

## 2009—2017年太湖湖泛发生特征及其影响因素\*

刘俊杰<sup>1</sup>, 陆 隽<sup>1</sup>, 朱广伟<sup>2\*\*</sup>, 高鸣远<sup>1</sup>, 闻 亮<sup>1</sup>, 姚 敏<sup>1</sup>, 聂 青<sup>1</sup>

(1: 江苏省水文水资源勘测局, 南京 210029)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统研究站, 南京 210008)

**摘 要:** 湖泛是太湖蓝藻水华较为独特的灾害表征形式,也是危害湖泊生态服务功能的主要因素,认知其发生机制、演变特征对湖泊蓝藻水华灾害防控具有重要作用. 本文基于2009—2017年江苏省水文部门逐年4—10月对太湖湖泛易发区现场巡查获得的湖泛发生状况数据,结合期间水质、入湖水量、营养盐负荷等环境条件变化监测,分析了太湖水域湖泛发生的时空变化特征,研究了湖泛发生前后的环境因子变化规律,探讨了湖泛强度年际波动成因. 结果表明,2009—2017年太湖共发现面积超过0.01 km<sup>2</sup>的湖泛61起,年发生次数3~17次不等;湖泛发生位置主要集中在太湖湖西沿岸带,9年发生了32次,占总频次的一半以上;其次为梅梁湾;贡湖相对较少,而巡查的东部湖区未发现湖泛事件. 通过对湖泛发生日与前10日的环境条件对比分析发现,湖泛发生前5天持续的高温、低压和低风速等气象条件有利于湖泛发生;气温连续高于25℃、气压低于101.0 kPa,有利于诱发湖泛;主导风向为东南风也有利于太湖西北部蓝藻水华严重区域的湖泛发生;大量蓝藻水华物质是湖泛发生的重要物质基础;湖泛发生前10日,湖体平均藻密度基本在1500万 cells/L以上. 湖泛发生强度还受前一年营养盐外源负荷的影响,湖泛发生频次较高的年份,前一年总磷和总氮营养盐入湖负荷也均处于较高水平. 研究表明,尽管2007年无锡贡湖水厂发生饮用水危机以来太湖流域已经开展了大量的水环境治理工程,但是截至目前,太湖的湖泛发生风险仍处于较高水平,在营养盐还未控制到较低水平之前,太湖的湖泛巡查与防控仍是十分必要和艰巨的任务.

**关键词:** 湖泛; 蓝藻水华; 气象条件; 灾害预报; 太湖

## Occurrence characteristics of black patch events and their influencing factors in Lake Taihu during 2009 and 2017

LIU Junjie<sup>1</sup>, LU Jun<sup>1</sup>, ZHU Guangwei<sup>2\*\*</sup>, GAO Mingyuan<sup>1</sup>, WEN Liang<sup>1</sup>, YAO Min<sup>1</sup> & NIE Qing<sup>1</sup>

(1: *Jiangsu Province Hydrology and Water Resources Investigation Bureau, Nanjing 210029, P.R.China*)

(2: *Taihu Laboratory for Lake Ecosystem Research, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China*)

**Abstract:** Black patch events caused by cyanobacterial blooms in Lake Taihu were very special ecological phenomenon and crucial important ecological disasters. Clarifying the cause of formation and mechanism of black water event is very useful for the risk forecasting and prevention. In this paper, occurrence of black patch events during 2009 and 2017 and their relationship with the environmental factors in Lake Taihu were analyzed. Based on the daily survey undertaken by Jiangsu Bureau of Hydrology and Water Resource, 61 black water events which larger than 0.01 km<sup>2</sup> were reported during 2009 and 2017, with 3 to 17 times per year. More than half of these black patch events happened at the northwestern coastal of Lake Taihu, where there is the most polluted input. Continually hot weather, low air pressure and low wind speed conditions for five days benefited the occurrence of the black patch events. Southeast wind direction also made the bloom materials moving to northwest coastal region and product black patch, which bring lots of pollution from that region. Accumulation of massive bloom material supplied the substance condition for

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203001, 2012ZX07101-010)、国家自然科学基金项目(41671494)、中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC008)和中国科学院南京地理与湖泊研究所“一三五”战略规划课题(NIGLAS2017GH04)联合资助. 2018-02-14 收稿; 2018-03-23 收修改稿. 刘俊杰(1973~), 男, 高级工程师; E-mail: jsswljj@126.com.

\*\* 通信作者; E-mail: gwzhu@niglas.ac.cn.

the black patch events. In addition, nutrient loading of the former year was also related to the intensity of black patch event in Lake Taihu. The research indicated that Lake Taihu has high risk of black patch event, although plenty of restoration project has been demonstrated in the past 10 years. Warmer climate and high nutrient background were the major factors delayed the tremendous efforts in the past 10 years. Therefore, monitoring and forecasting are still very necessary for the control and management of risk from cyanobacterial blooms in Lake Taihu.

**Keywords:** Black patch event; cyanobacterial bloom; weather condition; disaster forecast; Lake Taihu

湖泛是富营养化湖泊水体在藻类大量暴发、积聚和死亡后,在适宜的气象、水文条件下,与底泥中的有机物在缺氧和厌氧条件下产生化学反应,形成褐黑色伴有恶臭的“黑水团”,从而导致水体迅速恶化、生态系统受到严重破坏的现象<sup>[1]</sup>. 我国对湖泛问题的系统研究是从2007年5月无锡贡湖水厂发生饮用水供水危机事件开始的<sup>[2]</sup>. 由于对水源地水质的严重威胁<sup>[3]</sup>,湖泛灾害得到了广泛关注. 关于湖泛的成因,多数研究都发现与大量易腐烂有机物的堆积、淤泥的参与、持续高温及弱的水动力扰动有关<sup>[2,4-6]</sup>. 但是在一些关键参数方面也有不一致的,比如有关低风速气象条件的持续时间、是否需要风场陡变等条件<sup>[5,7]</sup>以及有关水位的影响等<sup>[1-2]</sup>. 此外,随着研究的深入,发现除了蓝藻水华残体能引起“藻源性湖泛”,水草等其他类型的有机质,特别是含硫氨基酸丰富的生物质均能引起湖泛发生<sup>[4,8-9]</sup>;不但夏季能发生,其他季节也能发生湖泛灾害<sup>[10]</sup>.

