ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)　ENVIRONMENTAL SCIENCE　第39卷　第11期
2018年11月15日

目　次

巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析

胡旻琪[1,2], 张玉超[1*], 马荣华[1], 张壹萱[1,2]
(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对近年来巢湖蓝藻水华暴发频繁, 基于中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectrum-radiometer, MODIS)多光谱遥感数据, 采用浮游藻类指数(floating algae index, FAI)和藻华像元生长算法(algae pixel-growing algorithm, APA)提取了巢湖蓝藻水华覆盖面积, 在分析 2016 年巢湖蓝藻水华时空分布规律基础上, 结合巢湖水质、气象数据, 讨论了藻华暴发的主要环境驱动力. 结果表明, 2016 年巢湖藻华暴发季节与往年一致(5 ~ 11 月), 但藻华首次暴发时间推迟到 5 月, 持续时间缩短至 204 d, 平均藻华面积 85.53 km^2. 其环境驱动力研究发现, 尽管巢湖主要水质指标呈现下降趋势, 但总氮、总磷浓度依然分别超过 V 类和 IV 类水质标准; 与往年相比, 2016 年春季风速偏大($\Delta W = 0.1\ m\cdot s^{-1}$)、降水偏多($\Delta P = 0.8$ mm)与日照时数偏低($\Delta S = -1.3$ h) 是巢湖藻华面积减少、起始暴发时间推迟的主要原因; 藻华持续期内, 降水成为影响藻华面积月际变化的主要影响因素, 当日平均风速不仅与当天藻华面积存在较显著的负相关($P < 0.05$), 当风速较大时对后续几日的藻华面积产生一定的滞后影响. 这些研究结果有助于了解巢湖蓝藻水华情况, 为应对巢湖藻华暴发与气候变化提供理论依据.

关键词: 巢湖; 蓝藻水华; 时空分布; 气象因子; 环境驱动力
中图分类号: X524; X87 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)11-4925-13 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201801057

Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers

HU Min-qi[1,2], ZHANG Yu-chao[1*], MA Rong-hua[1], ZHANG Yi-xuan[1,2]
(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Lake Chaohu has drawn increasing attention due to the occurrence of massive algal blooms. This study applied daily monitoring results from moderate-resolution imaging spectrum-radiometer (MODIS) satellite to extract algal blooms with a floating algal index algorithm and characterize surface floating algal bloom dynamics in 2016 with an algae pixel-growing algorithm. Combining water quality and meteorological data, environmental driving forces of algal blooms in 2016 were explored. The results showed that cyanobacterial blooms occurred throughout the lake from May to November, which is the same as in previous years. Compared with previous years, the initial bloom date was postponed to May, the duration was reduced to 204 days, and the average floating algal bloom area was reduced to 85.53 km^2. By investigating the environmental driving forces affecting the algal bloom, it was found that a larger wind speed ($\Delta W = 0.1\ m\cdot s^{-1}$), more precipitation ($\Delta P = 0.8$ mm), and a lower sunshine duration ($\Delta S = -1.3$ h) in spring were the main reasons. When the temperature was suitable, precipitation was the main driving force affecting the monthly variation in algal blooms. The daily average wind speed was also negatively correlated with the algal bloom area ($P < 0.05$). High wind speed can affect the area of algal blooms as well. These results will aid understanding of the situation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and provide a theoretical basis for dealing with algal blooming and climate change.

Key words: Lake Chaohu; floating algal blooms; spatial and temporal dynamics; meteorological factors; environmental drivers

巢湖位于安徽省合肥市, 是长江中下游重要的淡水资源和生态湿地, 在当地人民生活和经济发展中发挥着重要作用[1]. 20 世纪 80 年代初巢湖蓝藻水华开始暴发, 至今湖泊水华依然严重, 湖泊环境治理仍面临巨大压力[2]. 蓝藻水华会引起水质恶化, 破坏生态系统结构, 引起水体生态系统功能改退化, 造成严重的生态环境风险或直接的环境污染[3]. 因此, 掌握巢湖蓝藻水华的时空分布, 对于控制蓝藻水华、评价蓝藻生态环境风险、研究蓝藻异常生长的原因以及建立水质的预警系统非常重要.

湖泊水色遥感可以利用多种性在传感器探测以及反演内陆水体叶绿素等水色要素参数[4], 传感器接收到的遥感信息包含水体内一定深度的综合反映[5]. 遥感技术根据浮游植物中的叶绿素与可见和近红外光之间具有特殊的陡坡效应, 即叶绿素含量高的地方反射率的峰值也大的现象来监测富营养化

收稿日期: 2018-01-05; **修订日期**: 2018-04-22
基金项目: 国家自然科学基金项目(41671371, 41471287)
作者简介: 胡旻琪(1994 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为湖泊水色遥感, E-mail: huminqi28@163.com
* 通信作者, E-mail: yczhang@niglas.ac.cn

的分布范围[6]，通常蓝藻覆盖区域光谱特征与无藻湖面有较为明显的差异，因此可以利用遥感技术监测蓝藻水华.

中分辨率成像光谱仪（moderate-resolution imaging spectrum-radiometer，MODIS）是新一代地球观测传感器，其数据在全世界范围都可免费接收[7]. 目前，基于 MODIS 数据进行蓝藻水华监测的算法最常见的有单波段法、比值法、归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）法、增强型植被指数（enchanted vegetation index，EVI）法和浮游藻类指数（floating algae index，FAI）法等[8~10]. 其中 FAI 算法通过统计设置固定阈值，利用简单的像元分解，被认为是简单有效且高精度的水华提取算法[11]. 基于 MODIS 的 FAI 算法不仅可以实时监测蓝藻水华，也可以提供长时间序列下的藻华信息.

由于 MODIS 空间分辨率粗糙，需要开展亚像元方面的估算研究. 藻华像元生长算法（algae pixel-growing algorithm，APA）通过判定 MODIS 影像中的藻华"生长点像元"，采用临近像元相关、逐渐扩展的思路，从而精确计算出混合像元的藻华盖度，适用于藻华面积的长时间序列动态监测[12].

本研究针对巢湖藻华 MODIS 卫星日常遥感监测，基于 FAI 指数和 APA 算法，实现了 2016 年巢湖蓝藻水华高精度卫星遥感监测，开展了巢湖蓝藻的空间分布情况、暴发时间与持续时间、空间分布频率等研究. 结合 2000 ~ 2016 年巢湖当地水质指标数据与气象数据，讨论影响 2016 年巢湖蓝藻水华暴发时空规律的环境驱动力.

1 研究区域

巢湖处于安徽省中部（图 1），长江淮河之间，为我国五大著名淡水湖之一[13]，是长江流域的重要支流，水域面积约为 770 km^2，巢湖流域水系较为发达，共有大小河流 33 条，主要入湖河流有杭埠河、派河、白石山河、兆河等[14]. 近几十年来，由于不同污染源的污染物通过土壤径流和大气降水等多种途径进入巢湖水体，使水环境日趋恶化，巢湖富营养化问题越来越严重[15,16]，水生环境受到威胁和破坏.

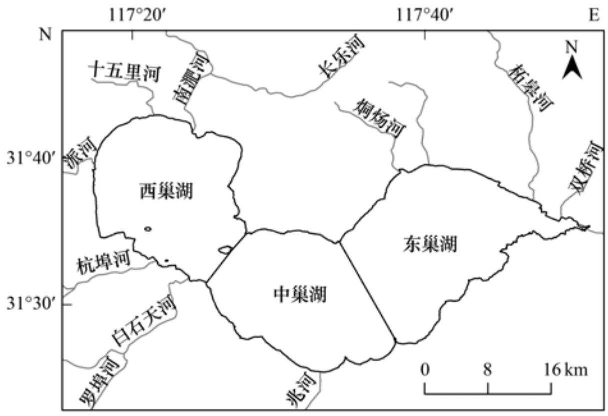

图 1 巢湖及其分区

Fig. 1 Lake Chaohu and three lake segments

2 研究方法

2.1 遥感影像数据处理

从美国国家宇航局（national aeronautics and space administration，NASA）获取 2016 年间巢湖天气状况良好的 MODIS 卫星遥感影像共 144 景（表 1），基本涵盖了 2016 年各月份，特别是水华暴发最为严重的夏、秋季节. 利用 SeaDAS7.4（seaWiFS data analysis system，美国）进行辐射定标获得 L1B 数据，去除臭氧吸收和分子瑞利散射的影响，从而获得 MODIS 瑞利散射校正的反射率数据[17,18]. 此外，将影像数据波长为 1240 nm 处的 500 m 分辨率数据重新采样至 250 m 分辨率，以匹配波长为 645 nm 处的分辨率.

