

“引江济太”对 2016 年后太湖总磷反弹的直接影响分析*

朱伟¹, 薛宗璞^{2**}, 章元明³, 翟淑华³, 冯甘雨¹, 王若辰¹, 陈怀民¹, 胡思远¹, 赵帅¹, 周娅³

(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)

(3: 太湖流域水资源保护局, 上海 200080)

摘要: 针对“引江济太”工程将总磷浓度偏高的长江水引入太湖后对 2016 年后太湖总磷反弹的影响, 本文实测并收集整理了 2016 年前后“引江济太”调水入湖水量、磷通量及全太湖入湖水量、磷通量与太湖磷存量等数据, 对 2016 年前后“引江济太”调水入湖水量、磷通量、磷形态与其他入湖河道水量、磷通量、磷形态以及全太湖的水质、受水区贡湖的水质进行了分析。结果表明: 2016 年前后, “引江济太”年均入湖磷通量为 97.56 t, 年均入湖水量为 8.16 亿 m³, 从调水量、入湖磷通量、调水后短期磷响应及各湖区磷增量来看, “引江济太”与 2016 年后太湖总磷反弹相关性不强。“引江济太”调水累计入湖磷通量为 877.97 t, 占太湖总入湖磷通量的 4.58%, 累计入湖水量占太湖累计入湖水量的 7.36%, 单位水量携带的磷通量仅为其他来水的一半左右, 占比相对有限。与太湖主要入湖河流相比, “引江济太”调水属于优质来水, 湖泊的入湖河流总磷浓度一般都高于湖泊本身的总磷浓度, “引江济太”调水总磷浓度偏高属于正常范围。目前“引江济太”工程在保证供水安全、缓解水华危机的同时对处于严重富营养化状态的太湖具有一定的改善效果, 但未来引水量增加的情况下, 必须继续关注引水带来的磷通量与太湖磷循环系统的关系, 确保“引江济太”对太湖继续产生良性的影响。

关键词: 太湖; “引江济太”; 磷; 入湖通量; 磷反弹

Effect of water diversion from the Yangtze River to Lake Taihu on total phosphorus rebound after 2016*

ZHU Wei¹, XUE Zongpu^{2**}, ZHANG Yuanming³, ZHAI Shuhua³, FENG Ganyu¹, WANG Ruochen¹, CHEN Huaimin¹, HU Siyuan¹, ZHAO Shuai¹ & ZHOU Ya³

(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*)

(3: *Taihu Basin Water Resources Protection Bureau, Shanghai 200080, P.R.China*)

Abstract: In order to figure out the influence of the water diversion from the Yangtze River Project (WDP) on the rebound of total phosphorus (TP) concentration in Lake Taihu after 2016, this study analyzed the water quantity, phosphorus flux and phosphorus form of Yangtze River and other inflowing rivers including Lake Taihu and Gonghu Bay around 2016 based on the data of water quantity, phosphorus flux transfer from Yangtze River and the phosphorus stock in the lake. The result shows that the average annual phosphorus flux into the lake was 97.56 t and the average annual water inflow volume was 816 million m³ around 2016. From the perspective of water volume, phosphorus flux into the lake, short-term phosphorus response after water diversion and phosphorus increment in each lake area, the correlation between the WDP and the TP rebound in the lake after 2016 is not strong. The cumulative phosphorus flux from the WDP was 877.97 t, accounting for 4.58% of the total TP flux into the lake, and the accumulative amount of lake water accounted for 7.36% of the accumulative amount of lake water in Lake Taihu, the phosphorus flux per unit of water is only about half of that of other water, which accounts for a relatively limited proportion. Compared with the main inflow rivers of Lake Taihu, the water quality from Yangtze River is good. The TP concentration in the inflow rivers is generally higher than

* 2020-02-21 收稿; 2020-03-27 收修改稿。

江苏省科技计划项目 (BE2018737) 和中央高校建设世界一流大学 (学科) 和特色发展引导专项资金项目联合资助。

** 通信作者; E-mail: xzp_hhu@163.com.

the TP concentration of the lake itself. At present, in addition to ensuring the safety of water supply and alleviating the water bloom crisis, the incoming water from the WDP has certain improvement effect when the lake is serious eutrophic. In the next step, we must pay attention to the relationship between the phosphorus flux brought by water diversion and the phosphorus circulation system in Lake Taihu, so as to ensure the ongoing WDP continue to have a positive impact.

Keywords: Lake Taihu; water diversion from the Yangtze river Project; phosphorus; flux of lake inflow; total phosphorus rebound

太湖流域位于长江三角洲南缘,地跨江苏、浙江、上海三省市,面积 3.69 万 km²,人口稠密、城市集中、经济发达。太湖也是承载长三角地区社会发展的重要水源地,在长三角一体化的发展趋势下太湖的地位更加重要。从 1980s 开始,太湖出现富营养化问题,2007 年爆发了影响巨大的水危机事件。此后,太湖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。但是 2016 年以来,太湖总磷(TP)浓度出现反弹现象^[1,2],2017 年出现较大的水华面积,直至 2019 年 TP 浓度没有下降的趋势。一时间,TP 浓度上升的原因得到广泛的讨论^[2-5],各种解释纷沓而至,其中关于“引江济太”是否造成太湖 TP 浓度上升的讨论也成为一热点。

近几年上海经由太浦河使用太湖水的水量增加、浙江湖州使用太湖水的水量也在增加^[6],而“引江济太”主要是为了解决太湖周边城市水资源的问题所开展的引水调度工程。“引江济太”第一期工程是经由望虞河将长江水引入贡湖,正在建设的第二期工程是通过新孟河将长江水引入竺山湖。当然“引江济太”除了水资源的利用之外,也有期望通过引水缓解水华的发生,尤其是防止水华在水厂取水口附近聚集的功能。2005 年起“引江济太”工程进入长效运行^[7],截止目前各方面的研究都认为“引江济太”促进了太湖有序流动,合理调控了太湖水位,满足了流域用水需求,缓解了太湖水华大面积暴发,在提升流域水资源和水环境承载能力方面发挥了重要作用^[8-12]。

但 2016 年以来,太湖 TP 浓度异常升高,打破了 2010 年以前平缓下降的趋势。朱广伟等^[1,3]分析了 2005—2017 年太湖北部梅梁湾、贡湖湾、竺山湾及西北沿岸、湖心区北部的氮、磷营养盐变化,发现 2015—2017 年水体 TP 浓度有升高趋势。王华等^[2]对全太湖 33 个监测点 2010—2017 年 TP 浓度进行分析,同样得到 2010—2014 年上下波动,2015 年呈上升趋势,2016 年达到 8 年期间最高值的结果。另一方面,长江水源的 TP 浓度高于太湖 TP 浓度,据水利部太湖流域管理局(以下简称太湖局)公开的《“引江济太”年报》统计,2010—2018 年“引江济太”经望虞河入湖水体的 TP 浓度年平均值为 0.118 mg/L,2010—2018 年全太湖 TP 浓度月平均值为 0.076 mg/L,由于经望虞河引入太湖的长江水磷指标高于太湖平均水平^[13]，“引江济太”是否引起太湖 TP 浓度升高自然而然引起各方面的关注。

关于“引江济太”对太湖水质的影响,之前研究者有过一些研究。贾锁宝等^[14]、姜宇等^[15]整理了 2007 年“引江济太”入湖口及太湖内无锡、苏州几个主要取水水源地的逐日总氮(TN)、TP 数据,认为“引江济太”开始调水后,无锡、苏州主要取水水源地的 TN、TP 浓度下降,对缓解取水口蓝藻污染起到了重要作用。燕姝雯等^[16]整理了 2009 年环太湖水文巡测(入湖河道水质)及同时期湖内水质监测数据,发现“引江济太”受水湖区贡湖湾水质明显好于竺山湖和西部沿岸区,认为“引江济太”调水对太湖水质改善有积极作用。马倩等^[17]则在 2009—2010 年 3 次调水期间从入湖口到贡湖内部布点采样,发现虽然长江水 TP 浓度高于贡湖湾,但入湖后 TP、溶解性总磷(DTP)浓度以 10%/km 的速度迅速降低,至贡湖湾湖心时已接近于贡湖湾的原始 TP 浓度。毛新伟等^[18]将“引江济太”的水质与 2007—2016 年环湖主要入湖河流水质进行比较,发现“引江济太”入湖水水质好于太湖主要入湖河道的平均水质,认为引水有利于太湖水质的改善。

