

特大洪水对浅水湖泊磷的影响:以 2016 年太湖为例*

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

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 太湖流域水资源保护局, 上海 200434)

摘要: 2016 年太湖发生特大洪水, 水位达到历史第二, 入湖水量比平均年多 60.8 亿 m³. 而从 2016 年开始太湖磷指标改变了 2010 年以来平缓下降的趋势出现回升, 也就是出现所谓“磷反弹”的问题. 为了研究磷反弹和特大洪水之间的关系, 本研究从 2016 年入湖水量、水质、磷通量、水中磷存量以及磷在太湖中的迁移过程出发, 对大洪水前后太湖磷的变化进行分析. 结果表明: 洪水期间入湖河道带来大量的磷是引起磷反弹的主要原因. 由于洪水的影响, 2016 年磷净入湖通量比往年平均水平多出 579.2 t, 约达到 1683.0 t. 其中, 两次洪水贡献极大, 约占全年水平的 50% (6—7 月和 10 月的洪水分别带入 580.5 和 268.2 t 磷). 磷反弹的另一个原因在于太湖存在较高的磷滞留率, 磷在入湖后很难经由出湖河道排出. 从入湖后磷的归趋上看, 洪水过程中高磷浓度水块尽管存在由太湖西北部向东、南部迁移的过程, 但途中水体磷浓度出现显著降低 (即滞留现象), 导致高磷浓度水块未能到达出湖排泄区 (太浦港、望虞河等). 全年净入湖磷通量中仅有小部分 (205.3 t) 直接引起水体磷浓度上升, 而其余的大部分则滞留于底泥之中, 明显高于往年水平. 2016 年滞留在太湖内的磷很可能破坏了往年底泥—上覆水的磷平衡, 对后续水质的变化产生间接的影响.

关键词: 太湖; 磷反弹; 洪水; 通量; 存量; 磷迁移

Effects of great floods on phosphorus in shallow lakes: A case study of Lake Taihu in 2016*

ZHU Wei¹, HU Siyuan¹, FENG Ganyu^{1**}, ZHANG Yuanming², ZHAI Shuhua², XUE Zongpu¹, ZHAO Shuai¹, CHEN Huaimin¹ & WANG Ruochen¹

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

(2: Taihu Basin Water Resources Protection Bureau, Shanghai 200434, P.R.China)

Abstract: In 2016, a heavy flood occurred and resulted the second highest water level of Lake Taihu in the history. The volume of water into Lake Taihu was 5.79×10^9 m³ more than the average of previous years. Since then, the phosphorus index of Lake Taihu changed from a slow decline since 2010, to the so-called “phosphorus rebound”. In order to study the relationship between phosphorus rebound and the great flood of 2016, this study analyzed the water volume, water quality, phosphorus flux, phosphorus storage in water and phosphorus migration in Lake Taihu. The change of phosphorus before and after the great flood was also carried out. The results showed that the large amount of phosphorus in the river channel during the flood period is the main cause of phosphorus rebound. Due to the impact of flooding, the net flux of phosphate into the lake in 2016 was 579.2 t more than the previous years’ average, reaching 1683.0 t. Among them, the two floods contributed a great share, accounting for about 50% of the annual level (the floods from June to July and October brought 580.5 and 268.2 t of phosphorus, respectively). Another reason for the rebound of phosphorus is that there is a high phosphorus retention rate in Lake Taihu, and it is difficult for phosphorus to be discharged through the lake channel after entering the lake. From the fate of phosphorus after entering the lake, the water block with high-phosphorus concentration in the flood process, although there is a migration from the northwestern to the east and the south in Lake Taihu, the phosphorus concentration in the water body is significantly reduced (i.e., the retention phenomenon), resulting in

* 2019-08-06 收稿; 2019-12-26 收修改稿.

江苏省科技计划项目 (BE2018737)、国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07603-003-04) 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: fengganyuhu@163.com.

high phosphorus concentration. The water block failed to reach the lake discharge area (Taipu Port, Wangyu River, etc.). Only a small part (205.3 t) of the net phosphorus flux in the whole year directly caused a rise of the phosphorus concentration in the water body, while the rest was retained in the sediment, which was significantly higher than the previous years. Phosphorus retained in Lake Taihu in 2016 is likely to destroy the phosphorus balance of the mud-overlying water at the end of the year, which has an indirect impact on subsequent changes in water quality.

Keywords: Lake Taihu; phosphorus rebound; flood; flux; stock; phosphorus migration

2016 年太湖发生流域性特大洪水^[1-4], 据 2016 太湖健康状况报告^[5], 7 月 8 日太湖水位达到 4.87 m, 为 1954 年以来第二高水位, 仅次于 1999 年. 水利部网站^[6]也公布, 2016 年太湖流域降雨持续偏多达历史极值, 较常年同期偏多 4 成, 与 1961 年以来同期雨量最多年份 1991 年基本持平, 受此影响太湖水位不断攀升, 最大日涨幅达 16 cm, 年内最高水位仅低于 1999 年历史最高水位 0.10 m, 且水位超警历时长达 60 天, 为 1999 年以来超警历时最长的一年, 同时, 周边河网多站水位创历史新高, 最多时超过 40 个站点水位超警戒, 江南运河常州至苏州沿线一度全线超保证水位, 13 个站点水位创历史新高.

与此同时, 大量研究表明, 2016 年太湖 TP 浓度异常升高, 打破了 2010 年以来平缓下降的趋势. 朱广伟等^[7]分析了 2005—2017 年北部太湖梅梁湾、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. 在我们前期的研究中^[8], 依据梅梁湾和贡湖湾 2010—2017 年间水质数据, 得到 TP 浓度在 2016 年有所回升, 回升比例约为 15%~20% 的结果. 王华等^[9]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, 2016 年达到 8 年期间最高值的结果. 谷孝鸿等^[10]基于 2007—2016 年对太湖的十年水质监测数据, 发现 TP 浓度在 2008 年达到峰值后开始下降, 而后趋于平缓, 2016 年又趋上升, 出现反弹趋势.

