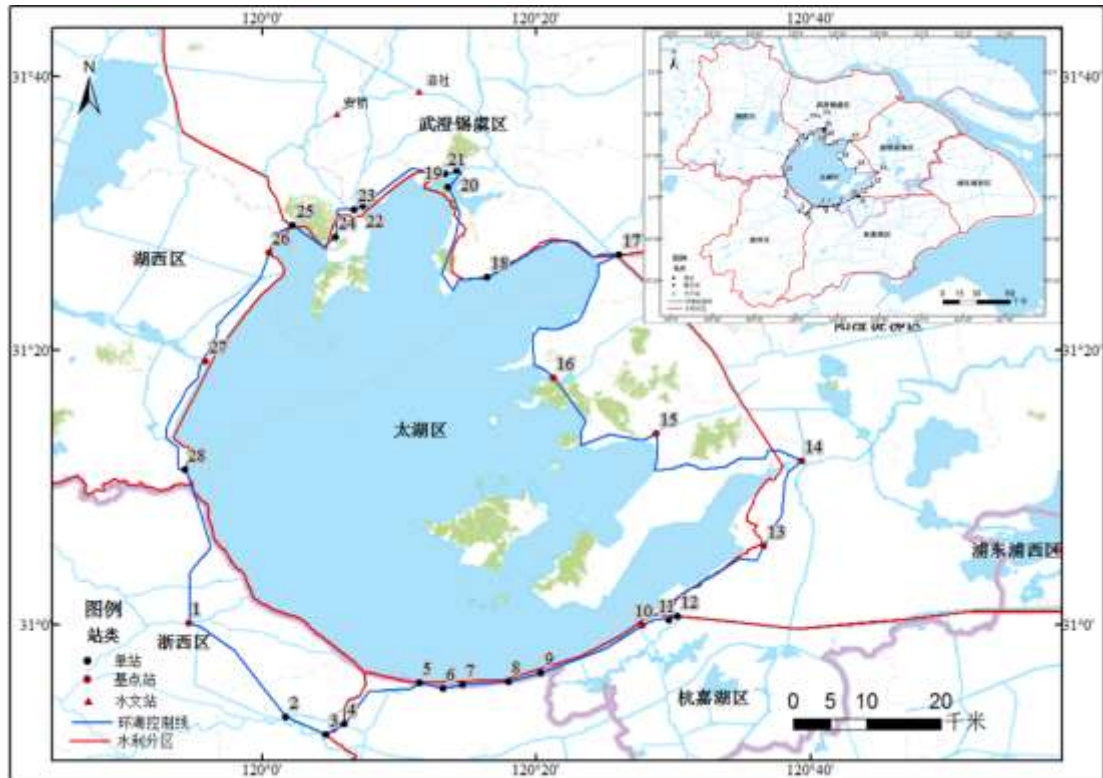
本文基于 1986-2024 年实测资料,综合太湖环湖取水等多源数据,解析太湖出入湖水量及其换水周期多尺度变化特征及其关联关系,识别影响其变化的关键因素,阐明太湖水文格局的变化规律,旨在为太湖的水资源、水环境和水生态协同管理提供科学依据。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据说明

环太湖湖岸线全长 393.2km,进出河港纵横,主要出入湖河流 50 余条。为掌握太湖出入湖水量,水文部门采用水文巡测方法开展太湖出入湖水量监测<sup>[9]</sup>。水文巡测通过在主要出入湖河流设置基点站、单站每日施测流量,并与巡测的断面关联推求巡测段流量。这些测站和巡测断面组成了环湖的巡测线(图 1),自 1986 年起沿该线开展太湖环湖水量全年观测,期间测站略有调整,2024 年巡测线的站/段如表 1 所示。本文分析选取 1986-2024 年出入湖流量资料系列。

环湖取水摘录自太湖流域管理局水文局组织编制的环太湖口门流量巡测及分析报告(2005-2009 年)和太湖流域及东南诸河水资源公报(2010-2024 年),环湖取水为河道外用水,水文监测水量不包含此项用水,主要包括直接从湖体取水的水厂用水(贡湖锡东、贡湖沙渚、金墅湾、湖东镇湖、湖东渔洋山、浦庄、东太湖北亭子港、东太湖庙港、湖州太湖等水源地)和电厂用水(如望亭电厂等)。



备注：沿湖小闸段用其中一个小闸的坐标代表

图 1 2024 年太湖环湖巡测线示意

Fig.1 Tour gauging line surrounding Lake Taihu in 2024

## 1.2 分析方法

出入湖水量的变化趋势采用 TFPW-MK 方法，相较于 Mann-Kendall 趋势检验可以降低序列中自相关性对检验结果的影响<sup>[18-19]</sup>。突变采用 Mann-Kendall 突变分析、滑动 T 检验、Pettitt 突变分析以及累计距平相综合分析结果<sup>[20-21]</sup>，通过 95% 显著性水平检验确定为突变年份。出入湖水量和换水周期的多时间尺度周期性采用小波分析方法<sup>[12]</sup>。首先对数据系列距平处理，因 39 年数据系列为有限时间数据序列，在时间序列的两端可能会产生“边界效用”，为消除或减小序列开始点和结束点附近的边界效应，对数据两端进行对称性延伸（Symmetric (Whole-Point)），在进行完小波变换后，去掉两端延伸数据的小波变换系数，保留原数据序列时段内的小波系数。

换水周期  $T$  是表征湖泊水文特征的关键指标，其大小反映了水文变化的快慢，对湖泊污染物输移与水生态环境分布格局有重要影响。其计算公式为<sup>[22-24]</sup>：

$$T = W/Q$$

其中， $T$  为换水周期 (d)； $W$  为湖泊蓄量，根据太湖年均水位查找库容曲线( $m^3$ )； $Q$  为日均出湖水量( $m^3/d$ )

随着国民经济的快速发展，直接从太湖取水规模持续扩大，其对湖泊水文系统的影响已不容忽视。尽管本研究获取的基础数据时段为 2005-2024 年，但为提升换水周期计算的科学与严谨性，研究进一步纳入河道外出湖水量，即环湖取用水量。自 2005 年以来，环太湖河道外年均取用水量约为 13.34 亿  $m^3$ ，其中 2005-2009 年环湖取用水量 3-11 亿  $m^3$ ，2010-2024 年环湖取用水量 13.8-17.6 亿  $m^3$ 。为更客观地分析取水影响，在计算换水周期时分为两种情景，一是仅考虑经由河道出湖的水量，即环太湖巡测线监测成果，二是河道出湖水量叠加环湖取用水量。

TFPW-MK 趋势分析和 M-K 检验、滑动  $t$  检验、Pettitt 检验分析使用 Python，小波分析使用 MATLAB。线性回归、独立样本 T 检验、相关性检验在 SPSS 20 软件中完成。