但仍然有一些重要问题存在各种议论。2016 年以后太湖磷的反弹是否与江济太入湖有关? 这个问题需要进行认真的研究和讨论。从“引江济太”对太湖磷循环系统的长期影响来看,比太湖水 TP 浓度偏高的长江水的长期引入是否会造成太湖内部磷的累积? 这种累积是否会引起磷循环的变化而造成磷的升高? 中远期新孟河“引江济太”工程运行后,加大引水量是否会对太湖磷的降低不利? 这些都是值得关心的问题。

本研究使用近 10 年实测的太湖贡湖湾水质数据和太湖 33 个监测点及环太湖 22 条出入湖河道的水量、水质、磷通量数据以及“引江济太”调水水量、水质、磷通量数据,对 2016 年前后“引江济太”输入太湖的 TP 情况进行了分析,对“引江济太”总体引入的 TP 通量与总输入通量及基本循环进行比较分析,结合国内外典型湖泊入湖河流 TP 浓度与湖体 TP 浓度之间的关系,对“引江济太”遇到的新老问题进行了对比与分析。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况及采样点划分

“引江济太”工程由常熟枢纽引长江水通过望虞河经望亭水利枢纽进入太湖,引水河道望虞河南起太湖边沙墩口,北至长江边的耿泾口. 沿线经过苏州市相城区、无锡市新吴区、锡山区和常熟市,全长 62.3 km,其中河道段 60.3 km、入湖段 0.9 km、入江段 1.1 km.

“引江济太”受水区贡湖湾是太湖东北部靠近无锡市的大型湖湾型水域,面积约 150 km². 平均水深约 1.8 m,西南部湾口连通梅梁湾与太湖湖心,东北角承接望虞河(图 1a). 该地区为亚热带季风气候,年平均气温为 16℃,年平均降水量为 1016 mm.

为监测“引江济太”入湖水质及受水区贡湖湾的水质,太湖局在望亭立交闸下(近太湖一侧)及贡湖湾内共布置了 5 个采样点(图 1b).

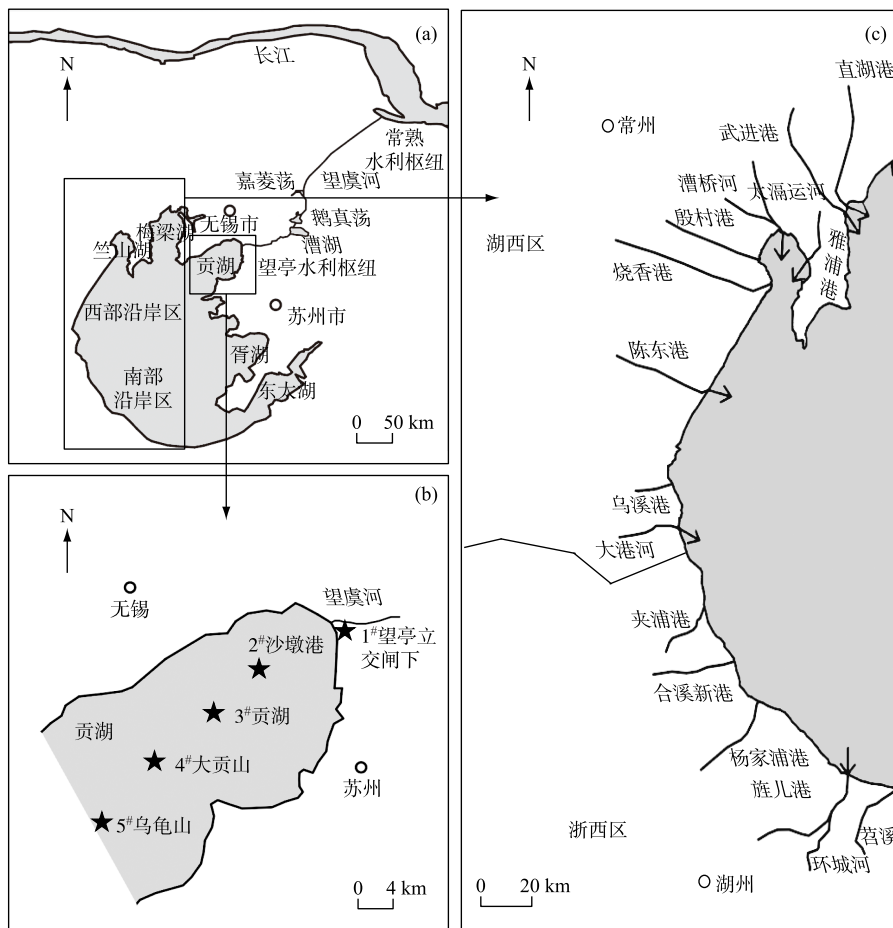


图 1 贡湖湾内和望虞河河口采样点布设以及太湖主要入湖湖区

Fig.1 Sampling sites in Gonghu Bay and Wangyu River and the main lake areas in Lake Taihu

1.2 环太湖入湖河道流量、磷通量和全湖磷浓度、磷存量数据来源及采样频次

环太湖河道入湖流量、磷通量和全湖磷浓度、磷存量数据由太湖局提供. 环太湖入湖河道流量、磷通量和全湖磷浓度、磷存量年均值数据由太湖局整合官方网站(<http://www.tba.gov.cn>)公布的《“引江济太”年报》(2013—2018年)、《太湖水情月报》(2007—2018年)、《太湖流域片水情年报》(2007—2018年)、《太湖

健康状况报告》(2007—2018 年)提供,年均值数据由月均值数据平均计算得出。

环湖河道月均入湖流量数据来自太湖局统计整编后的环太湖水文巡测资料,环太湖分为 10 段,共计约 130 个口门。环湖河道月均入湖磷通量数据用每月一次的水质监测结果作为当月的平均水质浓度进行计算,用单次水质浓度乘以当月入湖总水量得到当月入湖总通量。太湖按照自然形态和水质特征划分为 9 个湖区,太湖局在全湖布设了 33 个水质监测站点,按照水质监测站点数共区划 33 个分区,全太湖月均 TP 浓度和磷存量数据各监测点每月采样一次,用监测点代表的水体体积与全湖水体体积加权综合计算得出。

1.3 数据分析

统计检验在 SPSS 20 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 2016 年前后“引江济太”调水量变化

“引江济太”调水的目的主要有以下 3 种:(1)太湖水位低于调水限制水位,引水入湖提高水位,保证供水安全,此时调度原则依据《太湖流域洪水与水量调度方案》实施,保证太湖水位高于调水限制水位,低于防洪安全水位。2016 年前,依据此目的的调水共 26 次,2016 年后共 4 次。(2)发生小面积蓝藻水华时调水入湖防止发生大面积水华,依据此目的的调水共 2 次,均在 2016 年后。(3)发生大面积蓝藻水华调水入湖改善水质。2016 年前,依据此目的的调水共 5 次,2016 年后调水无此目的。

2016 年以前从长江引入太湖总水量达 85.63 亿 m^3 (图 2a),平均每年 9.51 亿 m^3 ,2011 年引水量最大,达 16.1 亿 m^3 ,2009 年最少,仅有 4.9 亿 m^3 。2016 年及以后共引入长江水量 12.18 亿 m^3 ,平均每年 4.06 亿 m^3 ,2016 年是自 2007 年以来引水量最小的一次,仅为 1.9 亿 m^3 (图 2b)。相比而言,2016 年及以后的年平均引水量偏小,仅为 2016 年前的 42.7%。