为减轻湖泛灾害对环湖居民生产生活的影 响,多名学者开发了湖泛预测预警系统<sup>[5,11-12]</sup>. 然而,预测的精度仍不够理想. 弄清湖泛发生机制,特别是揭示湖泛形成的环境条件,是湖泛灾害科学预测及实施防控的前提. 而除了实验室模拟研究之外<sup>[13-14]</sup>,湖泛的原位监测信息对于研判湖泛发生机制,建立湖泛预测预警模型具有极其重要的意义<sup>[15]</sup>.

自2007年太湖发生湖泛,引发无锡供水危机以来,太湖治理攻坚战已开展了10年,太湖整体水质有所改善,但近年来太湖蓝藻水华灾害问题仍未得到根治<sup>[16-18]</sup>,太湖小面积湖泛现象仍时有发生,湖泛防控仍是太湖安全度夏的重要内容,也是太湖水环境综合整治的难点与要点. 江苏省水文水资源勘测局自2009年以来,每年4—10月对太湖湖泛易发区实施逐日巡查,积累了详实的太湖湖泛灾害资料,对湖泛灾害预测及防控具有重要的意义. 本文拟利用2009—2017年太湖湖泛巡查获得的多年监测资料,定性 与定量相结合,分析湖泛发生的时空变化特征,探讨湖泛发生与主要巡测指标的关系,为提高湖泛防控能力提供科学依据.

## 1 材料和方法

### 1.1 湖泛的确定标准

巡查过程中,湖泛的现场确定主要依据3个方面的表征:气味、颜色和溶解氧. 监测人员首先凭借颜色和气味两个指标,如果闻到不正常的恶臭味道,同时发现水色发黑,立即停船进行溶解氧测定. 如果水面下0.5 m处溶解氧浓度低于2.0 mg/L,即可认为发生湖泛现象.

一旦发现湖泛,则测定湖泛区的面积. 测定方法是通过巡测湖泛区及其周边的水体溶解氧水平,大致画出湖泛区(表层0.5 m水体溶解氧浓度低于2.0 mg/L)的区域长度和宽度,估算出整个湖泛区的面积.

湖泛的持续时间单位为天. 首次发现某区域发生湖泛开始,保持每天2次的区域巡测,每次测定湖泛区的面积,直到溶解氧水平升高到2.0 mg/L以上,则宣布湖泛消失,持续的天数则为单次湖泛持续时间.

为更加系统地表述太湖湖泛的周年综合状况,构建表征全年湖泛严重程度的指标湖泛强度指数(Index of Black Patch Event,简称 $I_{\text{bpe}}$ ),其表征公式为:

$$I_{\text{bpe}} = N_{\text{bpe}} \cdot D_{\text{bpe}} \cdot A_{\text{bpe}} \quad (1)$$

式中, $N_{\text{bpe}}$ 为当年湖泛发生次数; $D_{\text{bpe}}$ 为当年平均单次湖泛的持续时间; $A_{\text{bpe}}$ 为当年平均单次湖泛的发生面积.

### 1.2 湖泛巡测方案

本文采用2009—2017年江苏省水文部门于太湖安全度夏期间的湖泛巡测数据. 江苏水文部门自2009年4月开始对太湖开展巡查监测,太湖安全度夏期(4月10日—10月20日)逐日巡查监测,编发日报. 太湖湖泛巡查水域主要包括湖泛易发区及重要饮用水源地,具体巡查区域为太湖西岸八房港—竺山湖—梅梁湖—贡湖—湖东段. 主要分为3个巡查区域:(1)太湖西岸八房港—竺山湖区,由江苏省水文水资源勘测局常州分局执行巡查任务;(2)梅梁湖区及贡湖区,由江苏省水文水资源勘测局无锡分局执行巡查任务;(3)湖东

区,包括苏州市在贡湖、上山、渔阳山和胥口湾的4个水厂附近,由江苏省水文水资源勘测局苏州分局执行巡查任务.湖泛巡查规范要求巡查船只在巡查区域内来回往复穿梭、蛇行曲折向前巡查及监测.

巡查过程中还设置固定水质测定点位.太湖西岸八房港—竺山湖区:设置八房港东、陈东港东、官渎港东、新渎港东、社渎港东、师渎港东、符渎港东、沙塘港东、雅浦港南、竺山湖中及竺山湖北11个巡查监测点,巡查水域面积为190 km<sup>2</sup>;梅梁湖—贡湖区:设置月亮湾、拖山、南泉水厂、马山水厂、直湖港东、小湾里水厂、南龚(外)、张桥(外)、锡东水厂及白洋湾水厂10个巡查监测点,巡查水域面积为272 km<sup>2</sup>;湖东区:设置镇湖水厂、渔阳山水厂及园区水厂4个巡查监测点,巡查水域面积为150 km<sup>2</sup>.具体巡查区域和固定监测点位详见图1.

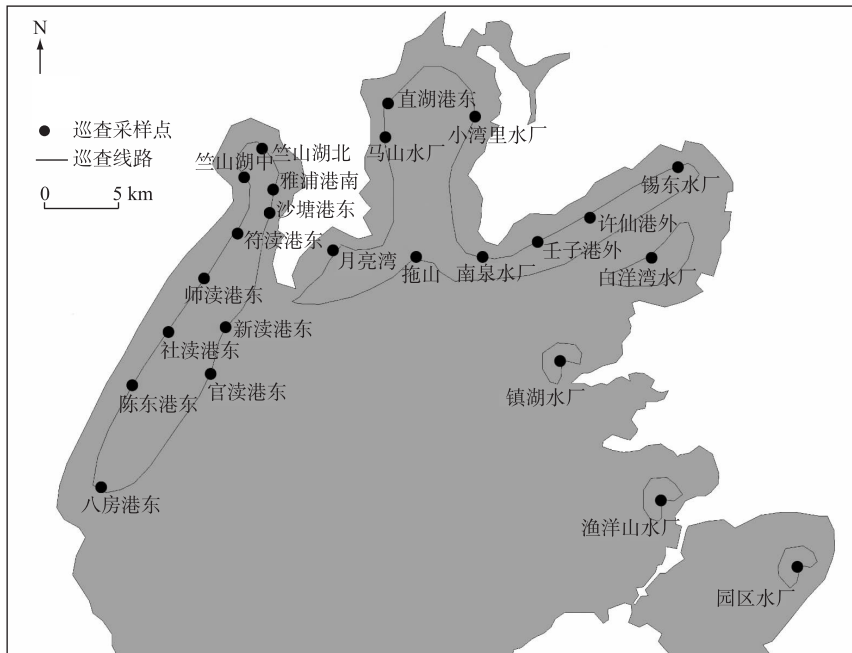


图1 太湖湖泛巡查线路及固定水质测定点位

Fig.1 Black patch events survey area and the water monitoring sites in Lake Taihu

