

太湖典型区 2010—2017 年间水质变化趋势及异常分析*

朱 伟^{1,2}, 谈永琴¹, 王若辰¹, 冯甘雨¹, 陈怀民¹, 刘毅璠¹, 李 明^{2,3}

(1: 河海大学环境学院, 南京 210098)

(2: 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 南京 210098)

(3: 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

摘 要: 自 2007 年太湖蓝藻水华引起无锡供水危机后, 在太湖流域及湖区开展了一系列综合治理措施以改善太湖水环境质量. 本研究在太湖梅梁湾和贡湖湾各设置 3 个采样点, 自 2010 年 4 月起每月 2 次监测太湖水质. 结合水文气象数据及无锡市环境监测站和太湖局的同期数据, 明确太湖自 2010 年以来, 水质整体良好, 总氮浓度在波动中呈现下降的趋势, 总磷浓度在 2014 年前也是在波动中呈现下降的趋势, 但在 2015 和 2016 年有所回升, 回升比例约为 15%~20%. 2015 和 2016 年总磷浓度出现回升的主要原因是这 2 年的 2 次大洪水过程携带大量 N、P 进入太湖湖区, 洪水消退过程中, N 大多以溶解态排泄出湖区, 而 P 则由于大多数以颗粒态存在, 逐渐沉积到湖泊中, 随着微囊藻生长消耗水体溶解态 P 以及水体 pH 和溶解氧的变化逐渐释放到太湖水体中.

关键词: 太湖; 梅梁湾; 贡湖湾; 总氮; 总磷; 微囊藻; 富营养化

The trend of water quality variation and analysis in typical area of Lake Taihu, 2010–2017

ZHU Wei^{1,2}, TAN Yongqin¹, WANG Ruochen¹, FENG Ganyu¹, CHEN Huaimin¹, LIU Yifan¹ & LI Ming^{2,3}

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

(2: *Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lakes, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, P.R.China*)

(3: *College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, P.R.China*)

Abstract: In order to deal with cyanobacterial bloom occurred in Lake Taihu, a series of comprehensive measures have been carried out in Lake Taihu and surrounding catchment since 2007. In the current study, Meiliang Bay and Gonghu Bay was selected as study areas. For each bay, 3 sampling points were set for monitoring water quality twice a month since April 2010. The hydrological and meteorological data and water quality data from Wuxi Municipal Environmental Monitoring Station and Ministry of Water Resources Bureau of Taihu Basin were also collected. All the data showed that water quality in Lake Taihu was improving since 2010. The concentration of total nitrogen (TN) was decreasing year by year. Total phosphorus (TP) concentration has also been decreasing before 2014, but it started to increase in 2015 and 2016 ranging from 15 to 20 percentage. The increase of TP within 2015 and 2016 was due to two great floods occurred in both years, which brought large amount of nutrient into Lake Taihu. After the floods, most nitrogen was discharged away in soluble form while most phosphorous was gradually deposited in Lake Taihu as particulate form. The accumulated phosphorus was then released along with the consumption of dissolved total phosphorus, increasing pH and variation in dissolved oxygen due to *Microcystis* growth.

Keywords: Lake Taihu; Meiliang Bay; Gonghu Bay; total nitrogen; total phosphorus; *Microcystis*; eutrophication

2007 年太湖蓝藻水华引起无锡供水危机, 使得太湖富营养化问题引起了公众和政府的高度关注^[1-2]. 随后, 国务院、水利部门及各级政府开展了一系列流域及湖泊综合治理措施以控制太湖富营养化, 改善太湖水环境质量^[3].

* 太湖水污染治理专项 (TH2016302) 资助. 2017-12-17 收稿; 2017-12-22 收修改稿. 朱伟 (1962~), 男, 博士, 教授; E-mail: weizhu@hhu.edu.cn.

近 10 a 来,太湖流域的生活及工业污水集中处理、污水处理厂全面提标^[4]和农业面源污染控制^[5-6]等手段的实施,逐渐实现了流域外源污染的有效控制. 自 2008 年以来,太湖湖区累计清淤底泥超过 1 亿 m^3 ,大规模的清淤大大减少了太湖的内源污染^[7-10]. 而湖滨带生态修复等措施使得太湖的自净能力不断提高^[11]. 近 5 a,太湖蓝藻藻液(含水率>99%)打捞量超过 600 万吨^[9-10,12-15]. 2010—2014 年,年均生态调水量超过 20 亿 m^3 ,但 2015 和 2016 年,年调水量仅分别为 9.62 和 4.81 亿 m^3 ,远低于往年平均值^[10-11,15]. 蓝藻打捞和生态调水等措施,进一步改善了太湖水质.

近年来太湖水环境质量明显提升. 截止 2014 年,太湖水质整体趋好^[16-17],贡湖湾等湖区的沉水植物逐渐恢复^[18],水生生态系统逐渐向健康方向发展,个别年份水华发生频次和面积有所减少^[19]. 但是,自 2015 年以来,太湖的水华发生频率、面积似乎有回升的趋势^[19],2017 年太湖水质与往年相比,出现了较为明显的波动. 因此,须要对太湖近些年水质变化规律进行分析,明确其发展规律,判断其是否出现异常. 这些分析对于正确理解太湖水质现状、影响因素以及更加科学地制定治理措施有着重要的参考价值.