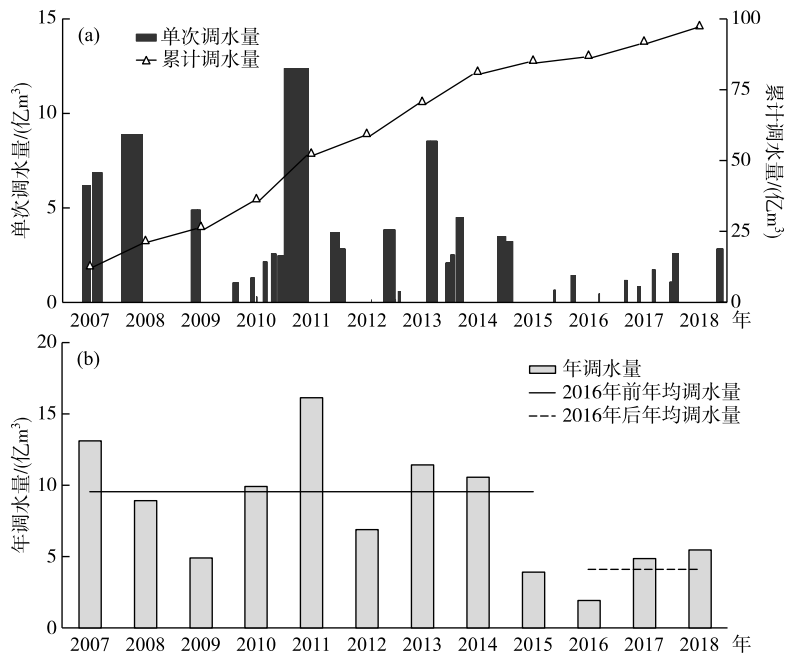


图 2 2016 年前后“引江济太”调水量

Fig.2 Quantity of water diversion from the Yangtze River around 2016

从引江水占环太湖总入湖水的比例来看,2016 年前总引江水量 85.63 亿 m^3 ,总入湖水量 946.04 亿 m^3 ,引江水占入湖总水量的 9.05%。环太湖年平均入湖水量 105.12 亿 m^3 ,年平均引江水量 9.51 亿 m^3 ,年引水量占太湖总入湖水量的 3.27%~14.75%。2016 年及以后总引江水量 12.19 亿 m^3 ,总入湖水量 385.1 亿 m^3 ,引江

水占入湖总水量的 3.17%。环太湖年平均入湖水量 128.37 亿 m^3 , 年平均引江水量 4.06 亿 m^3 , 年引水量占太湖总入湖水量的 1.19%~4.77%, 2016 年是自 2007 年来引水量环湖占比最小的一次, 仅占 1.19% (图 3)。相比而言, 2016 年及以后的年平均引水量环湖占比偏小, 仅为 2016 年前的 36.9%。

从引江水占直接受水湖区贡湖蓄水量的比例来看, 2016 年前贡湖年平均蓄水量为 3.25 亿 m^3 , 年平均引江水量 9.51 亿 m^3 , 年引水量是贡湖蓄水量的 1.13~5.46 倍, 加快了贡湖与全湖的水体交换。2016 年及以后贡湖年平均蓄水量为 3.52 亿 m^3 , 年平均引江水量 4.06 亿 m^3 , 年引水量是贡湖蓄水量的 0.51~1.47 倍, 仅与贡湖蓄水量持平 (图 3)。

从引江水量的年内分布来看, 在藻类暴发的关键期 4—10 月, 2016 年前该时间段累计引水量为 41.59 亿 m^3 , 占 2016 年前总引水量的 48.6%。2016 年及以后, 该时间段累计引水量为 3.04 亿 m^3 , 占 2016 年及以后总引水量的 24.9%。相比而言, 2016 年及以后在藻类暴发关键期的引水入湖量偏低, 仅为 2016 年前的 51.2%。

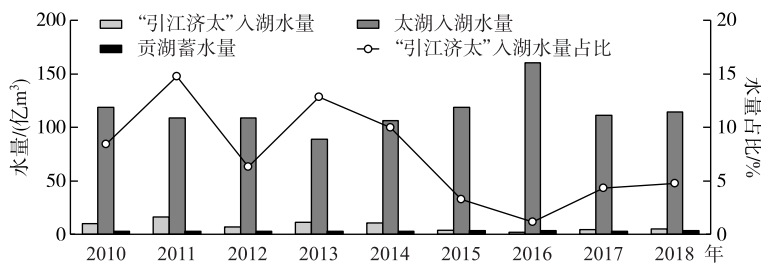


图 3 2016 年前后“引江济太”调水量、太湖入湖水量及贡湖蓄水量变化

Fig.3 Quantity of water diversion from the Yangtze River, water inflow from Lake Taihu and water storage in Gonghu Bay around 2016

2.2 2016 年前后“引江济太”水质变化

2.2.1 总磷浓度的变化 将贡湖湾及全湖水质监测点 TP 浓度数据进行平均得到贡湖湾和全太湖平均 TP 浓度, 同时在“引江济太”调水入湖时在望亭立交闸下近太湖侧采样点采集 TP 浓度数据 (图 4)。2016 年前, 全太湖年平均 TP 浓度为 0.073 mg/L, 贡湖湾年平均 TP 浓度为 0.063 mg/L, 引江水入湖时年平均 TP 浓度为 0.124 mg/L, 调水入湖 TP 浓度比太湖平均高约 0.051 mg/L。2016 年及以后, 全太湖年平均 TP 浓度为 0.083 mg/L, 贡湖湾年平均 TP 浓度为 0.073 mg/L, 引江水入湖时年平均 TP 浓度为 0.114 mg/L, 调水入湖 TP 浓度比太湖平均高约 0.031 mg/L。相比而言, 2016 年后引江水入湖时 TP 浓度下降了 0.01 mg/L, 相对太湖的 TP 浓度差也下降 0.02 mg/L。

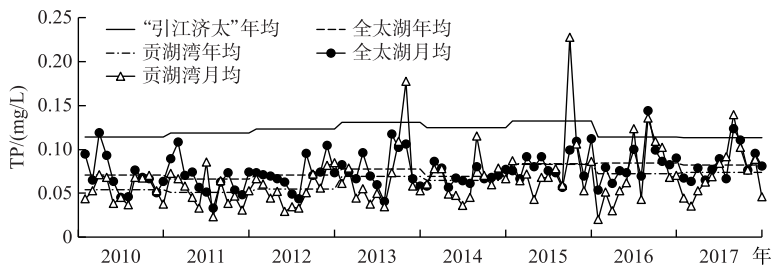


图 4 2016 年前后太湖、贡湖湾及“引江济太”入湖总磷浓度

Fig.4 Total phosphorus concentration of Lake Taihu, Gonghu Bay and water diversion from the Yangtze River around 2016

2016 年前全太湖月均 TP 浓度变化范围为 0.033~0.119 mg/L, 至 2014 年全湖 TP 浓度在波动中下降, 2015 年起出现回升, 2016 年后全湖出现磷反弹现象, 月均 TP 浓度变化范围为 0.053~0.144 mg/L, 回升比例约为 15%~20%。

从 TP 浓度变化趋势来看,2016 年太湖出现 TP 反弹现象,但“引江济太”入湖 TP 浓度相比 2016 年前出现下降. 利用 SPSS 20 软件对 2016 年前后贡湖湾、全太湖 TP 浓度与“引江济太”入湖 TP 浓度进行 Pearson 相关性分析,结果表明贡湖湾、全太湖 TP 浓度与“引江济太”入湖 TP 浓度均无显著相关关系($P \gg 0.1$).

2.2.2 “引江济太”入湖磷通量的变化 根据数据统计,2016 年前,“引江济太”累计入湖磷通量为 737.55 t,年均值为 122.93 t,最高值出现在 2011 年,为 197.53 t,最低值出现在 2015 年,为 51.79 t. 2016 年及以后,引水累计入湖磷通量为 140.42 t,年均值为 46.81 t,2016 年引江入湖磷通量为近年最少,仅为 16.42 t. 相比而言,2016 年后“引江济太”入湖磷通量是偏小的,年通量仅为 2016 年前的 38.1% (图 5a).

从“引江济太”入湖磷通量在全湖占比来看,2010—2015 年,全湖累计入湖磷通量为 13212 t,“引江济太”累计入湖磷通量为 737.55 t,占比 5.58%. 2016—2018 年,全湖累计入湖磷通量为 6496 t,“引江济太”累计入湖磷通量为 140.42 t,占比 2.16%. 相比而言,2016 年后“引江济太”入湖累积磷通量在全湖占比偏小. 而 2016 年“引江济太”入湖磷通量在全湖占比也是近年最小值,仅为 0.63% (图 5b).

