

## 太湖水体交换周期变化(1986—2018年)及对水质空间格局的影响\*

朱伟<sup>1</sup>, 程林<sup>1</sup>, 薛宗璞<sup>2\*\*</sup>, 冯甘雨<sup>1</sup>, 王若辰<sup>1</sup>, 张昱<sup>1</sup>, 赵帅<sup>1</sup>, 胡思远<sup>1</sup>

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

**摘要:** 针对太湖水体交换周期近十余年发生的变化, 本文收集整理了1986—2018年太湖水文巡测、汛期水文巡测数据以及太湖流域沿江城市引水量、流域降雨量变化数据, 基于太湖出入湖水量的变化研究了太湖水体交换周期的变化及原因, 并对交换周期变化对水质空间格局的影响进行分析。结果表明: 太湖入湖水量有显著上升, 2007年以来平均每年入湖水量增长30.8亿 $\text{m}^3/\text{a}$ 。水体交换周期显著下降, 2007年以后约为184 d, 相比2007年前下降了26 d。太湖流域及各水利分区近70年来, 除去2015和2016年, 降雨量无显著变化, 主要入湖区下垫面变化造成的入湖水量增加估算在每年2.0 $\text{m}^3$ 左右。太湖入湖水量增加主要集中在湖西区, 与沿江口门引水量明显相关。相比2007年前, 沿江口门引水量年均增长28.9亿 $\text{m}^3/\text{a}$ , 而这期间太湖入湖水量增量与这一引水有关。入湖水量的增加开始影响太湖存在的“西浊东清”水质结构, 水体交换周期缩短会使东西太湖水质出现均化的现象, 东部太湖水质会出现下降的趋势。

**关键词:** 太湖; 出入湖水量; 水体交换周期; 水质空间格局; 去除率

## Changes of water exchange cycle in Lake Taihu (1986–2018) and its effect on the spatial pattern of water quality\*

Zhu Wei<sup>1</sup>, Cheng Lin<sup>1</sup>, Xue Zongpu<sup>2\*\*</sup>, Feng Ganyu<sup>1</sup>, Wang Ruochen<sup>1</sup>, Zhang Yu<sup>1</sup>, Zhao Shuai<sup>1</sup> & Hu Siyuan<sup>1</sup>

(1: *College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

(2: *College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

**Abstract:** In view of the changes of Lake Taihu water exchange cycle in recent ten years, this paper collected and sorted out the hydrological survey data of Lake Taihu from 1986 to 2018, the water diversion quantity change of cities along the Yangtze River in Taihu Basin, rainfall change data of the basin, studied the changes and reasons of Lake Taihu water exchange cycle based on the changes of water inflow and outflow in Lake Taihu, and analyzed the effect of the change of water exchange cycle on water quality spatial pattern. The results show that the inflow of Lake Taihu has increased significantly, with an average annual inflow of 3.08 billion  $\text{m}^3/\text{a}$  from 2007. The water exchange cycle has dropped significantly. It is about 184 days after 2007, which is 26 days lower than that before 2007. Over the past 70 years in the Taihu Basin and various water conservancy divisions, except for 2015 and 2016, there has been no significant change in rainfall. The increase in the amount of water inflow into Lake Taihu caused by changes in the underlying surface of the main lake inflow area is estimated to be about 2.0  $\text{m}^3/\text{a}$ . The increase of water inflow into Lake Taihu is mainly concentrated in the west of Lake Taihu, which is obviously related to the water diversion along the Yangtze River. Compared with that before 2007, the water diversion volume along the Yangtze River has increased by 2.89 billion  $\text{m}^3$  on annual average, and the increase in the amount of water inflow into Lake Taihu during this period is related to this diversion. The increase of water inflow into Lake Taihu began to affect the water quality structure of “Turbid in the West and Clear in the East”. The shortening of the water exchange cycle will homogenize the water quality of east and west Lake Taihu, and the water quality of the east

\* 2020-12-12 收稿; 2020-12-25 收修改稿。

江苏省科技计划项目(BE2018737)和江苏省研究生培养创新工程研究生科研创新计划项目(B200203049)联合资助。

\*\* 通信作者; E-mail: xzp\_hhu@163.com.

Lake Taihu will show a downward trend.

**Keywords:** Lake Taihu; inflow and outflow; water exchange cycle; spatial pattern of water quality; removal rate

太湖经过十余年大力度的流域治理,入湖水质有明显改善、各种污染源得到削减.但自2016年以来磷出现反弹,2017年出现大面积的水华,尤其是东太湖也开始出现水华.磷反弹、水华持续大面积暴发、东太湖出现水华的原因得到了广泛的关注.

关于磷反弹的原因,出现了各种各样的推测,“全球气候变暖”<sup>[1]</sup>、“藻的泵吸”<sup>[2]</sup>、“引江济太”<sup>[3]</sup>、“2016年洪水”<sup>[4]</sup>、“东太湖水草的退化”<sup>[5]</sup>等,都成为了讨论的对象.在这些原因分析中,2016年特大洪水进太湖水量多出60.8亿 $\text{m}^3$ ,入湖磷通量比一般年份多出579.2 t,占近十年年均入湖磷通量的28%,是一般年份的1.3倍,对照赋存于太湖水体中的总磷大约为400 t,洪水造成的增量起到了较为关键的作用.而通过望虞河“引江济太”的年平均入湖水量占总入湖量8%左右,磷通量占近十年年均通量的4%左右,与洪水的影响相比是有限的.但从研究数据中发现,太湖总体的入湖水量有一定幅度的增加;同时,东太湖的水质下降、水华出现似乎与水体交换周期的缩短有一定的关系.而新孟河引水工程正在建设之中,建成后太湖总体形成“二引三排”的引排格局<sup>[6]</sup>(望虞河、新孟河引水,新沟河、走马塘、太浦河排水),在这种格局下,太湖的入湖水量、水体交换周期都会发生更大的变化,是否会改变目前“西浊东清”<sup>[7]</sup>的水质结构?因此,明确太湖入湖水量和水体交换周期的变化,对于顺应太湖水质规律进行科学调度是非常重要的.

对于太湖入湖水量变化已经有一些研究,季海萍等<sup>[8]</sup>分析了太湖1986—2017年出入湖水量的变化,认为太湖出入湖水量有显著的增加,推测是与水利工程调度有关.申金玉等<sup>[9]</sup>对湖西区入湖水量进行统计分析也得出了入湖水量增加的结论.在入湖通量方面,沈国华等<sup>[10]</sup>对太湖湖西区、武澄锡虞区入湖的污染物通量和太湖对应湖区的水质指标进行了分析,认为入湖污染物通量超过太湖自净能力,太湖污染有加剧的趋势.在太湖水质空间分布方面,王华等<sup>[5]</sup>通过分析太湖2010—2017年太湖总磷浓度的变化发现,太湖总磷浓度西北高、东南低,有显著的空间差异.在太湖自身净化能力方面,朱锦旗等<sup>[11]</sup>认为太湖水生植物对氮、磷有一定的截留能力,推测如果太湖外源总氮负荷小于1.83万t,总磷负荷小于1800 t,东太湖的水质也许可达到Ⅲ类水(GB 3838—2002).

各种迹象和研究都表明太湖的入湖水量有所增长,但太湖水体交换周期究竟发生了什么变化,引起这种变化的原因是什么?在下一步太湖治理以及加大“引江济太”力度的背景下,如何应对水体交换周期的变化?这些都需要进行预测和预判.

