

2017 年太湖水华面积偏大的原因分析*

朱 伟^{1,2}, 陈怀民^{1**}, 王若辰¹, 冯甘雨¹, 薛宗璞¹, 胡思远¹

(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)

摘 要: 太湖流域及湖区经过一系列综合治理之后, 截至 2015 年, 水华面积逐渐减少, 治理效果初见成效. 然而, 2017 年太湖出现了前所未有的大面积水华 (1403 km²), 其原因成为各方面关注的热点问题. 2011—2017 年, 在太湖贡湖湾和梅梁湾布置的 6 个采样点, 每月 2 次分层采集水质和微囊藻密度数据、全太湖的营养盐和微囊藻密度数据、气象数据和水华面积数据, 进行了水华面积偏大的原因分析. 结果显示, 2011—2017 年期间, 全太湖总氮 (TN) 的 7 年平均浓度为 1.89 mg/L, 总磷 (TP) 为 0.076 mg/L, 而 2017 年 TN 浓度为 1.60 mg/L, TP 浓度为 0.083 mg/L, 比 7 年平均 TP 浓度回升了 9.0%. 气温方面, 2011—2017 年 7 年平均气温为 17.3℃, 2017 年比 7 年平均气温高出 0.7℃. 全太湖 7 年平均微囊藻密度为 0.53×10⁸ cells/L, 而 2017 年为 1.18×10⁸ cells/L, 比 7 年平均值高出 1.21 倍. 在这样一个数据背景下, 全太湖年均值和风速区间比例冗余分析表明 TP 的回升、气温的偏高与水华面积也表现出明显的正相关关系, 且 5—9 月 1~2 m/s 弱风天数与水华面积呈显著正相关, 而风速超过 4 m/s 则会显著造成水华的消失. 综合以上数据及分析, 2017 年出现巨大面积水华是由于全湖 TP 浓度的上升和气温偏高使微囊藻密度增长, 为微囊藻聚集形成水华提供了丰富的物质基础, 而在微囊藻大量繁殖季节风力较弱, 1~2 m/s 左右风速易于使微囊藻聚集形成薄层大面积水华.

关键词: 太湖; 水华面积; 风速; 气温; 总磷; 微囊藻密度

Analysis on the reasons for the large bloom area of Lake Taihu in 2017

ZHU Wei^{1,2}, CHEN Huaimin^{1**}, WANG Ruochen¹, FENG Ganyu¹, XUE Zongpu¹ & HU Siyuan¹

(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)

Abstract: After a series of comprehensive restoring, the area of *Microcystis* blooms in Lake Taihu Basin has gradually decreased by 2015, and preliminary results were achieved. However, in 2017, an unprecedented expansion of the *Microcystis* blooms area (1403 km²) occurred in Lake Taihu, and the reason behind which has become a focus of researchers' attention. In this study, water quality and *Microcystis* cell density data, nutrient and *Microcystis* cell density data, meteorological data and blooms area data were collected twice a month from 6 sampling sites in Gonghu Bay and Meiliang Bay of Lake Taihu from 2011 to 2017. The results showed that the 7-year average concentrations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in Lake Taihu was 1.89 and 0.076 mg/L in 2011–2017, while in 2017 TN concentration was 1.60 mg/L and TP concentration was 0.083 mg/L, which was 9.0% higher than the 7-year average TP concentration. In terms of temperature, the average temperature in 2011–2017 was 17.3℃, while in 2017 it was 18.0℃, which was 0.7℃ higher than that in 7 years. The average cell density of *Microcystis* in Lake Taihu in 7 years was 0.53 × 10⁸ cells/L, while in 2017 it was 1.18 × 10⁸ cells/L, which was 2.21 times of the average in 7 years. In such a data background, RDA annual mean analysis and wind speed interval proportion analysis results indicated that the rise of TP concentration and the high temperature also showed a significant positive correlation with the area of *Microcystis* blooms. And the number of weak wind days from May to September has the greatest impact on the area of algal blooms, while the wind speed of more than 4 m/s would significantly reduce the probability of large-scale outbreaks. Based on the above data and analysis, the large area of algal

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07603-003-04) 和江苏省科技计划项目 (BE2018737) 联合资助. 2018-12-03 收稿; 2019-01-26 收修改稿. 朱伟 (1962~), 男, 博士, 教授; E-mail: weizhu@hhu.edu.cn.

** 通信作者; E-mail: huaiminchen@163.com.

blooms in 2017 is attributed to the increasing of *Microcystis* cell density due to the rise of TP concentration and high temperature in the whole lake, which provides a rich material basis for the formation of *Microcystis* blooms. Furthermore, the weak wind in the season of large-scale propagation of *Microcystis*. The wind speed of about 1–2 m/s is easy to facilitate *Microcystis* aggregation and *Microcystis* blooms formation.

Keywords: Lake Taihu; bloom area; wind speed; air temperature; total phosphorus; *Microcystis* cell density

湖泊富营养化导致蓝藻水华一直是水环境治理中的重点问题^[1-2]。水华的出现不仅制约了湖泊的经济利用价值,还严重影响到人类的健康安全。自2007年无锡供水危机以来,国家、地方都加大了对太湖的治理力度。近10年来,通过调整产业结构与布局、治理工业点源污染、完善城乡管网铺设、污水厂提标改造、湖滨区生态修复、生态清淤等一系列综合治理措施^[3-6],截至2015年,太湖水华面积逐年减少^[7],太湖治理似乎初见成效。但是,令人出乎意料的是2017年太湖出现了有记载以来最大面积的水华,据太湖健康状况报告面积高达1403 km²^[8],其原因成为各方面关注的热点问题。