从“引江济太”入湖磷通量与太湖水中含有磷长期关系来看,引水入湖磷通量与太湖水中含有磷变化的相关性很小($P \gg 0.1$). 2016 年前,太湖水中含有磷平均值为 399.1 t. 2016 年及以后,太湖水中含有磷平均值为 495.42 t,相比之前上升了 96.32 t. 2016 年为近年太湖水中含有磷最大的一年,有 523.69 t,但“引江济太”入湖磷通量逐年显著下降,2016 年仅入湖 16.42 t,是 2011 年的 16.2% (图 5b).

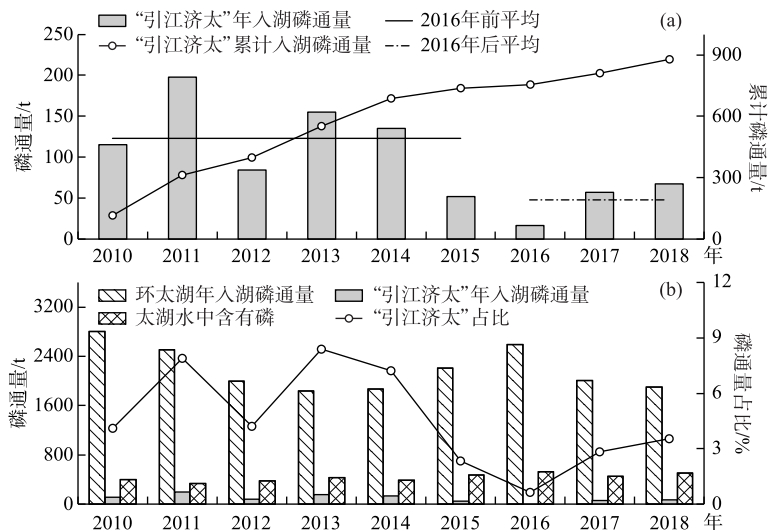


图 5 2016 年前后“引江济太”入湖磷通量概况

Fig.5 General situation of phosphorus flux of water diversion from the Yangtze River around 2016

2.2.3 “引江济太”入湖磷形态的变化 将望亭立交闸下、贡湖湾及全湖水水质监测点的 DTP 浓度数据进行平均得到年平均数据 (图 6). 2016 年前,全太湖年平均 DTP 浓度为 0.026 mg/L,贡湖年平均 DTP 浓度为 0.025 mg/L,引江水年平均 DTP 浓度为 0.075 mg/L,引水入湖时 DTP 浓度比太湖高约 0.049 mg/L. 2016 年及以后,全太湖年平均 DTP 浓度为 0.028 mg/L,贡湖年平均 DTP 浓度为 0.021 mg/L,引江水年平均 DTP 浓度为 0.064 mg/L,引水入湖时 DTP 浓度比太湖高约 0.036 mg/L. 相比而言,2016 年后引江水 DTP 浓度下降了 0.011 mg/L,相对太湖的 TP 浓度差也下降 0.013 mg/L,与 TP 浓度变化规律相似.

从 DTP 浓度占 TP 浓度比例来看,2016 年前全太湖、贡湖、“引江济太”调水中 DTP 浓度比例基本保持稳定.“引江济太”时望虞河 DTP 浓度占比约为 60%,贡湖湾 DTP 浓度占比约为 40%,全太湖 DTP 浓度占比约为 35%,引江水 DTP 浓度占比显著高于贡湖湾及全太湖平均水平. 值得注意的是,2016 年及以后,引江水、贡湖湾及全太湖 DTP 浓度占 TP 浓度的比例均有下降趋势,引江水 DTP 浓度占比约为 56%,下降了 4%,贡湖湾 DTP 浓度占比约为 29%,下降了 11%,全太湖 DTP 浓度占比约为 33%,下降了 2%.

2016年刘德鸿、范成新等^[19]对湖西区与浙西区主要入湖河流进行了磷形态采样分析,DTP占TP比例的范围为44%~50%,平均值为47%.与这个数据作比较,2016年前后引江水DTP占比高于湖西区与浙西区12%左右.

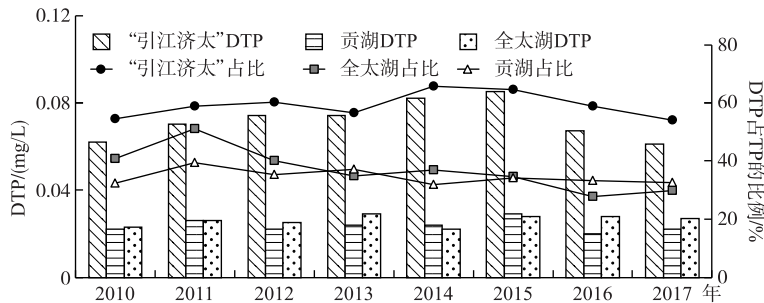


图 6 2016 年前后引江水与太湖、贡湖中的溶解性总磷浓度及占比

Fig.6 Dissolved total phosphorus (DTP) concentration and DTP/TP ratio in different rivers, Lake Taihu and Gonghu Bay around 2016

2.2.4 “引江济太”调水与主要入湖河流水质的对比 环太湖有众多的入湖河道,主要集中在太湖上游地区,分为湖西区入湖河道和浙西区入湖河道,年入湖水量占全太湖年入湖水量的70%以上.湖西区有13条主要入湖河流,浙西区有6条主要入湖河流(图1c).

2016年前,湖西区入湖河道平均TP浓度为0.198 mg/L,浙西区入湖河道平均TP浓度为0.129 mg/L,引江水平均TP浓度为0.124 mg/L.2016年及以后,湖西区入湖河道平均TP浓度为0.172 mg/L,浙西区入湖河道平均TP浓度为0.111 mg/L,引江水平均TP浓度为0.107 mg/L.引江水水质明显好于湖西区平均,与浙西区平均值相当,2016年后引江水TP浓度在下降(图7a).

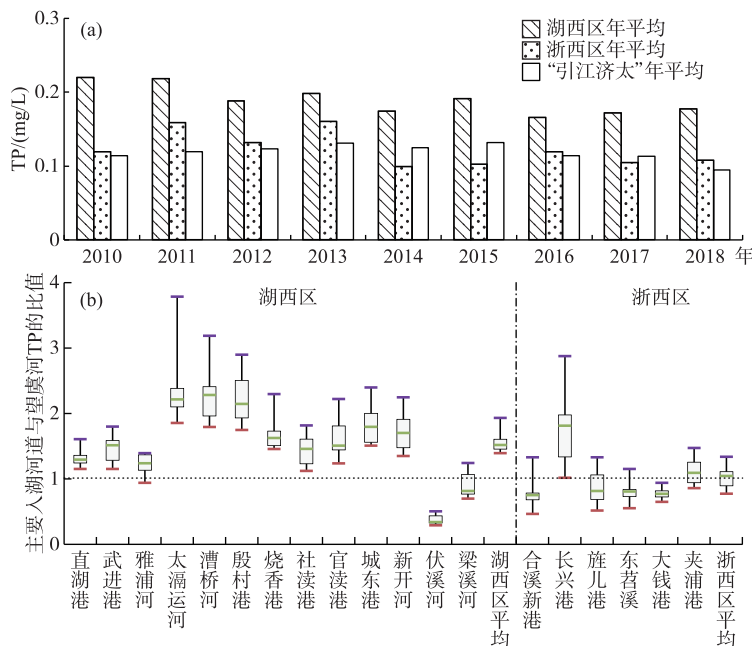


图 7 湖西区、浙西区主要入湖河流与“引江济太”入湖水体总磷浓度及其比值
Fig.7 The total phosphorus concentration and ratio of the main rivers entering the lake between water diversion from the Yangtze River

为了比较湖西区、浙西区 19 条入湖河流与“引江济太”经望虞河入湖 TP 浓度,说明“引江济太”调水水质在环太湖入湖河道中的水质水平,将每条河流入湖年均 TP 浓度分别除以同年“引江济太”时望虞河年均 TP 浓度,若比值大于 1 说明该条河当年入湖 TP 浓度大于望虞河,结果见图 7b。从图中可见,在湖西区与浙西区 19 条主要入湖河流中,只有伏溪河、梁溪河、合溪新港、大钱港、旌儿港和东苕溪年均入湖 TP 浓度明显低于望虞河,可见“引江济太”调水在环太湖入湖河流中属于水质较优的来水。