表 1 2016 年巢湖卫星影像数据

Table 1 MODIS data list of Lake Chaohu in 2016

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
影像数/景	10	15	9	7	8	7	15	19	17	3	16	18

2.2 蓝藻水华提取算法

与陆地表面相比，水体在红光-近红外-短波红外波段强吸收. 事实上，由于强吸收，在短波红外波段，水体是不透明或者"黑色"的. 这为使用这些波段进行大气校正提供了理论基础[19]. 水表面的悬浮藻类在 NIR 波段比在其他波段反射率高，这样可以很容易地将藻类从水体中区分出来. 基于此原理，针对 MODIS 的数据，王宁等[10]提出了浮游藻类指数（FAI），可以用于蓝藻水华的快速提取，其计算见式（1）和式（2）.

$$FAI_{MODIS} = R_{rc}(859) - R'_{rc}(859) \tag{1}$$

其中：

$$R'_{rc}(859) = R_{rc}(645) + [R_{rc}(1240) - R_{rc}(645)] \times (859 - 645)/(1240 - 645) \quad (2)$$

2.3 蓝藻水华面积计算方法

本研究使用藻类像素生长算法(APA)计算像素的浮游藻类覆盖度，该算法的思想是利用 3×3 窗口中 FAI 最大值和最小值来决定中心像元的 FAI 值[20]．因此中心像元的 FAI 值定义见式(3)：

$$\mathrm{FAI}_{\mathrm{MODIS}}^{\mathrm{pixel}} = \gamma \times \mathrm{FAI}_{\mathrm{MODIS}}(\mathrm{Max}^{\mathrm{pixel}}) - (1-\gamma) \times \mathrm{FAI}_{\mathrm{MODIS}}(\mathrm{Min}^{\mathrm{pixel}}) \quad (3)$$

式中，γ 是 3×3 窗口的分解系数.

浮游藻类覆盖度是指某一混合像元中藻华完全覆盖的面积占该像元面积的百分比．藻华纯像元表示该像元完全被藻华覆盖，覆盖度为 1；非藻华像元表示该像元内不存在藻华，覆盖度为 0．为了对混合像元中藻华与非藻华水体进行分解，假设任意一个混合像元的遥感信息可以分解为藻华像元与非藻华像元遥感信息的线性组合，可以表示为式(4)．

$$R_{\mathrm{mixed}} = \alpha \times R_{\mathrm{algae}} + (1-\alpha) \times R_{\mathrm{non\_algae}} \quad (4)$$

式中，α 为混合像元中的藻华覆盖度，其初始值为 0，通过迭代计算得到[21]．R_{algae}、$R_{\mathrm{non\_algae}}$ 和 R_{mixed} 分别为藻华纯像元，非藻华像元及混合像元中的遥感信息(如遥感反射率等)．由于 FAI 指数是 3 个波段经过瑞丽散射校正后遥感反射率的加减组合，因此 FAI 指数与藻华覆盖度的关系可表示为式(5)：

$$\mathrm{FAI} = \alpha \times \mathrm{FAI}_{\mathrm{algae}} + (1-\alpha) \times \mathrm{FAI}_{\mathrm{non\_algae}} = (\mathrm{FAI}_{\mathrm{algae}} - \mathrm{FAI}_{\mathrm{non\_algae}}) \times \alpha + \mathrm{FAI}_{\mathrm{non\_algae}} \quad (5)$$

式中，$\mathrm{FAI}_{\mathrm{algae}}$ 和 $\mathrm{FAI}_{\mathrm{non\_algae}}$ 分别是浮游藻类和非浮游藻类的阈值.

$\mathrm{FAI}_{\mathrm{non\_algae}}$ 阈值通过计算影像中每一个像元其 FAI 梯度，利用生成的梯度影像做出梯度直方图，确定影像内最大梯度值对应的 FAI 值．由于最大梯度值对应的位置可以很好地区分浮游藻类和非浮游藻类，将最大梯度值对应的 FAI 值求得的均值减去两倍的标准差得到通用的 $\mathrm{FAI}_{\mathrm{non\_algae}}$ 值为 −0.004．而 $\mathrm{FAI}_{\mathrm{algae}}$ 阈值通过汇总 MODIS 影像中藻华纯像元，形成 FAI 值分布直方图，按照获取 $\mathrm{FAI}_{\mathrm{non\_algae}}$ 阈值的方法，得到 $\mathrm{FAI}_{\mathrm{algae}}$ 阈值为 0.05[21]．已有研究利用 APA 算法实现对太湖蓝藻水华面积进行高精度计算，并对计算结果进行精度评价，得到均方根误差 RMSE 为 15.2km^2，相对误差 RE 为 9.9%[22]，结果较为精确．此外，也有学者利用该算法对巢湖蓝藻水华面积进行统计与监测，为缓解巢湖藻华暴发与治理方法提供新的技术支撑[20]．

因此 FAI 与混合像元的浮游藻类覆盖度呈线性关系．在一个 3×3 像素窗口中，最大像素和最小像素的 FAI 可以表示为式(6)：

$$\mathrm{FAI}_{\mathrm{MODIS}} = m \times \alpha + k \quad (6)$$

式中，m 和 k 分别是斜率和截距．将上述两式结合，混合像元的覆盖度可以表示为式(7)：

$$\alpha_{\mathrm{MODIS}}^{\mathrm{pixel}} = \gamma \times \alpha_{\mathrm{Max}} + (1-\gamma) \times \alpha_{\mathrm{Min}} \quad (7)$$

式中，α_{Max} 和 α_{Min} 分别是 3×3 窗口中的最大和最小藻类覆盖度．$\alpha_{\mathrm{MODIS}}^{\mathrm{pixel}}$ 是后续分析的基础覆盖度．如果 $\alpha_{\mathrm{MODIS}}^{\mathrm{pixel}}$ 不为零，那么该像素的蓝藻水华覆盖面积为 $0.25 \times 0.25 \times \alpha_{\mathrm{MODIS}}^{\mathrm{pixel}}$．整个湖泊的蓝藻水华面积按 $0.25 \times 0.25 \times \sum \alpha_{\mathrm{MODIS}}^{\mathrm{pixel}}$ 计算.

2.4 蓝藻水华面积统计方法

在本研究中，蓝藻水华的暴发指藻类生物量在水体表面的快速增加与积累，而非整个水体的藻类总存量．针对 2016 年基于 MODIS 的蓝藻面积提取数据，本文分析巢湖蓝藻水华时空分布的统计量包括：蓝藻水华覆盖面积，月平均覆盖度、藻华暴发频率、藻华暴发规模，起始时间和持续时间.

根据蓝藻水华覆盖面积将巢湖水华面积分为：无水华覆盖(水华覆盖面积小于 10 km^2)、轻度水华覆盖(水华覆盖面积在 10～50 km^2 之间)、中度水华覆盖(水华覆盖面积在 50～100 km^2 之间)和重度水华覆盖(水华覆盖面积大于 100 km^2)[23]．当水华覆盖面积大于 50 km^2 时，被认为有显著的蓝藻水华．月平均覆盖度为巢湖 2016 年当月所有影像蓝藻水华覆盖面积之和与当月影像数的比值，单位为 km^2.

单个像元的蓝藻水华暴发频率定义为式(8)：

$$F_{i,j} = C_{i,j}/\mathrm{TC}_j \quad (8)$$

式中，$F_{i,j}$ 是时间 j 内第 i 个像素出现蓝藻水华的相对频率，$C_{i,j}$ 是同一像素中藻华发生次数，TC_j 是 MODIS 影像的总数．本文统计巢湖 2016 年蓝藻水华的月暴发频率和年暴发频率．月暴发频率为 2016 年各月所有 MODIS 数据中水华暴发次数的比例，年暴发频率为 2016 整年内所有 MODIS 数据中水华暴发次数的比例，用百分比(%)表示，值越接近 100% 说明该区域蓝藻水华暴发几率越大，属于蓝藻水华暴发频繁区域.