1 材料与方法

1.1 采样点布设

选取太湖梅梁湾和贡湖湾作为太湖典型区域进行采样调查. 梅梁湾是太湖富营养化最严重的海湾之一,大规模微囊藻水华时有发生^[20]. 贡湖湾水质相对较好,部分区域在春季有水草生长^[18],但微囊藻水华仍时有发生^[20],2007 年的太湖蓝藻水华事件便是发生在贡湖湾^[1]. 本研究在梅梁湾和贡湖湾各均匀布设 3 个采样点(图 1). 2010 年 4 月至今,每月 2 次采集水样测定水质指标.

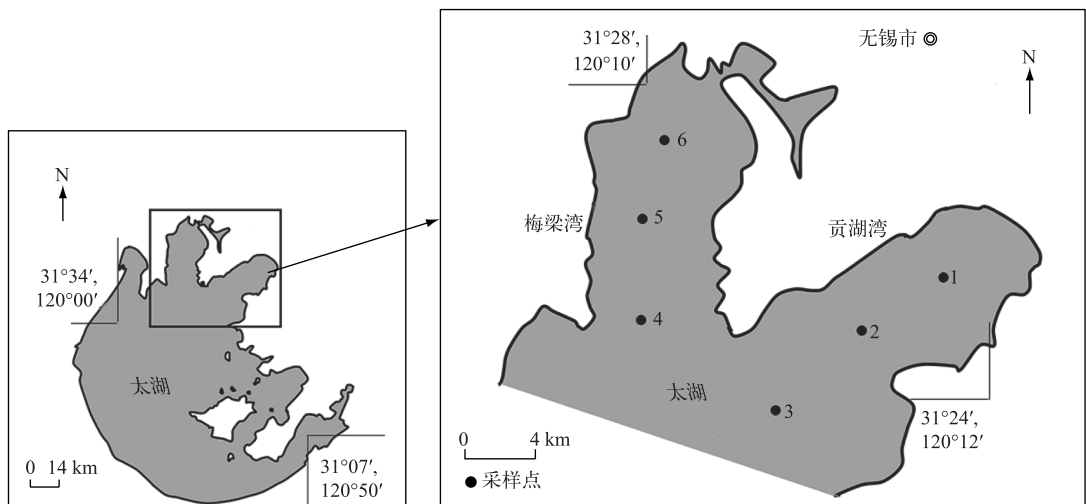


图 1 太湖梅梁湾和贡湖湾水样采集布点

Fig.1 Sampling sites in Meiliang Bay and Gonghu Bay of Lake Taihu

1.2 样品采集

由于微囊藻群体具有浮力,在风浪不大的条件下能够形成明显的垂向分布^[21]. 在此情况下,表层水体中微囊藻密度较大,而水面以下微囊藻密度随深度逐渐减小. 为避免上述因素对水质测定产生较大影响,本研究采集湖体表层水样和表层以下 1 m 处水样各 500 ml,分别测定水质指标求平均值作为最终结果. 此方法能够较为准确地反映太湖水柱水质的整体情况.

1.3 水质指标测定及水文气象数据收集

本研究对太湖水样的总氮(TN)、总磷(TP)、溶解态总氮(DTN)和溶解态总磷(DTP)进行测定. 其中, TN 和 TP 浓度直接用太湖原水进行测定,DTN 和 DTP 浓度则是先将水样用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后再进行测定. TN 和 DTN 浓度均采用碱性过硫酸钾消解分光光度法进行测定,TP 和 DTP 浓度用过硫酸钾消解分光

光度法进行测定^[22].

本研究收集了太湖月平均温度、月平均风速和月平均水位数据. 其中温度和风速数据来源于国家气象科学数据共享服务平台无锡站数据(区站号 58354) (<http://data.cma.cn/>), 水位数据来源于水利部太湖流域管理局流域公报.

2 结果

2.1 太湖的水文气象数据

太湖从 2010 年至今月平均气温并无明显变化, 每年 8 月月平均气温最高, 略高于 30℃; 1 月平均气温最低, 一般都小于 5℃. 特别是在 2011 年 1 月, 月平均气温接近 0℃ (图 2).

太湖风速近年间逐年减小, 特别是在 2015 和 2016 年, 月平均风速均小于 2.5 m/s. 2017 年风速比 2015 和 2016 年有所增大. 太湖水位相对平稳, 但 2015 和 2016 年水位较往年有所增加, 特别是在 2016 年, 太湖 7 月平均水位超过 4.5 m, 比往年月平均最高水位高出 1.0 m (图 2).