在未发现湖泛情况下,巡查固定监测点的监测指标包括水温(表层和底层)、风速、风向、气压、溶解氧(表层和底层)、pH、藻密度、叶绿素a等.若湖体出现湖泛等异常情况,测量、标注异常水域面积与范围,并采集样品送实验室进一步检测,同时加密监测湖泛区的动态变化.

一般情况下,巡查频次为1次/d;若发现湖泛等异常情况,则跟踪监测,加密巡查频次.巡查中携带的监测设备包括GPS、风速风向仪、气压计、水质多参数测定仪、采水器、水样冷藏箱等.

### 1.3 环境因子监测

2009—2017年间,中国科学院太湖湖泊生态系统研究站(简称太湖站)逐月采样分析了北部太湖14个点位的水体浮游植物叶绿素a(Chl.a)、水体总氮(TN)、总磷(TP)等营养盐环境指标,并在太湖站逐日监测了太湖水温(WT)、降雨量(RF)、水位(WL)等气象水文指标,具体样点布设及监测方法见文献[17].

江苏省水文水资源勘测局等还进行了入湖污染负荷的测定.测定和计算方法为:在太湖进出湖水量比较大的主要河流上设置流量测验断面,建立基点站和单站,每日定时流量测验,其他较小河道则根据水情变化采取巡查的方法,不定时进行流量测验,计算入湖水量.在出入湖口门,水量、水质(TN、TP)同步监测,每月上、下半月各测1次,汛期大水时频次加密.入湖氮、磷负荷的计算采用分别计算分析时段内的水量平均值、某种污染物平均浓度值,再求二者乘积的方法,即:

$$W = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{n} \quad (2)$$

式中,  $W$  为估算时间段的污染物通量;  $n$  为估算时间段内的采样次数;  $C_i$  为第  $i$  次采样的污染物浓度;  $Q_i$  为第  $i$  次采样的瞬时流量.

#### 1.4 数据统计与分析

湖泛的总发生天数是一年中单次湖泛发生天数的累积. 由于湖泛可能多点同时发生, 在日期上会有重复. 湖泛的平均单次面积是一年中历次湖泛面积的数学平均值. 为了更好地揭示藻类生物量与湖泛之间的关系, 对北太湖逐月 Chl.a 数值进行分段统计, 分别分析上半年(1—6月)的叶绿素平均值(Chl.a<sub>1-6</sub>)及全年叶绿素平均值(Chl.a<sub>1-12</sub>)与湖泛强度的关系. 此外, 为考量水位波动对湖泛强度的可能影响, 分析了年内水位极差(WL<sub>d</sub>)与湖泛相关指标的关系. 水文气象数据中的日水温积温(AWT)为逐日水温的累计值, 特定时间段的降雨量(RF)也是逐日值的累加. 不同因素间的相关性判别使用泊松系数( $P$ ),  $P < 0.05$  为显著相关,  $P < 0.01$  为极显著相关. 所有相关性分析采用 SPSS 16.0 软件完成.

## 2 结果与分析

### 2.1 湖泛发生状况

2009—2017年, 太湖巡查共发现湖泛61起, 年发生次数3~17次不等. 其中2017年为湖泛发生次数最多的年份, 共监测到湖泛17次. 其次为2012年, 监测发现湖泛12次(表1). 就发生位置而言, 湖泛发生区域集中分布在太湖湖西、贡湖及梅梁湖. 其中, 湖西为湖泛最高发水域, 达32次, 超过湖泛总次数的一半; 其次为梅梁湖, 达23次; 贡湖相对较少, 共发生6次; 而湖东段未发现过湖泛发生(图2).