表 1 2024 年环湖巡测线组成概况

Tab.1 Components of tour gauging line surrounding lake Taihu in 2024

水利分区	序号	巡测段/站	基点站	东 经	北 纬	河 名
浙西区	1	长兴(二)段	长兴(二)站	119°54'40"	31°00'09"	长兴港
	2	杨家埠站		120°01'38"	30°53'15"	旄儿港
	3	杭长桥站		120°04'41"	30°52'00"	苕溪
	4	城北闸站		120°06'00"	30°52'45"	龙溪
	5	大钱闸站		120°10'49"	30°55'20"	大钱港
	6	罗溇闸站		120°13'11"	30°55'40"	罗溇
杭嘉湖区	7	幻溇闸站		120°14'42"	30°55'13"	幻溇
	8	濮溇闸站		120°17'57"	30°55'51"	濮溇
	9	汤溇闸站		120°20'20"	30°56'30"	汤溇
	10	团结桥段	团结桥站	120°27'33"	30°59'43"	大庙港
太浦河	11	汤家浜闸站		120°29'37"	31°00'27"	汤家浜
	12	太浦闸站		120°30'18"	31°00'37"	太浦河
阳澄淀泖区	13	联湖桥段	联湖桥站	120°36'38"	31°05'44"	大浦口
	14	瓜泾口段	瓜泾口站	120°39'21"	31°11'59"	瓜泾港
	15	胥江大桥段	胥江大桥站	120°28'46"	31°13'59"	胥江
	16	铜坑闸段	铜坑闸站	120°21'13"	31°18'01"	浒光运河
望虞河	17	望亭(立交)站		120°25'19"	31°26'59"	望虞河
	18	沿湖小闸段				
武澄锡虞区	19	五里湖闸站		120°13'18"	31°32'06"	五里湖
	20	景宜桥站		120°14'31"	31°33'01"	梁溪河
	21	七号桥闸站		120°13'19"	31°32'56"	徐巷浜
	22	直湖港闸站		120°07'19"	31°30'35"	直湖港
	23	武进港闸站		120°06'51"	31°30'12"	武进港
	24	雅浦桥站		120°05'17"	31°28'21"	雅浦港
	25	百渎口站		120°02'13"	31°29'09"	太滆运河
湖西区	26	浔溪桥段	浔溪桥站	120°00'30"	31°27'12"	殷村港
	27	城东港桥段	大浦口(城)站	119°55'40"	31°19'23"	城东港
	28	大港桥站		119°53'51"	31°11'23"	大港河

## 2. 结果分析

### 2.1 环湖出入湖水量

2.1.1 变化趋势及空间差异 1986-2024 年出入湖整编资料统计表明,环太湖年均入湖水量 97.09 亿  $m^3$ , 出湖 97.78 亿  $m^3$ , 出入湖水量均呈上升趋势(图 2、3), 且均通过 $\alpha=0.05$  的显著性检验。森斜率 (Sen's Slope 估计量)表明太湖平均年入湖水量增加约 1.75 亿  $m^3$ 、出湖增加 0.97 亿  $m^3$ 。

从各水利分区的出入湖水量统计看, 片区差异明显, 没有一致性的上升趋势。入湖方面, 湖西区入湖水量呈显著上升趋势 ( $p<0.05$ ); 武澄锡虞区入湖水量呈显著下降趋势 ( $p <0.05$ ); 浙西区、阳澄淀泖区、望虞河入湖水量呈上升趋势, 杭嘉湖区入湖水量呈下降趋势, 但均未通过显著性检验。从变化来看, 湖西区年均入湖水量增幅最大 (1.83 亿  $m^3$ ), 望虞河次之 (0.19 亿  $m^3$ )、阳澄淀泖区较小 (0.06 亿  $m^3$ ); 武澄锡虞区 (-0.31 亿  $m^3$ ) 和杭嘉湖区 (-0.19 亿  $m^3$ ) 则呈负增长(表 2)。浙西区、阳澄淀泖区、望虞河和杭

嘉湖区的森斜率不具有统计上的可靠性。出湖方面，杭嘉湖区、望虞河出湖水量呈显著上升趋势 ( $p < 0.05$ )；浙西区、太浦河、阳澄淀泖区呈上升趋势但不显著，武澄锡虞区呈下降趋势但不显著。年均增幅以杭嘉湖区最大 (0.23 亿  $m^3$ )、望虞河次之 (0.20 亿  $m^3$ )，其它分区的变化未达到统计显著性水平 (表 2)。

入湖水量以湖西区和浙西区为主，历年平均分别占 56.8%和 22.1%。杭嘉湖区 (7.4%)、武澄锡虞区 (7.4%)、望虞河 (4.8%)、阳澄淀泖区 (1.5%) 合计占 21.1%。占比变化趋势上，湖西区入湖占比呈显著上升趋势 ( $p < 0.05$ )，武澄锡虞区入湖占比呈显著下降趋势 ( $p < 0.05$ )。出湖水量太浦河占比最高 (32.4%)、阳澄淀泖区次之 (22.3%)、再次分别为杭嘉湖区 (16.4%)、浙西区 (11.0%)、望虞河 (9.7%)、武澄锡虞区 (7.3%)。从出湖占比变化看，望虞河出湖占比呈显著上升趋势 ( $p < 0.05$ )，太浦河、浙西区、杭嘉湖区出湖占比呈上升趋势但均不显著；阳澄淀泖区、武澄锡虞区出湖占比呈下降趋势但不显著 (表 2)。