已有的研究表明水华的形成需要足够多的蓝藻生物量及适宜其聚集的气候条件^[9-10]。蓝藻的生长繁殖受诸多因素影响,如气温、光照、营养盐等。而蓝藻的聚集则受到风引起的水动力条件的影响,低风速情况易于蓝藻上浮聚集在水面,同时,在风生流作用下表面的蓝藻会水平漂移聚集到下风向区域,而当风速逐渐增大超过某一风速阈值时,已聚集形成的水华则会消失^[11-13]。然而,针对近年来太湖水华发生频次增多和强度增大的原因,不同学者有不同的观点。Zhang等^[14]发现1987–2009年期间受全球气候变化的影响,太湖近20年来的气温持续升高,使得适宜微囊藻繁殖的气温持续时间拉长,因此,微囊藻在春、秋季已具备足够多的生物量,导致微囊藻水华持续时间增长且面积增大。Zhu等^[15]研究台风过程的影响发现台风梅花和海葵过境时导致太湖底泥中营养盐的释放,促进了微囊藻生物量的增长,认为这可能是导致水华面积增大的原因。Yang等^[16]则认为极端强风和降雨天气造成底泥再悬浮以及流域内大量营养盐汇入太湖水体中,引起了微囊藻生物量的增长,从而造成了水华面积的增大。Wu等^[17]则认为2000–2011年太湖年平均风速的降低是造成近年来水华面积扩大的原因。

不同因子对水华面积的影响可分为两种途径:影响藻密度和影响微囊藻聚集形成水华。大多数因子是通过影响微囊藻生物量的间接因子,也有一些因子是影响微囊藻聚集的,典型的也就是风。而上述文献涉及到的气候、台风、水质等因子的影响都是首先从微囊藻密度上体现出来的。那么近年来太湖总氮(TN)浓度由下降进入波动期,据朱伟等^[18]报道,受2015和2016年两次大洪水的影响,流域里累积的污染物被带入湖泊;最近东太湖水草减少等也使得太湖水质波动反弹。典型湖区总磷(TP)浓度出现15%~20%的回升,这些变化是否会引起微囊藻密度出现显著变化,从而影响聚集形成水华的面积?另一方面,有无其他影响因子,比如风的特性,通过影响湖泊的动力过程从而对水华的聚集过程产生明显的影响?因此,本研究对近7年太湖典型湖区和全太湖的气象条件、水质、微囊藻密度,以及5–9月每隔5日抽检的水华面积等数据进行对比、分析,试图解释2017年水华面积偏大的原因。

1 材料和方法

1.1 采样点布设及样品采集

太湖梅梁湾和贡湖湾受季风的影响经常暴发严重的微囊藻水华,因此选取这两个湖湾作为太湖典型区域进行采样调查。本研究在贡湖湾和梅梁湾中心分别布设3个采样点(图1),2011–2017年进行每月2次的水样和藻样采集。由于微囊藻在水动力强度弱的情况下易于在水体表面大量聚集,在垂向分布上形成明显的差异^[19]。为避免垂向差异对水质及微囊藻密度的影响,利用分层采水器采集水面及水下1 m深处各500 ml的水样,同时,从水面至水底每隔0.5 m采集藻样。通过计算得到其各自的平均值来反映贡湖湾和梅梁湾整水柱水质和藻密度的真实情况^[20]。最终,计算出太湖典型湖区整体水质及藻密度的月均值及年均值。

1.2 水质及微囊藻密度的测定

水质分析包含TN、TP、溶解性总氮(TDN)和溶解性总磷(TDP)浓度4个指标。其中,TN和TP浓度直接采用太湖原水分别通过K₂S₂O₈+NaOH和K₂S₂O₈溶液进行消解后用分光光度法测定^[21]。而DTN和DTP浓度则先用0.45 μm的微孔滤膜将原水过滤后再用上述方法进行测定。

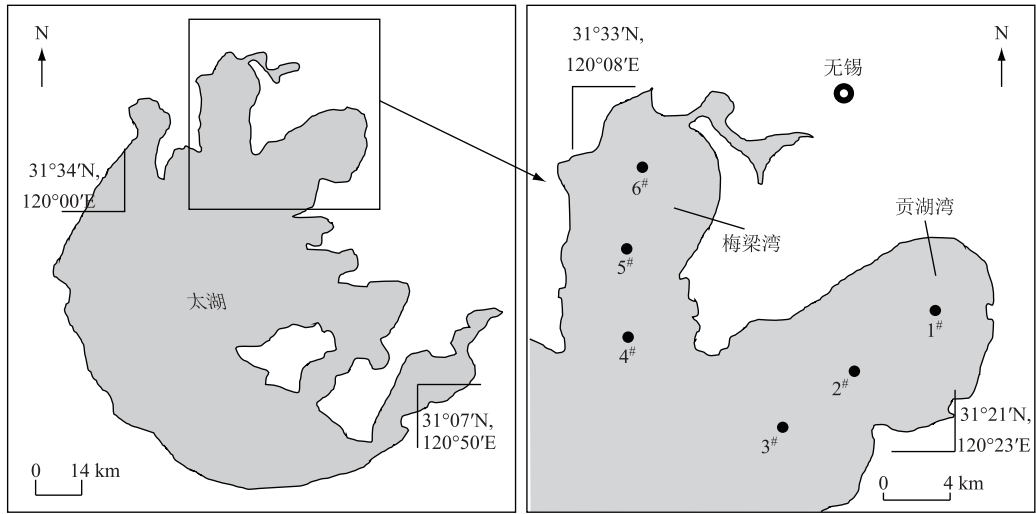


图1 太湖贡湖湾和梅梁湾采样点位置

Fig.1 Location of the sampling sites in Gonghu Bay and Meiliang Bay of Lake Taihu

微囊藻密度测定前需先将群体细胞分散为单细胞. 首先取 10 ml 浓缩藻样于 50 ml 离心管中, 然后用水浴振荡器在 100℃ 下以 120 转/min 震荡 5 min. 分散后的样品适当稀释后利用血球计数板在显微镜下计数 (奥林巴斯 CX31, 400×), 并取 3 次误差在 10% 以内的微囊藻密度平均值作为最终结果^[22].

1.3 气象、全湖营养盐和微囊藻密度及水华面积数据的来源

通过国家气象科学数据共享平台 (<http://data.cma.cn>) 收集无锡站 (58354) 2011—2017 年的日均气温和日平均风速数据, 并计算月均值、年均值和 5—9 月平均值. 以往的研究均已表明, 风速对水华的消失存在一个阈值. 总结太湖现场风速与水华关系的研究^[23-25] 可以发现太湖水华消失的风速阈值大概在 3~4 m/s 之间, 也说明太湖在风速 >4 m/s 时基本形成不了水华. 但能够促进水华形成的风速阈值并不清楚, 为此本文按照 1 m/s 风速的跨度, 将风速划分为 0~1、1~2、2~3、3~4 和 >4 m/s, 并计算每年 5—9 月水华暴发期各风速区间的天数占每月的比例.