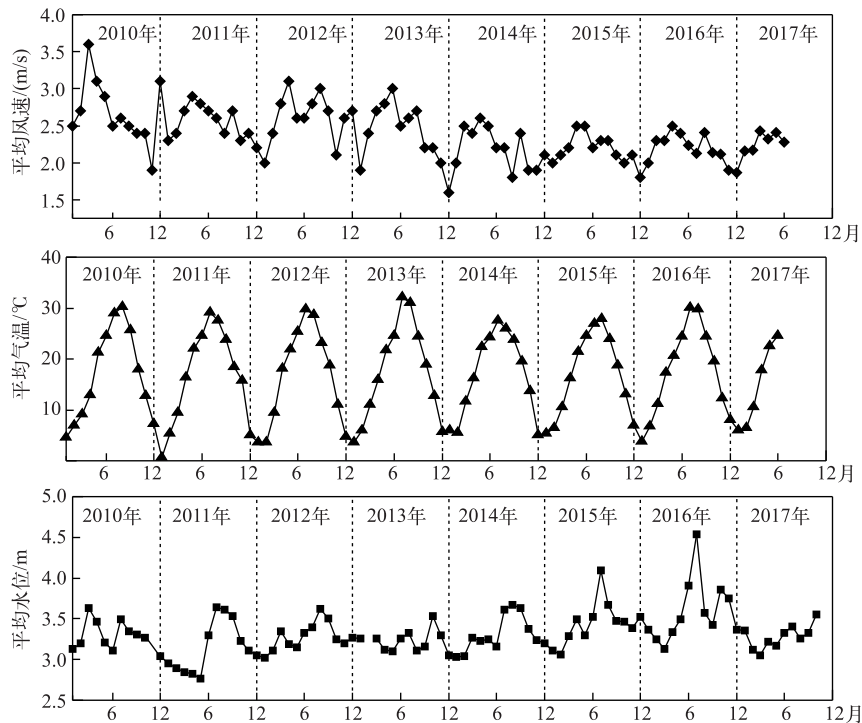


图 2 2010—2017 年太湖(无锡站)逐月水文气象数据

Fig.2 Monthly hydrological and meteorological data of Lake Taihu (Wuxi Station) from 2010 to 2017

2.2 贡湖湾营养盐浓度的变化

太湖贡湖湾从 2010 年至今 TN 和 DTN 浓度总体在波动中呈现下降的趋势, 分别从 4.5 和 3.5 mg/L 下降至约 1.0 和 0.5 mg/L (图 3). 特别是 2012 年及之后的 TN 和 DTN 浓度均比 2010—2011 年降低了近 50%. 2015 年以来 DTN 浓度降低幅度较大, TN 浓度略有波动.

2010 年至今, 贡湖湾 TP 和 DTP 浓度总体上呈现先下降后回升的趋势. 其中, TP 和 DTP 浓度在 2010—2011 年间波动中呈现下降的趋势, 2015 和 2016 年 TP 浓度比 2014 年有所上升, 特别是 2016 年 TP 浓度峰值达到了近 0.28 mg/L (图 3).

2.3 梅梁湾营养盐浓度的变化

梅梁湾从 2010 年至今 TN 和 DTN 浓度总体在波动中呈现下降的趋势, 特别是 2010—2012 年降幅较为

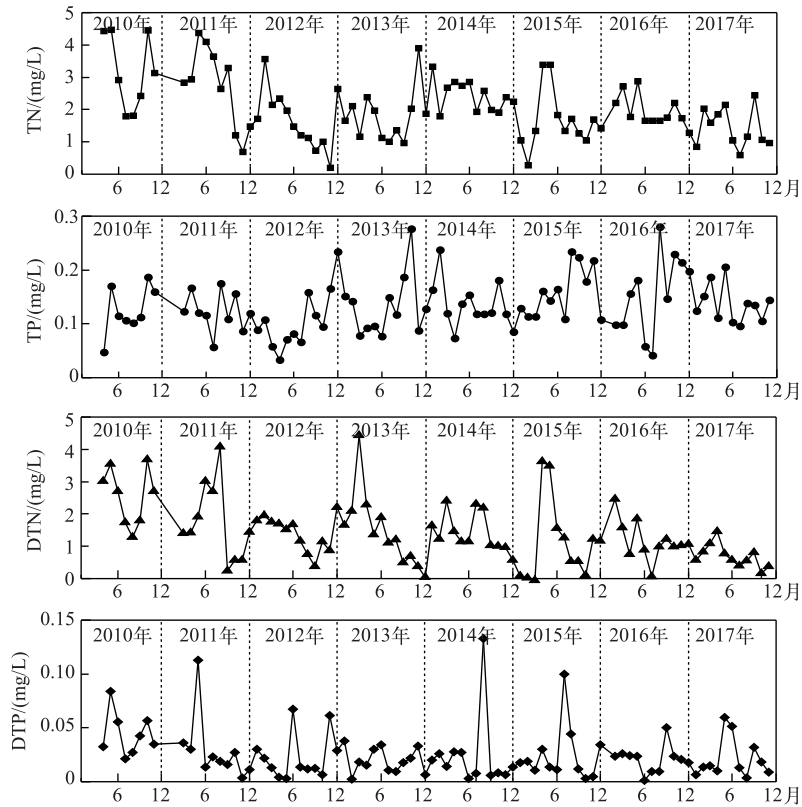


图 3 2010—2017 年贡湖湾营养盐浓度的逐月数据

Fig.3 Monthly nutrient concentrations in Gonghu Bay from 2010 to 2017

明显,2013 年以后呈现小幅波动但整体趋势依然是不断减小. 梅梁湾 TP 和 DTP 浓度总体在波动中呈现先降低后回升的趋势. 其中,2015 和 2016 年 TP 浓度均比 2014 年有所回升,并且 TP 和 DTP 浓度随月份的波动幅度逐年增大,特别是 TP 浓度每年最大月平均值逐年上升,从约 0.3 mg/L 增长至近 0.7 mg/L(图 4).