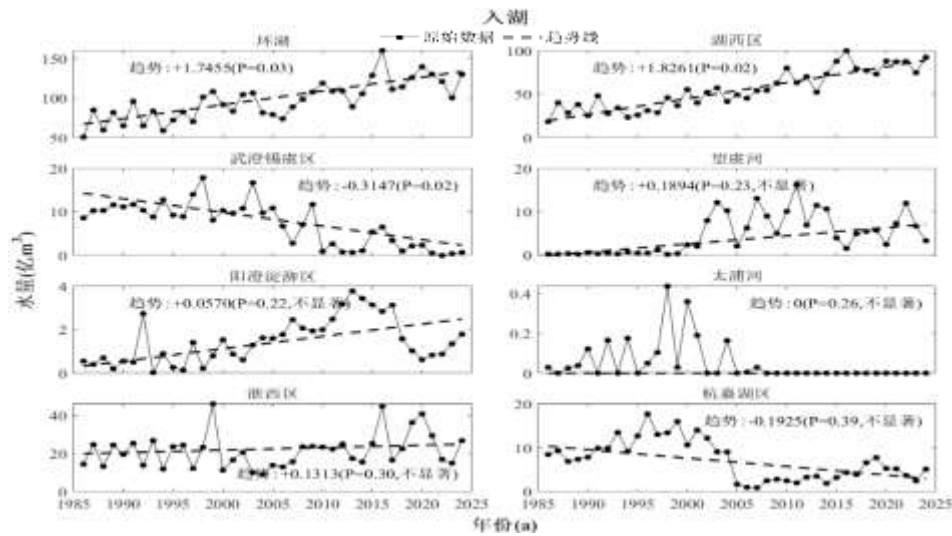


图 2 环太湖及各水利分区入湖水量时序变化图

Fig.2 Variation of annual inflow of Lake Taihu and the different zones

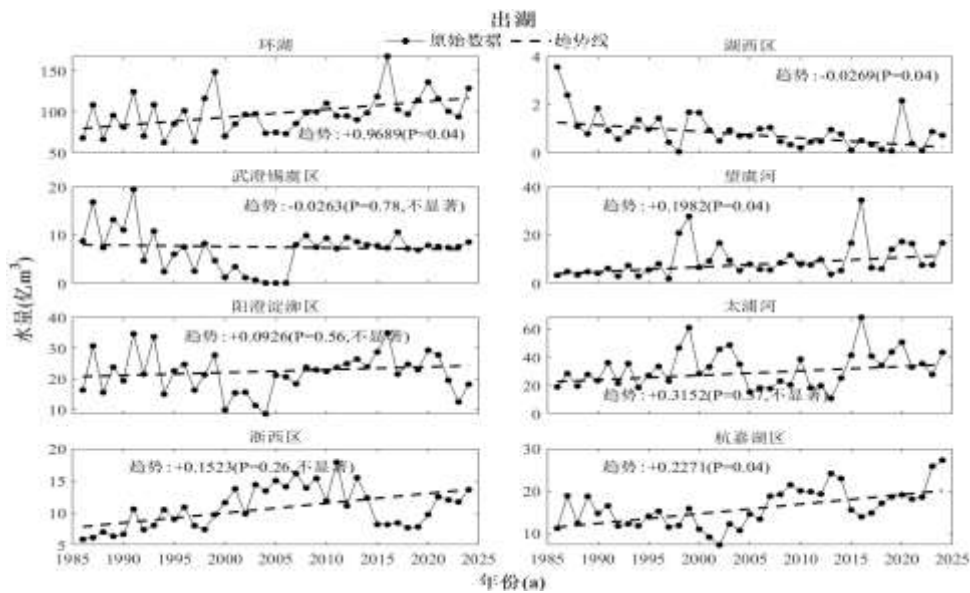


图 3 环太湖及各水利分区出湖水量时序变化图

Fig.3 Variation of annual outflow of Lake Taihu and the different zones

表 2 1986-2024 年环湖及各水利分区入、出湖水量及占比 TFPW-MK 趋势检验

Tab.2 Results of inflow and outflow variation from 1986 to 2024 measured with TFPW-MK method

项目	浙西区	杭嘉湖区	太浦河	阳澄淀泖区	望虞河	武澄锡虞区	湖西区	环太湖	
入湖	p 值	0.303	0.393	0.262	0.218	0.227	0.018	0.019	0.033
	z 统计量	1.031	-0.855	-1.122	1.232	1.207	-2.364	2.338	2.137
	森斜率	0.1313	-0.1925	0.0000	0.0570	0.1894	-0.3147	1.826	1.746
出湖	p 值	0.258	0.035	0.365	0.563	0.044	0.782	0.039	0.035
	z 统计量	1.132	2.112	0.905	0.578	2.012	0.277	-2.062	2.112
	森斜率	0.1523	0.2271	0.3152	0.0926	0.1982	-0.0263	-0.0269	0.9689
入湖占比	p 值	0.209	0.530	/	0.167	0.315	0.025	0.014	
	z 统计量	-1.257	-0.629	/	1.383	1.006	-2.238	2.464	
	森斜率	-0.002	-0.004	/	0.000	0.002	-0.005	0.009	
出湖占比	p 值	0.744	0.436	0.497	0.131	0.042	0.880	/	
	z 统计量	0.327	0.780	0.679	-1.509	2.037	-0.151	/	
	森斜率	0.000	0.001	0.001	-0.001	0.002	-0.001	/	

注：显著性水平 $\alpha=0.05$ 时， $|Z|=1.96$ 显著性水平临界线，下同

2.1.2 时序突变特征 突变识别综合采用 MK 检验、滑动 T 检验、Pettitt 突变检验及累积距平法，两种及两种以上方法同时检出且通过显著性水平 $\alpha=0.05$  的年份判定为突变点。最终确认的突变年份为多种方法综合研判的最可能年份，局部微小波动未予考虑。环太湖及各水利分区突变分析结果见表 3。环太湖入湖总水量 MK 检验无突变，综合多方法判定突变年份为 2007 年（均值跃迁和分布变化）。出湖总水量 MK 检验检出突变年份为 2013 年，结合其它方法，综合确定突变年份为 2007 年（均值跃迁、分布变化）和 2013 年（趋势转折、均值跃迁）。

表 3 环湖及各水利分区入、出湖水量突变检验

Tab.3 Mutation of inflow and outflow variation from 1986 to 2024

项目	浙西区	杭嘉湖区	太浦河	阳澄淀泖区	望虞河	武澄锡虞区	湖西区	环太湖	
M-K 检验	2015	/	/	2001	1996	2012	/	/	
滑动 t 检验 (5-10 年窗口)	2007	1994,2004,2015	/	2003,2006,2017	2001,2014	2005,2009	1997,2007,2014	1997,2007,2014	
入湖	Pettitt 检验	/	2004	/	2003	2001	2009	2007	2007
	累积距平	2007,2014	2004	/	2003	2001	2005,2009	2008	2007
	综合分析结果	2007,2015	2004	/	2003	2001	2009	2007	2007
出湖	M-K 检验	/	2009	1998,2015	2010	1998	1992	2001	2013
	滑动 t 检验(5-10 年窗口)	1999,2002,2013	2006,2014	1997,2004,2014	1999,2007	1997,2014	1993,2006	2007	2007,2013
	Pettitt 检验	1999	2006	/	/	1997	/	/	2007
	累积距平法	1999,2013	2006	1997,2004,2014	2007	1997,2014	1993,2006	2001,2007	2007,2013
	综合分析结果	1999,2013	2006	1997,2014	2007	1997, 2014	1993,2006	2007	2007,2013

各水利分区入湖水量突变判别结果为，湖西区 2007 年（均值跃迁和分布变化），浙西区 2007 年（均

值跃迁)和2015年(趋势转折),杭嘉湖区2004年(均值跃迁和分布变化),望虞河2001年(均值跃迁和分布变化),武澄锡虞区2009年(均值跃迁和分布变化),阳澄淀泖区2003年(均值跃迁和分布变化)。各水利分区入湖水量突变年份主要集中在2001~2009年。对出湖水量,太浦河突变年份为1997年和2014年(均为趋势转折、均值跃迁、分布变化),望虞河1997年(趋势转折、均值跃迁、分布变化)和2014年(均值跃迁),浙西区1999年(均值跃迁、分布变化),杭嘉湖区2006年(趋势转折、均值跃迁、分布变化),阳澄淀泖区2007年(趋势转折、均值跃迁、分布变化),武澄锡虞区为1993年(趋势转折、均值跃迁)和2006年(均值跃迁)。出湖水量突变主要集中时段为1997~1999年、2006~2007年、2013~2014年。