全湖营养盐和微囊藻密度年均值数据来源于水利部太湖流域管理局的《太湖健康状况报告》(2011—2017)^[7-8, 26-30]. 水华面积数据来源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享服务平台—湖泊—流域科学数据中心 (<http://lake.geodata.cn>), 该数据是通过中等分辨率成像光谱仪 (MODIS) 的图片进行分析获得的^[31]. 每隔 5 天获取一次当日 10:00—15:00 时间段内的水华面积图片, 若当日遇到云雨天气则取前一天或后一天的图片数据, 若前后仍遇云雨天气, 则直接跳过记为不可用数据, 每月共计 5 次, 我们称之为 5 日抽检水华面积. 太湖近年来在 5—9 月往往频繁暴发微囊藻水华, 因此, 5 日抽检的水华面积能够在一定程度上反映太湖水华的变化趋势. 在多云及雨天条件下由于云层的遮挡, 无法拍摄到湖面的情况, 从而会造成当日数据的缺失, 所以, 本研究共抽检了 2011—2017 年 5—9 月水华频繁暴发期的 175 次水华面积数据, 其中 154 次数据为可用数据, 用于分析水华面积的月变化规律.

1.4 数据分析

采用 CANOCO 4.5 (Microcomputer, Ithaca, New York, USA) 软件进行月均值和年均值冗余分析 (RDA). 除趋势对应分析 (DCA) 得出 4 个轴的最大梯度 < 3.0, 所以选用 RDA 分析^[32].

2 结果与分析

2.1 气象指标的变化

太湖 2011—2017 年每年的月平均气温变化规律并无明显差异. 每年 1 月平均气温最低, 约为 4℃ 左右,

随后气温逐渐升高,在7月达到最高值,约为30℃左右,而2017年的月均最高气温高达32.1℃.从年均气温来看,2011—2017年的年均气温变化范围在16.5~18.0℃之间,而2017年年均气温则为18.0℃,比2011—2017年平均气温高出0.7℃(图2).

太湖2011—2017年月均风速变化范围为1.63~3.12 m/s,而2017年每个月的月均风速都不足2.50 m/s.2011—2017年5—9月的7年平均风速为2.42 m/s,2017年5—9月平均风速最低(2.21 m/s).其中,2011—2017年5—9月水华暴发期的风速以1~2 m/s和2~3 m/s为主,但2017年1~2 m/s风速的天数在2011—2017年中最多(图2).

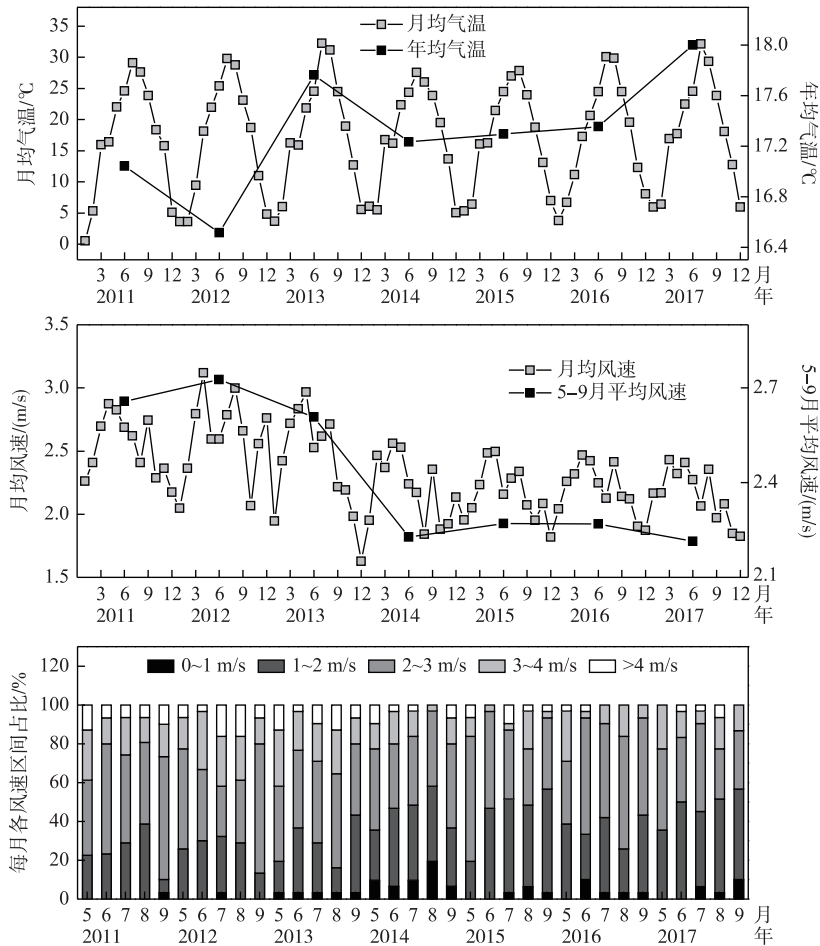


图2 太湖(无锡站 58354)2011—2017年月均及年均气象数据

Fig.2 Monthly and annual average meteorological data of Lake Taihu (Wuxi station 58354) from 2011 to 2017

2.2 营养盐的变化

将太湖梅梁湾和贡湖湾每月6个采样点表面及水下1 m的营养盐数据进行平均得出其月均数据.太湖梅梁湾和贡湖湾2011—2017年的TN和DTN浓度在2012年开始出现明显降低,随后降低速度减缓并进入波动期,2012—2017年TN和TDN月均浓度基本在2.00和1.12 mg/L上下波动,相较于2011年降低了39%和40%之多.TN和DTN的年均浓度分别从2011年的3.27和1.88 mg/L降低到2017年的1.59和0.54 mg/L.而全太湖的年均TN浓度在2011—2017年亦呈现出逐年降低的趋势,由2011年的2.04 mg/L降低到2017年的1.60 mg/L(图3).由此看来,太湖TN和DTN营养盐水平逐渐趋于好转.