2.3 太湖总磷对“引江济太”调水的响应

2.3.1 调水前后“引江济太”受水湖区贡湖湾的短期响应 2016 年前后“引江济太”调水入湖 30 次,直接受水湖区为贡湖湾。调水前后受水湖区水体 TP 的短期响应与入湖磷通量相关。近几年“引江济太”调水 TP 浓度变化不大,入湖磷通量应与入湖水量呈正相关,“引江济太”入湖磷通量会引起受水湖区贡湖及全太湖 TP 怎样的短期变化? 将 30 次调水过程按调水量降序排列,选取 3 次典型调水过程(表 1),代表入湖磷通量较多、中等、较少的 3 种情况,使用调水过程前、中、后 3 个阶段直接受水湖区贡湖湾、望虞河入湖河口(1[#]~5[#])的 5 个监测点日数据及全太湖当月平均 TP 数据(6[#])对调水前后贡湖湾的短期响应进行分析(图 8)。

表 1 “引江济太”调水典型过程
Tab.1 Typical process of water diversion from the Yangtze River

| 开始时间 | 终止时间 | 持续时间/d | 入湖水量/(亿 m ³) | 入湖磷通量/t | 调水量排序 |
|------------|------------|--------|--------------------------|---------|-------|
| 2014-11-05 | 2015-02-06 | 93 | 6.74 | 87.82 | 5 |
| 2016-03-05 | 2016-04-01 | 27 | 1.44 | 12.44 | 15 |
| 2016-09-05 | 2016-09-12 | 7 | 0.46 | 3.98 | 22 |

2014 年 11 月 5 日—2015 年 2 月 6 日这次调水持续 93 d,是“引江济太”调水量较多的一次(排第 5 位)。调水过程中引江水 TP 浓度为 0.107 mg/L,高于贡湖湾与全太湖平均值。调水前后贡湖湾 TP 浓度变化不大,调水后仅升高 0.005 mg/L,调水后 3 个月贡湖湾平均 TP 浓度相比调水前 3 个月反而下降了 0.022 mg/L(图 8a)。调水过程中 TP 浓度总体上是从望虞河河口向太湖湖心下降的,调水前后全太湖平均 TP 浓度变化不大,调水后升高 0.005 mg/L(图 8d)。

2016 年 3 月 5 日—2016 年 4 月 1 日这次调水持续 27 d,是“引江济太”调水量中等的一次(排第 15 位)。调水过程中望虞河 TP 浓度为 0.103 mg/L,高于贡湖湾与全太湖平均值。调水前后贡湖湾 TP 浓度变化不大,调水后仅升高 0.005 mg/L,调水后 3 个月贡湖湾平均 TP 浓度相比调水前 3 个月上升了 0.023 mg/L(图 8b)。调水过程中 TP 浓度总体上是从望虞河河口向太湖湖心下降的,调水前后全太湖平均 TP 浓度变化不大,调水后升高 0.002 mg/L(图 8e)。

2016 年 9 月 5 日—2016 年 9 月 12 日这次调水持续 7 d,是“引江济太”调水量较少的一次(排第 22 位)。调水过程中望虞河 TP 浓度为 0.107 mg/L,低于贡湖湾与全太湖平均值。调水前后贡湖湾 TP 浓度变化不大,调水后仅升高 0.004 mg/L,调水后 3 个月贡湖湾平均 TP 浓度相比调水前 3 个月下降了 0.02 mg/L(图 8c)。调水过程中 TP 浓度总体上是从望虞河河口向太湖湖心波动中上升的,调水后全太湖平均 TP 浓度下降了 0.073 mg/L(图 8f)。

2.3.2 太湖典型湖区总磷反弹对“引江济太”入湖磷通量的响应 2016 年全湖出现 TP 反弹的现象^[1,2],2016 年全太湖水中含有磷为 523.69 t,是近年最大值。“引江济太”入湖磷通量是否造成 2016 年后太湖 TP 的反弹? 基于太湖局公布的《太湖流域片水情年报》,环太湖入湖水量主要来自湖西区、浙西区和“引江济太”调水,因此本研究选取与入湖片区相对应的太湖贡湖、梅梁湖、竺山湖、西部沿岸区、南部沿岸区以及无直接外源磷输入的湖心区作为典型湖区,分析其水中含有磷及其变化量。

2016 年前,“引江济太”直接受水湖区贡湖湾水中含有磷平均值为 5.16 t,2016 年及以后,贡湖水中含有磷平均值为 6.41 t,相比之前上升了 1.25 t(图 9a)。从太湖各典型湖区年际水中磷增量来看,2014 年前,太湖水中含有磷波动中下降,2015 年起,太湖水中含有磷开始回升,各湖区反弹幅度不同,竺山湖、西部沿岸区、南部沿岸区、湖心区反弹幅度较大,反弹范围为 1.98~8.27 t,贡湖和梅梁湖反弹幅度较小,其中贡湖 2016 年水中含有磷比 2015 年下降了 0.52 t(图 9b),就单位水面面积磷增量而言,2016 年竺山湖比 2014 年上升了

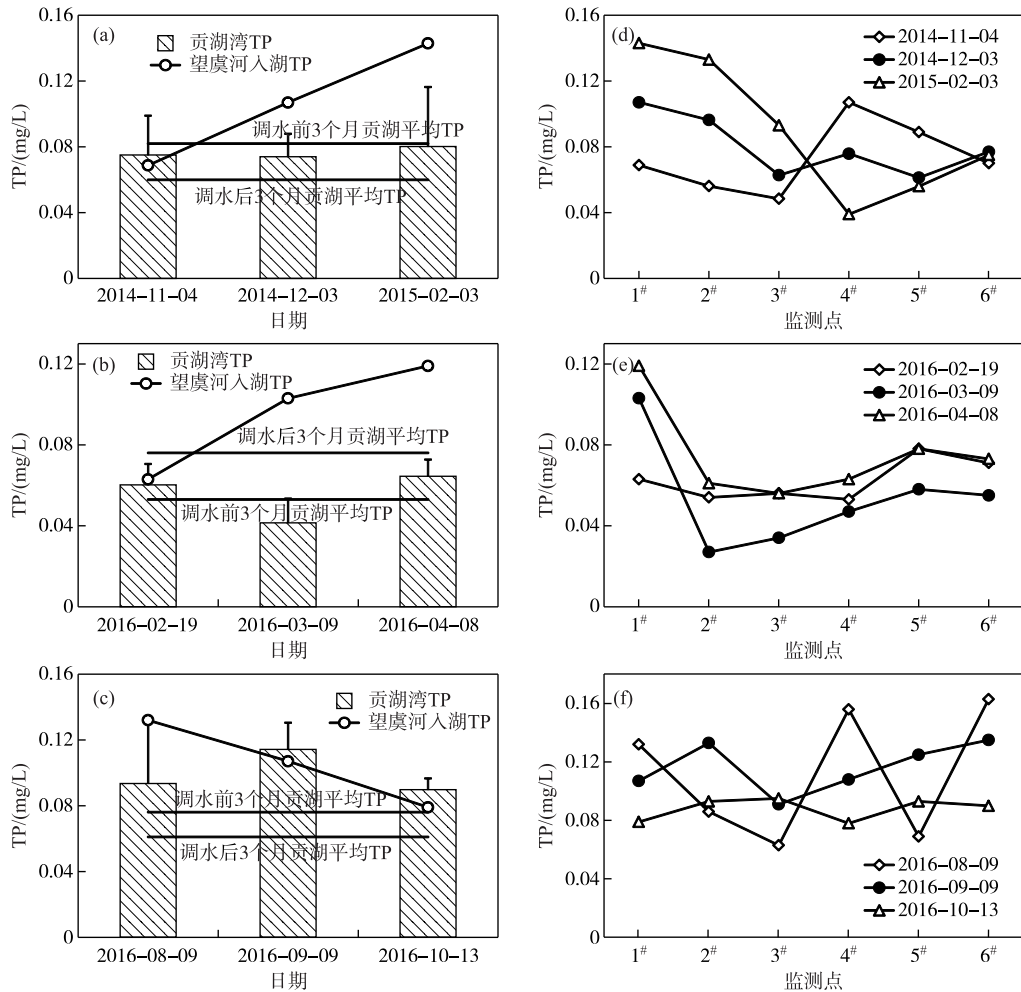


图 8 “引江济太”时望虞河入湖总磷浓度的短期响应

Fig.8 Short-term response of total phosphorus concentration in Wangyu River

0.093 t/km² (图 9c). 从典型湖区磷增量变化可见,磷反弹明显的湖区为湖西区、浙西区入湖河流的受水区,“引江济太”调水受水区贡湖水中含有磷并未显著增加,2015、2016 年“引江济太”入湖磷通量之和为 68.21 t,仅占这两年环太湖入湖磷通量的 1.49%.