关于 2016 年以来太湖磷波动的原因, 存在各种角度的分析, 但 2016 年入湖磷负荷量大于往年很可能是太湖 TP 异常的一个重要原因^[9,11]. 一般来说入湖河流 TP 平均浓度高于太湖水体平均浓度, 持续入湖的磷通量使得太湖 TP 浓度一直维持在较高水平. 朱广伟等^[7]还提出藻类的“泵吸作用”促进太湖磷浓度上升, 认为藻类大量繁殖能够改变水体 pH 以及促进耗氧, 从而大大加快底泥磷的释放, 使得底泥中磷转移到藻细胞内, 造成水体 TP 浓度升高^[7,9,11]. 近十年以来, 季节性底泥磷释放现象应该长期存在. 逢勇等^[12]计算比较了外源负荷和内源释放对太湖 TP 的贡献, 认为底泥释放量年均约为 275.5 t, 仅相当于外源输入量的 15.6%. 但这样的释放量每年存在, 难以成为 2016 年磷开始反弹的主要原因. 另一方面, 风浪作用也被认为与底泥释放有关, 风浪引起底泥再悬浮及间隙水释放. 但风浪强度变化所引起的波动一般是短暂的^[13], 太湖风力变化和磷反弹并不对应. 此外, 也有观点认为 2015 年以来东太湖水生植被的大量减少也可能是造成 TP 浓度升高的原因之一^[9,11].

在我们前期的研究中^[8], 提出了 2016 年大洪水是磷反弹主要原因的观点. 2016 年的洪水过程携带大量磷进入太湖湖区, 洪水消退过程中, 大多数以颗粒态存在的磷逐渐累积在湖水和底泥之中, 而底泥中的磷随着微囊藻生长消耗水体溶解态磷以及水体 pH 和溶解氧的变化又逐渐释放到水体中, 因此造成太湖磷水平的上升. 秦伯强等^[14]也认为洪水是导致湖泊富营养化的原因之一, 洪水泛滥所带来的大量的悬浮物携带营养盐, 特别是多数以颗粒态存在的磷, 沉入湖底, 在之后的风浪等作用大量悬浮, 并带入大量的营养物质到上覆水中, 导致湖泊逐步趋于富营养化. 陈修康等^[15]认为洪水对湖库的影响具有两面性, 一方面, 随水流进入水体的大量固体颗粒物中, 一些类似于絮凝剂, 能够吸附营养盐并最终沉积在底泥中, 降低可利用性营养盐浓度, 尤其是磷; 另一方面, 洪水携带大量的营养盐等物质进入水体, 沉积在水体底部, 增加了水体营养盐的负荷.

但是此前的研究主要依据我们自己实测的梅梁湖、贡湖的数据进行分析, 因为没有入湖河道水质、水量数据, 未能全面地计算全太湖洪水前后、洪水过程中磷输入通量、迁移过程以及累积规律. 为了更加准确、定量地说明洪水和全太湖磷反弹之间的关系, 本次研究与太湖流域水资源保护局(简称太湖水保局)合作, 使用全太湖 33 个测点及环太湖 22 条出入湖河道的水质数据对 2016 年太湖磷的输入、输出通量、水质、存量等进行全面分析, 期望能够更加全面、定量地说明 2016 年洪水前后太湖磷的变化.

1 数据与方法

1.1 湖区划分与采样点分布

太湖水保局的监测以及以往的研究^[16-17]都将太湖划分为五里湖、梅梁湖、竺山湖、贡湖、东太湖、胥湖、湖心区、西部沿岸区和南部沿岸区的 9 大湖区,布设有 33 个水质监测站点,并在 22 条主要出入湖河道上设有监测断面(图 1). 本研究以上述 33 个站点的水质数据,22 条主要出入湖河道每月的太湖磷浓度、水位、水量数据为依据对 2016 年洪水前后太湖磷变化进行分析,湖区水质、出入湖水量、磷浓度数据均来源于太湖水保局.

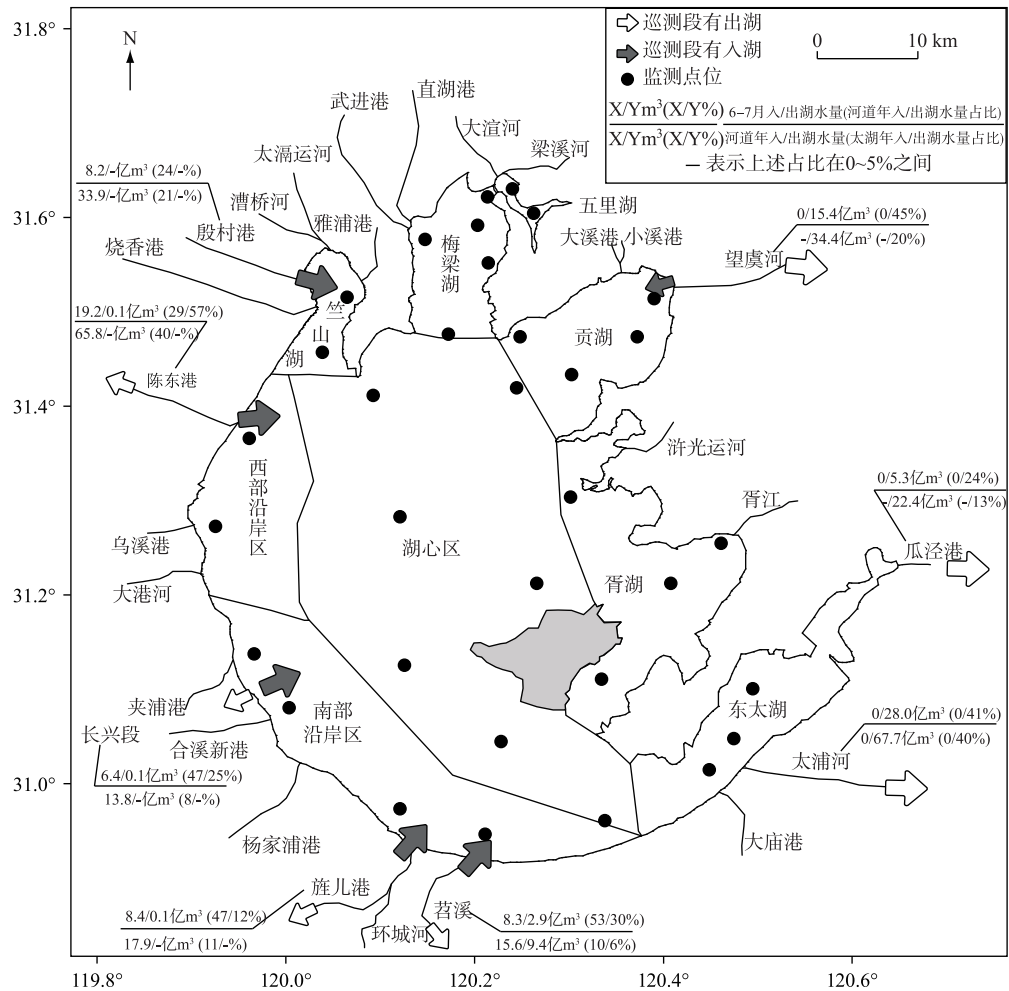


图 1 太湖湖区划分、采样点布置、主要出入湖河道及出入湖水量

Fig.1 Area division, sampling point arrangement, main access to the lake channel and water volume of Lake Taihu