太湖梅梁湾和贡湖湾 2011—2017 年的 TP 和 DTP 浓度在 2012 年开始出现明显的降低,随后降低速度减缓,2012—2014 年 TP 和 TDP 月均值基本上在 0.15 和 0.021 mg/L 上下波动,然而在 2015 年又开始出现明显回升,2015—2017 年 TP 和 DTP 的月均浓度在 0.18 和 0.031 mg/L 上下波动,相较于 2012—2014 年分别回弹了 20% 和 50% 左右,且 2015—2017 年各年份的 TP 和 DTP 最大月均浓度分别在 0.35~0.48 和 0.060~0.107 mg/L 范围内. 从贡湖湾和梅梁湾年均值变化来看,2017 年 TP 和 DTP 的年均浓度分别为 0.20 和 0.030 mg/L,比 2011—2017 年的平均浓度 0.18 和 0.027 mg/L 分别回弹了 11.1% 和 8.5%. 从全太湖的年均 TP 浓度来看,2017 年为 0.083 mg/L,比 2011—2017 年的平均值 0.076 mg/L 回弹了 9.0% (图 3). 因此,整体上来讲,太湖的 TP 浓度在 2017 年出现了明显的回升.

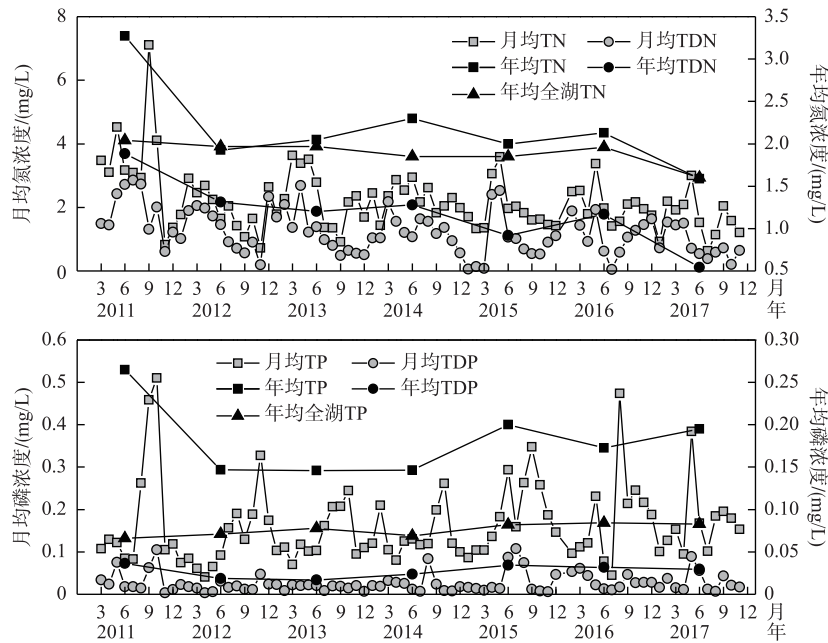


图 3 贡湖湾和梅梁湾及全太湖 2011—2017 年营养盐月均及年均浓度
Fig.3 Monthly and annual average nutrient concentrations in Gonghu Bay and Meiliang Bay and Lake Taihu from 2011 to 2017

2.3 微囊藻密度和水华面积的变化

将太湖梅梁湾和贡湖湾每月 6 个采样点整水柱微囊藻密度数据进行平均得出其月平均微囊藻密度数据(图 4). 微囊藻密度表现出明显的年际生消规律. 每年的 4 月微囊藻开始生长,5—9 月每月的整水柱微囊藻密度都超过 2.00×10^8 cells/L,10 月之后又开始消退. 从各年份最大的月均整水柱微囊藻密度来看,除了 2013 年达到了 9×10^8 cells/L 左右,其他年份的基本在 $2.79 \times 10^8 \sim 4.27 \times 10^8$ cells/L 之间变化. 从水华暴发期的 5—9 月贡湖湾和梅梁湾平均整水柱微囊藻密度来看,2013—2015 年有所降低,然而在 2016 年之后又出现了上升的趋势. 从年均值变化来看,2017 年贡湖湾和梅梁湾的年均微囊藻密度为 2011—2017 年的 1.05 倍. 而从全太湖来看,2011—2017 年全太湖的年均微囊藻密度呈现逐年上升的趋势,特别是 2017 年为 1.18×10^8 cells/L,是 2011—2017 年的 2.21 倍,是 2016 年的 1.42 倍.

将各年份水华频发暴发期 5—9 月每月 5 次的 5 日抽检水华面积数据进行统计,得出当月水华面积最小值、25% 值、平均值、75% 值和最大值. 从每月水华的各统计数值来看(图 5),每年水华面积并无随季节变化的趋势,各年份水华最大面积出现的月份也不同. 比较不同年份各项水华面积数值发现,从 2011—2013 年,水华面积呈逐年降低的趋势,各年份抽检出的最大水华面积和 5—9 月总平均水华面积分别由 2011 年的 945 和 192 km^2 降低到 2013 年的 389 和 129 km^2 . 而在 2014 年之后各项水华面积指标又逐渐升高,特别是

2017年水华面积相较于2016年有了大幅度的提升,其中5日抽检水华面积最大值高达1403 km²,5—9月总平均水华面积亦有399 km²,是2011—2017年平均面积的1.72倍,是2016年的1.52倍.

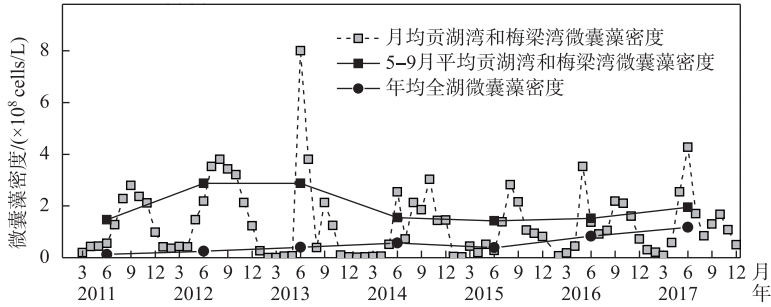


图4 贡湖湾和梅梁湾及全太湖2011—2017年微囊藻密度

Fig.4 Monthly and annual cell density in Gonghu Bay and Meiliang Bay and Lake Taihu from 2011 to 2017