由于每月藻华面积的最大值可以代表去除风混合干扰后的每月藻华暴发状况[22]．本研究统计了当年藻华面积月最大值的平均值，得到藻华面积的年平均值，单位为 km^2，作为衡量藻华暴发规模的指标.

考虑到巢湖蓝藻水华一般会持续到次年 1 月，起始时间定义为从每年 2 月 1 日开始的第一个非零 APA 值出现时间[22]，使用年积日进行统计，单位为 d. 持续时间是根据每年最初和最后一次观测到的水华面积在 50 km^2 以上的暴发日期相减所得到的天数，单位为 d. 当含有非零的 α_{MODIS}^{pixel} 值的湖泊面积大于整个湖泊的 25% 时，被认为有显著的蓝藻水华.

3 巢湖蓝藻水华时空分布规律

3.1 藻华覆盖面积变化趋势

利用 APA 算法对 2016 年所有巢湖 MODIS 影像的蓝藻水华面积进行计算，统计巢湖各月不同程度水华覆盖面积，并计算各月藻华覆盖面积大于 50 km^2 的影像数占当月总影像数的比例(图 2)，探究巢湖各月不同程度水华覆盖面积比例变化. 结果表明，无水华覆盖在 2 月与 3 月比重最大；轻度水华覆盖除 7 月所占比例有所增加外，其他月份基本持平；中度水华覆盖在 5 月和 9 月所占比例最大，其他月份保持低平；而重度水华覆盖比例在 4 月之后呈增加趋势，在 9 月达到最大值后缓慢下降，至 10 月后迅速下降. 总体上看，2016 年 1 月蓝藻水华覆盖面积出现小高峰，2 月和 3 月减少到最低，4 月以后巢湖蓝藻水华一直呈现增长趋势，在 6 月和 9 月蓝藻水华面积出现高峰，9 月以后蓝藻水华面积逐渐减少.

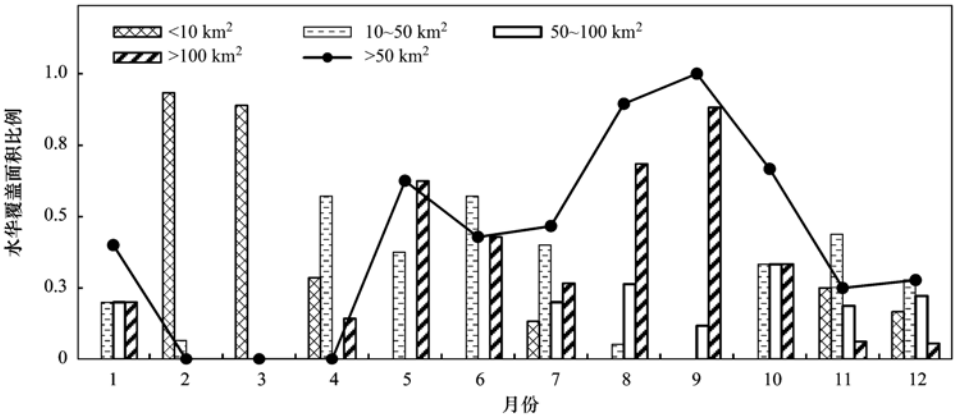

图 2 2016 年不同程度藻华月均覆盖面积比例

Fig. 2 Monthly algal bloom percentage in Lake Chaohu in 2016

结合对巢湖各分区(西巢湖、中巢湖和东巢湖)及整个湖区的藻华覆盖面积统计(图 3)可以看出，2016 年巢湖蓝藻暴发时间主要集中于 1 月、5 ~ 6 月及 8 ~ 9 月. 其中，东巢湖和中巢湖的藻华暴发时间都集中在 1 月及 5 ~ 6 月，而西巢湖的藻华暴发时间集中在 7 ~ 9 月.

3.2 最初暴发时间与持续时间

结合 2000 ~ 2015 年巢湖蓝藻水华暴发起始时间与持续时间[20,23]，对 2016 年全巢湖及不同湖区蓝藻水华暴发的起始时间(图 4)与持续时间(图 5)进行对比与分析. 结果表明，东部湖区的藻华发生的起始时间通常晚于其他两个湖区，2016 年巢湖蓝藻水华暴发的起始时间在 5 月 19 日，迟于前几年，而藻华持续时间达到 17 a 来最短，持续了 239 d.

3.3 巢湖蓝藻水华暴发频率

通过统计 2016 年巢湖不同湖区各月暴发频率(图 6)可以看出，西巢湖蓝藻水华暴发频率最大值出现在 9 月，且明显高于中巢湖和东巢湖；东巢湖藻华暴发频率最大值出现在 1 月和 5 月；中巢湖藻华暴发频率在 6 月和 9 月出现高峰，但峰值低于西巢湖与东巢湖.

为进一步掌握 2016 年巢湖不同湖区蓝藻水华空间分布情况，对其各月暴发频率与年暴发频率进行可视化(图 7). 结果表明，巢湖蓝藻水华在 2016 年各月都有不同程度的覆盖；以水华暴发起始时间自 2 月起算，4 月开始水华覆盖度明显增加，主要出现在东巢湖东部沿岸及中巢湖沿岸地区；6 月暴发频率出现高峰，全湖周边都有较高的暴发频率；9 月暴发频率达到最大值，主要以西巢湖的蓝藻水华覆盖为主. 从巢湖各区域来看，西巢湖蓝藻水华暴发频率最高，以西巢湖西北部与南部尤为明显，而东巢湖水域蓝藻水华在 4 ~ 5 月也有高频率的水华覆盖. 从 2016 年全年暴发频率图来看，西巢湖和东巢湖都是蓝藻水华暴发频繁的区域，尤其是西巢湖的西北部以及东巢湖东部沿岸，其蓝藻水华暴发频率相对较高.