本文收集整理1986年以来太湖水文巡测、汛期水文巡测数据;太湖流域沿江城市引水量变化及流域降雨量变化数据,通过降雨、水文数据的综合计算分析研究1986—2018年太湖出入湖水量的变化;结合太湖分湖区的水质特征及变化,力求对太湖水体交换周期发生的变化及其原因以及可能引起的影响进行一次清晰而全面的分析.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

太湖流域面积36895  $\text{km}^2$ ,其中太湖湖区面积3192  $\text{km}^2$ (包括部分湖滨陆地)<sup>[6]</sup>,太湖湖区库容约为50亿 $\text{m}^3$ .流域内水面总面积约5551  $\text{km}^2$ ,出入太湖河流228条,其中主要入湖河流有22条.太湖流域属亚热带季风气候区,降水丰沛,四季分明,夏季炎热.年平均气温14.9~16.2 $^{\circ}\text{C}$ ,多年平均降水量1177 mm.太湖流域地跨江苏、浙江、上海两省一市,人口约6104万人.2018年全流域国内生产总值约87663亿元,全流域用水量约342.9亿 $\text{m}^3$ .太湖流域及湖区分区见图1.

### 1.2 数据来源

太湖出入湖水量及沿江主要闸门引水量数据收集自太湖流域管理局水文水资源监测局对环太湖各单站及巡测断面出入湖水量的整理<sup>[12]</sup>,时间范围为1986—2018年.太湖分湖区水质数据收集自2008—2018年《太湖健康状况报告》<sup>[13]</sup>.以上数据均为年均值数据,数据采集及整编方法见相关研究.

1951—2018年太湖流域年降雨量数据收集自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>).

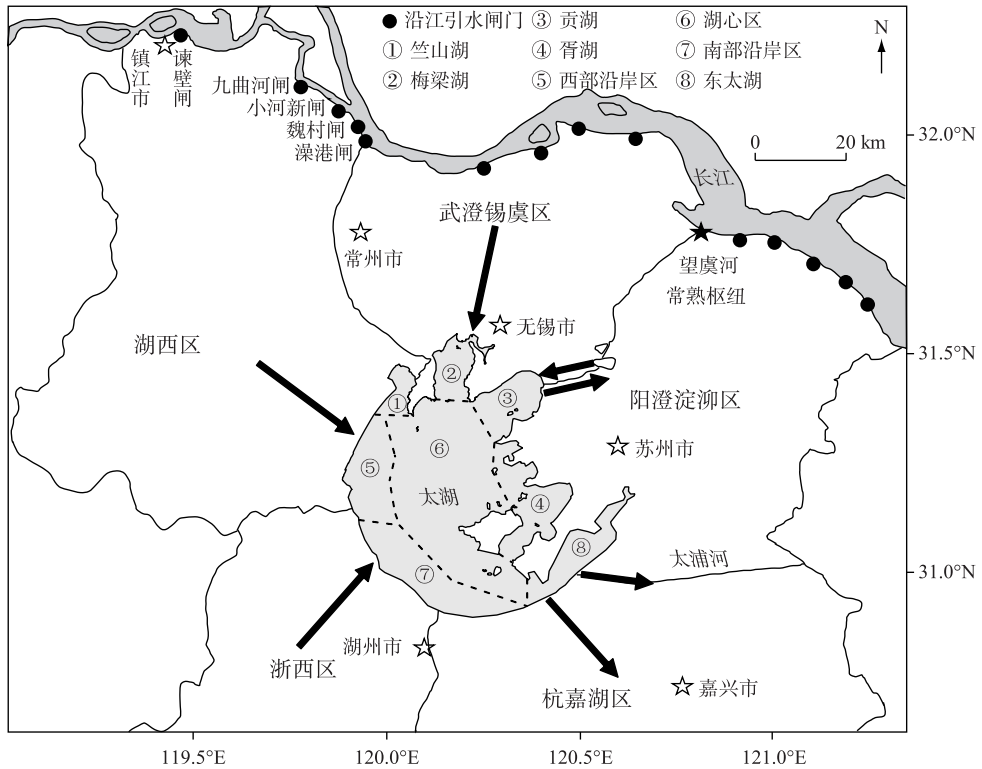


图1 太湖流域及湖区分区示意

Fig.1 Diagram of Taihu Basin and division

太湖流域主要城市建筑用地面积基于1980、1990、2000、2010、2015和2018年6期Landsat TM/ETM遥感影像数据,经过几何校正、辐射标定、大气校正、影像镶嵌和灰度直方图匹配等前期处理,采用目视解译法,承接前一期影像分解结果的基础上解译斑块增量,获取各期建筑用地变化情况,并与各城市统计年鉴进行对比。

### 1.3 数据分析

Mann-Kendall 检验采用 Visual Basic 编程完成,相关性检验在 SPSS 20 软件中完成,插值拟合在 Matlab 2018 中完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 太湖水量的变化

2.1.1 湖区 将太湖出入湖水量、蓄水量、年均水位、水体交换周期绘制成图2,数据变化趋势及出现突变年份见表1。

由图2可以看出,2007年之前平均入湖水量为80.8亿 $m^3$ ,出湖水量为88.9亿 $m^3$ ,2007年以后逐渐增加,平均入湖水量为111.6亿 $m^3$ ,出湖水量为104.8亿 $m^3$ ,入湖水量增加30.8亿 $m^3$ ,出湖水量增加15.9亿 $m^3$ ,由于无锡、苏州等沿湖城市用水量增加,故出湖水量增量小于入湖水量<sup>[14]</sup>。太湖的水位、库容变化不大,水位的波动幅度有所减小。在2007年之前,太湖水体交换周期的年际波动比较大,在120~280d范围内波动,平均为210d;2007年后,波动范围减小,在120~250d范围内波动,平均为184d,2007年前后平均减少了26d。

关于入湖水量等的变化属于自然波动还是外因影响,使用了Mann-Kendall 突变检验法进行分析,结果见表1。从分析结果可以看出2007年后太湖入湖水量和水体交换周期的增加属于明显突变性现象。湖泊蓄