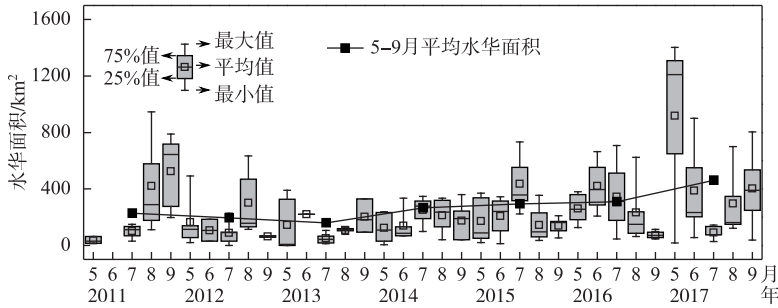


图5 太湖2011—2017年5—9月的月平均及总平均水华面积

Fig.5 Monthly and overall average bloom area in Lake Taihu from May to September between 2011 and 2017

2.4 各因素与水华面积的关系

通过RDA分析了贡湖湾、梅梁湾以及全太湖的微囊藻密度、水质、气温、风速与水华面积的关系. 贡湖湾、梅梁湾数据的月均值分析中使用营养盐月均浓度、月均风速和月均气温,结果变量为月均水华面积及贡湖湾和梅梁湾月均微囊藻密度,所选取的环境因子能够解释因变量的22.2%. 全太湖数据的年均值分析中使用全太湖年均TN和TDP浓度、年均气温和5—9月平均风速,结果变量为5—9月平均水华面积和年均全湖微囊藻密度,所选取的环境因子解释量已高达72.9%. 为了细化风速的影响,重新进行了5—9月0~1、1~2、2~3、3~4和>4 m/s风速的天数各占比例与上述年均值结果变量的RDA分析,细化的风速区间比例能够解释因变量的86.9%(表1).

蒙特卡洛检验结果显示(表2),典型湖区的RDA月均值分析中,显著影响平均水华面积及月均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度的主要环境因子有月均风速($P=0.007<0.01$)、月均TDN($P=0.020<0.05$);全太湖的RDA年均值分析中,显著影响5—9月平均水华面积、5—9月平均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度和年均全湖微囊藻密度的主要环境因子有5—9月平均风速($P=0.009<0.01$)、和年均全太湖TN($P=0.039<0.05$). 而细化的风速区间比例分析中显著因子为5—9月1~2 m/s风速的比例($P=0.017<0.05$)、5—9月3~4 m/s风速的比例($P=0.046<0.05$)和5—9月>4 m/s风速的比例($P=0.003<0.01$).

典型湖区的RDA月均值和全太湖的年均值分析均表明,风速与水华面积呈显著相关. RDA月均值分析表明,贡湖湾和梅梁湾的月均微囊藻密度与气温呈正相关,而与其他环境因子没有体现出明显相关性,而贡湖湾和梅梁湾的月均微囊藻密度与月均水华面积也没有呈现显著相关性. 全太湖的RDA年均值分析表明,风速与水华面积呈显著相关,从细化的风速区间分析来看,5—9月平均水华面积与5—9月1~2和0~1 m/s

风速的比例呈显著正相关,而与 >4 m/s 风速的比例呈显著负相关;正相关性排序分别为 1~2 m/s 风速比例 $>0\sim 1$ m/s 风速比例,负相关排序为大于 4 m/s 风速比例 $>3\sim 4$ m/s 风速比例 $>2\sim 3$ m/s 风速比例. 5—9 月平均水华面积与年均全湖微囊藻密度呈正相关,而年均全湖微囊藻密度与年均气温、全湖年均 TP 呈明显的正相关(图 6).

表 1 RDA 分析前两轴的统计特征

Tab.1 Statistics characteristics of the first two axes of RDA

统计指标		轴 1	轴 2
月均 值分 析	特征值	0.204	0.018
	月均水华面积和月均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度与环境的相关性	0.598	0.206
	月均水华面积和月均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度的累积变化百分率	20.4%	22.2%
	月均水华面积和月均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度与环境的累积变化百分率	91.8%	100.0%
年均 值分 析	特征值	0.562	0.167
	5—9 月平均水华面积、5—9 月平均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度和年均全湖微囊藻密度与环境的相关性	0.916	0.773
	5—9 月平均水华面积、5—9 月平均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度和年均全湖微囊藻密度的累积变化百分率	56.2%	72.9%
	5—9 月平均水华面积、5—9 月平均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度和年均全湖微囊藻密度与环境的累积变化百分率	75.0%	97.3%
5—9 月风 速区 间比 例分 析	特征值	0.631	0.238
	5—9 月平均水华面积、5—9 月平均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度和年均全湖微囊藻密度与环境的相关性	0.972	0.901
	5—9 月平均水华面积、5—9 月平均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度和年均全湖微囊藻密度的累积变化百分率	63.1%	86.8%
	5—9 月平均水华面积、5—9 月平均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度和年均全湖微囊藻密度与环境的累积变化百分率	70.9%	97.7%

表 2 RDA 分析各因子显著性和 F 值Tab.2 The values of significance and F of each factor in RDA

月均值分析	月均风速	月均 TN	月均 TDN	月均 TP	月均 TDP	月均气温
P 值	0.007 **	0.635	0.020 *	0.283	0.549	0.707
F 值	5.007	0.437	4.209	1.205	0.580	0.363
年均值分析	5—9 月平均风速	年均 TN-Q	年均 TP-Q			年均气温
P 值	0.009 **	0.039 *	0.224			0.266
F 值	5.89	3.67	1.68			1.45
5—9 月风速 区间比例分析	5—9 月 0~1 m/s 比例	5—9 月 1~2 m/s 比例	5—9 月 2~3 m/s 比例	5—9 月 3~4 m/s 比例	5—9 月 >4 m/s 比例	
P 值	0.589	0.017 *	0.473	0.046 *	0.003 **	
F 值	0.63	4.62	0.78	3.68	7.48	

* 表示差异显著, $P < 0.05$; ** 表示差异极显著, $P < 0.01$.