综上,湖西区和浙西区协同主导环太湖总入湖水量的突变年份;对于出湖水量,则总体上是各水利分区综合影响叠加。

因2013年后系列较短,重点分析2007年突变情况。从表4可以看出,入湖总水量增加34.99亿 $m^3$ 。湖西区增量最大,为37.57亿 $m^3$ ,超过了总增量,湖西区入湖水量占比从46.7%大幅提升至65.0%。浙西区入湖水量(5.55亿 $m^3$ )位居第二,略有增长,但是占比下降2.3%。望虞河入湖水量显著增加(增量5.24亿 $m^3$ ),占比从2.8%翻倍至6.4%。杭嘉湖区与武澄锡虞入湖水量大幅减少,减量分别为6.42亿 $m^3$ 和8.11亿 $m^3$ 。出湖总水量增加19.08亿 $m^3$ 。杭嘉湖区出湖水量增量(6.61亿 $m^3$ )和增量占比(34.6%)均最高;其余主要分区增量1.94-3.43亿 $m^3$ ,增量占比10.2%-18.0%。

表4 环太湖入出湖水量突变前后对比分析

Tab.4 Comparative Analysis of Mutation in Inflow and Outflow from 1986 to 2024

		浙西区	杭嘉湖区	太浦河	阳澄淀泖区	望虞河	武澄锡虞区	湖西区	环太湖
入湖 (亿 $m^3$ )	1986-2006	18.93	10.11	0.09	0.89	2.23	10.90	37.80	80.94
	2007-2024	24.48	3.69	0.00	2.14	7.47	2.79	75.37	115.93
	增量	5.55	-6.42	-0.09	1.25	5.24	-8.11	37.57	34.99
	增量占比	15.9%	-18.4%	-0.3%	3.6%	15.0%	-23.2%	107.4%	
出湖 (亿 $m^3$ )	1986-2006	9.78	13.03	30.67	20.27	7.85	6.21	1.16	88.98
	2007-2024	11.87	19.64	32.86	23.69	11.29	8.15	0.56	108.06
	增量	2.08	6.61	2.20	3.42	3.43	1.94	-0.60	19.08
	增量占比	10.9%	34.6%	11.5%	17.9%	18.0%	10.2%	-3.1%	
入湖占比	1986-2006	23.4%	12.5%	0.1%	1.1%	2.8%	13.5%	46.7%	
	2007-2024	21.1%	3.2%	0.0%	1.8%	6.4%	2.4%	65.0%	
出湖占比	1986-2006	11.0%	14.6%	34.5%	22.8%	8.8%	7.0%	1.3%	
	2007-2024	11.0%	18.2%	30.4%	21.9%	10.4%	7.5%	0.5%	

2.1.3 时序周期性特征 采用连续小波变换分析了1986-2024年出湖和入湖水量序列的时频结构,并通过计算其方差系数,定量评估了二者在不同时间尺度上的稳定性。

小波系数实部等值线显示,入湖水量在正负相位间频繁交替,呈现丰枯交替的振荡格局(图4)。小波方差图识别出三个主周期:第一主周期为23a,在该尺度下,小波系数实部在1986-1989、1997-2003、2013-2020年为正相位,表示入湖水量多,在1990-1996、2004-2012、2021-2024年为负相位,表示入湖水量少,波动的平均周期长约为15a。第二主周期为14a,该尺度下入湖水量的变化幅度由低-高-低-高-低-高-低-高-低,波动的平均周期长约为10a;第三主周期为9a,2007年后信号增强,主要体现为2007-2024年的高频振荡。对出湖水量序列,同样呈现出丰枯交替的格局。识别出了四个主周期(图4),分别为25a、6a、14a和9a。第一主周期为25a,高低相位时间与入湖水量23a尺度下基本一致,波动的平均周期长为16a。第二主周期为6a,1995-2007年及2013-2024年信号显著,为出湖水量独有周期。

小波系数实部等值线可清晰展示周期震荡能量的时空传递路径。入湖水量的能量高频成分在2007年

发生突变，其方差贡献的中心由 14a 波段跃迁至 9a 波段。出湖水量的演化路径则呈现两阶段特征：第一阶段（约 2007 年）与入湖过程耦合，完成从 14a 到 9a 的转换；第二阶段（约 2013 年）则表现为能量进一步向 6a 的集中化过程，此尺度的方差贡献显著增强，成为新的主导周期。这一结果与突变分析一致。

出湖水量周期结构呈现“自然-人为”复合特征。其 25a 长周期与入湖周期同步，反映气候驱动的本底节律；而显著的 6a 短周期为出湖过程所特有，揭示了高强度人类活动对出湖水量的调制作用。这表明太湖出湖过程已演变为自然气候与人工调控共同作用的复合水文现象。

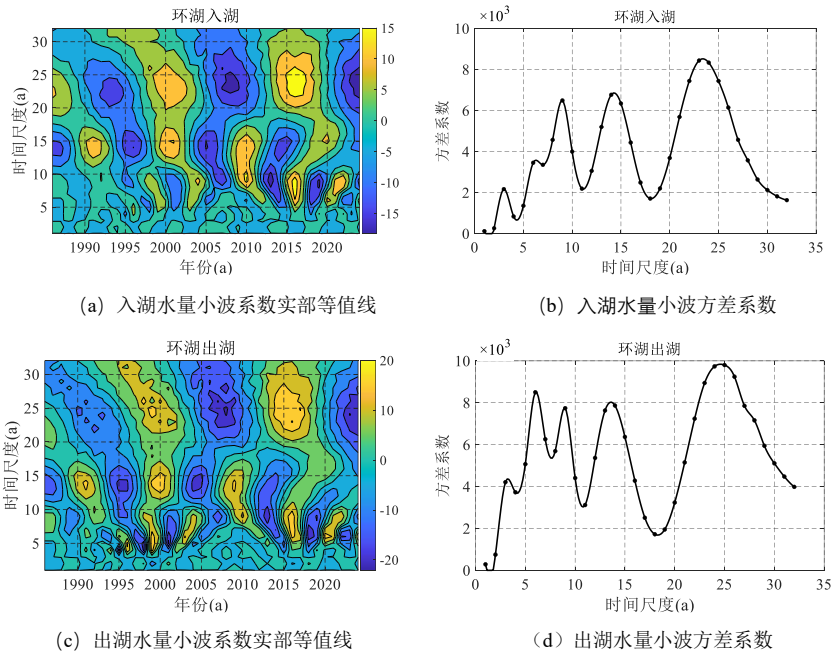


图 4 出入湖水量的的小波变换

Fig.4 The contour of continuous wavelet coefficients (left: a, c) and variance (right: b, d) for lake inflow and outflow