1.2 磷浓度计算方法

采用了监测点代表水体体积与湖区水体体积加权综合运用的方法进行计算,包括监测点代表水体的磷浓度($c_{i,j}$)、湖区磷浓度(c_i)和全湖磷浓度(C). 其中, i 为第 i 个湖区, j 为湖区内第 j 个监测点. 计算公式如下:

$$c_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} \left(c_{i,j} \frac{V_{i,j}}{V_i} \right) \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^9 \left(c_i \frac{V_i}{V} \right) \quad (2)$$

$$V_{i,j} = \sum_{j=1}^{j=n} (S_{i,j} \cdot H_{i,j}) \quad (3)$$

式中, n 为湖区内的监测点数, $V_{i,j}$ 为监测点代表的水体体积, V_i 为湖区的体积, V 为太湖水体体积, $S_{i,j}$ 为监测点代表的水体水面面积, $H_{i,j}$ 为监测点代表的水体平均水深。

1.3 磷通量计算方法

本研究分析了太湖与出入湖河道间的磷通量交换情况. 选取了每月太湖沿岸 23 个巡测段的出入湖水质、水量数据进行计算. 计算公式如下:

$$\Delta M = \sum_{k=1}^{23} (Q_k \cdot c_k) \quad (4)$$

式中, ΔM 为太湖每月的出、入湖通量, Q_k 和 c_k 分别为第 k 个巡测段的月出入湖水量和月均磷浓度. 计算时, 负值表示出湖, 正值表示入湖.

1.4 磷存量计算方法

对于太湖磷存量的分析涉及监测点代表水体的磷存量($m_{i,j}$)、湖区磷存量(m_i)和全湖磷存量(M), 并采用了监测点代表水体体积与湖区水体体积加权综合运用的方法进行计算分析. 计算公式如下:

$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{j=n} \left(m_{i,j} \frac{V_{i,j}}{V_i} \right) \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^9 \left(m_i \frac{V_i}{V} \right) \quad (6)$$

鉴于不同湖区间体积和面积相差较大, 比较湖区间磷存量的相对情况时选取单位面积磷存量(m'_i). 计算公式如下:

$$m'_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^{j=n} S_{i,j}} \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 太湖水量和磷浓度变化

图 2 为 2016 年太湖逐月水位和出入湖水量的变化情况. 作为自 1954 年以来第二大洪水年, 2016 年的最高月均水位达到了 4.5 m 以上, 6 月和 7 月连续 2 个月水位接近 4.0 m, 主洪峰从 6 月 3 日开始超过警戒水位, 7 月 3 日涨至保证水位 4.65 m, 7 月 8 日达到最高水位 4.87 m, 一直到 8 月 4 日退至警戒水位以下, 洪峰持续 60 天, 是一次流域性特大洪水^[6]. 而除主洪峰以外, 10 月、11 月水位再次超过警戒水位, 直到年末(12 月)和年初(1 月)水位才基本持平(均约 3.4 m), 回归正常水平.

从入湖水量上看, 年入湖水量达到 162.7 亿 m^3 , 是 2006—2015 年近十年平均年入湖水量(101.9 亿 m^3)的 156.8%^[18-27], 多入湖 60.8 亿 m^3 , 6 月和 7 月连续 2 个月入湖水量接近 60 亿 m^3 . 在空间分布上(图 1), 陈东港和殷村港的入湖水量占比较多, 陈东港 6、7 月入湖水量约占太湖 6、7 月总入湖水量的 1/3. 而出湖水量在 7 月份达到峰值, 洪峰滞后 1 个月左右. 总体表现出 6 月份蓄水 10 亿 m^3 左右, 7 月份排泄 10 亿 m^3 左右, 8 月份继续排泄 8 亿 m^3 左右. 空间上, 太浦河和望虞河为主要的出湖河道, 太浦河 6、7 月出湖水量占太湖 6、7 月总出湖水量的一半以上, 望虞河约占 1/3.

为了了解入湖、出湖水质, 选取了陈东港、殷村港、太浦河和望虞河四条主要出入湖河道一年间的水质进行整理, 结果如图 3. 由于河道在不同日期流向可能相反, 因此, 在分析每条河道时以流向为依据, 将河道的水质分为入湖水质和出湖水质. 整体来看, 陈东港、殷村港的入湖 TP 浓度一直保持在比较高的水平, 在 0.2 mg/L 左右; 而主要出湖的太浦河、望虞河其 TP 浓度相对较低, 基本在 0.1 mg/L 以下. 主要入湖河道陈东

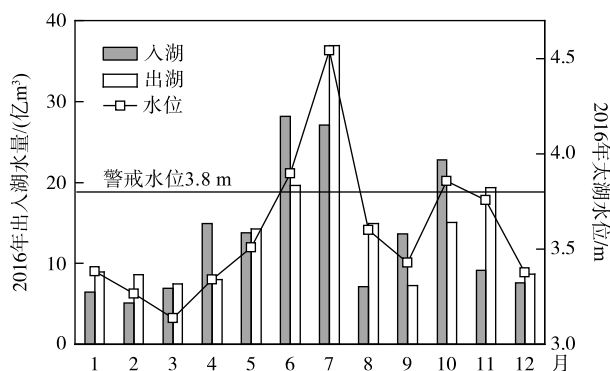


图 2 太湖水位和出入湖水量的变化

Fig.2 Changes in the water level and inflow/outflow of Lake Taihu

港、殷村港的 TP 浓度都在 3、4 月出现上升,在 6—7 月的洪峰过程中稍有下降,而 8 月份又稍有回升。从入湖水量来看,3 月入湖水量超过 15 亿 m^3 ,相当于洪水初期的部分,这个时候 TP 浓度最高,而入湖水量最大的 6—7 月 TP 浓度稍有下降。有趣的是在 8—9 月份陈东港随着水位降低稍有出水时,TP 浓度出现显著的峰值,可能是在河口地带磷有一定的聚集而出现的现象。