3 讨论

微囊藻水华是水体中具备足够多的微囊藻,在适宜的水动力条件下上浮至水体表面并通过水平漂移在下风向区域聚集所形成的^[33-34]. 微囊藻的细胞密度是决定水华能否形成的基础条件,微囊藻的生长受诸多

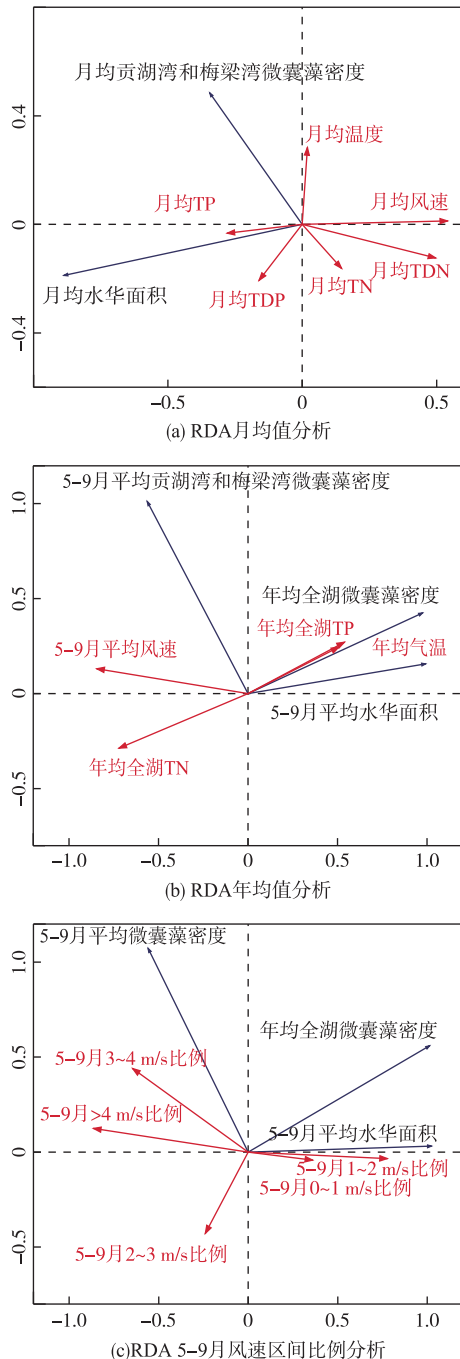


图6 环境因子与微囊藻密度和水华面积的RDA排序图

Fig.6 Redundancy analysis ordination diagram of cell density of *Microcystis* and bloom area in Lake Taihu in relation to environmental factors

环境因素影响,如气温、营养盐等.而风速主要通过影响湖泊中水动力而影响水华的形成及水平空间分布.全湖RDA年均值分析所选取的环境因子解释量高达96.4%,其中5-9月平均水华面积与5-9月平均风速、年均TP和年均气温具有相关性,相关性程度大小排序为:5-9月平均风速>年均TP≈年均气温.因此,本研究重点是从气温和营养盐对微囊藻密度的影响和风场对形成水华的作用机制出发,讨论2017年水华面积偏大的原因.

3.1 微囊藻密度对水华面积的影响

Paerl等^[35]指出微囊藻适宜在较高的气温下生长.Visser等^[36]指出当气温超过25°C时蓝藻的生长速率明显升高,其最适生长气温为27~37°C.从微囊藻密度的季节变化规律可以明显看出,微囊藻密度随气温升高而明显升高,随着气温降低而降低(图2、4).朱广伟等^[37]指出2017年气温出现异常高值,5-7月太湖水体中的叶绿素a浓度与上半年(1-6月)逐日水温积温呈显著正相关.RDA年均值分析同样表明,全太湖年均微囊藻密度与年均气温存在明显的正相关关系.图2显示2017年年均气温为18.0°C,高于2011-2017年之间平均值0.7°C,在7年之间年均气温最高.年均气温又与5-9月平均水华面积存在正相关性,因此,2017年气温偏高是影响2017年水华面积偏大的原因之一.

氮、磷浓度是影响微囊藻生长的重要环境因子^[38].本研究2011-2017年太湖典型湖区梅梁湾及贡湖湾的水质数据显示(图3),近7年来,水体TN和DTN浓度在2012年出现明显降低,且随后降低趋势变缓并进入波动期,分别在2.00和1.12 mg/L上下波动.特别地,2017年的TN和DTN年均浓度在7年中最低,相较于2011年分别降低了51.3%和71.3%.全太湖数据显示,2011-2017年TN浓度同样呈现下降的趋势,全太湖TN的7年平均浓度为1.89 mg/L,而2017年TN浓度为1.60 mg/L,比7年平均浓度低0.29 mg/L.RDA结果表明全湖年均微囊藻密度与全湖TN年均浓度呈负相关(图6),说明目前太湖总氮水平下降并没有对全太湖的微囊藻密度产生显著影响,TN仍处于较为富余的状态.

从磷的变化趋势发现(图3),贡湖湾和梅梁湾TP和TDP浓度均呈现出先下降后上升的趋势,其中2012年出现大幅度降低,2012-2014年TP和TDP月均浓度分别在0.15和0.021 mg/L上下波动,2015-2017年TP和DTP的月均浓度分别在0.18和0.031 mg/L上下波动,相较于2012-2014年分别回弹了20%和50%左右.全太湖的TP年均浓度由2014年的0.069 mg/L增加至2015年的0.082 mg/L,增加了18.8%,2011-2017年TP平均浓度为0.076 mg/L,2017年为0.083 mg/L,比TP 7年平均

值回升了9.0%。从梅梁湾和贡湖湾来看,2017年年均微囊藻密度比2011—2017年平均值降低了0.88%,而5—9月平均微囊藻密度只升高了0.01%。从典型湖区RDA月均值结果看出,月均贡湖湾和梅梁湾微囊藻密度与TP浓度无明显相关性。Xu等^[38]指出在磷浓度小于0.2 mg/L时,磷的增加会造成微囊藻生长率的增长,而超过该值时生长率不再发生变化。贡湖湾和梅梁湾的月均磷浓度普遍大于0.2 mg/L,因此,实测数据显示磷回升了9.0%,但该湖湾微囊藻密度的升高不显著。而从全湖微囊藻密度来看,全太湖7年平均微囊藻密度为 0.53×10^8 cells/L,而2017年为 1.18×10^8 cells/L,是7年平均值的2.21倍。全湖RDA结果同样显示水华面积与全湖年均TP浓度和年均微囊藻密度呈正相关。因此,TP浓度的回升同样对全太湖2017年水华面积有促进作用。