## 2.2 换水周期

2.2.1 时序变化 太湖年均水位自 1986 年以来呈显著上升趋势 ( $p < 0.05$ )，年均增幅 0.006 m (图 5 和表 5)。尽管湖泊蓄水量上升，但是由于出湖水量的快速上升，换水周期呈显著下降趋势 ( $p < 0.05$ )，年均降幅 1.59d，多年平均换水周期 213 d。叠加环湖取水后，换水周期下降更为显著，年均降幅达 2.57d，多年平均值为 201d。两类情景下太湖换水周期的降幅与均值差异，核心驱动因素为环湖取用水量对湖泊水文循环的额外干预。环湖取水属于湖泊河道外额外出湖项，其效应已通过太湖水位变化得以体现。不含环湖取水情景中，出湖量与水位对应的实际蓄量存在不匹配问题；而含环湖取水情景纳入年均 13.34 亿  $m^3$  的河道外取水数据，更合理地表征出湖水量。

表 5 年均水位、换水周期 TFPW-MK 趋势检验

Tab.5 Results of water level and Retention time from 1986 to 2024 measured with TFPW-MK method

项目	p 值	z 统计量	森斜率
年均水位	0.013	2.489	0.0064
情景一换水周期	0.019	-2.338	-1.593
情景二换水周期	0.005	-2.816	-2.571

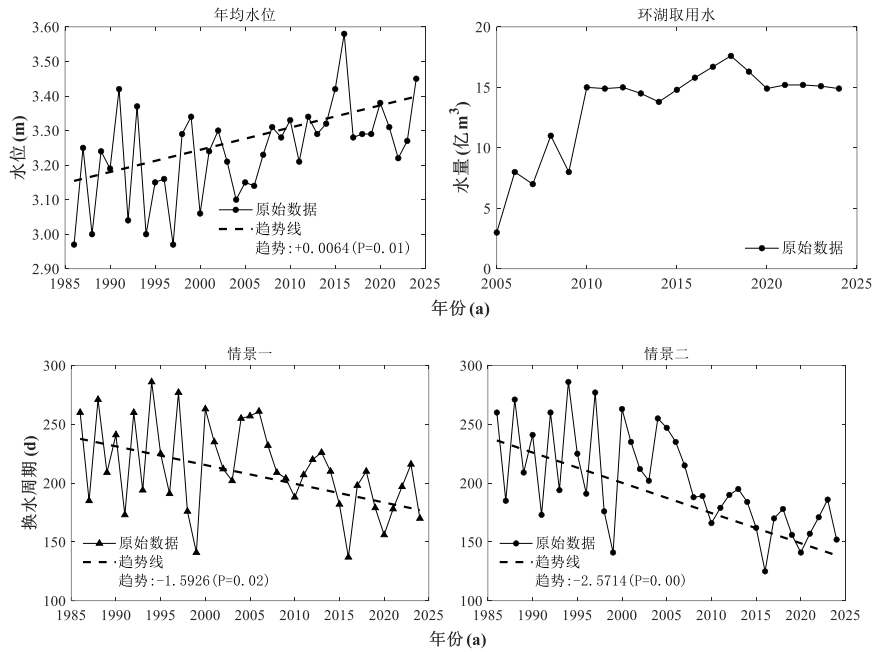


图5 太湖年均水位和换水周期的时序变化图

Fig.5 Variation of water level and Retention time

2.2.2 突变分析 1986年以来太湖年均水位在2007年发生突变(趋势转折、均值跃迁、分布变化)。情景一换水周期突变年份为2007年(均值跃迁)、2014年(均值跃迁和趋势转折),突变年份与环太湖出湖水量突变年份基本一致;情景二换水周期突变年份为2007年(趋势转折、均值跃迁、分布变化),环湖出湖水量加入河道外取用水量以后,突变年份2013年弱化下去了。

以2007年为界,前后两个系列水位对比,平均上升0.15m。不考虑环湖取用水,情景一换水周期下降32d;考虑取用水后,情景二换水周期减幅扩大至54天。

表6 年均水位及换水周期突变检验

Tab.6 Mutation of water level and Retention time

项目	MK 检验	滑动 t 检验(5-10 年窗口)	Pettitt 检验	累积距平	综合分析结果	1986-2006	2007-2024
年平均水位	2008	2007,2011	2007	2007	2007	3.17	3.32
情景一换水周期	2014	2007,2014	/	2007,2013	2007,2014	227	195
情景二换水周期	2010	2007,2014	2007	2007	2007	226	172

采用 Shapiro-Wilk 检验和独立样本 t 检验分析突变前后差异(表7)。经 Levene 检验确认方差不齐后,采用 Welch 校正 t 检验。分析表明,情景一换水周期突变前(1986-2006年)的均值为 227.3 d, 标准差为 40.5 d, 极其显著地高于突变后时期(2007-2024年)的 195.5 d 和 24.9 d, 平均差值为 31.8 d。考虑环湖取用水后,情景二换水周期均值和方差分别从突变前(1986-2006年)的 225.6 d 和 39.4 d 下降至 172.4 d 和 21.5 d, 下降 53.2 天

由于 Levene 检验表明数据方差不齐 ( $F = 7.450, P = 0.010$ ), 采用方差不齐修正的 Cohen's d 公式计算效应量, 情景一为 0.9、情景二为 1.7。根据 Cohen 的准则, 均属于一个非常大的效应量, 这表明 2007 年的水文突变不仅具有统计学显著性, 更导致了换水周期发生了实质性的缩短。

表 7 换水周期组统计量及独立样本检验

Tab.7 Group Statistics and Independent Samples Test

	变量 (分组)	N	均值+标准差	t 值	df	p 值	均值差值[95%CI]
情景一	组 1-突变前	21	227.3+40.45	3.003	33.82	0.005	31.83[10.28,53.38]
	组 2-突变后	18	195.5+24.91				
情景二	组 1-突变前	21	225.6+39.43	5.325	31.78	0	53.18[32.83,73.53]
	组 2-突变后	18	172.4+21.50				

注：N 系列长度，df 自由度，CI 置信区间

2.2.2 周期性特征 小波分析结果显示，太湖年均水位序列具有 14a、26a 的两个主周期。情景一换水周期序列呈现多周期嵌套的振荡结构，第一主周期为 9a，其次第二、三、四主周期分别为 14a、24a、6a，且从方差系数值可以看出，第二、三、四主周期与第一主周期震荡相差较小。考虑环湖取用水后，换水周期序列第一主周期变为 14a，第二、三主周期分别为 6a、9a，且对比第一主周期，周期震荡能量弱化了。

太湖年均水位的能量高频成分在 2007 年发生突变，其方差贡献的中心由 14a 波段跃迁至 24a 波段。情景一换水周期在 2007 年在 14a 和 9a 时间尺度下，均处于 0 等值线图区；2014 年在 9a 时间尺度下处于 0 等值线图区。情景二换水周期在 2007 年其 6a 尺度的震荡周期趋于结束。