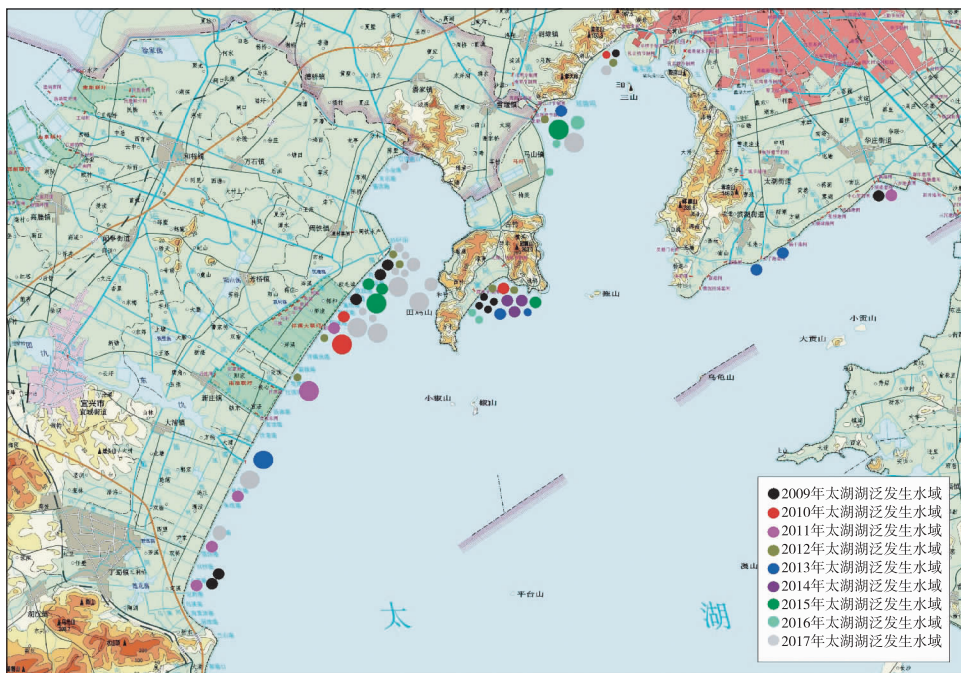


图2 2009—2017年太湖湖泛发生位置

Fig.2 Location of black patch events occurred in Lake Taihu during 2009 and 2017

从湖泛的持续时间看, 单次湖泛现象平均持续时间为3 d, 单次持续时间最长达9 d. 2012和2017年湖泛总发生天数最多(分别为32和47 d)且平均持续时间最长(分别为3.25和3.76 d). 单次湖泛发生面积为0.01~9.20 km<sup>2</sup>, 2011年7月27—30日湖西八房港一师渎港水域湖泛为巡查以来发现的单次面积最大的湖泛. 2017年湖泛总发生面积最大, 达到34.0 km<sup>2</sup>, 平均单次面积为2.0 km<sup>2</sup>. 每年5—9月为湖泛集中发生时段, 仅有一次发生在10月初, 发现的湖泛最早发生时间为5月15日, 其次为5月16日, 同样分别发生在

2017 和 2012 年(表 1).

表 1 2009—2017 年太湖湖泛发生情况

Tab.1 Basic information of black patch events occurred in Lake Taihu during 2009 and 2017

年份	总发生次数	总发生天数/d	平均单次持续时间/d	总发生面积/km <sup>2</sup>	平均单次面积/km <sup>2</sup>	最早发生日期
2009	3	5	2.00	1.5	0.50	2009-07-21
2010	4	9	2.75	7.3	1.83	2010-07-23
2011	6	15	2.50	12.6	2.10	2011-05-22
2012	12	32	3.25	4.8	0.40	2012-05-16
2013	6	12	3.00	4.1	0.68	2013-06-19
2014	3	3	1.00	0.6	0.20	2014-06-10
2015	5	10	2.60	5.4	1.07	2015-06-05
2016	5	7	1.40	2.8	0.57	2016-06-13
2017	17	47	3.76	34.0	2.00	2017-05-15

## 2.2 湖泛发生期间的环境特征

**2.2.1 气温** 根据 2009—2017 年湖泛发生前 10 日及发生日的气象水文监测结果,湖泛发生前 10 日—前 1 日,天气以晴好为主,平均气温均高于 25℃,且逐日升高,从 25.8℃持续上升至 28.2℃,平均上升幅度为 2.4℃,最大升幅达 8.3℃. 连续 5 日的高温可能是湖泛发生的一个关键特征. 湖泛发生 5 日以前的连续 5 日气温平均值为 26.3℃,而湖泛发生前 5 日的平均气温为 28.0℃,有明显的提升(图 3).

湖泛发生前 1 日的平均气温为 28.2℃,变化范围为 19.2~34.8℃(图 3),其中,83.3%的湖泛发生前 1 日气温在 25℃以上. 湖泛发生时的平均气温为 27.6℃,较前 1 日下降,降幅 0.6℃,最大降幅的湖泛出现在 2017 年 6 月 5 日沙塘港口—田鸡山附近水域,发生首日与前 1 日的温差达 11.5℃. 连续多日的高温后遇气温骤降,是诱发湖泛的重要条件之一. 这是因为气温陡降引起湖水的温度分层消失,水体上下对流过程加强,触发下层大量厌氧性物质上翻,加快了湖泛事件的形成.

**2.2.2 风速及风向** 湖泛发生前 10 日风速以微风为主,变化幅度很小,均小于 3.5 m/s. 湖泛发生前 1 日风级基本为 2~4 级,未出现 5 级以上风,而湖泛发生首日风速突增,平均风速为 4.1 m/s,较前 1 日上升 0.5 m/s,且出现 5 级风,其中升幅最高达 6.4 m/s(图 3). 据巡测数据分析,湖泛发生前 10 日至发生首日主导风向均为东南风,前 10 日主导风向为东南风的概率为 41.9%,湖泛发生首日该概率升至 54.4%,而太湖巡查期间多年平均东南风概率仅为 28.4%. 湖泛发生前 10 日至当日的东南风概率远高于多年平均.

受湖区营养盐供应量及生物体空间竞争等限制和影响,完全依赖水域内的藻类自发生长到足够发生湖泛所需的单位聚积量实际上难以发生,往往需要适当的风情(如风速和风向)作为其规模性聚积的驱动力<sup>[4,19]</sup>. 湖泛首发日风速加大,也加剧了湖体上下水的交换,甚至导致大量底泥中厌氧物质的快速释放,将一个相对缓慢的有机质分解等化学反应,迅速变成一个大量物质参与的大规模化学反应,从而有助于湖泛的形成. 此外,湖泛前期的微风有助于蓝藻水华物质的局部堆积. 在持续的东南微风作用下,湖区形成的蓝藻在较短时间内在湖西、梅梁湾西部及贡湖湾西部沿岸水域附近大量聚集,为湖泛的发生提供了重要的物质基础.

**2.2.3 气压** 湖泛发生前 10 日的气压变化幅度不大,变化范围为 99.7~101.7 kPa,平均为 100.75 kPa,呈现逐步下降的趋势. 湖泛发生首日平均气压为 100.71 kPa,较前 10 日及前 1 日气压平均下降 0.04 kPa(图 3),最大降幅达 1.5 kPa,为 2016 年 6 月 16 日—17 日发生在梅梁湖闻江口附近水域的湖泛. 湖泛发生首日气压处于 100.0~100.5 kPa 区间的比例较前 1 日上升近 10%,而处于 100.5~101.0 kPa 区间的比例则下降了约 12 个百分点,71.1%的湖泛发生首日气压低于 101.0 kPa,较低的气压状态是大部分湖泛发生的诱发条件. 低气压有利于湖泛发生的机制,也与水体分层稳定性的打破有关. 低气压有利于水体底层厌氧分解产生的气泡等物质上浮,包括一些未分解完全的有机质碎块上翻,加速水相的厌氧分解进入“链式反应”阶段.