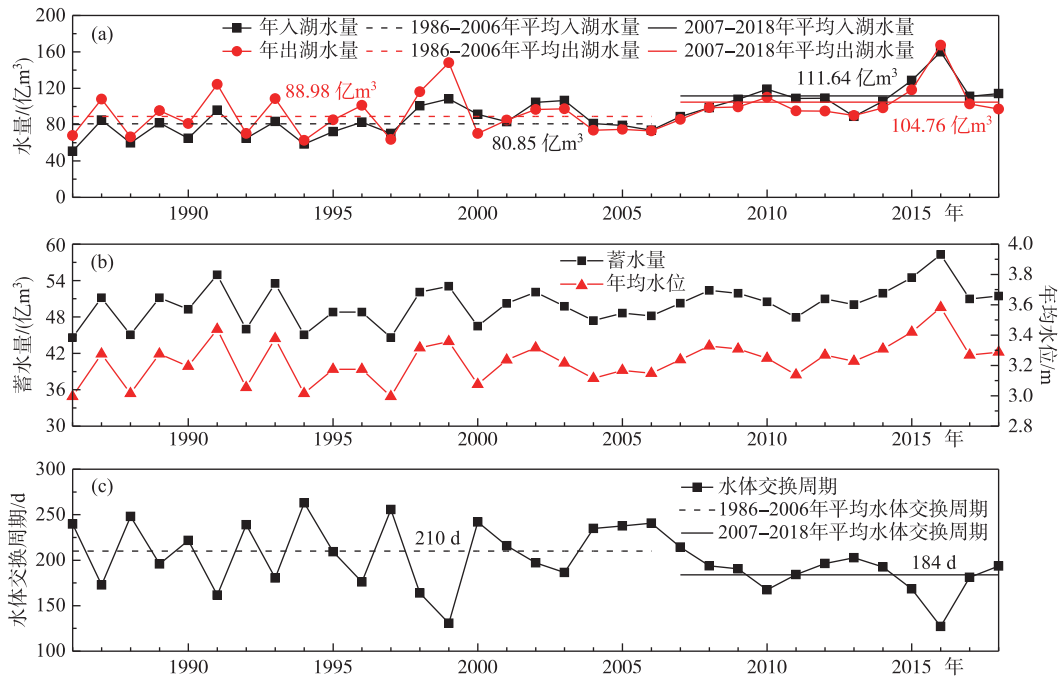


图2 太湖水循环变化

Fig.2 Changes of water cycle in Lake Taihu

表1 太湖水循环序列 Mann-Kendall 检验

Tab.1 Mann-Kendall test of water cycle sequence in Lake Taihu

指标	入湖水量	出湖水量	蓄水量	平均水位	水体交换周期
趋势	4.66 ***	1.97 *	2.01 *	2.00 *	-1.78 *
突变年	2007 年	—	—	—	2007 年

\*\*\*  $P < 0.001$ ; \*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$ ; “—”代表无突变趋势或突变年(下同).

水量、平均水位、出湖水量的增加也是确定的现象.

2.1.2 各水利分区入湖水量变化 按照一般的太湖流域分区,将环湖各分区入湖水量及占比绘制成图3. 由图3可以看出,太湖入湖水量主要来源的湖西区在2001年前年均入湖水量41.1 亿  $m^3$ ,2002年后年均入湖水量67.4 亿  $m^3$ . 浙西区年均入湖水量变化不大,约为20.4 亿  $m^3$ . 望亭水利枢纽入湖水量增加明显,从2000年前的年均0.31 亿  $m^3$ 增加为2000年后的年均7.37 亿  $m^3$ . 从入湖水量占比来看,太湖入湖水量主要来源的湖西区在2001年前占比为50.8%,从2002年开始占比逐年上升,到2018年占比达到64.5%. 另外一个显著增加的是望亭水利枢纽,占比从0.6%增加到8%,这显然是“引江济太”的效应. 而浙西区在2000年开始有明显的下降,占比从22.3%减少到18.7%;杭嘉湖区占比从2000年前的14%,减少到5%.

对各水利分区入湖水量的 Mann-Kendall 趋势检定和 Mann-Kendall 突变检验法分析结果见表2. 可以看出,从2002年开始湖西区发生了显著的入湖水量增长. 另外一个显著增长的是经过望亭水利枢纽的入湖水量,突变年是2000年.

## 2.2 太湖水体交换周期的变化

2.2.1 长江—太湖引水量变化 收集整理了长江(江苏段)沿江主要口门(图1)的引水量数据,考虑到太湖流域下游水系来水基本不汇入太湖,而以望虞河为界的上游水系才能够汇入太湖<sup>[15]</sup>. 因此主要考虑望虞河西区域的引水状况. 太湖流域多为河网地区,西北高、东南低,从长江的引水一般会汇入区域河网然后向东

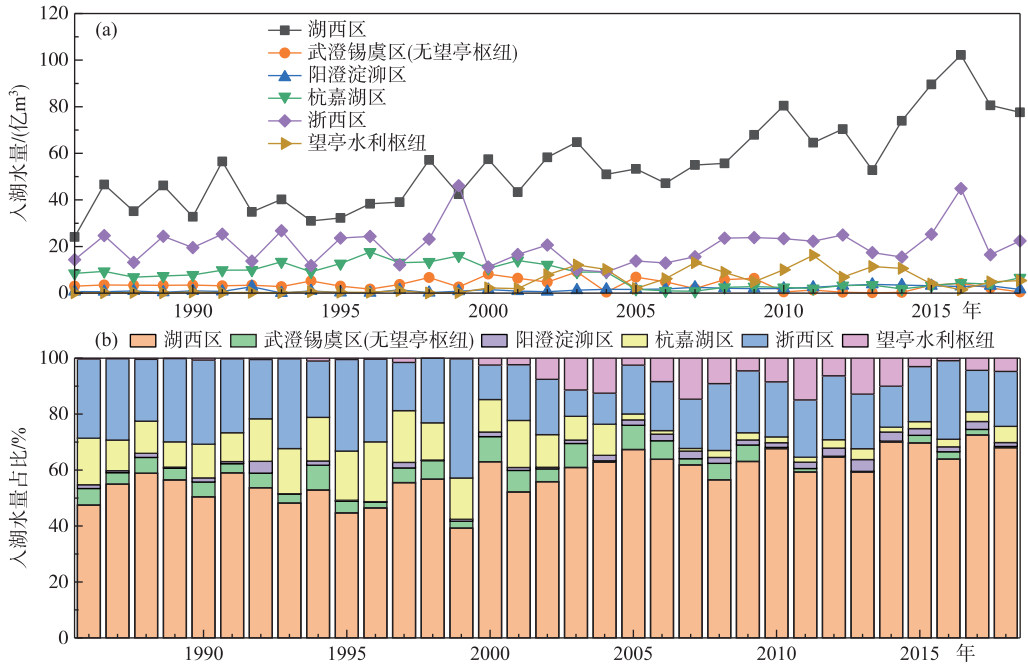


图3 环太湖分区入湖水量及其占比

Fig.3 Inflow water and its proportion in the districts around Lake Taihu

表2 环太湖分区入湖水量序列 Mann-Kendall 检验

Tab.2 Mann-Kendall test of water inflow sequence around Lake Taihu

指标	湖西区	武澄锡虞区(无望亭枢纽)	浙西区	望亭水利枢纽
趋势	5.28 ***	-1.33 ***	—	4.45 ***
突变年	2002	2009	—	2000

南方向流去,汇入太湖的可能性较大。

上游沿江口门引水量变化见图4。2002年前这些沿江口门引水量很小,2003年开始沿江口门引水量开始增加,2007年及以后,沿江口门年均引水量约为35.93亿m<sup>3</sup>,累计引水431.2亿m<sup>3</sup>。其中“引江济太”年均引水量为8.11亿m<sup>3</sup>,累计引水入湖97.3亿m<sup>3</sup>,相比2007年之前,“引江济太”之外的沿江口门年均引水量增长了27.8亿m<sup>3</sup>/a。从沿江口门引水量和排水量变化的关系来看,2007年后湖西区主要沿江口门年净引水量是17.6亿m<sup>3</sup>,武澄锡虞区(无望亭枢纽)年引水量和排水量相当。

从各水利分区入湖水量与对应的沿江口门引水量相关性分析(表3)来看,湖西区入湖水量的增加与湖西区沿江口门引水量有显著的正相关( $P < 0.05$ ),而与武澄锡虞区(无望亭枢纽)则没有相关性。

从数据来看,2007年以后湖西区5个主要闸门引水量没有特别显著的增减变化(图5a),因此使用5个闸门的年均引水量绘制成了图5b。而湖西区主要闸门的年均引江水量在21.56亿m<sup>3</sup>左右,5个沿江闸门引水量相对比较均匀,各闸门年引水量变化范围为3.86亿~5.10亿m<sup>3</sup>。