3 讨论

3.1 2016 年后太湖总磷反弹与“引江济太”的关系

2016 年以来,太湖 TP 出现反弹现象^[1-2],水中含有磷及 TP 浓度均是近年最高,“引江济太”与太湖 TP 反弹是否有关系? 从 TP 浓度来看,相比之前,2016 年及以后引水入湖时 TP 浓度有所下降,相对太湖的 TP 浓度差也在下降,引江水的水质在逐步改善. 从入湖水量与磷通量来看,“引江济太”年平均入湖磷通量占太湖总入湖磷通量的 4.45%,年平均引水量占太湖年平均入湖水量的 7.35%,单位水量携带的磷通量仅为其他来水的一半左右. 2016 年及以后,引水水量及磷通量均出现显著下降,引水量仅为之前的 42.7%,入湖磷通量仅为之前的 38.1%,其中 2016 年是近年入湖水量及磷通量最小的一年. 从“引江济太”与环湖主要河道入湖水水质比较来看,引江水水质明显优于湖西区,与浙西区相当,在太湖主要入湖河流中,仅有 5 条河流水质

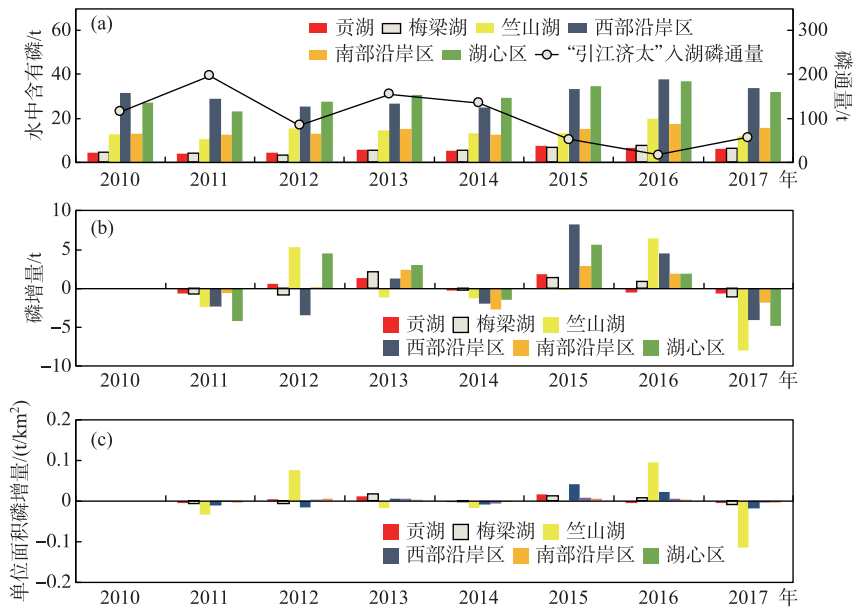


图9 2016年前后太湖典型湖区磷存量及年际变化量

Fig.9 Phosphorus stock and annual variation in typical areas of Lake Taihu around 2016

优于引江水,引江水属于太湖优质来水.从调水后贡湖及全太湖TP浓度的短期响应看,短期内贡湖TP浓度有微小起伏,但3个月后贡湖TP浓度出现下降,可以理解为长江水通过望虞河进入太湖后,其中部分颗粒态磷进入底泥,与贡湖水体交换、混合后水中TP浓度下降.从引水量年内分布来看,2016年后,藻类暴发的关键期引水入湖量在全年仅占24.9%,占比较低.2016年9月份引水后贡湖及全太湖TP浓度短期响应与非藻类暴发关键期的规律相似.引江水目的主要是保证太湖流域供水安全,2016年后环太湖年均入湖水量相比之前增加了22.1%,而藻类暴发关键期与太湖汛期基本重合,期间引水量在全年占比是较低的,对贡湖及全太湖TP浓度的短期影响未见特殊性.从太湖分湖区TP反弹量来看,2016年由于太湖全流域爆发洪水^[20],入湖河流带来流域内的大量磷,太湖的水质、水量资料显示,陈东港和殷村港是2016年入湖磷通量最大的河流,相对应的入湖湖区西部沿岸区和竺山湖磷反弹量与入湖河流磷通量有明显关联性,西部沿岸区总反弹量最大,2016年相比之前磷存量增加了12.81 t,竺山湖单位水面面积反弹量最大,2016年相比之前磷存量增加了0.093 t/km².当年“引江济太”调水水质要明显优于其他入湖河流,“引江济太”直接受水湖区贡湖磷存量增加了1.33 t,单位水面面积磷增量为0.011 t/km²,均低于全太湖平均水平,在全湖磷反弹的背景下,贡湖水中含有磷甚至相比2015年出现下降.综上,从调水量、入湖磷通量、调水后短期磷响应及各湖区磷增量来看,“引江济太”未造成2016年后太湖TP浓度反弹.

3.2 “引江济太”对太湖总磷的累计影响

“引江济太”是否会造成太湖内部磷的累积,对太湖磷循环产生影响?“引江济太”累计入湖磷通量877.97 t,占全太湖累计入湖的4.58%,累计入湖水量97.93亿m³,占全太湖累计入湖的7.36%.从目前状态下对太湖TP的影响来看,主要受水区贡湖的TP浓度低于全太湖均值,在2016年全湖磷反弹的大背景下,贡湖水中含有磷浓度比2015年下降.从“引江济太”受水湖区贡湖TP浓度低于全太湖平均以及西部沿岸区、竺山湖和梅梁湖的状态来看,为贡湖容量2.4倍的年平均引水量对贡湖TP应该产生了好的影响.而根据贡湖TP浓度均值低于全太湖均值,也可以认为通过贡湖进入全太湖的来水对处于严重富营养化状态的太湖具有一定的改善效果.

一个值得关注的问题是,2016年之后贡湖及全太湖DTP浓度在TP浓度中占比下降,相比之前,贡湖湾DTP浓度占比下降了11%,全太湖DTP浓度占比下降了2%.近年来,全太湖入湖磷通量在1610~2250 t/a

之间^[1,21], 出湖通量在 340~1033 t/a 之间, 估算净入湖通量在 815~1530 t/a 之间. 计算太湖水中磷的存量就能发现这 815~1530 t/a 的磷只有一部分进入水中, 可能另外一部分主要是进入了底泥和植物、动物系统中. 也就是说目前太湖的水-底泥系统中磷的沉降量可能会大于释放量. 因此, 就产生了一个问题, 磷是否可以长期处于沉降量大于释放量的状态? 磷不断地向底泥聚集, 水质也逐渐向好的方向发展. 近年来贡湖及太湖中颗粒态磷占比有所上升, 一旦底泥中磷聚集-释放的现有平衡发生逆转, “引江济太” 累计带入的磷通量将会对太湖产生完全不同的影响, 这种循环平衡关系必须引起我们的关注.

3.3 “引江济太”的远景展望

立足于长远的太湖治理, 入湖河流的水质总体在向好的方向转变, 太湖入湖磷通量会逐渐得到控制, 太湖 TP 浓度水平在未来也会逐渐下降, 入湖河流 TP 浓度与湖泊 TP 浓度的关系如何? 收集了国内外一些典型湖泊和入湖河流 TP 浓度的数据^[22-39], 用同年入湖河流总磷浓度 (TP_{river}) 和湖泊总磷浓度 (TP_{lake}) 的比值来衡量入湖河流和湖泊 TP 浓度的关系. 由图 10 可见, 不论是处于贫营养还是富营养的湖泊, TP_{river}/TP_{lake} 基本都大于 1, 也就是说一般情况下入湖河道的 TP 浓度会高于湖泊. 由于河流有较为强烈的流动性, 其水体中携带较多的颗粒态磷, 这些磷一旦进入相对静止的湖泊就会有一部分发生沉降转入底泥, 这可能是湖泊中 TP 浓度低于河流的原因之一. 另外, 就单位水面(水量)各种生物的生物量而言, 湖泊中浮游植物、浮游动物、沉水植物等的生物量远远高于河流. 而这些生物体内都含有磷, 因此转化为生物体内磷的量也要多一些. 因此河流中的磷进入湖泊后一部分会转入到底泥系统、生物系统中, 在水中的数量一般都会下降. 换言之, 一定范围内河流磷浓度大于湖泊磷浓度是河湖动力以及生态系统的差异造成的, 入湖河流 TP 浓度高于湖泊并不一定会对湖泊 TP 浓度产生不利影响.