**2.2.4 藻密度** 在持续的适宜温度及适当的风场条件下,水体平均藻密度从湖泛发生 10 日前的 942 万 cells/L 升至发生 2 日前的 1626 万 cells/L,升幅达 72.6%(图 3). 藻密度的持续增加,或者说藻的聚集,是湖泛发生

的一个前提。湖泛发生 10 日前至 6 日前,水体藻密度平均值为 1125 万 cells/L,1 日前至 5 日前,藻密度平均值为 1417 万 cells/L,湖泛发生首日的藻密度平均值则为 1850 万 cells/L。77.1% 的湖泛发生前 1 日的藻密度达到 500 万 cells/L 以上,其中藻密度在 1000 万~2000 万 cells/L 区间的比例最高,达 31.3%,其次为 2000 万~3000 万 cells/L,而达到 3000 万 cells/L 以上的比例最小,为 6.3%。

湖泛发生首日的藻密度分布区间与前 1 日类似,湖泛发生所需“藻源”基础已形成。湖泛发生首日平均藻密度达 1850 万 cells/L,较发生前 1 日增长 404 万 cells/L,藻密度最大增幅达到 16244 万 cells/L,为发生在 2013 年 9 月 18 日陈东港北—朱涑港近岸的湖泛。

在营养盐充足的条件下,连续的高温晴好天气( $>25^{\circ}\text{C}$ )有助于蓝藻在水体表层大量繁殖生长,在稳定的东南微风长时间驱动下,生长的蓝藻在湖西、梅梁湾西部及贡湖湾北部沿岸水域大量聚集,同时,死亡腐败的藻类也在同一区域不断聚集形成,从而形成湖泛的藻源基础。在遇到天气突然变化,如气温突降、风速短时增大、气压降低等诱因时,水体垂直方向受到较大扰动,不再利于蓝藻的生长或漂浮,并将下沉的死亡藻类带至水体表层,触发湖泛现象。

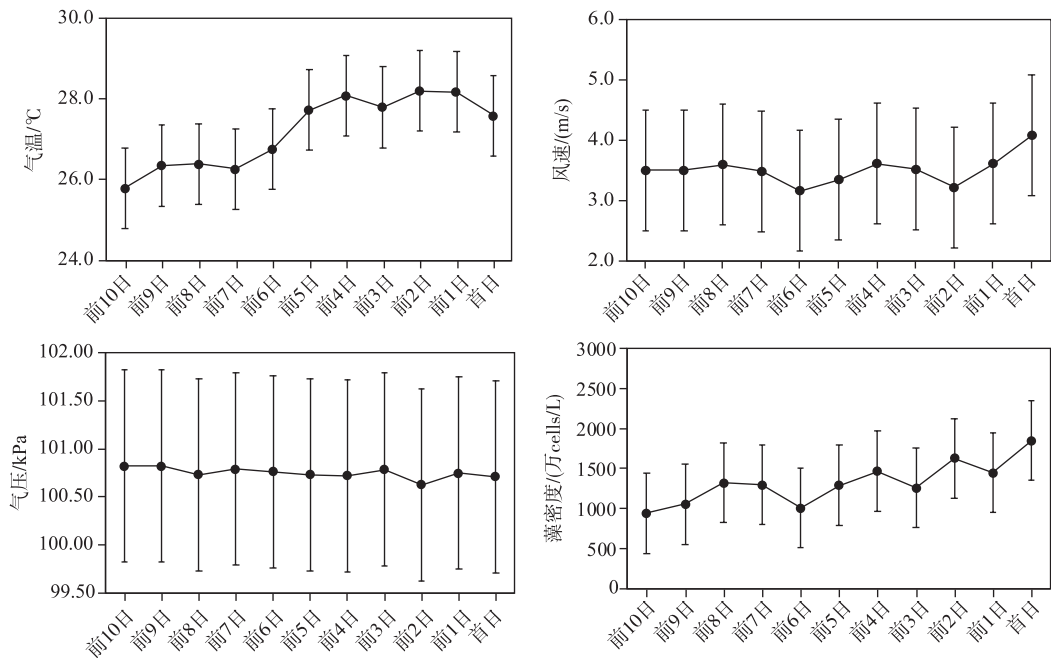


图3 湖泛发生前 10 日至发生首日平均气温、风速、气压和藻密度变化过程

Fig.3 Changes of average air temperature, wind speed, air pressure and phytoplankton density in the 10 days before black patch events occurred

2.2.5 营养盐负荷 氮和磷是藻类生长的主要物质基础,其在水体中存在的水平和形态直接控制着藻类种群结构、更替、生物量和生产力等<sup>[20]</sup>。2009—2017 年间,入太湖的总磷负荷出现两次峰值,分别为 2010—2012 年及 2016—2017 年。2010—2012 年平均入湖总磷负荷为 0.204 万 t,2016—2017 年则达到 0.222 万 t;2010—2012 年平均入湖总氮负荷为 3.96 万 t,2016 年为 3.56 万 t,2017 年为 3.55 万 t,入湖营养盐负荷两次峰值形成的原因均与当年入湖水量较大有关(图 4)。

从湖泛多发水域历年 5—9 月总磷和总氮浓度变化可以看出,湖西的总磷和总氮浓度较其他湖区偏高(图 5),且与同期入太湖营养盐负荷变化趋势同步性较高,受入太湖营养盐负荷影响明显。结合历年发生湖泛的频次及水域进行分析,发生湖泛频次较高的年份,如 2012 年(12 次)和 2017 年(17 次),其前一年(2011 和 2016 年)总磷和总氮营养盐入湖负荷均处于较高水平;营养盐浓度最高的湖西水域也是湖泛最高发区域。