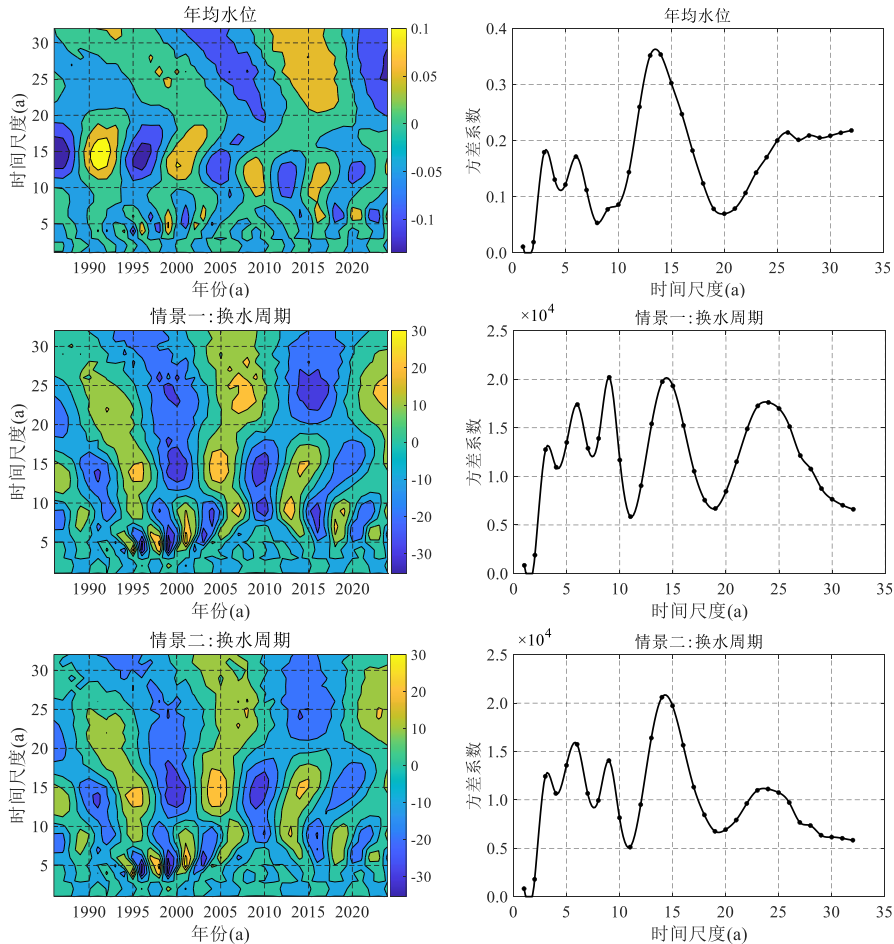


图 6 Morlet 小波变换系数实部等值线和方差系数图

Fig.6 The continuous wavelet coefficients(left) and variance(right) contour for water level and Retention time

总体来说太湖正在变成一个水流更替加速、与外界水体交换更频繁的湖泊，其水文节律受气候变化（降水）和人类活动（水利工程调控）双重驱动，且自 2007 年开始，驱动机制可能发生了改变。换水周期显著下降，说明出湖水量的增长速度，远快于湖泊蓄水量的增长速度。2007 年这个共同的突变年，两种情景下的换水周期的第一主周期与入湖水量的中短周期一致（9a, 14a），说明换水周期对年际尺度的水文波动高度敏感。太湖流域降水偏丰时，入湖径流量增大，太湖水位上升。依据防洪调度预案，水利工程（如太浦闸等）会主动加大下泄流量以控制水位。出水量的增加直接加快了太湖的水体置换速度，使得换水周期相较于平水年或枯水年明显缩短。

### 3. 讨论

#### 3.1 换水周期变化驱动因子识别

太湖入湖水量依赖于降水产生的径流以及人为长江引水。引水调度本身高度依赖于流域降水的丰枯情况：洪水期间，天然入湖水量大，太湖调洪同时加大下泄流量控制水位；枯水期间，引水补湖保障供水。这一丰出、枯引的动态过程，本质上是由降水格局所控制的。相关分析结果显示，2007 年前，换水周期与流域降水相关性要高于环太湖入湖水量。而之后换水周期与环湖入湖水量的相关系数明显上升，Pearson 相关系数从-0.747 升至-0.964，而与降水量的相关性减弱，Pearson 系数从-0.850 降至-0.768。Spearman 相关系数也表现出同样的趋势。入湖水量与流域降水相关，但是在当前太湖流域这一受人工高度调控的水网中，入湖水量受人工影响变得更为突出。综合可以判断，太湖流域降水是 1986-2006 年影响换水周期最核心的驱动机制，降水及其所主导的自然-人工复合调度过程，是 2007-2024 年影响太湖换水周期最核心的机制。

表 8 换水周期与流域降水量及环湖入湖水量的相关性检验

Tab.8 Correlation test of Retention time and precipitation、inflow in Taihu basin

系列	检验方法	情景一换水周期	情景二换水周期	
太湖流域降水量	1986-2006(n=21)	Pearson	-0.850**	-0.848**
		Spearman	-0.784**	-0.799**
	2007-2024(n=18)	Pearson	-0.768**	-0.725**
		Spearman	-0.546**	-0.573**
环太湖入湖水量	1986-2006(n=21)	Pearson	-0.747**	-0.751**
		Spearman	-0.745**	-0.758**
	2007-2024(n=18)	Pearson	-0.964**	-0.963**
		Spearman	-0.913**	-0.936**

注：\*\*表示在显著性水平 $\alpha=0.01$  下相关显著，\*表示在显著性水平 $\alpha=0.05$  下相关性显著，下同

#### 3.2 换水周期与主要入湖水量

环湖入湖水量由各水利分区组成，且各分区有各自的水文特性和调控措施。各分区入湖水量年均占比 1986-2006 年湖西区（46.7%）、浙西区（23.4%）、望虞河（2.8%）控制着整个入湖的 72.8%，2007-2024 年湖西区（65.0%）、浙西区（21.1%）、望虞河（6.4%）控制着整个入湖水量的 92.6%，武澄锡虞区由于水环境问题严格控制区域水入湖，只有汛期洪涝水位达到一定级别，才能在水质条件允许的条件下开闸入湖，由 1986-2009 年均入湖 10.43 亿  $m^3$  骤减到 2010-2024 年均入湖 1.907 亿  $m^3$ ；阳澄淀泖区亦然；杭嘉湖区由于南排、北排工程及太湖水位的抬高，入湖水量 2004 年突变，由 1986-2004 年年均入湖水量为 11.04 亿  $m^3$ ，降至 2005-2024 年均入湖仅为 3.448 亿  $m^3$ 。