2.4 太湖 TN 和 TP 浓度的年际变化

将梅梁湾和贡湖湾的数据平均以表征太湖今年来水质的平均值(图 5). 2010 年至今 TN 年平均值总体在波动中呈现下降的趋势,特别是 2012 年比往年大幅降低. 相比之下,TP 浓度年平均值在 2014 年之前在波动中呈现下降的趋势,2015 年开始略有上升,此后 TP 浓度较 2014 年一直处于高值.

3 讨论

3.1 太湖近 8 a TN 和 TP 浓度变化趋势分析

本研究近 8 a 的贡湖湾和梅梁湾水质数据显示,太湖水质整体趋好,TN 浓度逐年下降,略有波动,而 TP 浓度从 2014 年起略有回升,以 2014 年数值为基数,太湖 TP 浓度在 2015 和 2016 年分别回升 36.6% 和 17.9%. 无锡环境监测站的数据也显示太湖 TN 浓度从 2010 年以来逐年减小,而 TP 浓度近 2 a 略有回升(图 6). 以 2014 年为基数,太湖无锡水域 2015 和 2016 年 TP 浓度分别回升 7.2% 和 15.3%. 全太湖 TP 浓度 2015 年无明显回升,2016 年回升约 8%. 太湖局的数据则显现全太湖 TP 浓度在 2015 和 2016 年分别回升 16.7% 和 21.7%(图 6).

水利部太湖流域管理局(简称太湖局)对太湖水质的监测是对整个太湖所有湖区 33 个点位进行采样测定后取得平均值. 由于东太湖湖区水质整体较好,平均计算会将太湖北部包括梅梁湾和贡湖湾在内的部分