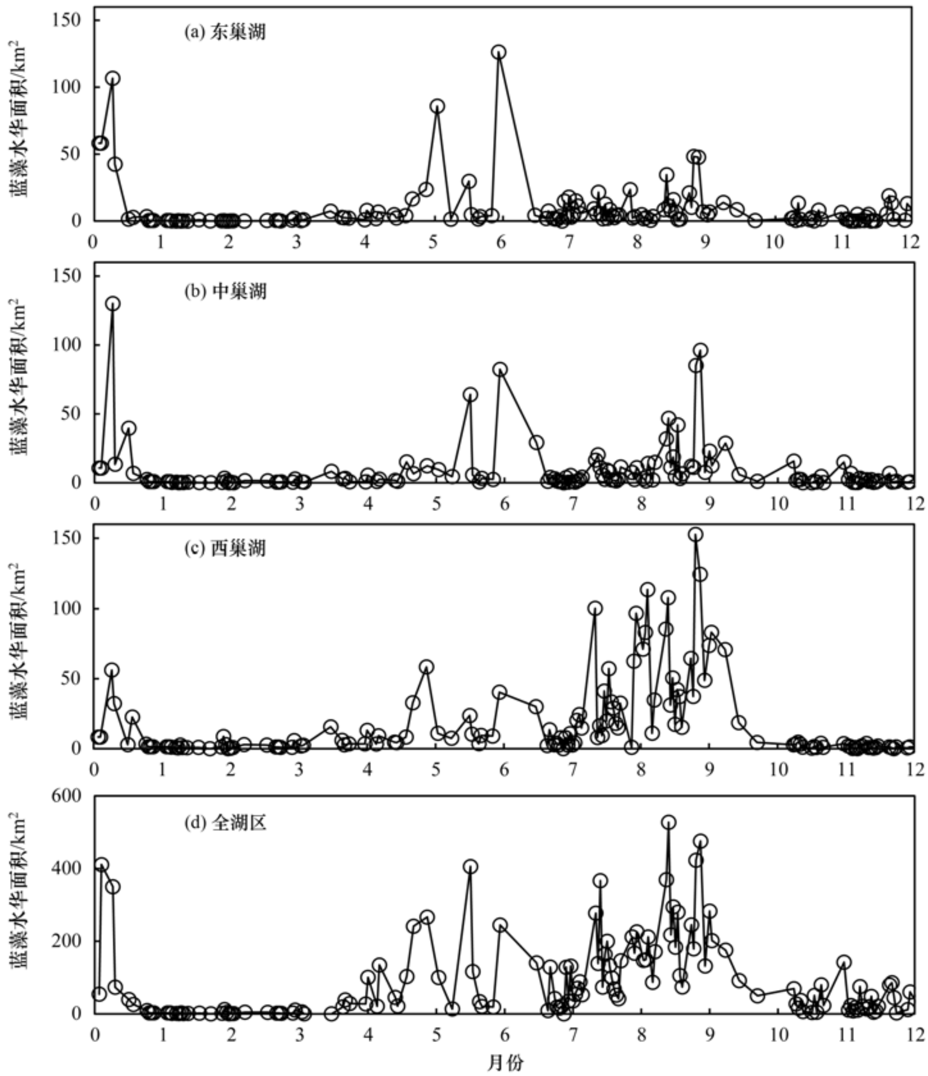

图 3　2016 年巢湖蓝藻水华面积

Fig. 3　Time series of algal bloom distribution in Lake Chaohu in 2016

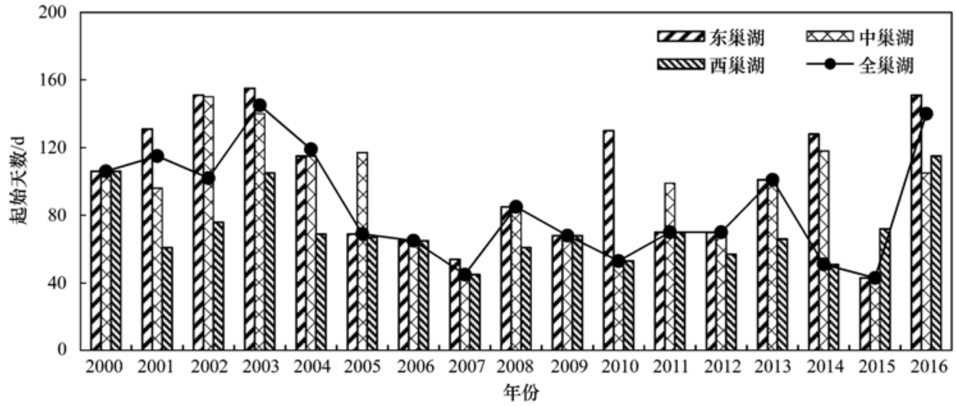

图 4　2000 ~ 2016 年巢湖藻华暴发起始时间

Fig. 4　Initial blooming date in Lake Chaohu from 2000 to 2016

4　环境驱动因素

富营养化是蓝藻水华暴发的主要先决条件，其中氮和磷一般被认为是主要的营养元素[24]．通过获取巢湖 2000 ~ 2016 年各类水质指标[25 ~ 29]，包括水体透明度 SD(cm)、高锰酸盐指数($mg \cdot L^{-1}$)、总

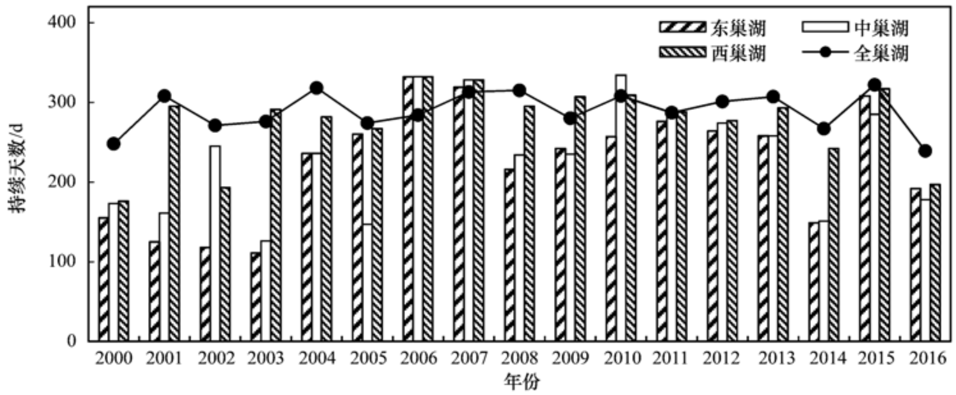

图 5　2000 ~ 2016 年巢湖藻华暴发持续天数

Fig. 5　Duration of algal bloom in Lake Chaohu from 2000 to 2016

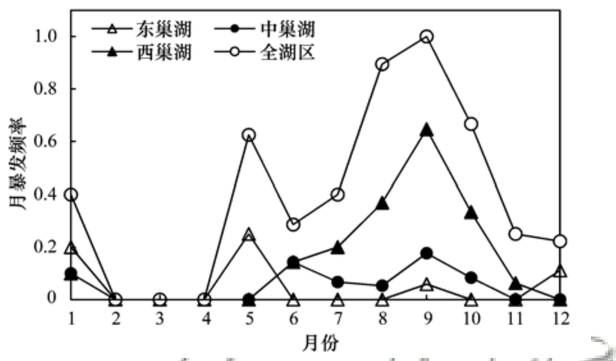

图 6　2016 年巢湖蓝藻水华月暴发频率统计

Fig. 6　Monthly algal bloom frequency in Lake Chaohu in 2016

氮 TN(mg·L⁻¹)、总磷 TP(mg·L⁻¹) 及氮磷比 TN/TP，统计 2000 年至 2016 年来各类水质指标平均值(表 2). 结果表明，17 年来巢湖各类水质指标整体呈下降趋势，氮磷比呈上升趋势(图 8). 2016 年巢湖水体 SD 与 TP 浓度均低于往年平均值，而高锰酸盐指数与 TN 浓度高于往年平均值.

表 2　2000 ~ 2016 年不同水质指标平均值

Table 2　Averages of water quality parameters from 2000 to 2016

水质指标	SD	TN/TP	TN	TP	高锰酸盐指数
平均值	39.75	13.88	2.18	0.17	5.09

尽管近年来巢湖在水环境治理方面做了大量工作[30,31]，巢湖的水质也得到了一定的改善，水体的营养盐负荷依旧较重. 对比巢湖 2016 年不同水质指标与地表水环境质量标准(GB 3838-2002) 发现，2016 年巢湖 TP 浓度超过了国家Ⅳ类水体标准，TN 浓度超过了国家Ⅴ类水体标准. 此外，水体氮磷浓度比对蓝藻水华的发生也有影响，通常认为当 TN:TP < 29:1，甚至低至 5:1 ~ 10:1时，蓝藻在浮游植物种群组成中占优势[32 ~ 34]，从巢湖 2000 ~ 2016 年监测情况来看，巢湖氮磷浓度比在 9:1 ~ 20:1之间. 因此，巢湖水体富营养化程度依旧较高，对研究时间段内的蓝藻水华影响并不显著，本研究重点讨论气象环境因子对巢湖蓝藻水华的影响.

4.1　藻华年际变化环境驱动力分析

从国家气象台(中国气象局) 获得 2000 ~ 2016 年巢湖气象数据，包括温度(T)、降水量(P)、风速(W) 和日照时数(S). 将 ΔT、ΔP、ΔW 和 ΔS 分别定义为给定年份的温度、降水、风速和日照时数的日平均值数据与 2000 ~ 2016 年该气象变量所有数据的平均值之间的差值[35]，来表示不同气象变量的变化幅度.

在水体富营养化条件下，蓝藻水华的覆盖面积和持续时间会受到温度、风速(混合) 和太阳日照时长的影响[36]. 通过统计 2000 ~ 2016 年各气象变量的年变化趋势(ΔT、ΔW，ΔP 和 ΔS) 可以发现(图 9)，巢湖平均气温一直处于波动状态，没有明显的变化趋势，其中 2002 年和 2007 年 ΔT 高出 0.6℃，2016 年 ΔT 高出 0.4℃. ΔP 在 2000 ~ 2015 年间没有明显的变化趋势，其变化幅度在 1 mm 以内，2016 年的降水达到 16 年来最大值，ΔP 高出 2.2 mm. ΔW 在 2000 ~ 2013 年间呈下降趋势，2013 年后风速增加，2016 年 ΔW 与 17 年风速平均值基本持平. ΔS 在 2000 ~ 2013 年间呈上升趋势，2013 年后日照时长减少，2016 年 ΔS 减少了 0.2 h.