2.2.2 太湖流域近70年降雨量变化 统计了1951—2018年太湖全流域平均及上游水利分区的降雨量变化,上游水利分区是入湖水量占总水量88%的湖西区、浙西区和武澄锡虞区(图1),年降雨量变化结果见图6。由图可见,这3个区域降雨量平均值接近,波动较大。总体而言,浙西区年降雨量大于湖西区和武澄锡虞区,2016年这3个区域的年降雨量均是1951年来的最大值。

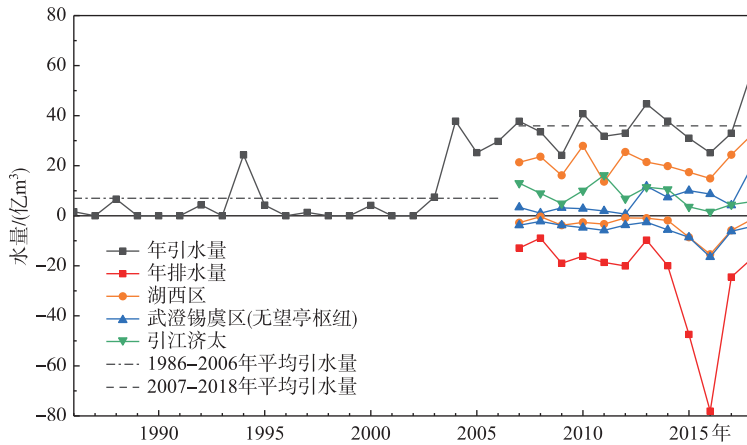


图 4 沿江口门引排水量变化

Fig.4 Variation of water diversion at the entrance along the Yangtze River

表 3 水利分区入湖水量与引江水量相关性检验

Tab.3 Correlation test of water inflow into lake and water diversion from the Yangtze River in water conservancy subarea

水利分区	湖西区	望亭枢纽	武澄锡虞区(无望亭枢纽)
湖西区	0.47 *	—	—
望亭枢纽	—	1.00 ***	—
武澄锡虞区(无望亭枢纽)	—	—	-0.28

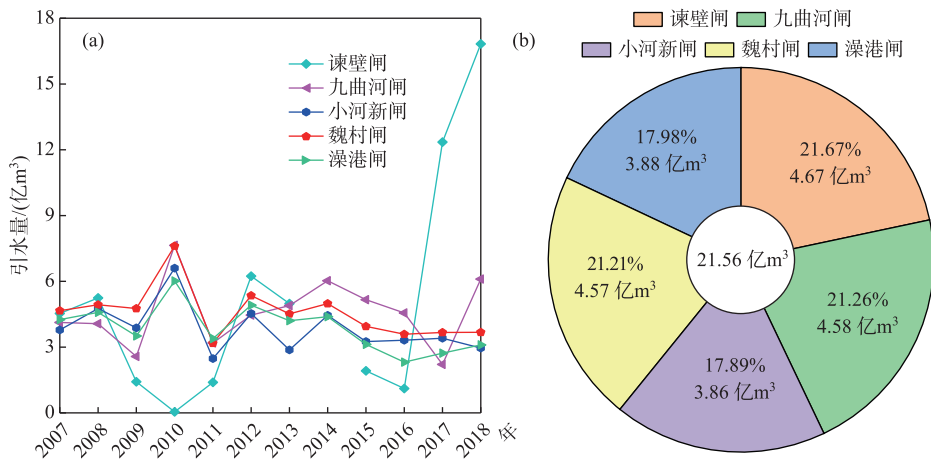


图 5 湖西区各沿江闸门引水量年际变化及年均引水量

Fig.5 Interannual variation and annual average water diversion of gates along the Yangtze River in the west area of Lake Taihu

对太湖全流域平均及上游地区降雨量的 Mann-Kendall 趋势检定和 Mann-Kendall 突变检验法分析结果见表 4。可以看出,太湖全流域及上游水利分区年降雨量均没有发生突增。

2.2.3 太湖流域近 10 年降雨量及径流量分析 以太湖入湖水量突变增加的 2007 年为界,将太湖全流域平均

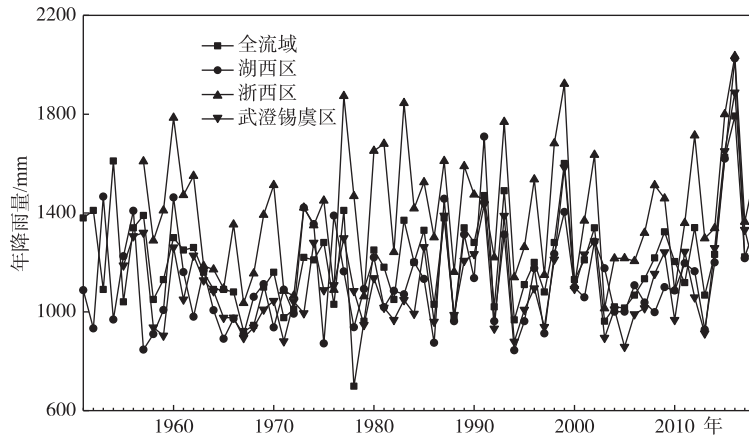


图 6 太湖流域年降雨量变化

Fig.6 Annual rainfall variation in Taihu Basin

及上游水利分区 2007—2018 年逐年的降雨量、径流量与 2007 年前平均值的差值绘制成图 7。从降雨量上看,2007 年后太湖全流域平均及上游水利分区的年降雨量均值相较之前有所上升,上升范围为 92.41~116.18 mm。但由于 2015、2016 年是太湖流域五十年来年降水量最多的两年,如不包括这两年的极端情况,2007 年后太湖全流域平均年降雨量相较之前仅增加了 31.41 mm,是多年平均的 2.6%。浙西区年均降雨量相较之前仅增加了 18.27 mm,是多年平均的 1.6%。而主要入湖水利分区湖西区的年均降雨量相较之前减少了 25.25 mm。因此,在排除 2015、2016 两个极端年份的情况下,近十年太湖流域降雨量并没有显著增加,而主要入湖的水利分区湖西区降雨量还存在减少的情况。

从径流量变化来看,全湖及湖西区入湖水量相较之前增加显著,每年都高于之前的均值,而浙西区、武澄锡虞区无此现象。全太湖年入湖水量增加了 30.8 亿  $m^3$ ,而湖西区入湖水量增加了 28.2 亿  $m^3$ 。从降雨与径流量的关系来看,除 2015、2016 两个强降雨年以外,全太湖和湖西区降雨量变化不大,而入湖径流量增加显著,两者之间关联性不强。降雨量相比之前减少的年份,全太湖和湖西区年入湖水量仍比之前有所上升。但流域出现特大降雨的年份(2015、2016 年),流域出现洪水,入湖径流量是受降雨量影响的。

2.2.4 下垫面变化对入湖水量的影响 太湖流域主要城市建筑用地的增加会造成流域下垫面硬化,从各城市 1980—2018 年的建筑用地面积变化来看(图 8),增加较多的是下游的上海市、苏州市和无锡市,增加范围是 891~2116  $km^2$ ,而湖西区、浙西区的主要城市常州、镇江和湖州则增加较少,增加范围是 344~730  $km^2$ 。以太湖入湖水量开始增加的 2007 年为界,与 2010 年相比 2018 年入湖水量最大的湖西区、浙西区的主要城市常州、镇江和湖州的建筑用地面积仅增加了 100  $km^2$  左右,和其他区域相比变化较小。而上海市和苏州市增加的建筑用地面积较大,均大于 250  $km^2$ 。这主要由于太湖流域上游的湖西区 and 浙西区以山地为主,而下游地区以平原为主,发展速度存在差异性<sup>[16]</sup>。