3.2 风速对水华面积的影响

风速影响微囊藻垂向上浮和水平漂移聚集形成水华的过程。众多学者发现水华的出现和消失存在一个风速阈值,当风速低于该阈值时,微囊藻易于上浮并在风生流作用下向下风水平漂移并聚集形成水华,而当风速高于该阈值时,微囊藻则在垂向上均匀分布,水华现象消失^[39-41]。太湖水华消失的风速阈值往往出现在3~4 m/s之间。

典型湖区RDA月均值和全湖年均值分析结果均表明水华面积与风速表现出显著相关性。RDA 5—9月风速区间比例分析结果显示,5—9月平均水华面积与5—9月1~2 m/s和0~1 m/s风速的比例均呈正相关,而与>4 m/s和2~3 m/s、3~4 m/s风速的比例均呈负相关。正相关性排序为:1~2 m/s风速比例>0~1 m/s风速比例;负相关排序为:大于4 m/s风速比例>3~4 m/s风速比例>2~3 m/s风速比例。然而,为什么不同风速区间对造成水华面积如此差异? Li等^[42]指出当水面聚集微囊藻生物量达到一定条件时即可形成肉眼可见的水华现象。因此,当水体中生物量足够大时,微囊藻仅通过微风弱聚集便可形成表层微囊藻密度较低的薄层水华。且众多学者在太湖的夏季同样观测到已聚集形成的水华斑块在风生流作用下水平漂移的现象^[25, 43]。Deng等^[25]在竺山湾搭建平台测量水华斑块的飘移距离与所需时间,发现在风速低于4 m/s的阈值时,水华暴发期中形成的水华斑块会随着风速的增大向下风向漂移速率加快。这种现象会使得已上浮形成的薄层水华逐渐漂移至下风向区域聚集成厚层水华,而通过卫星所拍摄的水华照片只是一个平面图像并不能测算出水华聚集层的厚度,所以难以区分薄层大面积和厚层小面积的水华。

梅梁湾和贡湖湾位于太湖北部,受夏季季风的影响,往往会有大量的微囊藻水平迁移至该湖湾区域。RDA年均值分析结果亦表明贡湖湾和梅梁湾5—9月平均微囊藻密度与风速呈正相关。本研究数据显示在2011—2017年期间,该湖湾区域的年均TN和TP浓度分别大于2.00和0.14 mg/L(图3),该营养盐条件下太湖贡湖湾和梅梁湾水华暴发期的5—9月整水柱微囊藻密度月均浓度普遍大于 2×10^8 cells/L(图4),该区域的微囊藻仅通过垂向上浮即可形成水华。因此,外来迁移进来的微囊藻并不会造成该区域水华面积的增大,仅造成该湖区微囊藻密度的增多。综上所述可以推断出,风速在1~2 m/s和0~1 m/s时,微囊藻容易上浮聚集但只发生缓慢的水平漂移,易形成大面积薄层的水华;风速在2~3 m/s和3~4 m/s时,微囊藻容易上浮聚集并能够快速水平漂移,易形成面积偏小的厚层水华;在风速>4 m/s时,微囊藻受强烈的紊流作用而难以以上浮、已经上浮的受到扰动混合而在垂向较为均匀分布,可导致水华现象消失。

2017年全太湖的年均微囊藻密度为 1.18×10^8 cells/L,该微囊藻密度完全能够仅通过弱聚集形成薄层水华,此外,2017年年均风速为2011—2017年来最低的且5—9月风速在1~2 m/s区间的天数也要多于往年。因此,可以推断出2017年风速较弱和风速在1~2 m/s的天数偏多为2017年太湖水华面积偏大创造了适宜的水动力条件。

4 结论

通过对太湖2011—2017年环境因子、微囊藻密度和水华面积进行分析,主要得出以下结论:

- 1) 从RDA年均值的分析结果可以推断出,全湖TP浓度的上升和2017年气温偏高使全湖微囊藻密度增加并为形成水华提供了丰富的物质基础,风速较弱为微囊藻上浮聚集形成巨大水华面积创造了适宜的条件。
- 2) 2011—2017年全太湖TN的平均浓度为1.89 mg/L,TP为0.076 mg/L,而2017年TN浓度为1.60

mg/L, TP 浓度为 0.083 mg/L, 比 7 年 TP 平均浓度回升了 9.0%. 气温方面, 7 年的平均气温为 17.3°C, 2017 年比 7 年平均气温高出 0.7°C.

3) 2017 年气温偏高及 TP 浓度的反弹造成了 2017 年全太湖年均微囊藻密度高达 1.18×10^8 cells/L, 为 2011—2017 年平均值 (0.53×10^8 cells/L) 的 2.21 倍, 全太湖年均藻密度与 5—9 月水华面积呈显著正相关.

4) 2017 年风速为 2011—2017 年最低值, 5—9 月的平均风速为 2.21 m/s, 此外 1~2 m/s 风速的天数为 7 年来最高值. 5—9 月风速区间 RDA 分析结果显示, 1~2 m/s 左右风速易于使微囊藻聚集形成薄层大面积水华, 而 >4 m/s 的风速会造成水华消失.

致谢: 感谢国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台—湖泊一流域科学数据中心 (<http://lake.geodata.cn>) 提供数据支撑.

5 参考文献

- [1] Qin B, Xu P, Wu Q *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**(1): 3-14. DOI: 10.1007/s10750-006-0521-5.
- [2] Paerl HW, Otten TG. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology*, 2013, **65**(4): 995-1010. DOI: 10.1007/s00248-012-0159-y.
- [3] Wang HY. Discussion on ecological dredging and silt treatment technology of Taihu Lake in Wuxi City. *Engineering Sciences*, 2010, **12**(6): 108-112. [王鸿涌. 太湖无锡水域生态清淤及淤泥处理技术探讨. 中国工程科学, 2010, **6**(12): 108-112.]
- [4] 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.]
- [5] 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.]
- [6] Li CH, Ye C, Zhao XF *et al.* The ecosystem health assessment of the littoral zone of Lake Taihu. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(12): 3806-3815. [李春华, 叶春, 赵晓峰等. 太湖湖滨带生态系统健康评价. 生态学报, 2012, **32**(12): 3806-3815.]
- [7] 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.]
- [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, 2017. [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, 2017.]
- [9] Kong FX, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(3): 589-595. [孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.]
- [10] Qin BQ, Wang XD, Tang XM *et al.* Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: cause and measurement. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(9): 896-906. [秦伯强, 王小冬, 汤祥明等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策. 地球科学进展, 2007, **22**(9): 896-906.]
- [11] George D, Edwards R. The effect of wind on the distribution of chlorophyll a and crustacean plankton in a shallow eutrophic reservoir. *Journal of Applied Ecology*, 1976, **13**(3): 667-690.
- [12] Webster IF, Hutchinson PA. Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes revisited. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(2): 365-373.
- [13] 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.
- [14] Zhang M, Duan H, Shi X *et al.* Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: implications for