为了探究气象因素年际变化对于巢湖藻华动态变化的影响，本文将巢湖气象变量(ΔT、ΔW，ΔP 和 ΔS) 和 2000 ~ 2016 年巢湖藻华面积、藻华暴发的起始时间及持续时间进行 Pearson 相关性分析. 结果表明，年均风速变量(ΔW) 和日照时数(ΔS) 对藻华面积变化的相关性最为显著，相关系数分别为 −0.775($P < 0.01$) 和 0.500($P < 0.05$)；降水变化量则对藻华暴发起始时间和持续时间分别呈显著正

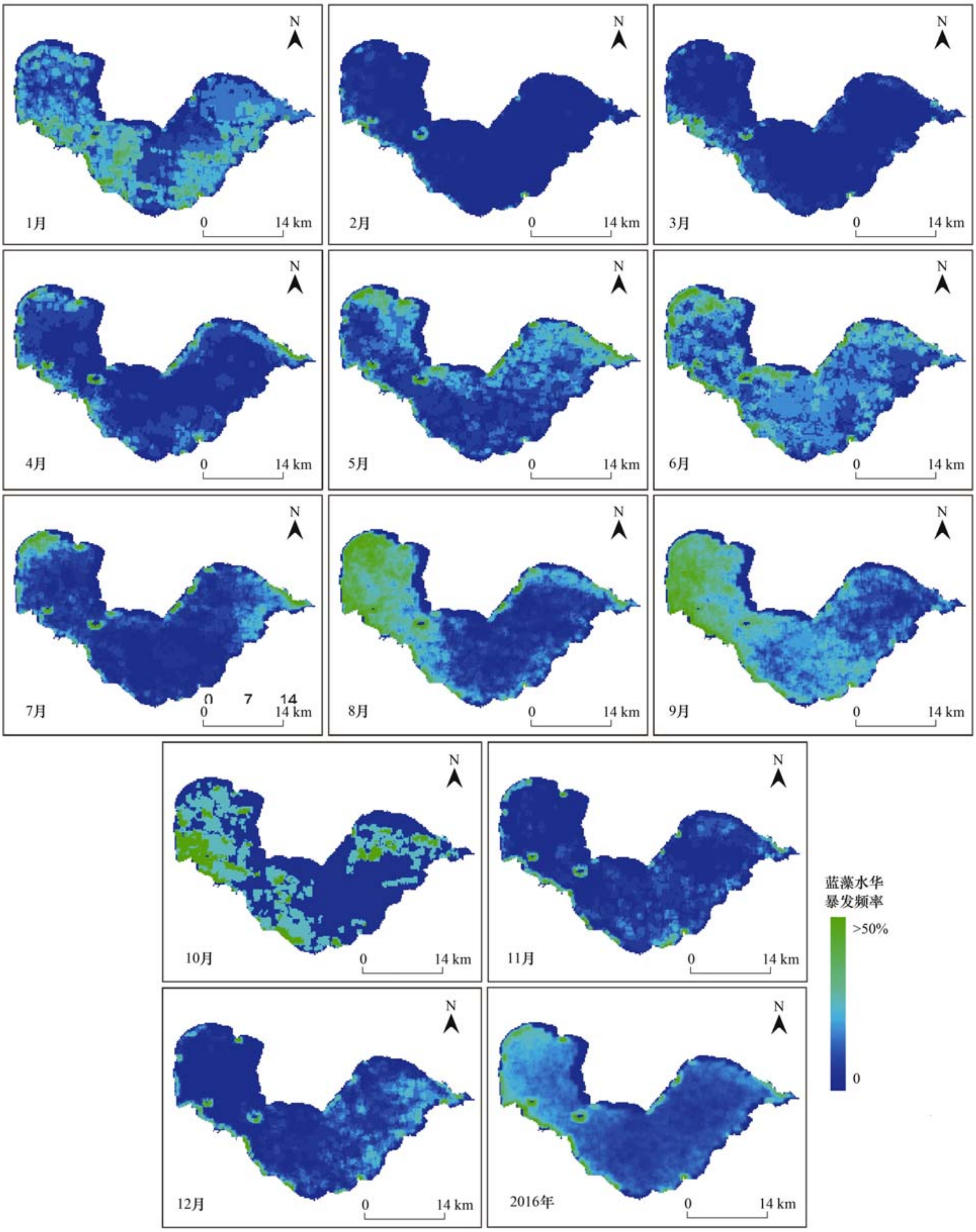

图 7　2016 年巢湖蓝藻水华各月暴发频率空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of monthly algal bloom frequency in Lake Chaohu in 2016

相关($R=0.765$，$P<0.01$)和负相关($R=-0.633$，$P<0.01$)；但气温变量对藻华面积、藻华发生起始时间和持续时间之间并无显著性相关关系.

为深入探究气象因子对藻华年际变化的影响，将 2000～2016 年冬季(上一年 12 月～当年 2 月)和春季(当年 3～5 月)的平均风速、降水、气温及日照时长与巢湖藻华的年际变化参数(表 3)进行皮尔逊相关性分析(表 4). 本研究表明，冬春两季风速、

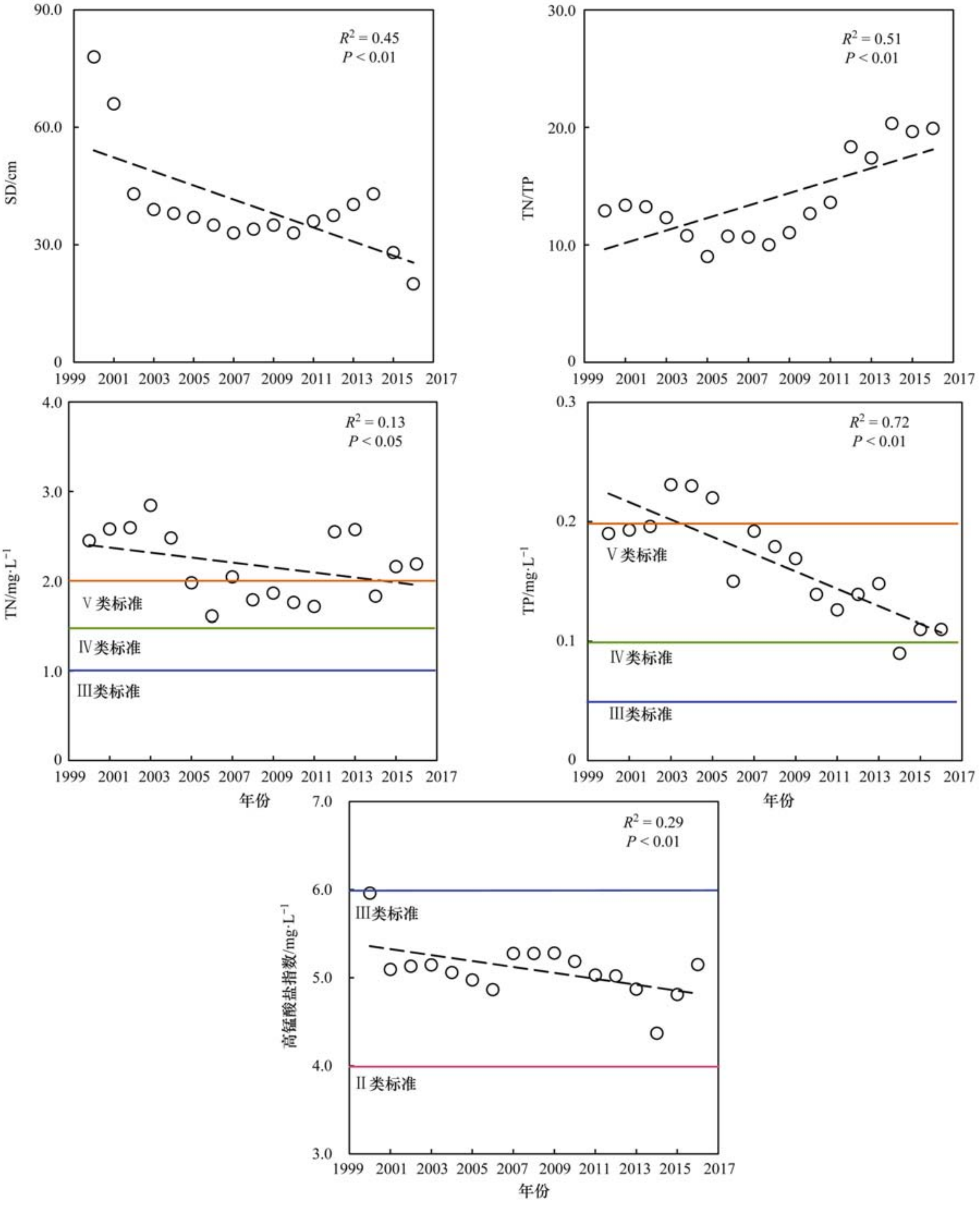

图8 2000~2016年不同水质指标结果

Fig. 8 Water quality parameters in Lake Chaohu from 2000 to 2016

降水变量对藻华面积大小成显著性负相关($P<0.05$)，即冬春两季的风速越大、降水越多，则当年藻华发生面积相对偏小；冬季气温变量和春季的日照时数变量，分别与来年藻华面积呈显著负相关和正相关($P<0.01$)；春季的日照时数变化则与藻华发生起始时间呈显著负相关($P<0.05$)，春季的日照时数则与藻华发生起始时间呈显著负相关($P<0.05$)，即春季日照时数越长，藻华发生起始时间越早；藻华持续时间则与上述变量无显著相关性．对于2016年，春季较大风速($\Delta W=0.1\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$)，较多降水($\Delta P=0.8$ mm)和偏低日照时数($\Delta S=-1.3$ h)是造成当年藻华面积减小，起始时间较迟的主要原因．