从入湖水量组成看，湖西区、浙西区、望虞河（引江济太）是主要的入湖水量来源，其水量决定了换水周期的长短。随着近年太湖流域治理的推进，在枯水季节，为了补充水资源，引水调度已经常态化，这使得太湖整体的年入湖总水量上升，尽管太湖蓄水量也在突变后上升，但是并没有抵偿水量增加强化的换水周期下降。

浙西区入湖水量影响因素分析：浙西区入湖水量与降雨量相关系数 2007 年后有大幅下降，Pearson 相关系数从 0.919 降至 0.783，Spearman 系数从 0.917 降至 0.746（表 9）。这主要是：“一轮治太”东西苕溪防洪工程完工后，一是经东导流港各闸东排杭嘉湖水量进一步增加，二是环湖河道拓浚以后，河道坡降进一步减缓<sup>[25]</sup>，致使浙西区出湖水量呈上升趋势但不显著（表 2）。1986-2024 年浙西区年降水量系列呈显著上升趋势，西苕溪杨家埠站（流域控制面积 2265km<sup>2</sup>）呈显著上升趋势，但主要接纳东苕溪来水的杭长桥站（流域控制面积 2268km<sup>2</sup>）反而呈显著下降趋势，这说明经东导流港各闸进入杭嘉湖区的水量逐渐增多，这一结论与文献<sup>[25,26]</sup>研究一致。浙西区年降雨量、单站/段入湖水量突变年份与浙西区入湖水量突变年份基本一致（表 9）。

表 9 浙西区年降水及单站段趋势和突变检验

Tab.9 Trend and mutation test in Zhexi area

项目	浙西区年降水量	长兴(二)段年入湖水量	杨家埠站年入湖水量	杭长桥站年入湖水量
p 值	0.033	0.735	0.000	0.514
z 统计量	2.129	0.339	3.968	-0.653
森斜率	7.558	0.012	0.185	-0.037
突变年	2007,2014	2007,2014	2007	2007

湖西区入湖水量影响因素分析：湖西区年降水量系列呈上升趋势但未通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验（ $Z=1.333$ ,  $P=0.183$ ），但湖西区入湖水量呈上升趋势且通过  $\alpha=0.05$  的显著性检验。湖西区 1986-2006 年年入湖水量与年降雨量 Pearson 相关系数（0.488）、Spearman 系数(0.540)，与湖西区引江水量相关未通过显著性检验；与湖西区降水量 2007-2024 年的两种相关系数均高于 1986-2007 年的，且 2007-2024 年与引江水量相关系数 Pearson ( $r=0.435$ )、Spearman( $\rho=0.472$ )（表 10）。湖西区与沿江、武澄锡虞区的锡澄线存在水量交换，湖西区根据高低分开、高水高排的治理原则，逐步兴建与武澄锡低片的分界控制线工程（一轮治太工程），2007 年太湖蓝藻危机以后，无锡地区的水利工程调度出现了比较大的变化，为改善梅梁湖湾、贡湖湾的水质，不间断实施大渲河泵站和梅梁湖泵站联合调水入梁溪河工程，自 2007 年以来经梅梁湖、大渲河泵站抽引太湖水量年均 8.095 亿 m<sup>3</sup>，经梁溪河入苏南运河，这导致苏南运河洛社段的水文情势发生变化，2007 年甚至开始产生倒流现象，导致湖西区产水及客水的下泄路径发生变化，此部分水量经由湖西区入太湖，这也是湖西区入湖水量持续增加的原因之一<sup>[27]</sup>，这也是对降雨径流排江的一种补偿，同时引江水量更多的补充湖西区，因此 2007-2024 年湖西区入湖水量与降雨的相关系数较 1986-2006 年高，经锡漂运河安桥水文站（2024 年 5 月报汛）监测资料统计，2024 年 6 月至 2025 年 5 月，流向湖西区水量 13.21 亿 m<sup>3</sup>（无雨期间）。

表 10 浙西区与湖西区入湖水量与降水量及工程相关关系

Tab.10 Correlation test of inflow and precipitation 、pumping in Zhexi and Huxi

系列	检验方法	浙西区	湖西区	湖西区
		入湖与降雨	入湖与降雨	入湖与引江
1986-2006(n=21)	Pearson	0.919**	0.488*	0.346
	Spearman	0.917**	0.540**	0.351
2007-2024(n=18)	Pearson	0.783**	0.639**	0.435*
	Spearman	0.746**	0.598**	0.472*

#### 4 结论

1) 太湖出入湖水量近 40 年来均呈显著上升趋势（ $\alpha=0.05$ ），并于 2007 年发生统计突变。突变后，入湖和出湖年总水量分别增加 34.99 亿 m<sup>3</sup>和 19.08 亿 m<sup>3</sup>。出入湖变化空间差异明显。入湖方面，湖西区入湖水量及占比均呈  $\alpha=0.05$  的显著性上升趋势；浙西区入湖水量上升但不显著，占比下降但不显著；望虞河入湖

水量及占比均呈上升趋势但不显著。三个分区入湖水量合计由突变前的 72.8% 升至 92.6%。出湖方面, 望虞河呈  $\alpha=0.05$  的显著性上升趋势。出入水量也呈现出明显的多尺度周期性振荡。

2) 太湖换水周期与出入湖水量变化高度同步, 呈显著下降趋势 ( $\alpha=0.05$ )。2007 年发生突变, 换水周期较突变前明显缩短, 换水周期 (情景一) 从 227d 降至 195d。考虑环湖取用水后 (情景二), 换水周期下降的更低, 2007 年后平均为 172d。两种情景下的换水周期呈现 9a、14a 的多时间尺度的周期震荡。考虑取用水后, 出现了一个时间尺度为 6a 的周期。

3) 太湖换水周期在 2007 年突变前首要驱动因子为流域降水, 但是之后入湖水量 (降雨径流及人工调度的复合结果) 取代降水成为首要驱动因子。工程调度显著改变了湖西区与浙西区的入湖驱动机制: 湖西区由降水弱相关转为强负相关, 浙西区维持强负相关但相关性有所减弱。

本研究阐明了自然与人为因素共同作用下太湖出入湖水量和换水周期的演变过程, 识别了其突变年份, 并明确了突变后水利工程调度对换水周期的影响, 成果可为新的水文情势下太湖三水协同管理提供支撑。