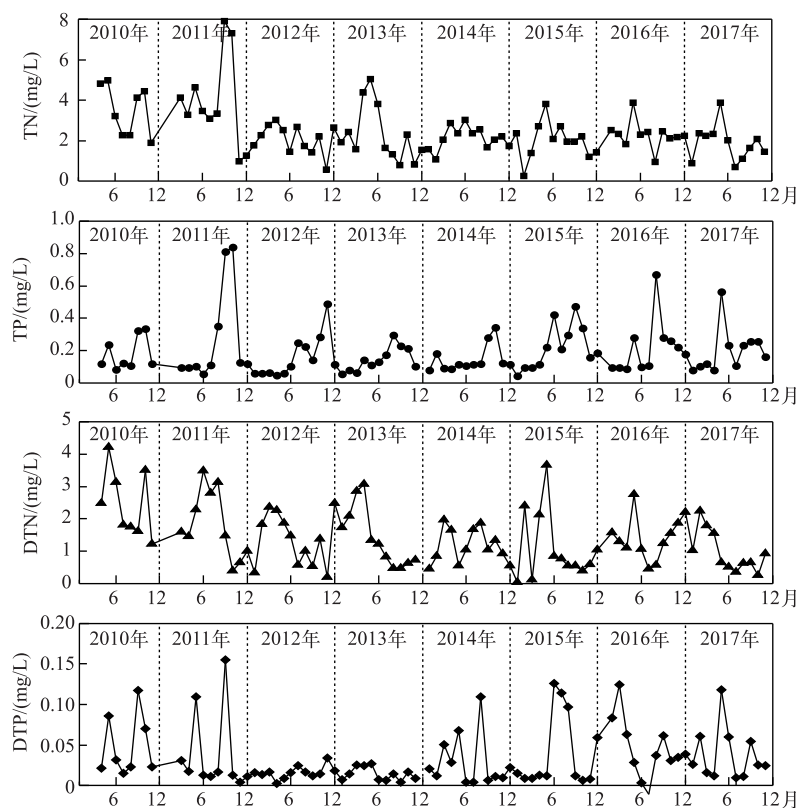


图 4 2010—2017 年梅梁湾营养盐浓度的逐月数据

Fig.4 Monthly nutrient concentrations in Meiliang Bay from 2010 to 2017

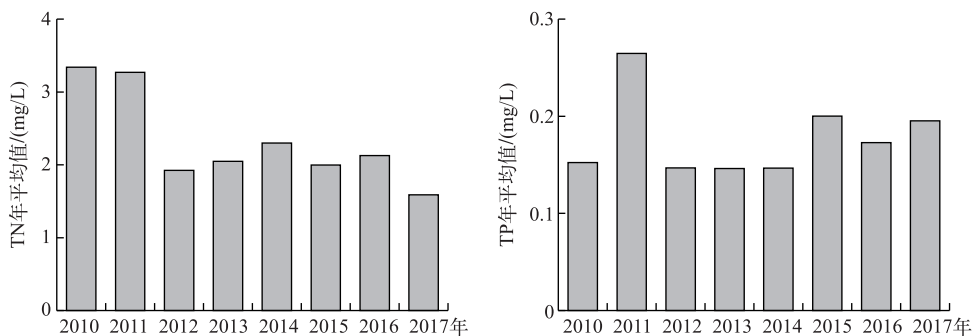


图 5 2010—2017 年太湖 TN 和 TP 浓度的年际变化

Fig.5 Annual concentrations of TN and TP in Lake Taihu from 2010 to 2017

区域营养盐波动幅度稀释. 这可能是太湖局数据显示 2015 和 2016 年太湖 TP 浓度回升比例较本研究低的原因. 无锡环境监测站在测定营养盐浓度时, 会先用 25[#]浮游植物网(孔径 64 μm)将微囊藻群体颗粒去除, 因此其数据更多地反映出溶解态的氮、磷浓度. 无锡环境监测站数据显示 2015 和 2016 年太湖 TP 浓度回升比例比太湖局和本研究的数据都小(图 6). 这说明, 颗粒态磷在 2015 和 2016 年太湖 TP 浓度回升中起到重要作用. 此外, 无锡监测站的数据还显示, 太湖无锡水域 TP 浓度回升比例远远高于整个太湖 TP 浓度的回升比例(图 6), 这进一步证明了太湖局全太湖的平均结果会将太湖北部包括梅梁湾和贡湖在内的部分区域营养盐波动幅度稀释.

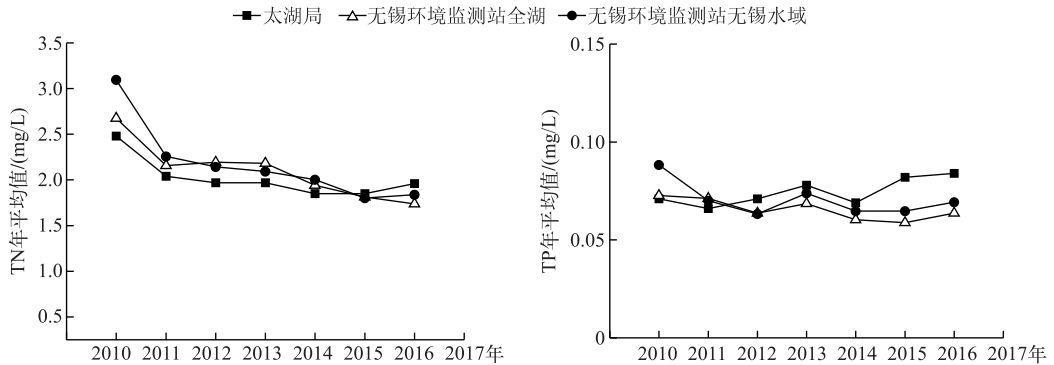


图 6 本研究、无锡环境监测站、太湖局近 8 a 营养盐年平均值比较

Fig.6 Comparison of the annual average concentration of nutrient from this research, Wuxi Municipal Environmental Monitoring Station and Ministry of Water Resources Bureau of Taihu basin over the past eight years

尽管不同来源的太湖水质数据反映出来的太湖 TP 浓度回升比例不同,但所有数据均显示 2015 和 2016 年,太湖 TP 浓度呈现回升趋势,而太湖 TN 浓度逐年下降,略有波动. 因此,可以明确自 2010 年以来,太湖水质整体向好,TN 和 TP 浓度在波动中呈现逐年下降的趋势,但 TP 浓度在 2015 年和 2016 年略有回升,三方数据略有差异,平均回升比例约为 15%~20%.

3.2 太湖 TP 浓度波动的原因分析

一般认为风浪扰动促进太湖沉积物 P 的释放是影响太湖 TP 浓度的主要因素^[23-24]. 然而气象数据显示(图 2),太湖风速近年间逐年减小,特别是 TP 浓度回升的 2015 和 2016 年,平均风速为近 7 a 最小. 因此,可以断定,2015 和 2016 年太湖 TP 浓度的回升并不是由于风浪扰动引起内源 P 释放引起的.

温度能够影响底泥中微生物的活性从而影响沉积物 P 的释放速率^[25-26]. 但本研究获得的数据显示,太湖 2010 年至今逐年气温并无明显变化. 因此,温度对太湖 TP 浓度的影响也可以排除.

无锡监测站的数据会受到太湖中微囊藻群体大小的影响. 然而,大量研究显示在生长季太湖微囊藻的群体一般都大于 100 μm ,且不同年份间差异也不明显^[20,27]. 因此,也可以排除微囊藻群体大小变化对太湖 TP 浓度回升的影响.