4.2 藻华月际变化环境驱动力分析

由于巢湖属典型的亚热带季风气候，气温和降水呈明显的季节性变化，风速和日照时数的季节性

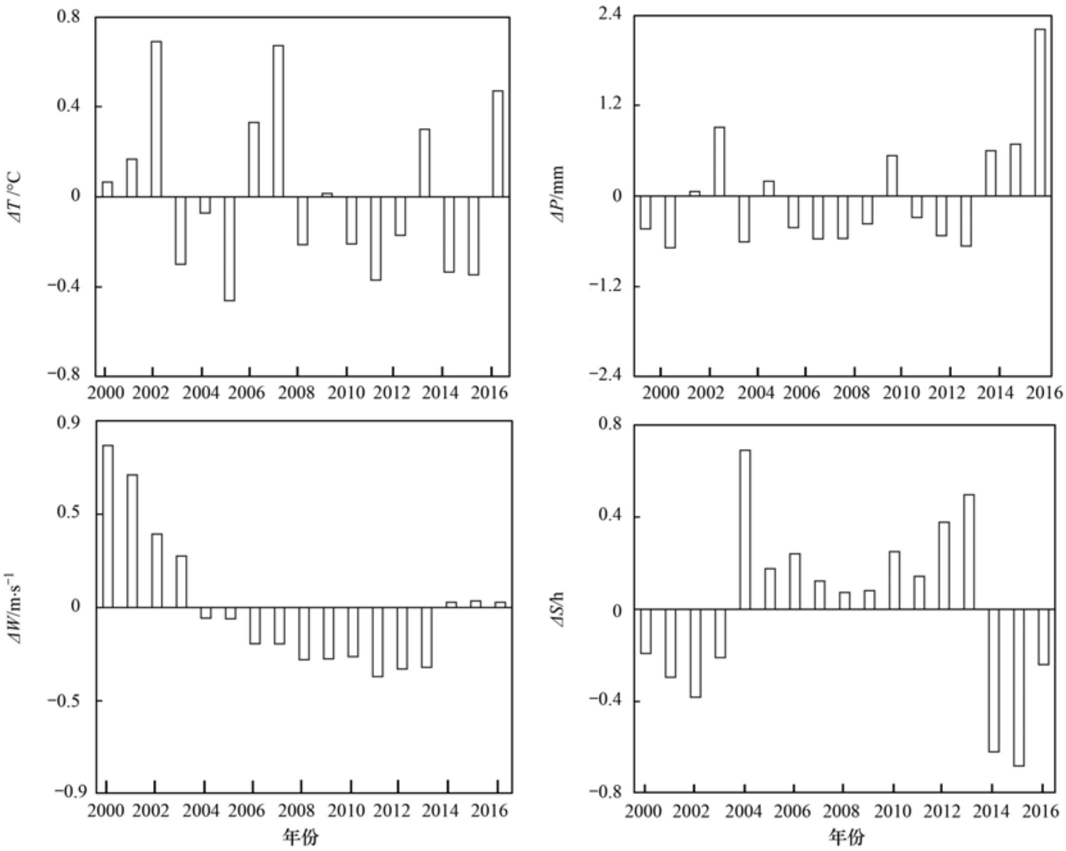

图 9　2000 ~2016 年巢湖气象变量年际变化

Fig. 9　Trend in daily average anomalies in Lake Chaohu from 2000 to 2016

表 3　巢湖藻华年际变化参数与冬、春季节气象数据统计

Table 3　General temperature features of floating algae at time of bloom formation and area of algal blooms in Lake Chaohu

年份	起始时间 /d	持续天数 /d	藻华面积 /km²	平均风速/m·s⁻¹		平均降水/mm		平均气温/℃		日照时长/h	
				冬季	春季	冬季	春季	冬季	春季	冬季	春季
2000	56	248	69. 3	3. 2	3. 4	1. 2	1. 2	4. 4	17. 8	3. 3	6. 4
2001	47	308	103. 6	3. 1	3. 1	2. 1	1. 4	4. 7	17. 2	2. 7	5. 4
2002	93	271	73. 1	2. 8	3. 2	1. 3	4. 4	6. 3	16. 7	3. 8	3. 3
2003	83	276	107. 6	2. 6	3. 1	2. 6	4. 2	4. 6	16. 0	3. 3	4. 3
2004	32	318	126. 6	2. 1	2. 8	1. 4	2. 5	5. 3	16. 2	4. 7	5. 8
2005	67	274	168. 3	2. 2	2. 6	1. 7	2. 4	3. 3	16. 5	3. 0	6. 5
2006	35	284	139. 3	2. 4	2. 5	1. 9	3. 0	3. 8	16. 9	3. 6	6. 2
2007	36	313	158. 9	1. 9	2. 6	1. 3	2. 9	5. 7	17. 6	4. 2	6. 0
2008	34	315	166. 9	2. 1	2. 4	1. 6	1. 9	3. 4	17. 6	3. 6	6. 3
2009	43	280	130. 0	2. 2	2. 3	1. 6	3. 0	5. 3	16. 6	3. 9	5. 9
2010	53	308	113. 2	2. 1	2. 5	2. 0	4. 2	4. 8	14. 9	3. 6	5. 3
2011	70	287	181. 1	2. 1	2. 4	0. 6	1. 2	4. 1	16. 8	4. 7	7. 0
2012	57	301	212. 8	1. 8	2. 2	0. 9	3. 0	3. 5	17. 0	3. 7	5. 7
2013	51	307	148. 6	2. 0	2. 5	1. 6	2. 4	3. 9	17. 1	3. 1	6. 0
2014	51	267	125. 7	2. 3	2. 7	1. 9	3. 6	4. 6	17. 0	3. 5	5. 1
2015	43	322	123. 4	2. 6	2. 7	1. 5	3. 6	5. 2	16. 3	4. 5	5. 2
2016	140	204	118. 9	2. 3	2. 8	1. 4	3. 7	5. 5	16. 5	3. 9	4. 3

变化相对较弱. 本研究将 2016 年巢湖各月平均气温、日照时长与平均降水与巢湖各月蓝藻水华最大面积作对比(图 10). 结果表明, 当温度逐渐上升时, 蓝藻水华面积相应增加, 温度是藻华面积月际变化的主要驱动力. 在平均气温高于 20℃ 的夏季, 藻华覆盖面积月际间的差异则主要受降水的影响. 2016 年平均降水比往年平均值高出 2. 2 mm, 尤其 7 月降水达到全年最高值, 因此当月藻华面积有所

表 4 2000 ~ 2016 年巢湖气象变量与巢湖藻华面积、起始时间及持续天数的皮尔逊相关系数[1)]

Table 4 Pearson's correlation coefficient of initial bloom date, duration and area of floating algal blooms, and climate variables

特征指标	平均风速/m·s⁻¹		平均降水/mm		平均气温/℃		日照时长/h	
	冬季	春季	冬季	春季	冬季	春季	冬季	春季
藻华面积	−0.713**	−0.793**	−0.538*	−0.526*	−0.699**	0.411	0.136	0.747**
起始时间	0.205	0.331	−0.039	0.374	0.278	−0.227	−0.069	−0.595*
持续天数	−0.118	−0.171	−0.060	−0.327	−0.188	0.091	0.130	0.425

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

减少，当月大规模降水抑制了藻华的暴发规模与覆盖面积. 每年6 ~7 月是长江中下游的梅雨季节，大规模降水导致湖泊水位升高，流量的增大有利于水中有机物、氮、磷等营养物质的稀释，从而减小了藻类的增长速度，抑制藻华的发生[37]. 因此，在温度基本稳定时，降水量是影响藻华面积月际变化的主要驱动力.