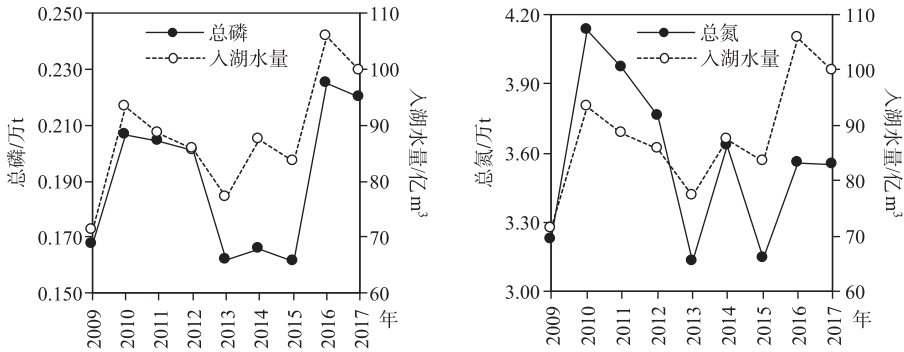


图4 2009—2017年太湖多年入湖氮、磷负荷变化

Fig.4 External loadings of nitrogen and phosphorus during 2009 and 2017

湖体中充足的营养盐储备为次年藻类繁殖生长、大面积暴发及湖泛发生奠定了基础。

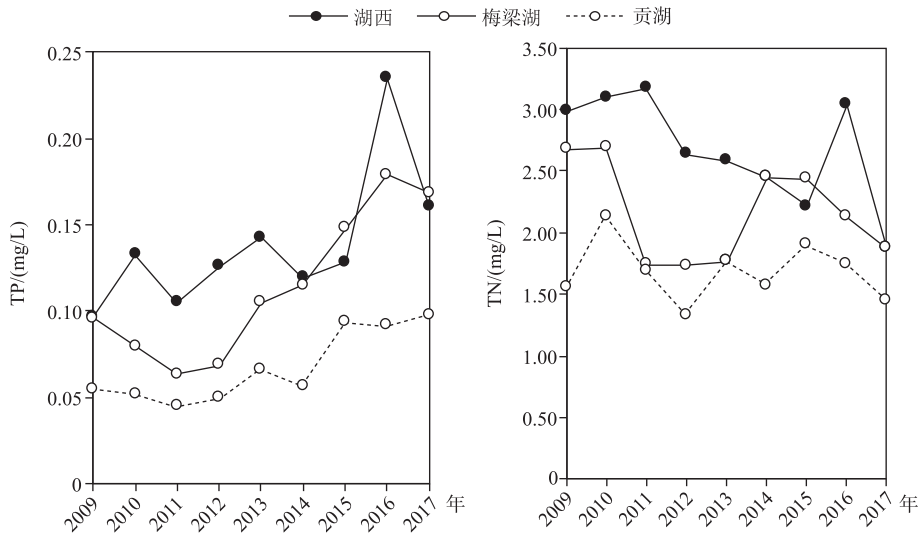


图5 2009—2017年5—9月巡查湖区水体总磷和总氮浓度的变化

Fig.5 Average concentrations of total phosphorus and total nitrogen from May to September, 2009 to 2017

### 3 讨论

2007年太湖贡湖水厂发生水危机事件以来,国家和地方开展了一系列污染治理工程,力图减少蓝藻水华灾害,确保太湖不发生大规模湖泛灾害,不发生饮用水危机. 其中重要的治理工程包括:(1)污染源治理方面:新建城市污水处理厂244家,新建污水管网24500 km,关闭化工企业4千多家,关闭重污染及污染排放不达标企业1千家;(2)蓝藻清除方面:环湖设置蓝藻打捞点112个,藻水分离站10个,累积打捞蓝藻1000万t;(3)污染底泥疏浚3700万m<sup>3</sup>;(4)实施湿地保护与恢复项目105个,保护与恢复湿地面积15万hm<sup>2</sup>. 经过10年的努力,环湖河道及湖体部分营养盐指标明显下降<sup>[21-22]</sup>,15条主要入湖河道中有12条达到或优于Ⅲ类水目标.

然而,大型浅水湖泊的富营养化治理往往需要较长的时间,特别是大型浅水湖泊,藻类生物量等富营养化关键指标对生态修复的响应较滞缓,且对气候变化等环境因子的胁迫响应很脆弱<sup>[23]</sup>. 本研究表明,尽管太湖及其流域的水质有所改善,可是太湖的湖泛灾害风险仍未消除,甚至在近两年极端温度和降雨等气候

因素的影响下,藻类生物量在2017年仍出现了明显反弹<sup>[17]</sup>,湖泛问题也明显反弹。

2009—2017年湖泛强度及北太湖的环境指标状况见表2。从 $I_{bpe}$ 与相关环境因子的相关性(表3)可以看出,反映上半年水体平均浮游植物生物量的 $Chl.a_{1-6}$ 与 $I_{bpe}$ 呈极显著相关,这说明藻类生物量或者水体蓝藻物质的总量是影响当年湖泛灾害强度的重要因素。这与实际观察及前人研究的结果一致,藻情严重程度与湖泛的发生概率有关<sup>[2,4,10]</sup>。因此,与上半年藻情关系密切的因子 $Chl.a_{1-12}$ 、TP、 $WL_d$ 及 $WT_{year}$ ,与 $I_{bpe}$ 均具有较好的相关性,尽管一些指标的相关性未达到显著水平。

表2 2009—2017年湖泛强度及北太湖的环境指标状况\*

Tab.2 Intensity of black patch events and environmental indicators during 2009 and 2017

年份	$I_{bpe}$	$Chl.a_{1-6}/$ ( $\mu g/L$ )	$Chl.a_{1-12}/$ ( $\mu g/L$ )	TP/ ( $mg/L$ )	WL/ m	$WL_d/$ m	RF/ mm	$WT_{year}/$ $^{\circ}C$
2009	3.0	18.1	34.0	0.156	3.311	0.021	1201.4	17.1
2010	20.1	12.5	19.2	0.123	3.312	0.001	776.4	16.9
2011	31.5	11.0	26.2	0.144	3.174	0.138	967.0	16.7
2012	15.6	16.4	26.0	0.152	3.302	0.128	1020.6	16.7
2013	12.2	13.8	29.4	0.151	3.253	0.049	977	17.5
2014	0.6	20.3	31.3	0.132	3.279	0.026	1124.8	17.0
2015	13.9	27.8	52.5	0.168	3.357	0.078	1295.2	17.0
2016	4.0	26.0	51.8	0.145	3.518	0.161	1714.3	19.0
2017	127.8	56.5	56.6	0.179	3.183	0.335	1101.8	19.5