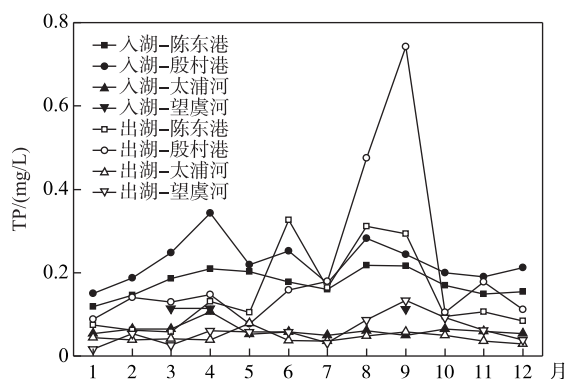


图 3 2016 年太湖主要出入湖河道总磷浓度的月变化

Fig.3 Monthly change of total phosphorus concentration in the main river channel of Lake Taihu in 2016

从水质、地理位置的代表性出发,选取了竺山湖、湖心区、南部沿岸区和东太湖 4 个湖区对洪水蓄泄过程中磷的变化进行分析,结果见图 4。区域性地看,太湖磷明显存在西北高、东南低的空间差异,全湖平均与湖心区比较接近,TP 在 0.06~0.14 mg/L 范围,DTP 在 0.02~0.05 mg/L 范围。东太湖和南部沿岸区 TP、DTP 浓度略低于太湖平均水平,而竺山湖则显著偏高。在洪水过程中,除东太湖和南部沿岸区没有表现出显著的磷浓度变化以外,太湖总体平均值和其他湖区都有一定的响应,而竺山湖磷浓度出现非常显著的峰值,其最大 TP、DTP 浓度分别高达其 2016 年年均值的 3.12 倍和 3.57 倍,太湖 2016 年年均值的 7.77 倍和 11.8 倍,基本上与入湖河道的磷浓度接近。陈东港在 8—9 月份回水时,竺山湖的磷浓度出现异常的高峰值,而全湖平均和湖心区都在 8 月份出现了磷浓度的峰值。

2.2 磷通量

根据沿湖 22 条出入湖河道水量和水质的数据,可以计算出 2016 年逐月磷通量的变化,见表 1。2016 年入湖通量为 2569.3 t,出湖通量为 886.3 t,净入湖通量为 1683.0 t。总体而言每个月入湖通量都大于出湖通量,一般要大于 37.7%~669.1%。在洪峰出现的 6—7 月份,磷的入湖通量出现显著的峰值,单月达到 400 t 左右。而出湖通量的峰值则出现在 7—8 月单月出湖通量在 100~150 t 左右。伴随 10 月,11 月的水位再次上

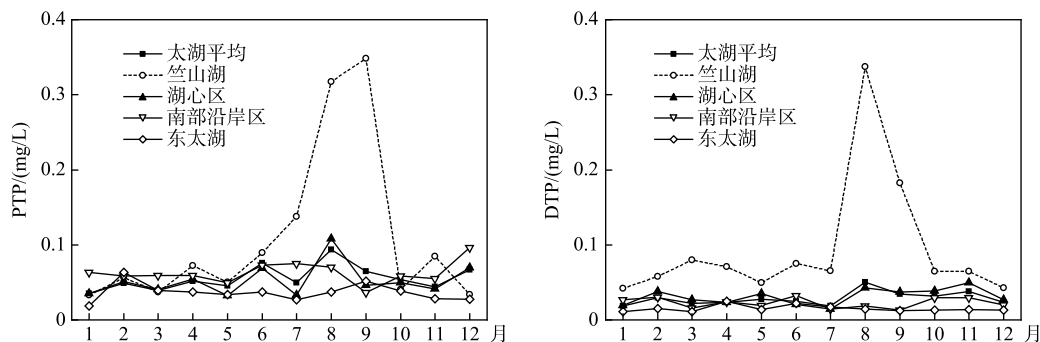


图 4 2016 年太湖全湖及典型湖区颗粒态磷、溶解态磷浓度的月变化

Fig.4 Monthly variation of particulate phosphorus and dissolved phosphorus concentrations in the whole lake and typical area of Lake Taihu in 2016

表 1 2016 年太湖磷通量及滞留率逐月变化数据
Tab.1 Monthly data of phosphorus flux and retention rate in Lake Taihu in 2016

时间	入湖 磷通量/t	出湖 磷通量/t	净入湖 磷通量/t	滞留率/ %
1 月	74.7	39.4	35.3	47.3
2 月	82.4	51.1	31.3	38.0
3 月	101.1	34.1	67.0	66.3
4 月	279.2	36.3	242.9	87.0
5 月	215.2	90.5	124.7	57.9
6 月	405.6	95.7	309.9	76.4
7 月	414.2	143.6	270.6	65.3
8 月	155.5	108.2	47.3	30.4
9 月	224.6	57.7	166.9	74.3
10 月	368.4	100.2	268.2	72.8
11 月	129.6	94.1	35.5	27.4
12 月	118.8	35.4	83.4	70.2
合计	2569.3	886.3	1683.0	65.5

升,9 月和 10 月的入湖通量也再次上升,达到 224.6~368.4 t/月的水平,相对应的 10—11 月出湖通量也有一些上升. 洪水期间的磷滞留率(单月出入湖磷通量差值与入湖磷通量之比)一般在 27.4%~87.0% 范围.

通过将 22 条出入湖河道磷通量进行比较,得出磷的主要入湖河道为陈东港(通量为 1115 t,占 43.4%)和殷村港(通量为 700 t,占 27.2%),其余来自长兴港等(占 7.9%)、旌儿港(占 6.5%)、苕溪等(占 5.0%),其余河道占 10.0%. 而主要出湖河道为太浦港(通量为 279 t,占 32.5%)和望虞河(通量为 192 t,占 21.7%),其余来自瓜泾港(11.2%)、幻溇等(8.0%)、苕溪等(占 6.8%)、大渲河(5.4%)、太浦口等(4.1%),其余河道占 10.3%. 这 4 条主要河道磷通量及水量变化见图 5. 在分析每条河道时以流向为依据,将磷通量分为入湖和出湖通量. 陈东港在洪峰期间的 7 月份磷通量达到最大值,8—9 月份有所下降后的 10 月份再次体现出很高的通量,而在太湖水位达到警戒水位之前的 4—5 月份已经上升到较高的

通量水平. 而殷村港则从 4 月份开始一直到 10 月份都表现出磷通量较大的趋势,在水位最高的 7 月份达到最大值. 太浦港的出湖通量在水位上升的 6 月份变化不大,到 7 月份通量达到最大,8—9 月份通量很小. 而望虞河则在 6 月份洪峰初期达到了最大出湖通量,后续的变化不太明显.