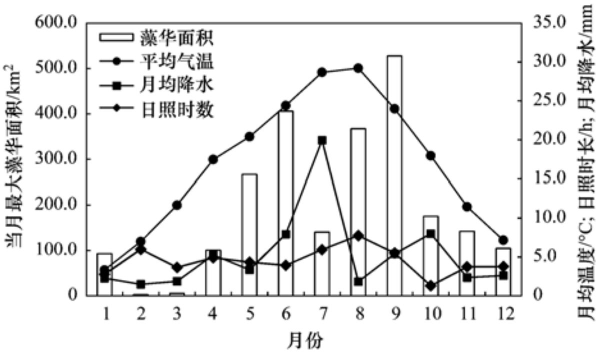

图 10 2016 年巢湖月均气温、日照时长及降水量与最大藻华面积变化

Fig. 10 Variation of monthly algal bloom area and climate variables

统计巢湖各月主要风向(表 5)与风向频度(图 11)表明，2016 年巢湖以东风和西北偏西风为主，8 月份之前盛行南风，藻华大多集中于各湖区的北部；秋季以后盛行东风，藻华在风生流作用下，主要集聚在西北部的水体表面，导致秋季巢湖西北部的藻华覆盖面积居高不下. 因此，风向对藻华集聚的空间分布有一定影响.

表 5 2016 年巢湖各月主要风向与平均风向

Table 5 Monthly wind direction at Lake Chaohu in 2016

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
主要风向	E	E	ESE	ESE	WNW	E	E	E	E	E	E	WNW
平均风向	SSE	SSW	SSE	SSE	S	S	S	SSE	SE	SE	S	SSW

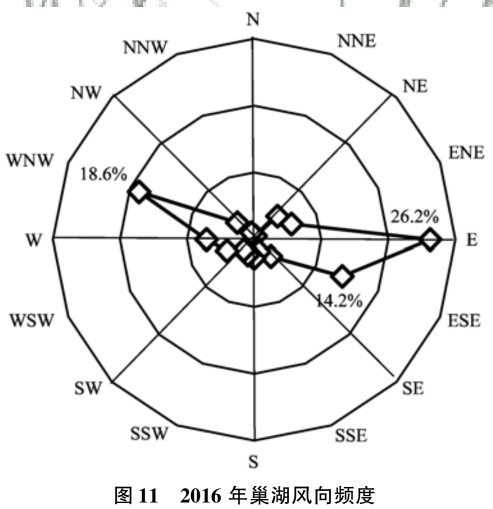

图 11 2016 年巢湖风向频度

Fig. 11 Annual frequency of wind direction at Lake Chaohu in 2016

此外，不同水华蓝藻间的季节变化也是造成巢湖藻华空间分布月际变化不可忽略的因素. 巢湖的相关研究表明，巢湖春季以鱼腥藻占优势，夏季以微囊藻占优势，秋冬季再转变为鱼腥藻，期间在春末夏初和秋末伴随着短暂出现的束丝藻优势种[38]. 在空间上，微囊藻主要分布在巢湖的西湖区，鱼腥藻与束丝藻分布在东湖区，束丝藻也偶尔出现在中部湖区. 每年冬季以束丝藻为优势水华蓝藻藻种，因此 1 月巢湖东部湖区可能出现明显的藻华覆盖,；春季(3 ~4 月) 日均温小于 25℃，鱼腥藻占据优势形成水华，此时藻华主要出现在东部湖区和中部湖区；夏、秋季(5 ~11 月) 蓝藻大量生长并上浮集聚，微囊藻为优势藻种，巢湖西部湖区出现了大面积水华. 10 月以后，随着温度的降低，水华蓝藻的优势藻种也逐渐发生了变化，西湖区的藻华覆盖逐渐减少，藻华更多集中在东湖区.

4.3 藻华日际变化环境驱动力分析

根据巢湖藻华连续时间内的遥感图像监测结果，可动态监测藻华面积在连续几天内的变化，从而研究藻华面积日变化的主要环境驱动力(不包括降水). 通过选取 2016 年 5 月中旬至 6 月期间与 9 月中下旬连续天数下的蓝藻水华遥感监测图像，比

较藻华覆盖面积与气象因子的关系(图 12). 结果表明, 风速偏低、气温偏高且有日照时长较多时有利于藻华的发生. 当温度稳定在 20℃ ~25℃时, 蓝藻水华面积与日平均风速有较好的负相关性, 相关系数为 −0.503($P<0.05$), 当风速高于 3 $m\cdot s^{-1}$ 时, 风浪作用使得水体发生扰动, 藻类在湖中的水平及垂直分布趋于均一, 不再出现藻类聚积现象, 从而抑制了水华的形成[39,40]. 同时, 比较 2016 年 6 月 25 日前后的平均风速与藻华面积的关系发现, 较高的风速不仅对当日藻华覆盖面积有影响, 也对后续几天藻华的发生有一定的抑制作用.

当温度过高时, 超出了蓝藻的最佳生长温度, 也不利于藻华的形成. 以 2016 年 9 月 12 日前后为例, 尽管平均风速低于 3 $m\cdot s^{-1}$, 温度却超过 30℃且日照时长超过 10 h, 藻华面积也有所抑制(图 12). 此外, 由于风速为当日平均风速, 藻华面积为卫星过境时刻的结果, 两者之间存在一定的时间尺度差异, 亦会带来一定的分析误差.

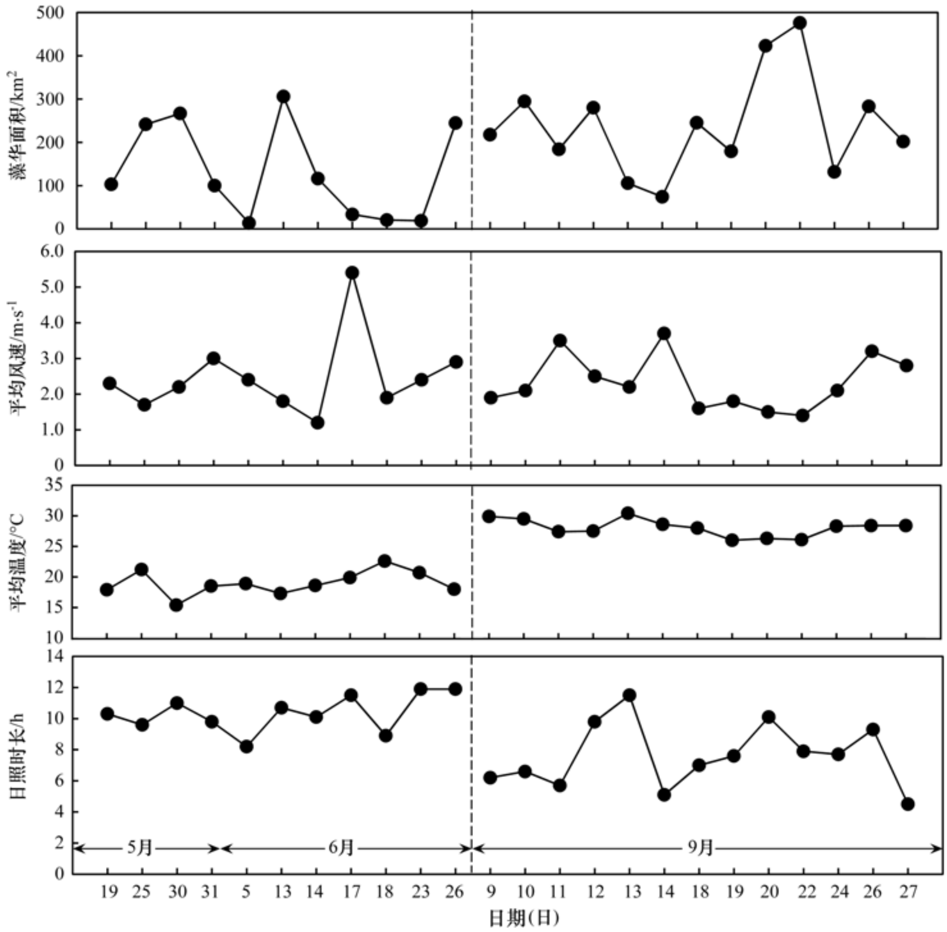

图 12 2016 年连续数日气象数据与藻华覆盖面积关系

Fig. 12 Examples of daily algal bloom area, wind speed, temperature, and sunshine hours in 2016

5 结论

(1)2016 年 1 月与 5 月巢湖藻华主要发生在东部与中部湖区, 9 月集中在巢湖西部, 与往年藻华的主要暴发季节和覆盖范围基本一致. 然而藻华暴发的起始时间相比往年更晚, 持续时间更短, 藻华覆盖面积也有所较少. 但是西巢湖藻华暴发频率依旧居高不下, 东巢湖藻华暴发情况也愈加严重.