从图 10 还可以看出, 在本次统计的这些湖泊中, 较少发生水华的湖泊 TP 浓度一般在 0.04 mg/L 以下, 而这些湖泊入湖河流的 TP 浓度也可以是湖泊的 1~10 倍. 出现水华的湖泊 TP 浓度一般在 0.05~0.25 mg/L 之间, TP_{river}/TP_{lake} 也在 1~10 之间. 而“引江济太”调水与全太湖 TP 浓度的比例为 1.8, 与贡湖 TP 浓度的比例为 1.6, 属于中等偏低状态. 从这个角度而言, 并不能以“引江济太”调水 TP 浓度高于太湖和贡湖就认为其对太湖产生不利影响. 就目前的状态而言, 环太湖主要入湖河流与太湖的平均比值约为 2.23, “引江济太”调水 TP 浓度低于湖西区, 接近浙西区, 相对于其他来水而言“引江济太”来水中 TP 浓度并不是特别高. 以“引江济太”调水的主要目的来看, 调水不仅保证了太湖流域的供水安全, 还通过改变贡湖湾水动力条件有效缓解了大面积蓝藻水华暴发的危机^[14-15].

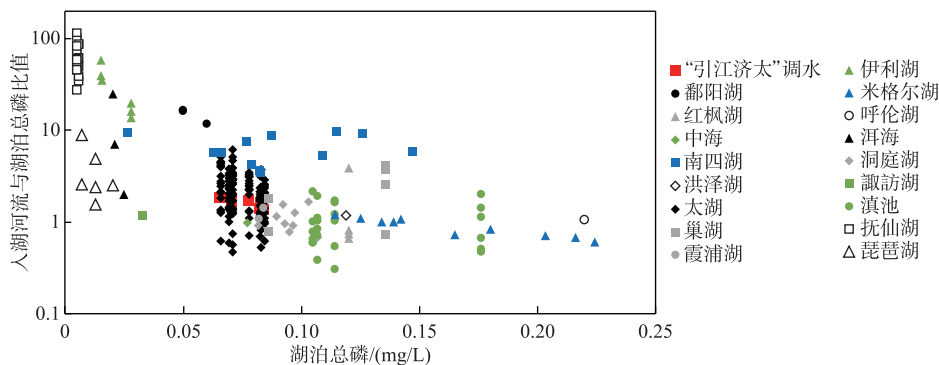


图 10 不同湖泊入湖河流与湖泊总磷比值(灰色点代表该湖泊较少暴发水华)

Fig.10 Total phosphorus ratio between different inflowing rivers and lakes

目前除望虞河引水以外, 新孟河引水工程也正在建设^[40]. 建成后太湖总体形成“二引三排”的引排格局(望虞河、新孟河引水, 新沟河、走马塘、太浦河排水). 根据新孟河引水工程方案, 2020 年新孟河引水工程完工后, 太湖的交换周期将缩短为 180 d 左右, “引江济太”将会给太湖带来很大的改变. 从太湖与长江交换关系发生重大变化的角度, 长江引水带来的 TP 通量对太湖的影响必须关注. 在目前太湖总体处于严重富营养化、全太湖 TP 浓度偏高的背景下, 从长江经望虞河引入的长江水的 TP 浓度低于大多数入湖河流, 对贡湖及

全太湖起到了好的作用. 但如果未来长江来水 TP 浓度保持现在的水平,“引江济太”引入的磷通量在太湖入湖总通量中所占比例增加,对太湖总体磷循环以及全太湖磷水平会产生与现在不同的影响.

4 结论

1)2016年前后,“引江济太”年均入湖磷通量为 97.56 t,年均入湖水量为 8.16 亿 m^3 ,相比之前,2016 年及以后年引水量和入湖磷通量均显著降低,从调水量、入湖磷通量、调水后磷的短期响应及各湖区磷增量来看,“引江济太”与 2016 年后太湖 TP 浓度反弹相关性不强.

2)2016年前后,“引江济太”调水累计入湖磷通量为 877.97 t,占太湖总入湖磷通量的 4.58%,累计入湖水量占太湖累计入湖水量的 7.36%,单位水量携带的磷通量仅为其他来水的一半左右,占比相对有限. 与太湖主要入湖河流相比,“引江济太”调水属于相对优质来水,在保证供水安全、缓解水华危机的同时对处于目前严重富营养化状态的太湖水质具有一定的改善效果.

3)湖泊的入湖河流 TP 浓度一般都高于湖泊本身的 TP 浓度,“引江济太”调水 TP 浓度约是全太湖 TP 浓度的 1.6 倍,是贡湖 TP 浓度的 1.8 倍,从河湖 TP 比的角度处于正常范围. 在未来“引江济太”水量增加的情况下,必须关注引江水与湖水 TP 浓度的相对关系,也必须关注长期大量引水过程中底泥聚集—释放的平衡关系,确保“引江济太”对太湖继续产生良性的影响.

5 参考文献

- [1] 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.]
- [2] 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.]
- [3] Zhu GW, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Variation and driving factors of nutrients and chlorophyll-a concentrations in northern region of Lake Taihu, China, 2005–2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 279-295. DOI: 10.18307/2018.0201. [朱广伟, 秦伯强, 张运林等. 2005—2017年北部太湖水体叶绿素 a 和营养盐变化及影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 279-295.]
- [4] Yang LY, Yang XY, Ren LM *et al.* Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 20-29. 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): 20-29.]
- [5] Zhu W, Tan YQ, Wang RC *et al.* The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010–2017. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 296-305. DOI: 10.18307/2018.0202. [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. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 296-305.]
- [6] Taihu Basin Water Resources Protection Bureau. Taihu Basin and southeast rivers water resources bulletin, 2011–2018. [水利部太湖流域管理局. 太湖流域及东南诸河水资源公报, 2011—2018.]
- [7] Wu HY, Lin HJ eds. Water diversion experiment from Yangtze River to Lake Taihu. Beijing: China Water & Power Press, 2010. [吴浩云, 林荷娟. 引江济太调水试验. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.]
- [8] Lu SY. Discussion on the role of water supply safety in Taihu basin by river diversion. *Engineering Technological Research*, 2019, **4**(3): 255-256. [卢沈煜. 引江济太对保障太湖流域供水安全的作用探讨. 工程技术研究, 2019, **4**(3): 255-256.]
- [9] Zhai SH, Zhang HJ, Hu WP *et al.* Evaluation of water diversion effect from Yangtze River to Lake Taihu. *China Water Resources*, 2008, (1): 21-23. [翟淑华, 张红举, 胡维平等. 引江济太调水效果评估. 中国水利, 2008, (1): 21-23.]
- [10] Zhang R, Zhang GS, Zhou YK. Post-evaluation of Wangyu river project in Lake Taihu basin. *Journal of Economics of Water Resources*, 2005, (1): 23-24, 31-65. [张睿, 杨高升, 周玉康. 太湖流域望虞河工程后评价. 水利经济, 2005, (1): 23-24, 31-65.]