2.3 水中的磷存量

2.3.1 水中磷存量的逐月变化 图 6 所示为太湖及其不同湖区水中磷存量的变化情况. 太湖水中总存量在 400~900 t 之间波动,面积最大的湖心区存量为 200~300 t,竺山湖虽然面积不大但也存有较多磷且波动较大. 洪水期间湖心区与太湖总体的规律比较一致,都在 8 月份出现峰值;而竺山湖从 6 月份开始出现磷存量的明显上升,峰值一直持续到 9 月份,东太湖的波动比较小. DTP 的存量与 TP 的变化规律基本相同,竺山湖在洪水期的峰值非常明显,太湖总体及太湖湖心区也在 8 月份出现峰值. 只有南部沿岸区稍有不同,在 6、7 月份 TP、DTP 上升以后,9 月份有一个明显的下降,10 月份又有回升.

考虑到不同湖区的面积和体积存在明显差异,因此,通过单位面积磷存量来比较不同水体间的差异(图 7). 从单位面积水中 TP 存量来看,太湖总体与湖心区接近,在 0.22 t/km² 左右. 竺山湖最多,东太湖最少. 洪

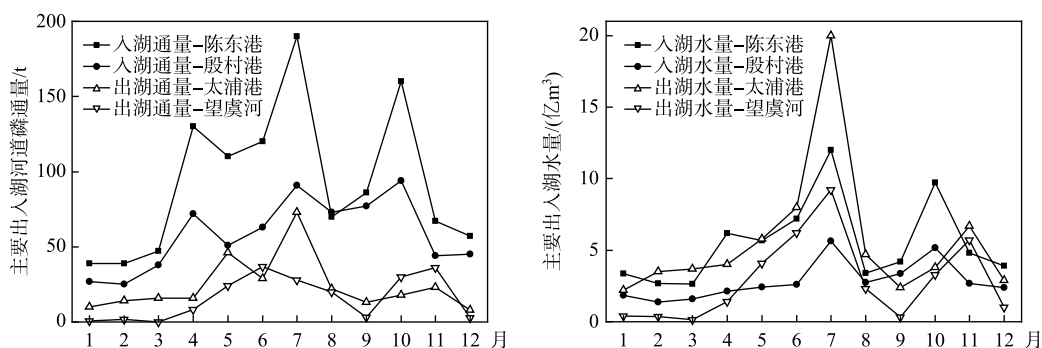


图 5 2016 年太湖主要出入湖河道磷通量(a)和水量(b)的逐月变化

Fig.5 Monthly change of phosphorus flux(a) and water volume(b) in the main river channel of Lake Taihu in 2016

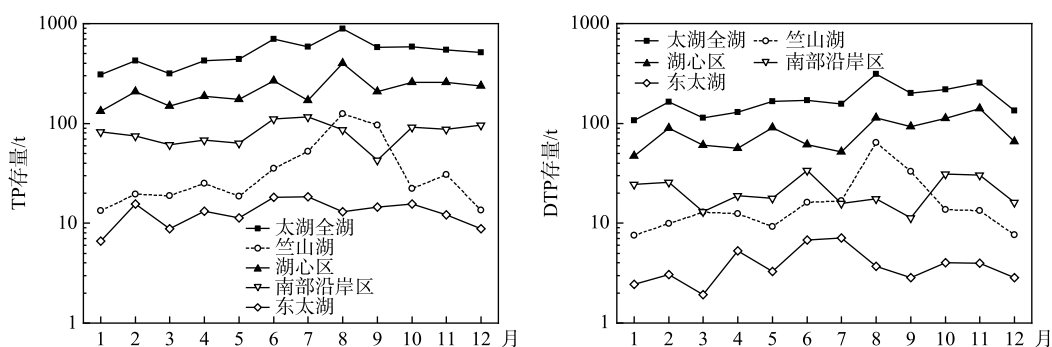


图 6 太湖磷存量的逐月变化

Fig.6 Monthly change of phosphorus storage in Lake Taihu

水期间竺山湖单位面积 TP 的峰值非常明显,大约从 0.3 t/km^2 上升至 1.8 t/km^2 ,DTP 的数据也表明了相同的特点.太湖总体和湖心区也是在 8 月份出现峰值,在 TP 和 DTP 的数据中都能观察到这一趋势.

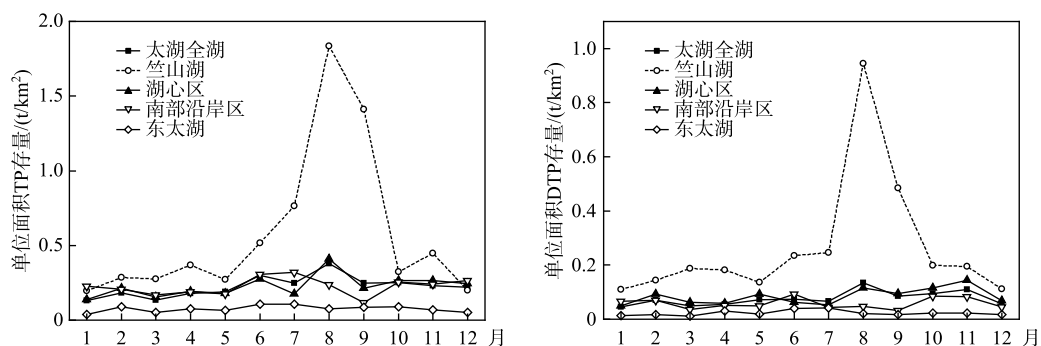


图 7 单位面积磷存量的逐月变化

Fig.7 Monthly change of phosphorus stock per unit area

2.3.2 水中磷存量的迁移过程 将单位面积水中磷存量的数据按月制作等值线就可得到图 8. 总体而言太湖水中单位面积磷存量在空间上主要呈现出西北部高、东南部低的差异,而季节上出现冬季低、夏季高的规律.在 2016 年的特大洪水期间,随着 4、5 月份入湖水量增加,磷存量出现由西向东的增加现象;6 月份西太湖殷