从下垫面硬化造成的产流增加量来看,南京水利科学研究院李伶杰等<sup>[16]</sup>以 1991、1999 和 2009 年降雨量为前提进行了分析。相对于 1985 年,2010 年太湖流域建筑面积增加 5291  $km^2$ ,湖西区、浙西区和武澄锡虞区共增加约 396  $km^2$ ,这种下垫面条件变化所造成的湖西区产流量增量最大值约为 1.0 亿  $m^3$ ,而浙西区约为 0.5 亿  $m^3$ 。而 2010—2018 年湖西区 and 浙西区主要城市建筑用地增加幅度在 100  $km^2$  左右,小于 1985—2010 年阶段的 396  $km^2$ ,因此这一阶段湖西区由于下垫面硬化造成的年均入湖水量增量不会超过 1985—2010 年期间的增量,应该在 1.5 亿  $m^3$  以内。如果以 2007—2018 年下垫面变化造成的增量估算,应该在 2.0 亿  $m^3$  左右。

表 4 环太湖年降雨量序列 Mann-Kendall 检验

Tab.4 Mann-Kendall test of water inflow sequence around Lake Taihu

指标	湖西区	武澄锡虞区	浙西区	全流域
趋势	—	—	—	—
突变年	—	—	—	—



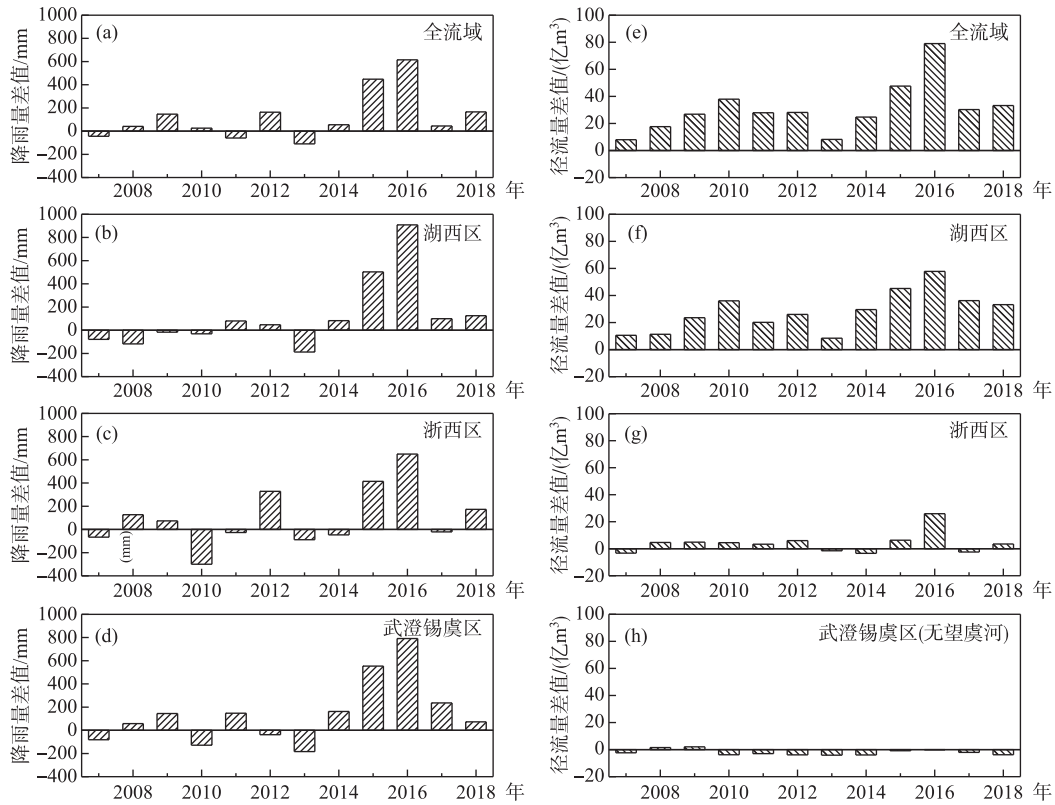


图 7 太湖流域降雨量、径流量变化差值(以 2007 年前平均值为基数)

Fig.7 Difference of rainfall and runoff changes in Taihu Basin( Based on the pre-2007 average value)

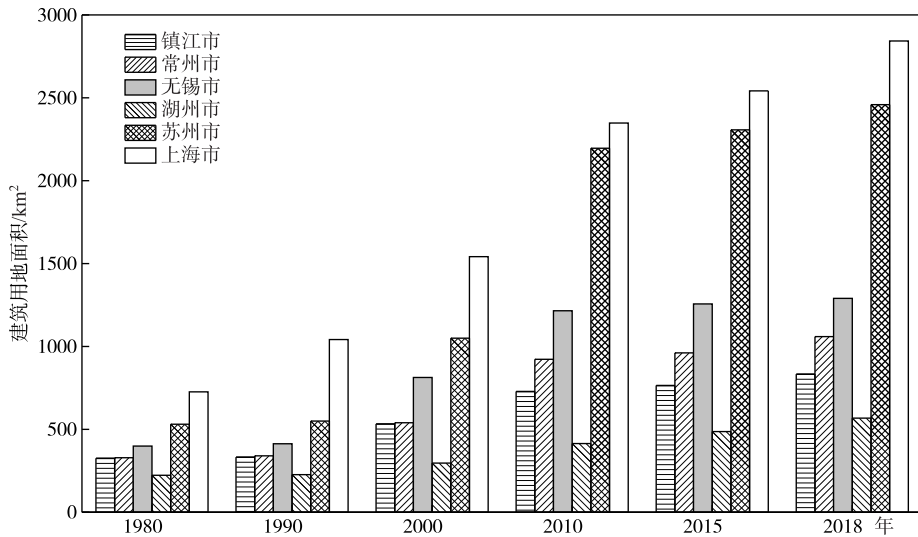


图 8 太湖流域建筑用地面积变化

Fig.8 Construction land area changes in Taihu Basin



2.2.5 湖西区水量变化对水体交换周期的影响 2007年后湖西区入湖水量占太湖总入湖水量的60%以上,且湖西区年入湖水量比2007年之前年均增加了28.2亿 $m^3$ ,是太湖入湖水量增量(30.8亿 $m^3$ )的主要来源.若湖西区入湖水量维持在2007年前的平均水平,将湖西区入湖水量不增加时的水体交换周期与实际的水体交换周期绘制于图9.由图可见,湖西区水量的增加显著降低了太湖的水体交换周期,减少范围是13.2~81.3 d.

### 2.3 太湖水质的空间变化

2.3.1 分湖区水质差异 太湖主要入湖水量来自湖西区,主要出湖水量从太浦闸流出,中间流经竺山湖、湖心区和东太湖,“引江济太”调水主要从贡湖进入太湖.研究入湖—出湖之间的水质变化规律,选取太湖这4个湖区作为研究区域,分析总氮(TN)浓度、总磷(TP)浓度和微囊藻生物量的变化(图10).