\*  $I_{bpe}$ :湖泛强度指数; $Chl.a_{1-6}$ :当年1—6月北太湖水体浮游植物叶绿素a浓度平均值; $Chl.a_{1-12}$ :当年全年12个月北太湖水体浮游植物叶绿素a浓度平均值;TP:当年全年12个月北太湖水体水柱总磷平均值;WL:太湖站栈桥逐日水位的年平均值; $WL_d$ :当年WL与前一年WL的差别绝对值;RF:全年降雨量; $WT_{year}$ :太湖栈桥水下50cm逐日水温的年均值。

表3 年均湖泛强度与相关环境因子的相关系数

Tab.3 Correlation coefficient between intensity of black patch events and environmental factors

	$I_{bpe}$	$Chl.a_{1-6}$	$Chl.a_{1-12}$	TP	WL	$WL_d$	RF	$WT_{year}$
$Chl.a_{1-6}$	0.825**	1.000						
$Chl.a_{1-12}$	0.452	0.825**	1.000					
TP	0.604	0.732*	0.738*	1.000				
WL	-0.535	-0.104	0.303	-0.189	1.000			
$WL_d$	0.848**	0.814**	0.644	0.668*	-0.216	1.000		
RF	-0.177	0.306	0.722*	0.275	0.760*	0.245	1.000	
$WT_{year}$	0.629	0.809**	0.759*	0.479	0.193	0.758*	0.521	1.000

\*表示相关关系显著, $P<0.05$ , $n=9$ ; \*\*表示相关关系极显著, $P<0.01$ , $n=9$ 。

太湖的水情与湖泛的发生强度之间可能存在内在联系。年度的水位差 $WL_d$ 与 $I_{bpe}$ 呈极显著的相关关系(表3)。对比年均水位值曲线可以看出,2017年较2016年水位下降明显,年均水位降幅为0.335m,可能与当年湖泛较为严重的情况有关联(图6)。2011年也较2010年水位明显下降,导致总体湖泛强度增加。对比2007年的湖泛灾害状况,当年冬、春季水位明显偏低,加上气温较高,导致了春季藻情异常严重,最终造成贡湖水厂发生水危机<sup>[3]</sup>。这意味着,干旱引起的水位明显偏低,可能会诱发次年较高的湖泛灾害风险。如果次年还伴随了高温的气象条件,春季藻类生物量偏高,就需要高度关注湖泛灾害风险。

近年来气候变化的强度有所增强,极端降雨和极端高温等气候现象频繁出现,对太湖的湖泛灾害防控提出了新的挑战。Zhang等通过遥感反演揭示出台风雨等极端降雨事件对太湖湖体大范围的透明度影响很大<sup>[24]</sup>,进而对藻类的生长和生物量空间分配产生巨大影响,通过统计分析揭示了近50年来极端降雨频次增加的现象。而Yang等通过对2007—2015年大于300 $km^2$ 面积水华事件气象学特征分析,发现暴雨和强风等



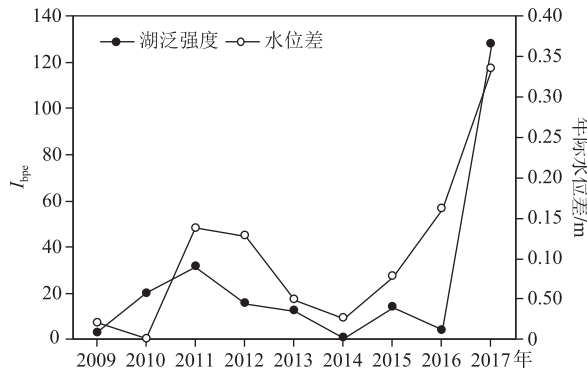


图6 2009—2017年太湖湖泛强度指数与  
年际水位差的逐年变化

Fig.6 Variation of index of black patch events and water level difference of Lake Taihu during 2009 and 2017

和低压,以及持续上升的藻密度,是湖泛暴发的前兆;而突然降温及风速增加、扰动加强则可能是湖泛的触发条件。长期来看,前一年的氮磷负荷偏高、当年的水位变幅加大及气温偏高、藻情较重等环境条件有利于湖泛灾害的发生。

3) 由于太湖流域及湖体营养盐本底高,蓝藻水华问题还未得到根治,太湖的湖泛灾害仍处于高发阶段,湖泛巡查及灾害预测预警仍是湖泛灾害防控的重要手段。

致谢:江苏省水文水资源勘测局常州分局、无锡分局及苏州分局提供了湖泛巡查资料,中国科学院南京地理与湖泊研究所太湖湖泊生态系统研究站提供了部分水质与水文气象资料,在此一并表示谢意。