村港位置出现明显磷的增加,除东南部局部区域外太湖的近 3/4 面积单位面积水中磷存量达到 0.2 t/km^2 ; 其中,单位面积水中磷存量 $> 0.2 \text{ t/km}^2$ 的区域面积在 5—6 月之间向太湖东南方向扩大了约 1000 km^2 . 7—8 月份西太湖竺山湖、梅梁湖周边出现持续的磷增加,尤其是陈东港位置的增加尤为显著,单位面积水中磷存量超过 0.4 t/km^2 的高浓度区向东南部分扩散,但 0.2 t/km^2 的等值线并没有进一步向东南迁移,反而稍微出现一些回缩;也就是说太湖磷的高浓度区并没有出现望向虞河、太浦河两个主要出湖河道迁移的现象. 8 月以后全太湖都是磷存量回落的过程,9 月份大于 0.4 t/km^2 的高浓度区向西北回缩, 0.2 t/km^2 的等值线基本回到了西北和东南的中间线附近. 10 月份,由于出现了二次洪峰, 0.2 t/km^2 的等值线又向东南方向移动,但 0.4 t/km^2 以上的高浓度区基本均化消失. 此后太湖的大部分区域保持在单位面积水中磷存量超过 0.2 t/km^2 的水平. 洪水期间的整个迁移过程表现出高浓度区就地回落,太湖整体磷存量水平增加的趋势.

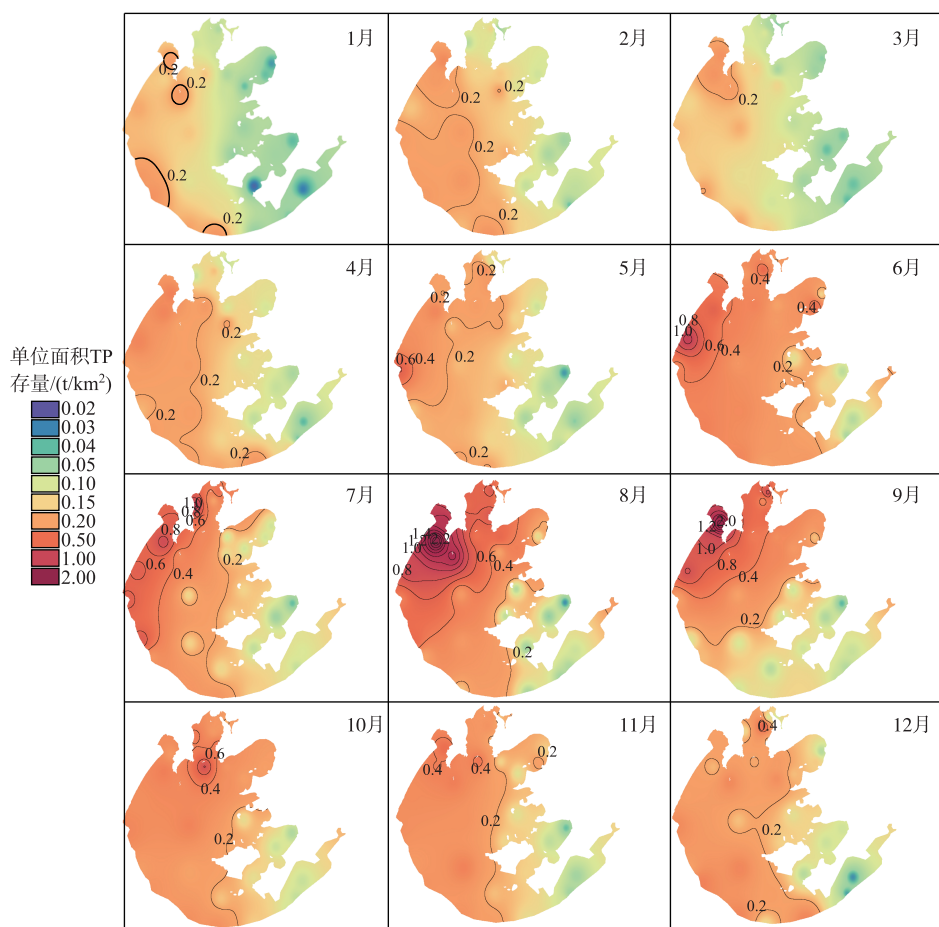


图 8 2016 年每月单位面积 TP 存量分布的变化情况

Fig.8 Changes in the distribution of TP stock per unit area of each month in 2016

2.3.3 水中磷存量的积累过程 为了更加清晰地分析水中磷的变化过程,对洪水过程中月间水中磷存量的变化量进行计算得到图 9. 月间累积情况指相邻两月间单位面积总磷存量的差值,正值表示存量增加,负值表示存量减少. 从这一结果看出,主洪峰发生的 7—8 月期间,除了胥湖、东太湖和南部沿岸区少数区域,太湖整体的磷处于上升状态,西北部、竺山湖及湾外区域磷上升非常显著,月间增幅达 1.0 t/km^2 以上. 8—9 月期间,也就是第一次洪峰回落期间,太湖水中的磷存量全面下降,尤其是原来的高增长区,下降更加显著. 9—10 月份出现了北部下降、南部上升的趋势.

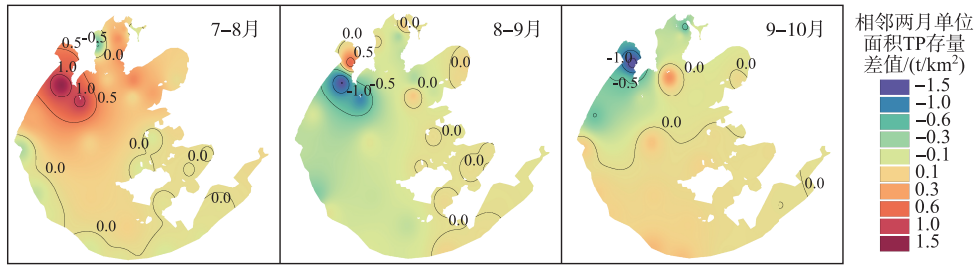


图 9 7—10 月间单位面积磷存量的逐月积累(相邻两月差值)情况

Fig.9 Monthly accumulation of phosphorus stocks per unit area from July to October, i.e., the stocks variation between two months