- [11] Zhai SH, Zhang HJ, Yu XZ *et al.* Analysis on water source assurance and influence of Wangyu river and water diversion experiment from Yangtze River to Lake Taihu. *China Water Resources*, 2008, (1): 28-30. [翟淑华, 张红举, 禹雪中等. 望虞河引江济太长江水源保证性及其影响分析. 中国水利, 2008, (1): 28-30.]
- [12] Zhou J, Zhang XW, Liu L *et al.* Analysis and suggestion on the effect of using Wangyu river to divert the river from Yangze river to Lake Taihu. *Jiangsu Water Conservancy*, 2015, (4): 45-46. [周吉, 张小稳, 刘琳等. 利用望虞河实施引江济太的成效分析及建议. 江苏水利, 2015, (4): 45-46.]
- [13] Taihu Basin Water Resources Protection Bureau. Annual report on water diversion effect from Yangtze river to Lake Taihu, 2013-2018. [水利部太湖流域管理局. 太湖流域引江济太年报, 2013-2018.]
- [14] Jia SB, You YH, Wang R. Influence of water diversion from Yangtze River to Taihu Lake on nitrogen and phosphorus concentrations in different water areas. *Water Resources Protection*, 2008, 24(3): 53-56. [贾锁宝, 尤迎华, 王嵘. 引江济太对不同水域氮磷浓度的影响. 水资源保护, 2008, 24(3): 53-56.]
- [15] Jiang Y, Cai XY. Analysis on the improvement effect of diversion from the Yangtze River to the water source of Lake Taihu. *Jiangsu Water Resources*, 2011, (2): 36-37. [姜宇, 蔡晓钰. 引江济太对太湖水源地水质改善效果分析. 江苏水利, 2011, (2): 36-37.]
- [16] Yan SW, Yu H, Zhang LL *et al.* Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009. *J Lake Sci*, 2011, 23(6): 855-862. DOI: 10.18307/2011.0605. [燕姝雯, 余辉, 张璐璐等. 2009年环太湖入出湖河流量及污染负荷通量. 湖泊科学, 2011, 23(6): 855-862.]
- [17] Ma Q, Tian W, Wu ZM. Total phosphorus and total nitrogen concentrations of the water diverted from Yangtze River to Lake Taihu through Wangyu River. *J Lake Sci*, 2014, 26(2): 207-212. DOI: 10.18307/2014.0206. [马倩, 田威, 吴朝明. 望虞河引长江水入太湖水体的总磷、总氮分析. 湖泊科学, 2014, 26(2): 207-212.]
- [18] Mao XW, Xu F. A comparative analysis of the water quality of Lake Taihu by the main rivers around Lake Taihu and the Yangtze River. *Water Resources Development Research*, 2018, 18(1): 29-32. [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. 水利发展研究, 2018, 18(1): 29-32.]
- [19] Liu DH, Yu JH, Zhong JC *et al.* Characteristics of nitrogen and phosphorus loading and migration in typical river networks in Taihu Lake basin. *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 125-132. [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. 中国环境科学, 2016, 36(1): 125-132.]
- [20] Water Resources Department of the Taihu Basin, Jiangsu Provincial Department of Water Resources, Zhejiang provincial department of water resources *et al* eds. The health status report of Taihu Lake, 2016. [水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅, 浙江省水利厅等. 太湖健康状况报告, 2016.]
- [21] Zhai SH, Han T, Chen F. Self-purification capacity of nitrogen and phosphorus of Lake Taihu on the basis of mass balance. *J Lake Sci*, 2014, 26(2): 185-190. DOI: 10.18307/2014.0203. [翟淑华, 韩涛, 陈方. 基于质量平衡的太湖氮、磷自净能力计算. 湖泊科学, 2014, 26(2): 185-190.]
- [22] Jin XC, Xin WG, Lu SY *et al.* Effect of polluted inflow river on water quality of lake bay. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(4): 52-56. DOI: 10.13198/j.res.2007.04.56.jinxc.010. [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. 环境科学研究, 2007, 20(4): 52-56.]
- [23] Wang J, Mao JZ, Xie YH. Analysis on spatiotemporal variation characteristics of water quality in Dianchi Lake from 2008 to 2014. *Yangtze River*, 2018, 49(5): 11-15. [王杰, 毛建忠, 谢永红等. 2008~2014年滇池水质时空变化特征分析. 人民长江, 2018, 49(5): 11-15.]
- [24] Huang DL, Ni ZK, Zhao S *et al.* Based on the correlation analysis of water quality between lake and inflow/outflow: Taking Poyang Lake as an example. *Environmental Science*, 2019, (10): 4450-4460. DOI: 10.13227/j.hjcx.201902103. [黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽等. 基于湖泊与出入湖水水质关联性研究: 以鄱阳湖为例. 环境科学, 2019, (10): 4450-4460.]
- [25] Wang SH, Jiang X, Jing XC. Classification and pollution characteristic analysis for inflow rivers of Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 2834-2839. DOI: 10.13227/j.hjcx.2011.10.024. [王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析. 环境科学, 2011, 32(10): 2834-2839.]
- [26] Chaohu Administration Bureau of Anhui Province. Health report of Chaohu Lake in 2018. [安徽省巢湖管理局. 2018巢湖健康状况报告.]
- [27] Guizhou Provincial Environmental Protection Department. Guizhou environmental quality report (1986-2016). 贵州省环

- 境保护厅. 贵州省环境质量报告书(1986—2016).]
- [28] Xiao L, Jing BX, Li SH *et al.* Analysis of total phosphorus concentration in Fuxian Lake from 2002 to 2015. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, **58**(2): 335-337. [肖蕾, 金宝轩, 李石华等. 2002—2015年抚仙湖总磷浓度变化分析. 浙江农业科学, 2017, **58**(2): 335-337.]
- [29] Chen XH, Qian XY, Li XP *et al.* Long-term trend of eutrophication state of Lake Erhai in 1988–2013 and analyses of its socio-economic drivers. *J Lake Sci*, 2018, **30**(1): 70-78. DOI: 10.18307/2018.0107. [陈小华, 钱晓雍, 李小平等. 洱海富营养化时间演变特征(1988—2013年)及社会经济驱动分析. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 70-78.]
- [30] Luo YY, Zhao B, Dong WF *et al.* Phosphorus morphology and distribution characteristics of typical inflow river in Erhai buffer zone. *Science and Technology Innovation Herald*, 2015, (4): 106-107. [罗杨阳, 赵斌, 董文飞等. 洱海缓冲带典型入湖河流磷形态分布特征. 科技创新导报, 2015, (4): 106-107.]
- [31] Yang H, Li HY, Li LH. Analysis on spatial and temporal changes of phosphorus load and eutrophication of Erhai Lake in 2015. *Pearl River*, 2017, **38**(7): 77-79. [羊华, 李红燕, 李丽怀. 2015年洱海入湖河流磷负荷时空变化与洱海富营养化浅析. 人民珠江, 2017, **38**(7): 77-79.]
- [32] Li WP, Chen AH, Yu L *et al.* Pollutant influx from the main river (Kherlen River) of Lake Hulun in wet seasons, 2010–2014. *J Lake Sci*, 2016, **28**(2): 281-286. DOI: 10.18307/2016.0206. [李卫平, 陈阿辉, 于玲红等. 呼伦湖主要入湖河流克鲁伦河丰水期污染物通量(2010—2014). 湖泊科学, 2016, **28**(2): 281-286.]
- [33] 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.]
- [34] Cui CX, Hua WH, Yuan GW *et al.* Current situation evaluation and trend analysis of water quality in Hongze Lake. *Comprehensive Utilization of Resources in China*, 2013, (10): 44-47. [崔彩霞, 花卫华, 袁广旺等. 洪泽湖水水质现状评价与趋势分析. 中国资源综合利用, 2013, (10): 44-47.]
- [35] Zhu X. Study on prevention and control of total phosphorus pollution in Hongze Lake based on ecological factor scheduling. *Reform & Opening*, 2017, (21): 104-106. [朱翔. 基于生态因子调度的洪泽湖总磷污染防治研究. 改革与开放, 2017, (21): 104-106.]
- [36] Bai YBLG, Xu FR, Gao SL *et al.* Progress in environmental protection and restoration of Biwa Lake in Japan. *Flood Control and Drought Fighting in China*, 2018, **28**(12): 42-46. [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. 中国防汛抗旱, 2018, **28**(12): 42-46.]
- [37] Yu H. Integrated control of pollution sources in Lake Biwa basin, Japan and its successful experience in lake eutrophication management. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(11): 1243-1250. [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. 环境科学研究, 2014, **27**(11): 1243-1250.]
- [38] 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.
- [39] 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. DOI: 10.1016/j.jglr.2014.05.001.
- [40] National Development and Reform Commission. Overall plan for comprehensive water environment improvement in the Taihu Lake basin (revised in 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).]