## 5 参考文献

- [1] Lu GH, Ma Q. Monitoring and analysis on "Black Water Aggregation" in Lake Taihu, 2009. *J Lake Sci*, 2010, **22**(4): 481-487. DOI: 10.18307/2010.0402. [陆桂华, 马倩. 2009年太湖水域“湖泛”监测与分析. 湖泊科学, 2010, **22**(4): 481-487.]
- [2] Lu GH, Ma Q. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(3): 43-442. [陆桂华, 马倩. 太湖水域湖泛及其成因研究. 水科学进展, 2009, **20**(3): 438-442.]
- [3] Qin BQ, Zhu GW, Gao G et al. A drinking water crisis in Lake Taihu, China: Linkage to climatic variability and lake management. *Environmental Management*, 2010, **45**(1): 105-112.
- [4] Fan CX. Progress and prospect in formation of black bloom in Lake Taihu: A review. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 553-566. DOI: 10.18307/2015.0401. [范成新. 太湖湖泛形成研究进展与展望. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 553-566.]
- [5] Wang CL, Zhang Y, Zhang NH et al. Analysis of meteorological factors of forming feculent and anaerobic water aggregation induced by algal bloom in Taihu Lake. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 401-408. [王成林, 张咏, 张宁红等. 太湖藻源性湖泛形成机制的气象因素分析. 环境科学, 2011, **32**(2): 401-408.]
- [6] Wang CL, Zhang NH, Zhang Y et al. The research on warning of black water cluster in Taihu Lake based on meteorological factors. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2010, **2**(5): 1-4. [王成林, 张宁红, 张咏等. 基于气象条件的太湖湖泛预警研究. 环境监控与预警, 2010, **2**(5): 1-4.]
- [7] Shen QS, Shao SG, Wang ZD et al. Fade and recovery process of algae-induced black bloom in Lake Taihu under different wind conditions. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(12): 1060-1066. DOI: 10.1360/972011-745. [申秋实, 邵世光, 王兆德等. 风浪条件下太湖藻源性湖泛的消退及其水体恢复进程. 科学通报, 2012, **57**(12): 1060-1066.]
- [8] Shen QS, Zhou QL, Shao SG et al. Estimation of *in-situ* sediment nutrients release at the submerged plant induced black bloom area in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2014, **26**(2): 177-184. DOI: 10.18307/2014.0202. [申秋实, 周麒麟, 邵世光等. 太湖草源性“湖泛”水域沉积物营养盐释放估算. 湖泊科学, 2014, **26**(2): 177-184.]

极端天气事件诱发了50%以上的大面积水华事件<sup>[18]</sup>. Wu等对太湖流域2000—2012年的风场变化与蓝藻水华面积的关系分析表明,区域尺度的年平均风速下降也可能对蓝藻水华面积有贡献<sup>[25]</sup>. 因此,2017年太湖湖泛灾害加重的现象表明,目前太湖的水质改善程度还不足以解除太湖的湖泛灾害风险。

## 4 结论

1) 2009年以来在太湖共巡查到61起面积大于0.01 km<sup>2</sup>的湖泛事件,主要发生在蓝藻水华容易堆积的太湖西北沿岸带。湖泛的发生强度年际之间差异较大,其中2017年湖泛频次及强度明显较高,其次为2011—2012年。

2) 通过对湖泛强度及环境因子的综合分析,发现持续5天的高温、持续多日的低风速

- [ 9 ] Cai P, Wu YC, Liu X *et al.* The contribution of sediment and algal to the formation of black bloom and their potential to supply the black substance in waters in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2015, **27**(4): 575-582. DOI: 10.18307/2015.0403. [蔡萍, 吴雨琛, 刘新等. 底泥和藻体对太湖湖泛的诱发及水体致黑物的供应潜力. 湖泊科学, 2015, **27**(4): 575-582.]
- [ 10 ] Shao SG, Xue LQ, Liu C *et al.* Seasonal differences in the process of algae-induced black bloom. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2511-2516. [邵世光, 薛联青, 刘成等. 藻源性湖泛发生过程的季节差异. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2511-2516.]
- [ 11 ] Li W, Qin BQ, Zhang YL *et al.* Numerical forecasting of short-term algae-induced black bloom in eutrophic shallow lake: A case study of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 701-709. DOI:10.18307/2016.0402. [李未, 秦伯强, 张运林等. 富营养化浅水湖泊藻源性湖泛的短期数值预报方法——以太湖为例. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 701-709.]
- [ 12 ] Kong FX, Ma RH, Gao JF *et al.* The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 314-328. DOI:10.18307/2009.0302. [孔繁翔, 马荣华, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 314-328.]
- [ 13 ] Shen QS, Shao SG, Wang ZD *et al.* Simulation of black bloom in Moon Bay of Lake Taihu and physical and chemical responses of water and sediment. *Advances in Water Science*, 2011, **22**(5): 710-719. [申秋实, 邵世光, 王兆德等. 太湖月亮湾湖泛发生过程模拟及水土物化性质的响应. 水科学进展, 2011, **22**(5): 710-719.]
- [ 14 ] Li ZC, Duan HT, Zhang YC *et al.* Variations in optical properties and water color during the formation of black bloom waters: a laboratory experiment. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 524-532. [李佐琛, 段洪涛, 张玉超等. 藻源型湖泛发生过程水色变化规律. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 524-532.]
- [ 15 ] Gong H, Yao M, Shao FY *et al.* Analysis of warning monitoring system and control technology for black water cluster in Taihu Lake. *Jiangsu Water Resources*, 2017, (8): 52-55. [龚慧, 姚敏, 邵飞燕等. 太湖湖泛预警监测系统及治理技术探析. 江苏水利, 2017, (8): 52-55.]
- [ 16 ] Shi K, Zhang Y, Zhou Y *et al.* Long-term MODIS observations of cyanobacterial dynamics in Lake Taihu: Responses to nutrient enrichment and meteorological factors. *Scientific Reports*, 2017, **7**: 40326, DOI:10.1038/srep40326.
- [ 17 ] 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.]
- [ 18 ] 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.
- [ 19 ] 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.]
- [ 20 ] Xu H, Qin BQ, Zhu GW. Nutrient limitation of cyanobacterial growth in different regions of Lake Taihu in summer. *China Environmental Science*, 2012, **32**(12): 2230-2236. [许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究. 中国环境科学, 2012, **32**(12): 2230-2236.]
- [ 21 ] Dai XL, Qian PQ, Ye L *et al.* Changes in nitrogen and 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.]
- [ 22 ] Yi J, Xu F, Gao Y *et al.* Variations of water quality of the major 22 inflow rivers since 2007 and impacts on Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1167-1174. DOI: 10.18307/2016.0602. [易娟, 徐枫, 高怡等. 2007年以来环太湖22条主要河流水质变化及其对太湖的影响. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1167-1174.]
- [ 23 ] Kosten S, Huszar VLM, Becares E *et al.* Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. *Global Change Biology*, 2012, **18**: 118-126.
- [ 24 ] Zhang Y, Shi K, Zhou Y *et al.* Monitoring the river plume induced by heavy rainfall events in large, shallow, Lake Taihu using MODIS 250 m imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **173**: 109-121.
- [ 25 ] 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. *Science of the Total Environment*, 2015, **518/519**: 24-30.