3 讨论

3.1 洪水期间磷的通量

2016 年太湖发生的洪水属于“特大洪水”^[5],共出现两次洪峰;主洪峰出现在 6—7 月,持续 60 天,入湖水量达到 55.3 亿 m^3 左右;第二次洪峰出现在 10 月份,入湖水量 22.8 亿 m^3 左右. 全年总入湖量达到 162.7 亿 m^3 ,比近十年年均水平增加 60.8 亿 m^3 . 在洪峰期间的 7 月份,河道 TP 浓度有所降低,7 月以后有所上升,特别是殷村港 9 月出湖 TP 浓度出现非常显著的峰值,约是 7 月的 4 倍. 洪水过程中太湖全湖平均以及湖心区磷浓度上升,竺山湖 TP 浓度上升尤为显著. 在 6—7 月第一次洪峰中太湖 TP 入湖通量为 819.8 t,出湖通量为 239.3 t,净入湖通量达到 580.5 t. 10 月份的第二次洪峰再次带入 368.4 t 的磷,净入湖通量达到 268.2 t. 2016 年全年 TP 入湖通量为 2569.3 t,出湖通量为 886.3 t,净入湖通量达到 1683.0 t. 太湖全年 TP 入湖通量一般在 1350~1918 t 范围,出湖通量在 340~1033 t 范围,净入湖通量在 815~1530 t 范围^[28-29]. 将上述两篇文献中涉及的 2000—2002 年及 2009 年的数据平均可以得到太湖平均入湖通量为 1647.0 t、净入湖通量 1103.8 t. 与这个平均值比较 2016 年入湖磷通量多出 922.3 t,净入湖量多出 579.2 t,可以认为净入湖量的增加是洪水期间入湖河道磷浓度升高和洪水大量输入的结果.

3.2 洪水带入磷的归趋

一般认为,磷入湖后,主要有两种迁移转化途径:一部分在水体悬浮物表层吸附或沉积,另一部分存在于水体中,进入生物体^[30]. 太湖水中 TP 存量在洪峰到来之前的 5 月份为 442.2 t,第一次洪峰输入后的 8 月份达到 886.6 t,增加了 444.4 t,与净入湖量的 580.5 t 有一定的吻合性,说明洪水期间输入的磷 76.6% 还是赋存在水中,而 136.1 t 已经不在水中,可能是沉降后在底泥中赋存. 从 2016 年全年来看,12 月与 1 月份水中磷的差值为 205.3 t,而净入湖量通量为 1683.0 t,中间的缺失量为 1477.7 t,这一部分最合理的解释是沉积累积于底泥之中. 研究表明,磷以颗粒态或溶解性磷酸盐的形式进入湖体,颗粒态磷可以直接储存在底泥中,溶解性磷酸盐可以通过初级生产者被包含在有机物中,最终以有机形式沉降到底部^[31],甚至表层沉积物(0~2 cm)中富集的磷约占总磷浓度的 33%^[32],说明磷的沉降累积是外源输入的磷在湖泊中迁移转化的一个重要组成部分. 可以认为,沉积或滞留在底泥中是磷的主要归趋. 而对 2016 年而言,全太湖湖体净增总磷 1683.0 t,其中 205.3 t 在水中造成磷浓度上升,另一部分 1477.7 t 积累于底泥之中.

3.3 洪水期间磷的迁移与累积

洪水期间磷的主要输入位置在西北部,竺山湖周边尤为明显,这与洪水期间的水量输入和主要河道的磷通量输入是基本吻合的. 高含磷浓度的水体从西北部向东南部湖区迁移,过程中除去东南部局部区域以外,整个太湖水中磷的浓度有所升高. 从单位面积磷存量来看,大于 0.4 t/km^2 的高浓度区域在整个洪水过程中大多数局限在竺山湖、梅梁湖和西部沿岸区,并没有大面积迁移到湖心区以及太浦河、望虞河的出湖河口. 也就是说,高磷浓度的水块在向东南迁移的过程中磷的浓度出现了下降. 这可能与入湖水与原湖水混合有一定关系,另一方面,也是磷沉积进入底泥现象的间接反映. 从颗粒态磷的浓度变化来看,也明显出现洪峰

后的减少现象. 有研究表明, 磷因重力沉降而沿着水流方向逐渐减少^[33], 因此, 磷向底泥的沉降、累积使得太湖高磷浓度的水块在向东、南部迁移的过程中磷的浓度出现了下降. 前文提到, 太湖全年 TP 平均净入湖通量为 1103.8 t, 2016 年净入湖通量约达到 1683 t, 与之相比多出 579.2 t, 磷滞留量明显高于往年水平, 且有相当一部分滞留在底泥中, 打破了往年底泥—上覆水间的磷平衡关系, 很可能是引起 2017 年太湖 TP 浓度居高不下的主要原因.

4 结论

1) 2016 年太湖发生特大洪水, 水位达到历史第二, 入湖水量比平均年多 60.8 亿 m^3 . 洪水期间入湖河道及太湖湖体水质中的磷浓度明显升高, 竺山湖及其周边上升尤为明显. 2016 年全年 TP 入湖通量为 2569.3 t 左右, 出湖通量为 886.3 t 左右, 净入湖通量约达到 1683 t. 其中净入湖量比平均年多出 579.2 t.

2) 2016 年全太湖湖体净增总磷 1683.0 t, 其中 205.3 t 在水中造成磷浓度上升, 另一部分 1477.7 t 积累于底泥之中.

3) 洪水带来的磷首先造成竺山湖、梅梁湖和西部沿岸区磷浓度的升高, 然后逐步向湖心、东部、南部迁移, 迁移过程中磷浓度明显下降. 高浓度的含磷水块并没有发展到太浦河、望虞河这些主要的出湖排泄区, 出现了明显的磷滞留现象.

4) 洪水直接造成了太湖大部分区域水中磷浓度上升, 并且在底泥中积累了较多的磷, 底泥中磷的累积也会对后续水质的变化产生间接的影响.