除此之外,本研究数据显示 2015 和 2016 年,太湖 TP 浓度在 7—9 月间出现了峰值(图 3 和图 4). 然而,夏、秋季富营养化湖泊 TP 浓度回升是由于沉积物的厌氧环境^[28]、水体 pH 升高^[29-30]以及藻类大量生长消耗水体中 DTP^[31]等原因促进沉积物 P 释放造成的,属于浅水富营养化湖泊的普遍现象. 此现象在太湖梅梁湾和贡湖湾的其他年份也经常出现.

需要注意的是,太湖在 2015 和 2016 年都遭遇了比较大的洪水,特别是 2016 年,太湖 7 月平均水位超过 4.5 m,比往年月平均最高水位高出 1 m(图 7). 太湖 2015 和 2016 年入湖水量较正常年分别多出 3 和 40 亿 m^3 (图 7). 而且在行洪期间河道的水质与往年没有明显的差异,从太湖健康状况报告的数据看,2015 和 2016 年的 TN 年负荷比正常年分别增加 1500 和 6200 t,2015 和 2016 年的 TP 年负荷比正常年分别增加 200 和 500 t.

从太湖 2015 和 2016 年太湖水位与营养盐季节变化中可以发现,太湖水位出现峰值后,太湖 TP 浓度逐渐增加并出现峰值(图 8). 但太湖 TN 浓度并未出现类似现象. 同时,水位出现峰值后,颗粒态 TP 浓度明显上升并出现峰值(图 9). 因此,太湖 2015 和 2016 年 TP 浓度回升过程中主要起作用的应该是颗粒态 P.

综上所述可以推断,2015 和 2016 年的 2 次大洪水过程携带大量 N、P 进入太湖湖区,洪水消退过程中, N 大多以溶解态排泄出湖区,而 P 则由于大多数以颗粒态存在,逐渐沉积到湖泊中,随着微囊藻生长消耗水体溶解态 P 以及水体 pH 和溶解氧的变化逐渐释放到太湖水体中. 这是太湖 2015 和 2016 年 TP 浓度出现回升的主要原因.

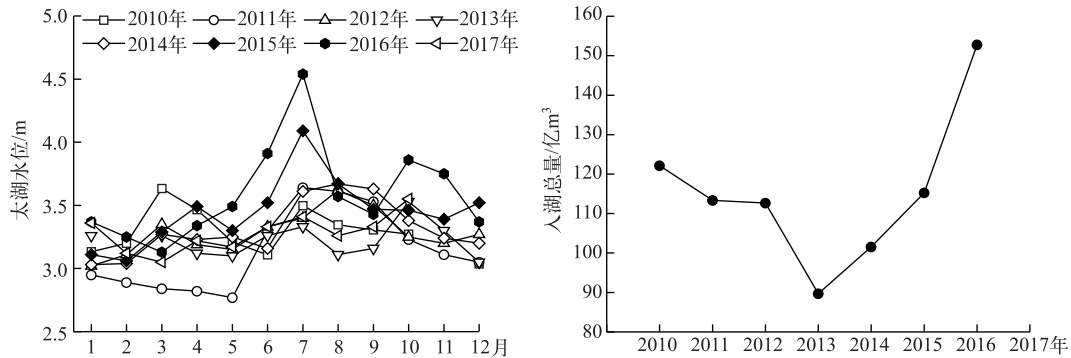


图7 2010—2017年太湖水位的逐月变化及年入湖水量变化

Fig.7 Monthly variation in water level and annual variation in the amount of water flow into Lake Taihu from 2010 to 2017