- future climate change. *Water Research*, 2012, **46**(2): 442-452. DOI: 10.1016/j.watres.2011.11.013.
- [15] Zhu M, Paerl HW, Zhu G *et al.* The role of tropical cyclones in stimulating cyanobacterial (*Microcystis* spp.) blooms in hypertrophic Lake Taihu, China. *Harmful Algae*, 2014, **39**: 310-321. DOI: 10.1016/j.hal.2014.09.003.
- [16] 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.
- [17] Wu T, Qin B, Brookes JD *et al.* The influence of changes in wind patterns on the areal extension of surface cyanobacterial blooms in a large shallow lake in China. *The Science of the Total Environment*, 2015, **518/519**: 24-30. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.02.090.
- [18] 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.]
- [19] Zhu W, Li M, Dai X *et al.* Differences in vertical distribution of *Microcystis* morphospecies composition in a shallow hypertrophic lake (Lake Taihu, China). *Environmental Earth Sciences*, 2014, **73**(9): 5721-5730. DOI: 10.1007/s12665-014-3826-0.
- [20] Zhu W, Zhou X, Chen H *et al.* High nutrient concentration and temperature alleviated formation of large colonies of *Microcystis*: Evidence from field investigations and laboratory experiments. *Water Research*, 2016, **101**: 167-175. DOI: 10.1016/j.watres.2016.05.080.
- [21] 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.
- [22] Li M, Zhu W, Gao L *et al.* Changes in extracellular polysaccharide content and morphology of *Microcystis aeruginosa* at different specific growth rates. *Journal of Applied Phycology*, 2012, **25**(4): 1023-1030. DOI: 10.1007/s10811-012-9937-7.
- [23] Cao HS, Kong FX, Luo LC *et al.* Effects of wind and wind-induced waves on vertical phytoplankton distribution and surface blooms of *Microcystis aeruginosa* in Lake Taihu. *Journal of Freshwater Ecology*, 2006, **21**(2): 231-238.
- [24] Wu TF, Zhu GW, Qin BQ *et al.* Prior wind field induced hydrodynamics and its influence on cyanobacterial bloom in northern bays of Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2012, **24**(3): 409-415. DOI: 10.18307/2012.0312. [吴挺峰, 朱广伟, 秦伯强等. 前期风场控制的太湖北部海湾水动力及对蓝藻水华影响. 湖泊科学, 2012, **24**(3): 409-415.]
- [25] Deng J, Chen F, Liu X *et al.* Horizontal migration of algal patches associated with cyanobacterial blooms in an eutrophic shallow lake. *Ecological Engineering*, 2016, **87**: 185-193. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.12.017.
- [26] 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.]
- [27] 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.]
- [28] 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.]
- [29] 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.]
- [30] 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.]
- [31] Duan H, Ma R, Hu C. Evaluation of remote sensing algorithms for cyanobacterial pigment retrievals during spring bloom formation in several lakes of East China. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **126**(11): 126-135.
- [32] Wang XL, Zhang M, Yin J. Composition and influential factors of phytoplankton function groups in Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2018, **30**(2): 431-440. DOI: 10.18307/2018.0214. [王徐林, 张民, 殷进. 巢湖浮游藻类功能群的组成特性及其影响因素. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 431-440.]

- [33] Reynolds C, Walsby A. Water-blooms. *Biological Reviews*, 1975, **50**(4): 437-481.
- [34] Ishikawa K, Kumagai M, Vincent WF *et al.* Transport and accumulation of bloom-forming cyanobacteria in a large, mid-latitude lake: the gyre-*Microcystis* hypothesis. *Limnology*, 2002, **3**(2): 87-96. DOI: 10.1007/s102010200010.
- [35] Paerl HW, Huisman J. Blooms like it hot. *Science*, 2008, **320**(5872): 57-58.
- [36] Visser PM, Verspagen JMH, Sandrini G *et al.* How rising CO₂ and global warming may stimulate harmful cyanobacterial blooms. *Harmful Algae*, 2016, **54**: 145-159.
- [37] 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.]
- [38] Xu H, Paerl HW, Qin B *et al.* Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 420-432.
- [39] Moreno-Ostos E, Cruz-Pizarro L, Basanta A *et al.* Spatial heterogeneity of cyanobacteria and diatoms in a thermally stratified canyon-shaped reservoir. *International Review of Hydrobiology*, 2009, **94**(3): 245-257. DOI: 10.1002/iroh.200811123.
- [40] Wu X, Kong F, Chen Y *et al.* Horizontal distribution and transport processes of bloom-forming *Microcystis* in a large shallow lake (Taihu, China). *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2010, **40**(1): 8-15. DOI: 10.1016/j.limno.2009.02.001.
- [41] Xiao M, Zhu W, Li M *et al.* The influence of water oscillation on the vertical distribution of *Microcystis* colonies of different sizes. *Fresen Environ Bull*, 2013, **22**: 3511-3518.
- [42] Li Q, Hu W, Zhai S. Integrative indicator for assessing the alert levels of algal bloom in lakes: Lake Taihu as a case study. *Environmental Management*, 2016, **57**(1): 237-250.
- [43] Bai XH, Hu WP, Hu ZX *et al.* Importation of wind-driven drift of mat-like algae bloom into Meiliang Bay of Taihu Lake in 2004 summer. *Environmental Science*, 2005, **26**(6): 57-60. [白晓华, 胡维平, 胡志新等. 2004年夏季太湖梅梁湾席状漂浮水华风力漂移入湾量计算. 环境科学, 2005, **26**(6): 57-60.]