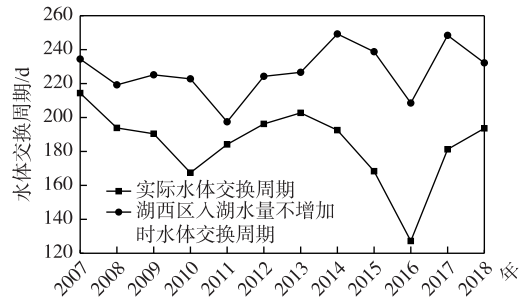


图9 湖西区入湖水量增加对水体交换周期的影响

Fig.9 The influence of increasing water inflow on water exchange cycle in the west area of Taihu Basin

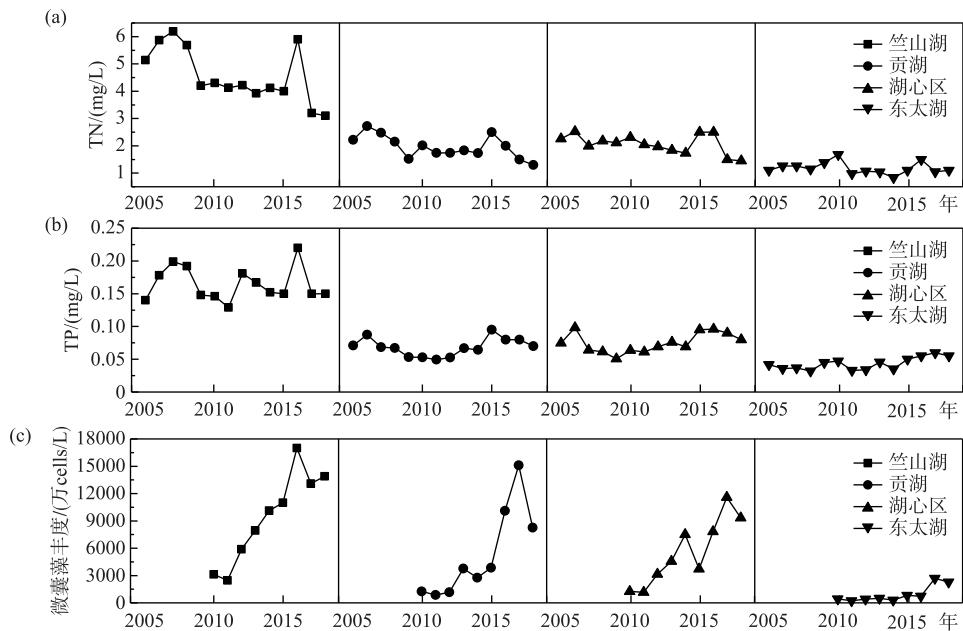


图10 太湖分湖区水质及微囊藻丰度差异

Fig.10 Differences of water quality and *Microcystis* abundance in the sub-lake areas of Lake Taihu

从TN浓度变化来看(图10a),接近湖西入湖区的竺山湖显著大于湖心区和东太湖,贡湖则与湖心区相当.从时间上看2005—2018年太湖各湖区TN浓度呈下降趋势,但是4个湖区2016年均出现TN浓度回升,但此后又回到之前的水平附近.从空间上看,太湖TN浓度存在明显的自西向东的下降趋势,而且下降幅度很大,达到73.4%.

TP浓度变化(图10b)在空间上的变化规律与TN浓度类似,也呈现显著的自西向东的下降趋势,下降幅度也很大,达到73.1%.但在时间上从2005—2014年各湖区都出现下降趋势,从2015年,尤其是2016年磷出现显著回升,此后维持在回升的水平上,而相对于原有水平东太湖TP浓度上升尤其明显,2018年比2005年上升了31.9%.

从微囊藻生物量变化可以看出(图 10c). 时间上,除东太湖以外其他几个湖区都在 2007—2008 年期间生物量显著增长,2017 年达到峰值. 东太湖是在 2016 年之前变化不明显,而在 2017 年有明显的上升且并没有回落. 空间上的变化规律与水质相似,西部高、东部低,从竺山湖、贡湖、湖心区不断减少,到东太湖锐减到其他湖区的 13.8% 左右.

2.3.2 太湖水体交换周期变化对水质的影响 太湖具有非常突出的特点也就是水质及微囊藻的生物量存在明显的空间差异,表现出西北湖区差、东南湖区好的显著趋势,可以称为“西浊东清”的特点. 也就是太湖具有显著的降解、沉降、转化、截流氮、磷污染物的能力(以下统称为净化),从湖西区进入太湖至太浦闸流出的过程中,这种净化作用充分发挥,氮、磷浓度显著下降,东太湖成为水质良好的清水系统. 东部苏州、上海金泽、嘉善太白荡的水源地也因此得到良好的水源. 将湖西区入湖污染物浓度与太浦闸出湖污染物浓度通过去除率来定量评价这一净化过程,去除率为:

$$\text{去除率}_i = \frac{\text{入湖}_i - \text{出湖}_i}{\text{入湖}_i} \quad (1)$$

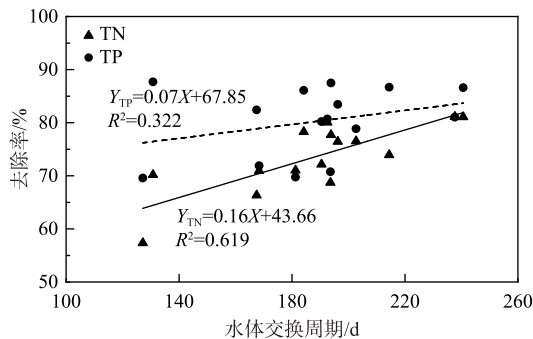


图 11 太湖水体交换周期与水质去除率的关系

Fig.11 The relationship between water exchange cycle and water quality removal rate in Lake Taihu

式中, $i$  为水质指标(TN 浓度、TP 浓度). 收集整理每年太湖水质的去除率与对应的该年太湖水体交换周期绘制成图 11. 由图可见,太湖 TN、TP 的去除率均与水体交换周期有显著的正相关关系( $P < 0.05$ ),显然从目前数据来看,太湖水体交换周期越长,太湖对入湖河水的净化效果越好,入湖河流平均携带的 74.1% 的氮和 79.4% 的磷被太湖净化. 针对太湖去除率与水体交换周期的关系进行拟合得到公式(2)~(3).

$$R_N = 43.66 + 0.16E_r \quad (2)$$

$$R_P = 67.85 + 0.07E_r \quad (3)$$

式中, $R_N$  为 TN 去除率(%), $R_P$  为 TP 去除率(%), $E_r$  为水体交换周期(d).

### 3 讨论

#### 3.1 太湖水体交换周期的变化

长期来看,太湖的水循环发生了什么变化? 从 2.1 节的结果可见,入湖水量增加是毋庸置疑的,2007 年开始呈现突变增加的趋势,相比 1986—2006 年的平均值增加了 30.8 亿  $\text{m}^3$ /年. 按照秦伯强等<sup>[17]</sup>估算的 1966—1988 年太湖年均入湖水量只有 52.5 亿  $\text{m}^3$ ,2007 年后太湖年均入湖水量约是 1980s 之前的 2.13 倍.

从太湖蓄水量和年均水位来看,1986 年以来也有增加,以 2007 年为界,2007—2018 年太湖蓄水量比之前多了 2.67 亿  $\text{m}^3$ /a,年均水位上升了 0.11 m. 这主要因为 2010 年开始执行的《太湖流域洪水与水量调度方案》相比 1999 年的《太湖流域洪水调度方案》,将防洪控制水位上调了 0.1 m<sup>[18]</sup>.