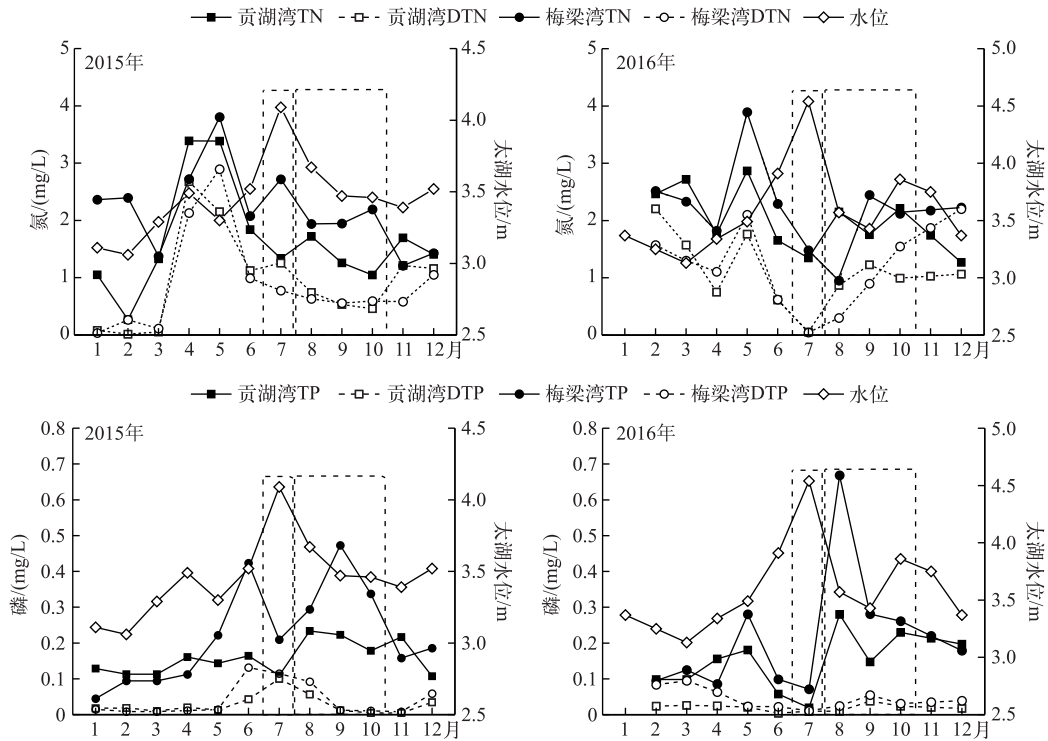


图8 2015和2016年太湖水位、氮和磷浓度的逐月变化

Fig.8 Monthly variation in water level, concentrations of nitrogen and phosphorus in Lake Taihu in 2015 and 2016

4 结论

本研究显示,太湖自2010年以来,水质整体向好,TN浓度在波动中呈现下降的趋势,TP浓度在2014年前也是在波动中呈现下降的趋势,但2015和2016年有所回升,回升比例约为15%~20%。2015年和2016年TP浓度出现回升的主要原因是这两年的两次大洪水过程携带大量N、P进入太湖湖区,洪水消退过程中,N大多以溶解态排泄出湖区,而P则由于大多数以颗粒态存在,逐渐沉积到湖泊中,随着微囊藻生长消耗水体

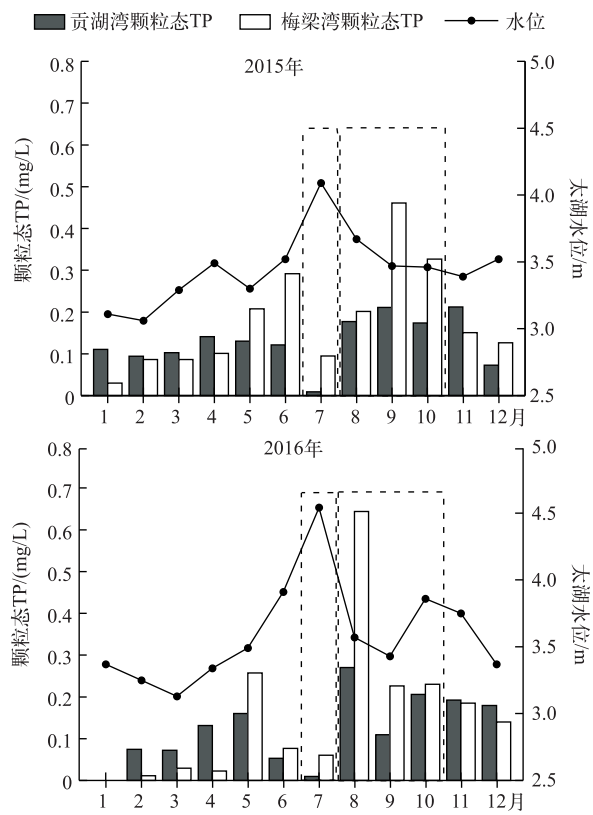


图 9 2015 和 2016 年太湖水位和颗粒态 TP 浓度逐月变化

Fig.9 Monthly variation in water level, concentrations of particle TP in Lake Taihu in 2015 and 2016

溶解态 P 以及水体 pH 和溶解氧的变化逐渐释放到太湖水体中。

5 参考文献

[1] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake. *Science*, 2007, **317**(5842): 1166-1166. DOI: 10.1126/science.317.5842.1166.

[2] Zhang XJ, Chen C, Ding J *et al.* The 2007 water crisis in Wuxi, China: Analysis of the origin. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **182**(1): 130-135. DOI:10.1016/j.jhazmat.2010.06.006.

[3] Li JC. Total control and water pollution control in Taihu Basin—A review of "Overall Plan for Integrated Water Environment Management in Taihu Lake Basin". *Environmental Pollution and Prevention*, 2010, **32**(4): 96-100. [李家才. 总量控制与太湖流域水污染治理——《太湖流域水环境综合治理总体方案》述评. 环境污染与防治, 2010, **32**(4): 96-100.]

[4] He LJ, Wang Y, Huang H *et al.* Summary of technical innovations for upgrading and retrofitting of MWWTPs for First Level A Criteria in Taihu Lake Basin of Jiangsu Province. *China Water & Wastewater*, 2011, **27**(10): 33-39. [何伶俐, 汪勇, 黄皓等. 江苏太湖流域污水处理厂一级 A 提标改造技术总结. 中国给水排水, 2011, **27**(10): 33-39.]

[5] Yan LZ, Shi MJ, Wang L. Review of agricultural non-point pollution in Lake Taihu and Taihu Basin. *China Population, Resources and Environment*, 2010, **20**(1): 99-107. [闫丽珍, 石敏俊, 王磊. 太湖流域农业面源污染及控制研究进展. 中国人口·资源与环境, 2010, **20**(1): 99-107.]