5 参考文献

- [1] Wang TS. Analysis of the 2016 great flood in the Taihu Basin. *China Flood & Drought Management*, 2018, **28**(6): 60-62. [王同生. 太湖流域 2016 年大洪水分析. 中国防汛抗旱, 2018, **28**(6): 60-62.]
- [2] Mei Q, Li P, Jin K *et al.* The great flood prevention work and thinking in Taihu Lake Basin in 2016. *China Flood & Drought Management*, 2016, **26**(5): 22-25. [梅青, 李鹏, 金科等. 2016 年太湖流域特大洪水防御工作及思考. 中国防汛抗旱, 2016, **26**(5): 22-25.]
- [3] Li KG. 2016 Flood Control and Drought Relief Work Report. *China Flood & Drought Management*, 2017, **27**(1): 12-15. [李坤刚. 2016 年防汛抗旱工作报告. 中国防汛抗旱, 2017, **27**(1): 12-15.]
- [4] Wu YN, Sun HT, Feng DW *et al.* Practice and thinking on the flood dispatching of Taihu Lake in 2016. *China Water Resources*, 2016, (15): 15-17. [伍永年, 孙海涛, 冯大蔚等. 2016 年太湖洪水调度实践及思考. 中国水利, 2016, (15): 15-17.]
- [5] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau 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, 上海市水务局. 太湖健康状况报告, 2016.]
- [6] Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/201702/t20170212_844729.html. [中华人民共和国水利部. http://www.mwr.gov.cn/xw/slyw/201702/t20170212_844729.html.]
- [7] 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.]
- [8] 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 年水质变化趋势及异常分析. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 296-305.]
- [9] Wang H, Chen HX, Xu ZA *et al.* The trend of total phosphorus concentration variation analysis and reason discussion 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.]
- [10] Gu XH, Zeng QF, Mao ZG *et al.* Water environment change over the period 2007-2016 and the strategy of fishery improve the water quality of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(2): 305-318. DOI: 10.18307/2019.0201. [谷孝鸿, 曾庆飞, 毛

- 志刚等. 太湖 2007—2016 十年水环境演变及“以渔改水”策略探讨. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 305-318.]
- [11] Ling H, Wu D, Tan DX *et al.* Causes and countermeasures of total phosphorus rise in Taihu Lake during recent years. *Environmental Science and Technology*, 2018, **31**(6): 54-59. [凌虹, 巫丹, 谭东烜等. 近年太湖总磷升高成因及对策建议. 环境科技, 2018, **31**(6): 54-59.]
- [12] Pang Y, Yan RR, Li YP *et al.* Contribution of combined action of exogenous source and internal load on water nutrient in Taihu Lake. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, **39**(9): 1051-1059. [逢勇, 颜润润, 李一平等. 内外源共同作用对太湖营养盐贡献量研究. 水利学报, 2008, **39**(9): 1051-1059.]
- [13] Zhang L, Zhu GW, Luo LC *et al.* Phosphorus load change in water body of Meiliang Bay of Taihu Lake under wind and waves and its relationship with redox characteristics. *Science in China: Ser D: Earth Sciences*, 2005, **35**(S2): 138-144. [张路, 朱广伟, 罗淑葱等. 风浪作用下太湖梅梁湾水体磷负荷变化及与水体氧化还原特征关系. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2005, **35**(S2): 138-144.]
- [14] Qin BQ, Yang LY, Chen FZ *et al.* Lake eutrophication mechanism and control technology and its application. *Chinese Science Bulletin*, 2006, **51**(16): 1857-1866. [秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用. 科学通报, 2006, **51**(16): 1857-1866.]
- [15] Chen XK, Guo YH, Feng Y *et al.* Impact of great flood on phytoplankton assemblages and their succession: A case study of Gaozhou Reservoir, Guangdong Province. *J Lake Sci*, 2014, **26**(1): 137-146. DOI: 10.18307/2014.0117. [陈修康, 郭跃华, 冯喻等. 特大洪水对浮游植物群落及其演替的影响—以广东高州水库为例. 湖泊科学, 2014, **26**(1): 137-146.]
- [16] Lu MF, Xu B, Yang XC. Evaluation method for water quality of Taihu Lake and its variation in recent years. *Water Resources Protection*, 2008, **24**(5): 30-33. [陆铭锋, 徐彬, 杨旭昌. 太湖水质评价计算方法及近年来水质变化分析. 水资源保护, 2008, **24**(5): 30-33.]
- [17] Zhang YL, Qin BQ, Zhu GW *et al.* Profound changes in the physical environment of Lake Taihu from 25 years of long-term observations: implications for algal bloom outbreaks and aquatic macrophytes loss. *Water Resources Research*, 2018, **54**(7): 4319-4331. DOI: 10.1029/2017WR022401.
- [18] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2006. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2006.]
- [19] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2007. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2007.]
- [20] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2008. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2008.]
- [21] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2009. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2009.]
- [22] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2010. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2010.]

- 文局. 太湖流域片水情年报, 2010.]
- [23] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2011. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2011.]
- [24] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2012. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2012.]
- [25] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2013. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2013.]
- [26] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2014. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2014.]
- [27] Jiangsu provincial hydrology and water resources survey bureau, Zhejiang provincial hydrographic bureau, Shanghai hydrological station, Shanghai flood control information center, Fujian provincial hydrology and water resources survey bureau, Anhui provincial hydrographic bureau. Annual report of water regime in Taihu basin & southeast rivers, 2015. [江苏省水文水资源勘测局, 浙江省水文局, 上海市水文总站, 上海市防汛信息中心, 福建省水文水资源勘测局, 安徽省水文局. 太湖流域片水情年报, 2015.]
- [28] Zhai SH, Zhang HJ. Water quantity and waste load variation of rivers around Lake Taihu from 2000 to 2002. *J Lake Sci*, 2006, **18**(3): 225-230. DOI: 10.18307/2006.0305. [翟淑华, 张红举. 环太湖河流进出湖水量及污染负荷(2000—2002年). 湖泊科学, 2006, **18**(3): 225-230.]
- [29] 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水量及污染负荷通量. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.]
- [30] Wang J, Liang XJ, Meng XL *et al.* Analysis on mechanism of transportation and conversion of total phosphor in Miyun Reservoir. *Global Geology*, 2006, **25**(1): 76-80, 85. [王静, 梁秀娟, 孟晓路等. 密云水库中总磷迁移转化机制的分析. 世界地质, 2006, **25**(1): 76-80, 85.]
- [31] Sondergaard M, Jensen PJ, Jeppesen E. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *The Scientific World Journal*, 2001, (1): 427-442. DOI: 10.1100/tsw.2001.72.
- [32] Liu EF, Shen J, Yuan HZ *et al.* The spatio-temporal variations of sedimentary phosphorus in Taihu Lake and the implications for internal loading change and recent eutrophication. *Hydrobiologia*, 2013, **711**(1): 87-98. DOI: 10.1007/s10750-013-1465-1.
- [33] Peng JP, Pang Y, Li YP *et al.* Phosphorus change in lake waters after hydrodynamic process and its contribution to eutrophication. *Ecology and Environment*, 2004, **13**(4): 503-505. [彭进平, 逢勇, 李一平等. 水动力过程后湖泊水体磷素变化及其对富营养化的贡献. 生态环境, 2004, **13**(4): 503-505.]