从太湖出湖水量和交换周期来看,由于入湖水量增加,湖泊蓄水量增加不大,出湖水量也显著增加,相应的湖泊水体交换周期下降明显. 以 2007 年为界,2007—2018 年太湖水体交换周期平均值为 184 d,比 1986—2006 年的平均值 208 d 减少了 26 d/a. 参照秦伯强等<sup>[17]</sup>估算的 1966—1988 年太湖蓄水量与出湖水量的平均值,1980s 太湖水体交换周期约为 308 d,约是现在的 1.67 倍.

#### 3.2 太湖入湖水量增加的原因

太湖流域除自流域降雨产流以外,从长江向河网引水也会引起入湖水量的增加. 以 Mann-Kendall 趋势检定来看,1951—2018 年之间年降雨量并没有显著的规律性变化趋势,但 2016 年的降雨量是 1951 年来的最大值,可能对后十年的平均值产生了一定的影响. 水利部太湖流域管理局吴浩云等<sup>[19]</sup>对太湖全流域及各水利分区 1951—2011 年的年降水量、汛期降水量及年最大 30 日降水量进行分析,也认为降雨量并无显著变化趋势. 另一方面由于太湖流域城镇化速度发展非常快,下垫面的硬化也会造成产流系数的增加,具有在相

同降雨量下产流量增加的可能. 占入湖水量 88% 的湖西区、浙西区、武澄锡虞区由于建筑用地增加造成下垫面硬化的面积远小于下游的城市<sup>[16]</sup>, 在 1985—2010 年建筑面积增加 396 km<sup>2</sup>, 径流量增加了 1.5 亿 m<sup>3</sup>, 而 2010—2018 年期间建筑面积增加 1000 km<sup>2</sup> 左右, 径流量的增加不会超过 1.5 亿 m<sup>3</sup>. 时间尺度换算为 2007—2018 年, 主要产流区(湖西区、浙西区、武澄锡虞区)由于下垫面硬化造成的年均入湖水量增量不会大于 2.0 亿 m<sup>3</sup>.

从长江向河网引水量的变化来看, 增量是显著的, 以 2007 年为界, 2007—2018 年望虞河以西的沿江口门年均引水量增长 28.9 亿 m<sup>3</sup>/a. 但实际情况有可能多于这个数据, 因为沿江还有一些小的涵闸, 其引水数据未能够收集并纳入本次计算. 有文献报道<sup>[9]</sup>2000 年左右沿江口门经过工程改造, 从排水为主变为引水为主. 从引水量、降雨量与入湖水量的相关性分析(表 3)来看, 沿江口门引水和太湖水量增加之间具有非常显著的关联性, 可以认为沿江口门引水进入太湖是太湖入湖水量增加的主要原因之一. 考虑到流域下垫面<sup>[16]</sup>变化可能造成不超过 5 亿 m<sup>3</sup> 水量增加, 沿江口门引水的效应相当于 23 亿 m<sup>3</sup> 左右的水量增加, 而望虞河“引江济太”工程自 2003 年开始常态运行, 为太湖入湖水量提供了 7.99 亿 m<sup>3</sup>/a 的增量.

此外, 从入湖水量发生突变的时间点分析(表 2), 变化开始于 2002 年, 而入湖水量与沿江口门引水量的分析(表 3)表明湖西区的引江水量的相关性最强, 这些证据又与湖西区沿江口门完成工程改造的时间一致, 从这些时间点的重合上也可以证明沿江口门引水对入湖水量产生的影响.

### 3.3 水体交换周期变化对太湖总磷及水华的影响

入湖水量的增加对太湖总磷与水华有怎样的影响? 湖西区的引水应该是从 2002 年以后开始, 2007 年以后引水量波动但年际差异不大. 2015 年发生洪水, 入湖水量较大, 2016 年发生大洪水后太湖总磷浓度开始上升. 2016 年特大洪水导致大量 TN、TP 输入, 磷通量一次性增加 579 t<sup>[4]</sup>, 太湖的水质也在此后得到响应, TP 的反弹尤为明显.

收集国内外典型湖泊的水体交换周期, 并按 2.3.2 节的方法计算了这些湖泊对入湖河流总磷的去除率, 结果绘制在对数坐标图 12 上. 显然从目前的数据来看, 当湖泊水体交换周期较长时, 对入湖河流的总磷去除效果较好. 匈牙利的巴拉顿湖<sup>[20-22]</sup>、美国的伊利湖<sup>[23-24]</sup>水体交换周期在 3~4 a, 其对入湖河流总磷的去除率年均均在 90% 以上. 中国的洪泽湖<sup>[25-26]</sup>、洞庭湖<sup>[27]</sup>、鄱阳湖<sup>[28]</sup>水体交换周期仅有 20~40 d, 其对入湖河流总磷的去除率年均只有 24.8% 左右, 表现出较低的去除效果. 太湖、巢湖<sup>[29]</sup>等水体交换周期在 100~300 d, 对总磷的去除率也在二者之间, 大约在 63.8% 左右. 从这一规律上来看, 如果太湖入湖水量进一步增加, 水体交换周期进一步下降, 太湖对入湖河流总磷的去除率会继续降低, 太湖总磷浓度平均值尤其是东太湖的总磷浓度也可能进一步上升, 太湖“西浊东清”的水质结构会因此受到影响. 另一方面, 水体交换周期较短的湖泊由于湖水流速快, 紊动剧烈, 一般不容易形成水华, 如洪泽湖等水体交换周期极短的湖泊尽管其总磷高于太湖, 但是少见水华暴发的报道. 对于太湖而言, 水体交换周期长对于饮用水水源地的东太湖、胥湖保持低营养的清水状态是有利的, 但通过望虞河“引江济太”加快交换可能对于缓解西部湖区水华暴发有益. 理想的方法是引江水进入太湖西北部, 在不影响太湖水体总体交换周期的前提下加快西北部的水循环.

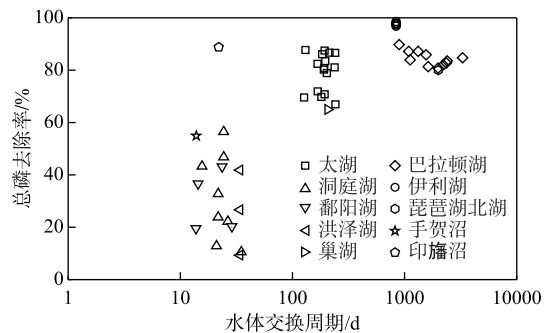


图 12 典型湖泊水体交换周期与总磷去除率的关系

Fig. 12 The relationship between typical lake exchange cycle and total phosphorus removal rate

## 4 结论

1) 太湖入湖水量有显著上升, 2007 年来相比之前, 平均每年入湖水量增长 30.8 亿 m<sup>3</sup>/a. 水体交换周期显著下降, 现在约为 184 d, 相比 2007 年前下降了 26 d.

2) 太湖流域及各水利分区近 70 年来降雨量无显著变化. 太湖入湖水量增加主要集中在湖西区, 与沿江口门引水量明显相关. 2007 年以来沿江口门引水量的变化不大, 相比 2007 年前, 年均引水量增长 28.9 亿  $\text{m}^3/\text{a}$ , 而这期间太湖入湖水量增量与这一引水有关.

3) 太湖存在显著的“西浊东清”的水质结构, 东部的水质良好依赖于太湖自身的净化作用, 目前来看, 水体交换周期越长, 东部 TN、TP 浓度的降低幅度越大.

4) 入湖水量增加一直对太湖水质产生着影响, 而 2016 年突然出现的磷反弹, 显然与这一年发生的特大洪水一次性多增加 579 t 磷通量有着显著的关系. 2016 年洪水造成的年度性水体交换周期缩短已经对东部太湖水质产生了不利的影响.