## 5 参考文献

- [1] Huang XW. On the Gains and Losses of Taihu Basin Integrated Plan. *J Lake Sci*, 2002, **14**(3): 203-208. [黄宣伟. 论《太湖流域综合治理规划》的得失. 湖泊科学, 2002, **14**(3): 203-208.]
- [2] Zhu W, Zhou XP, Cai J, Lessons from comprehensive management of water environment in Taihu Basin. *Water Resources Protection*. 2016, 32 (3) :149-152. DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2016.03.028. [朱威, 周小平, 蔡杰. 太湖流域水环境综合治理及其启示. 水资源保护, 2016, 32 (3) :149-152.]
- [3] Wu HY, Lu ZH. Review and thinking of water management practice in Taihu Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*. *SHUILI XUEBAO*, 2021, 52(3):277-290. DOI:10.13243/j.cnki.slx.20200728. [吴浩云, 陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考. 水利学报, 2021, 52(3):277-290.]
- [4] Yang S, Wan RR, Li B. Hydrological connectivity research in Lake Taihu Basin: Status, progress and future challenges. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1055-1074. DOI:10.18307/2022.0402. [杨素, 万荣荣, 李冰. 太湖流域水文连通性: 现状、研究进展与未来挑战. 湖泊科学, 2022, **34**(4):1055-1074.]
- [5] 水利部太湖流域管理局《太湖志》编纂委员会. 太湖志. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [6] Tian JM, Wang YH, Ye C *et al.* Evolution of land use patterns in Taihu Lake Basin and its impact on water body's nitrogen and phosphorus load. *Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition*, 2010, **43**(2): 63-69. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4616.2020.02.011. [田甲鸣, 王延华, 叶春等. 太湖流域土地利用方式演变及其对水体氮磷负荷的影响. 南京师大学报: 自然科学版, 2020, **43**(2): 63-69.]
- [7] Ru JJ, Su WZ, Ye GB. Urban and rural construction land expansion hot area and flood risk assessment in Taihu Lake Basin. *Areal Research and Development*, 2019, **38**(3): 148-153. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2363.2019.03.027 [汝静静, 苏伟忠, 叶高斌. 太湖流域城乡建设用地扩张热区与洪涝危险性评价. 地域研究与开发 2019, **38**(3): 148-153.]
- [8] Li LJ, Hu QF, Wang YT *et al.* Spatiotemporal pattern of water yield changes over the Taihu Basin during the rapid urbanization process. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1289-1298. DOI 10. 18307 /2019. 0519. [李伶杰, 胡庆芳, 王银堂等. 快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空分布特征. 湖泊科学, 2019, 31(5) : 1289-1298.]
- [9] Ji HP, Wu HY, Wu J. Analysis of changes in the amount of water entering and leaving Lake Taihu from 1986 to 2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986-2017年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]
- [10] Xu RC, Pang Y, Hu ZB. Analysis on the water quantity changes from Jiangsu section entering Lake Taihu from 1990 to 2019. *J. Lake Sci*, 2021, **33**(3):797-805. DOI: 10.18307/2021.0315. [胥瑞晨, 逢勇, 胡祉冰. 1990—2019年江苏片区入太湖水量变化及原因分析. 湖泊科学, 2021, **33**(3) :797-805.]
- [11] Chen F, Wu PF, Liu JT *et al.* Estimation of water entering the western area of Taihu Lake Basin. *Water Power*. 2018, **44**(5):8-10. [陈方, 吴鹏飞, 刘金涛, 等. 太湖流域湖西区入湖水量估算研究. 水力发电, 2018, **44**(5):8-10.]
- [12] Wu J, Hu Y, Wu J *et al.* Variation of water quantity into western area of Taihu Lake and influence factors. *Journal of China*

- Hydrology*,2016,**36**( 3) : 44-49. [吴娟, 胡艳, 武剑等. 太湖流域湖西区入湖水量变化及原因初步分析. 水文, 2016,**36**( 3) : 44-49.]
- [13] Shen JY, Gan SW, Chen R *et al.* Analysis of influencing factors of inflow and outflow around Taihu Lake and countermeasures. *Water Resources Protection*,2011,**27**(6): 48-52.DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2022.06.012. [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. 水资源保护, 2011, **27**( 6) : 48-52. ]
- [14] Lin P, Chen QH, Li QF *et al.* Analysis on inflow and outflow of water resources zones around Taihu Lake and its contribution. *Water Resources Protection*, 2021,**37**(03):66-73. DOI:10.3880 /j.issn.1004-6933.2021.03.011. [林鹏, 陈启慧, 李琼芳, 等.环太湖各水资源分区入出湖水量及贡献分析.水资源保护, 2021,**37**(03):66-73.]
- [15] Wen YH, Wang ZY, Dong JG. Preliminary study on changing condition for inflow and outflow of Taihu Lake. *Yangtze River*,2014,**45**( 1) : 20-23.DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2014.01.007. [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. 人民长江, 2014, **45**( 1) : 20-23. ]
- [16] Wang XM, Zhai SH, Zhang HJ *et al.* Research on appropriate hydraulic retention time on basis of water quality improvement of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2017, **29**(1):9-21. DOI 10. 18307/2017. 0102.[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.湖泊科学, 2017, **29**(1):9-21.]
- [17] Zhu W, Cheng L, Xue ZP *et al.*Changes of water exchange cycle in Lake Taihu(1986-2018) and its effect on the spatial pattern of water quality. *J Lake Sci*, 2021,**33**(4):1087-1099. DOI 10.18307/2021.0411. [朱伟, 程林, 薛宗璞等.太湖水体交换周期变化(1986—2018年)及对水质空间格局的影响. 湖泊科学, 2021, **33**(4): 1087—1099]
- [18] 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 .
- [19] YUE S,WANG C Y. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the MannKendall Test [J] . *Water Resources Research*,2002,**38** ( 6) : 1-4 .
- [20] Ding LH, Xiao WG, Chen XH *et al.* Analysis of precipitation change trend in Binjiang River Basin. *Journal of China Hydrology*,2014,**34**( 5) : 67-74 . [丁华龙, 肖卫国, 陈晓宏等. 滨江流域降水时空演变规律分析. 水文, 2014, **34**( 5) : 67-74. ]
- [21] Zhang HR, Zhou JZ, Zeng XF *et al.* Inconsistency analysis of spatial and temporal evolution of precipitation and runoff in Jinshajiang River Basin. *Journal of China Hydrology*,2015,**35**( 6) : 90-96. [张海荣, 周建中, 曾小凡等. 金沙江流域降水和径流时空演变的非一致性分析. 水文, 2015,**35**( 6) : 90-96.]
- [22] 王苏民, 窦鸿身.中国湖泊志. 北京:科学出版社, 1998.
- [23] Wu Z, Lai X, Zhang L *et al.* Phytoplankton chlorophyll a in Lake Poyang and its tributaries during dry, mid-dry and wet seasons: A 4-year study. *Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems*, 2014, **412**: 1-13.
- [24] 朱海虹, 张本. 鄱阳湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [25] 卢七召. 东西苕溪入湖河道的变迁与水文情势变化分析. *浙江水利科技*, 2011, ( 5) : 6-9.
- [26] 胡尧文. 杭嘉湖地区引排水工程改善水环境效果分析 [学 位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010: 81-92.
- [27] 朱立国, 徐兴, 朱玲等. 苏南运河洛社段水文特性变化分析. *治淮*, 2023(4):4-5.