[6] Zhang HJ, Chen F. Non-point pollution statistics and control measures in Taihu Basin. *Water Resources Protection*, 2010, **26**(3): 87-90. [张红举, 陈方. 太湖流域面源污染现状及控制途径. 水资源保护, 2010, **26**(3): 87-90.]

[7] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial de-

- partment of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report. 2008. [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. 2008.]
- [8] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report. 2009. [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. 2009.]
- [9] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report. 2013. [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. 2013.]
- [10] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report. 2014. [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. 2014.]
- [11] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report. 2015. [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. 2015.]
- [12] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report. 2010. [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. 2010.]
- [13] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report. 2011. [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. 2011.]
- [14] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report. 2012. [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. 2012.]
- [15] Water resources department of the Taihu basin, Jiangsu provincial department of water resources, Zhejiang provincial department of water resources, Shanghai municipal water bureau eds. Taihu health report 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.]
- [16] Zhang L, Fan KX, Zheng H *et al.* Application of water quality identification index method in water quality evaluation of Taihu Lake. *Journal of Aquaculture*, 2016, **37**(1): 35-40. [张莉, 樊祥科, 郑浩等. 水质标识指数法在太湖渔业生态环境评价中的应用. 水产养殖, 2016, **37**(1): 35-40.]
- [17] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al.* Changes in nitrogen phosphorus concentrations in Lake Taihu, 1985–2015. *J Lake Sci*, 2016, **28**(5): 935-943. DOI: 10.18307/2016.0502. [戴秀丽, 钱佩琪, 叶凉等. 太湖水体氮、磷浓度演变趋势 (1985–2015 年). 湖泊科学, 2016, **28**(5): 935-943.]
- [18] Wu DH, Wang Y, Xu ZA. Hydroacoustic investigation of submerged macrophyte coverage in Gonghu Bay, Taihu Lake. *Journal of China Hydrology*, 2016, **36**(4): 44-47. [吴东浩, 王玉, 徐兆安. 基于水声学的太湖贡湖湾沉水植物盖度调查. 水文, 2016, **36**(4): 44-47.]
- [19] Yang Z, Zhang M, Shi X *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.
- [20] Lin L, Appiah-Sefah G, Li M. Using a laser particle analyzer to demonstrate relationships between wind strength and *Microcystis* colony size distribution in Lake Taihu, China. *Journal of Freshwater Ecology*, 2015, **30**(3): 425-433. DOI: 10.1080/02705060.2014.976666.
- [21] Zhu W, Li M, Luo Y *et al.* Vertical distribution of *Microcystis* colony size in Lake Taihu: Its role in algal blooms. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, **40**(4): 949-955. DOI: 10.1016/j.jglr.2014.09.009.
- [22] Ebina J, Tsutsui T, Shirai T. Simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in water using peroxodisulfate oxidation. *Water Research*, 1983, **17**(12): 1721-1726. DOI: 10.1016/0043-1354(83)90192-6.
- [23] Søndergaard M, Kristensen P, Jeppesen E. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiologia*, 1992, **228**(1): 91-99. DOI: 10.1007/BF00006480.
- [24] Marsden MW. Lake restoration by reducing external phosphorus loading: The influence of sediment phosphorus release. *Freshwater Biology*, 1989, **21**(2): 139-162. DOI: 10.1111/j.1365-2427.1989.tb01355.x.

- [25] Jiang X, Jin X, Yao Y *et al.* Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake, China. *Water Research*, 2008, **42**(8): 2251-2259. DOI: 10.1016/j.watres.2007.12.003.
- [26] Qin BQ, Fan CX. Exploration of conceptual model of nutrient release from inner source in large shallow lake. *China Environmental Science*, 2002, **22**(2): 150-153. [秦伯强, 范成新. 大型浅水湖泊内源营养盐释放的概念性模式探讨. 中国环境科学, 2002, **22**(2): 150-153.]
- [27] Li M, Zhu W, Gao L *et al.* Seasonal variations of morphospecies composition and colony size of *Microcystis* in a shallow hypertrophic lake (Lake Taihu, China). *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, **22**: 3474-3483.
- [28] Spears BM, Carvalho L, Perkins R *et al.* Sediment phosphorus cycling in a large shallow lake: Spatio-temporal variation in phosphorus pools and release. *Hydrobiologia*, 2007, **584**(1): 37-48. DOI: 10.1007/s10750-007-0610-0.
- [29] Istvanovics V. Seasonal variation of phosphorus release from the sediments of shallow Lake Balaton (Hungary). *Water Research*, 1988, **22**(12): 1473-1481. DOI: 10.1016/0043-1354(88)90158-3.
- [30] Jin X, Wang S, Pang Y *et al.* Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 2006, **139**(2): 288-295. DOI: 10.1016/j.envpol.2005.05.010.
- [31] Xie L, Xie P, Li S *et al.* The low TN:TP ratio, a cause or a result of *Microcystis* blooms? *Water Research*, 2003, **37**(9): 2073-2080. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00532-8.