## 5 参考文献

- [ 1 ] Yang Z, Zhang M, Shi XL *et al.* Nutrient reduction magnifies the impact of extreme weather on cyanobacterial bloom formation in large shallow Lake Taihu (China). *Water Research*, 2016, **103**: 302-310. DOI: 10.1016/j.watres.2016.07.047.
- [ 2 ] Yang LY, Yang XY, Ren LM *et al.* Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 18-27. DOI: 10.18307/2019.0102. [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. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 18-27.]
- [ 3 ] Zhu W, Xue ZP, Zhang YM *et al.* Effect of water diversion from the Yangtze River to Lake Taihu on total phosphorus rebound after 2016. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1432-1445. DOI: 10.18307/2020.0518. [朱伟, 薛宗璞, 章元明等. “引江济太”对 2016 年后太湖总磷反弹的直接影响分析. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1432-1445.]
- [ 4 ] Zhu W, Hu SY, Feng GY *et al.* Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: A case study of Lake Taihu in 2016. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 325-336. DOI: 10.18307/2020.0201. [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. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 325-336.]
- [ 5 ] Wang H, Chen HX, Xu ZA *et al.* Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(4): 919-929. DOI: 10.18307/2019.0421. [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. 湖泊科学, 2019, **31**(4): 919-929.]
- [ 6 ] National Development and Reform Commission of the People's Republic of China ed. The overall plan for the comprehensive management of the water environment of the Taihu River Basin (revised in 2013), 2013. [中华人民共和国国家发展和改革委员会. 太湖流域水环境综合治理总体方案(2013 年修编), 2013.]
- [ 7 ] Zhu GW, Zou W, Guo CX *et al.* Long-term variations of phosphorus concentration and capacity in Lake Taihu, 2005-2018: Implications for future phosphorus reduction target management. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 21-35. DOI: 10.18307/2020.0103. [朱广伟, 邹伟, 国超旋等. 太湖水体磷浓度与赋存量长期变化(2005-2018 年)及其对未来磷控制目标管理的启示. 湖泊科学, 2020, **32**(1): 21-35.]
- [ 8 ] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017. *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.]
- [ 9 ] Shen JY, Shi YD, Gan SW *et al.* Changing trend of water entering western area of Taihu Lake Basin and causal analysis. *Water Resources Protection*, 2011, **27**(4): 48-50, 54. DOI: 1004-6933(2011)04-0048-03. [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. 水资源保护, 2011, **27**(4): 48-50, 54.]
- [ 10 ] Shen GH, Wang Q. Influences of input and output flow on water environment in Taihu Lake. *Water Resources Research*, 2013, **29**(1): 46-50, 60. DOI: 1004-6933(2013)01-0046-05. [沈国华, 王谦. 太湖进出水量变化对水环境的影响. 水资源研究, 2013, **29**(1): 46-50, 60.]
- [ 11 ] Zhu JQ, Xu HL. Study on the nitrogen and phosphorus environmental capacity of Lake Taihu. *Yangtze River*, 2008, (18): 29-31. [朱锦旗, 徐恒力. 太湖水域氮、磷环境容量研究. 人民长江, 2008, (18): 29-31.]
- [ 12 ] 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: 1004-6933(2011)06-0048-05. [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.]
- [ 13 ] Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources ed. The health status report of Taihu Lake. [水利部太湖流域管理局. 太湖健康状况报告.]

- [14] Shen GH, Chen Y. Analysis of water inflow and outflow changes in Taihu Lake. *Jiangsu Water Conservancy*, 2008, (2): 27-28. [沈国华, 陈颖. 太湖进出水量变化分析. 江苏水利, 2008, (2): 27-28.]
- [15] Han CL, Mao R. The structure characteristics and the functional variation of the river systems in Taihu lake catchment. *J Lake Sci*, 1997, **9**(4): 300-306. DOI: 10.18307/1997.0403. [韩昌来, 毛锐. 太湖水系结构特点及其功能的变化. 湖泊科学, 1997, **9**(4): 300-306.]
- [16] 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.]
- [17] Qin BQ, Hu WP, Chen WM eds. The evolution process and mechanism of Taihu Lake water environment. Beijing: Science Press, 2004. [秦伯强, 胡维平, 陈伟民. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004.]
- [18] Wu HY, Sun HT. Formulation and understanding of flood and water dispatching plan in Taihu Basin. *China Flood & Drought Management*, 2012, **22**(2): 5-7. [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. 中国防汛抗旱, 2012, **22**(2): 5-7.]
- [19] Wu HY, Wang YT, Hu QF *et al.* Tempo-spatial change of precipitation in Taihu lake basin during recent 61 years. *Journal of China Hydrology*, 2013, **33**(2): 75-81. [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. 水文, 2013, **33**(2): 75-81.]
- [20] Kovács, Clement A. Impacts of the climate change on runoff and diffuse phosphorus load to Lake Balaton (Hungary). *Water Science and Technology*, 2009, **59**(3): 417-423. DOI: 10.2166/wst.2009.883.
- [21] Istvánovics V, Somlyódy L. Factors influencing lake recovery from eutrophication—the case of Basin 1 of Lake Balaton. *Water Research*, 2001, **35**(3): 729-735. DOI: 10.1016/S0043-1354(00)00316-X.
- [22] Dávid L, Telegdi L eds. The influence of watershed development on the long-term eutrophication of lake balaton. Modeling and Managing Shallow Lake Eutrophication. Berlin, Heidelberg: Springer, 1986: 366-377. DOI: 10.1007/978-3-642-82707-5\_15.
- [23] Baker DB, Confesor R, Ewing DE *et al.* Phosphorus loading to Lake Erie from the Maumee, Sandusky and Cuyahoga rivers: The importance of bioavailability. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(3): 502-517.
- [24] Bertram PE. Total phosphorus and dissolved oxygen trends in the central basin of Lake Erie, 1970–1991. *Journal of Great Lakes Research*, 1993, **19**(2): 224-236. DOI: 10.1016/S0380-1330(93)71213-7.
- [25] Li B, Pu PM. Study on the evolution tendency of water quality in Huai river basin and Hongze lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2003, **12**(1): 67-73. [李波, 濮培民. 淮河流域及洪泽湖水质的演变趋势分析. 长江流域资源与环境, 2003, **12**(1): 67-73.]
- [26] Cheng Z, Sun X. Analysis of water pollution status and development trend of Hongze Lake. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 1996, **9**(1): 15-18. [程钟, 孙祥. 洪泽湖水污染状况及其发展趋势分析. 江苏环境科技, 1996, **9**(1): 15-18.]
- [27] Zhang GG, Lu SY, Tian Q. Analysis of spatial-temporal variations of total nitrogen and total phosphorus concentrations and their influencing factors in Dongting Lake in the past two decades. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(11): 2377-2385. [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. 环境化学, 2016, **35**(11): 2377-2385.]
- [28] Liu FG, Wang SG, Guo YY *et al.* Spatial-temporal variations of pollutant fluxes of inflow and outflow of Lake Poyang (2008–2012). *J Lake Sci*, 2014, **26**(5): 641-650. DOI: 10.18307/2014.0501. [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). 湖泊科学, 2014, **26**(5): 641-650.]
- [29] Chaohu Administration Bureau of Anhui Province ed. Health report of Chaohu Lake in 2018, 2018. [安徽省巢湖管理局. 2018 巢湖健康状况报告, 2018.]