(2)在水体富营养化的前提下, 气象条件在这个过程中起着决定性的作用. 2016 年巢湖藻华面积偏小、初始暴发时间较迟主要受春季风速、降水和日照时数变化的影响. 同时, 研究表明蓝藻水华面积月际变化主要受降水的影响. 此外, 日平均风速的变化能使得藻华面积在几日之内剧烈变化, 两者呈显著负相关关系.

(3)富营养化湖泊蓝藻水华的形成是物理因素、化学因素和生物量等共同作用的结果. 不利的气象条件(风速较小、温度较高且降水较少)对蓝藻水华发生有不容忽视的影响, 本研究将对进一步提高富营养化湖泊蓝藻水华的预测、预警能力提供重

要的技术支撑. 但是, 较高的湖泊富营养化状态是蓝藻水华发生的根本原因. 因此, 积极开展湖泊及其流域内的污染控制及生态修复工作, 提高湖泊水体自净能力, 降低水体富营养化水平, 才能从根源控制藻类的大量生长与繁殖, 以及大规模蓝藻水华的暴发.

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊-流域科学数据共享平台”提供影像数据支持; 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊生物与生态研究室张民博士提供部分水质参数数据支持.

参考文献:

[1] 李印霞, 饶本强, 汪志聪, 等. 巢湖藻华易堆积区蓝藻时空分布的研究[J]. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(2): 25-31.
Li Y X, Rao B Q, Wang Z C, *et al*. Spatial-temporal distribution of phytoplankton in bloom-accumulation area in Lake Chaohu[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2012, **21**(2): 25-31.

[2] 刁晓君, 李一葳, 王曙光. 水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 107-113.
Diao X J, Li Y W, Wang S G. Effects of outbreak and extinction of algal blooms on the microbial community structure in sediments of Chaohu lake[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 107-113.

[3] 苟婷, 马千里, 王振兴, 等. 龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4141-4150.
Gou T, Ma Q L, Wang Z X, *et al*. Eutrophication and characteristics of cyanobacteria bloom in the summer in Guishi reservoir[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4141-4150.

[4] 梁其椿, 张玉超, 薛坤, 等. 巢湖藻类高斯垂向分布结构参数的遥感估算[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 546-557.
Liang Q C, Zhang Y C, Xue K, *et al*. Remote sensing-based estimation for Gaussian distribution parameters of vertical structure of algal biomass in Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(3): 546-557.

[5] 马荣华, 张玉超, 段洪涛. 非传统湖泊水色遥感的现状与发展[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 237-245.
Ma R H, Zhang Y C, Duan H T. The status and development of the non-traditional lake water color remote sensing[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 237-245.

[6] 刘红, 张清海, 林绍霞, 等. 遥感技术在水环境和大气环境监测中的应用研究进展[J]. 贵州农业科学, 2013, **41**(1): 187-191.
Liu H, Zhang Q H, Lin S X, *et al*. Advances in remote sensing technology applied in water and atmospheric environment monitoring[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, **41**(1): 187-191.

[7] 李国砚, 张仲元, 郑艳芬, 等. MODIS 影像的大气校正及在太湖蓝藻监测中的应用[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 160-166.
Li G Y, Zhang Z Y, Zheng Y F, *et al*. Atmospheric correction of MODIS and its application in cyanobacteria bloom monitoring in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2008, **20**(2): 160-166.

[8] Hu C M. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, **113**(10): 2118-2129.

[9] Zhang Y C, Ma R H, Duan H T, *et al*. A novel algorithm to estimate algal bloom coverage to subpixel resolution in Lake Taihu[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, **7**(7): 3060-3068.

[10] 王宁, 黄娟, 崔廷伟, 等. 基于 MODIS 数据的 5 种植被指数对不同生长阶段绿潮的探测能力对比及应用[J]. 激光生物学报, 2014, **23**(6): 590-595.
Wang N, Huang J, Cui Y W, *et al*. Capability comparison of 5 vegetation indices for detecting the green tide in different development phases and the application[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2014, **23**(6): 590-595.

[11] Duan H T, Loiselle S A, Zhu L, *et al*. Distribution and incidence of algal blooms in Lake Taihu[J]. Aquatic Sciences, 2015, **77**(1): 9-16.

[12] 马孟枭, 张玉超, 钱新, 等. 藻类垂向分布对内陆湖泊叶绿素 a 反演算法影响的模拟研究[J]. 红外与毫米波学报, 2014, **33**(6): 666-673.
Ma M X, Zhang Y C, Qian X, *et al*. Influence of algae vertical profiles on chlorophyll-a retrieval algorithm in inland lakes: hydrolight simulation[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2014, **33**(6): 666-673.

[13] 周鑫, 王心源. 巢湖流域水污染防治研究[J]. 资源开发与市场, 2007, **23**(9): 841-842, 814.
Zhou X, Wang X Y. Research on water pollution and control of Chaohu Drainage basin[J]. Resource Development & Market, 2007, **23**(9): 841-842, 814.

[14] 奚姗姗, 周春财, 刘桂建, 等. 巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征[J]. 环境科学, 2016, **37**(2): 542-547.
Xi S S, Zhou C C, Liu G J, *et al*. Spatial and temporal distributions of nitrogen and phosphate in the Chaohu Lake[J]. Environmental Science, 2016, **37**(2): 542-547.

[15] 笪春年, 王儒威, 夏潇潇, 等. 巢湖表层沉积物中多溴联苯醚的分布和污染源解析[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(1): 150-156.
Da C N, Wang R W, Xia X X, *et al*. Distribution and sources of polybrominated diphenyl ethers in surface sediments of Lake Chaohu[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(1): 150-156.

[16] 马书占, 潘继征, 吴晓东, 等. 旁路多级人工湿地对巢湖流域南淝河水的净化效果[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 303-311.
Ma S Z, Pan J Z, Wu X D, *et al*. Purification efficiencies of a multi-stage bypass constructed wetland for treating polluted water from Nanfei River, Chaohu Catchment[J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 303-311.

[17] Chavula G, Brezonik P, Thenkabail P, *et al*. Estimating chlorophyll concentration in Lake Malawi from MODIS satellite imagery[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2009, **34**(13-16): 755-760.

[18] Le C F, Hu C M, English D, *et al*. Climate-driven chlorophyll-a changes in a turbid estuary: observations from satellites and implications for management[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, **130**: 11-24.

[19] Wang M H, Shi W. Estimation of ocean contribution at the MODIS near-infrared wavelengths along the east coast of the U. S.: two case studies[J]. Geophysical Research Letters, 2005, **32**(13): L13606.

[20] Zhang Y C, Ma R H, Zhang M, *et al*. Fourteen-year record (2000-2013) of the spatial and temporal dynamics of floating algae blooms in Lake Chaohu, observed from time series of MODIS images[J]. Remote Sensing, 2015, **7**(8): 10523-10542.

[21] 张玉超, 马荣华, 段洪涛. 一种大型浅水湖泊蓝藻水华 MODIS 卫星高精度监测方法[P]. CN 103743700A, 2014-04-23.

[22] 马孟枭. 基于 MODIS 影像的太湖蓝藻水华面积高精度计算方法及应用[D]. 南京: 南京大学, 2014.
Ma M X. An accurate algorithm to estimate cyanobacteria bloom area in Lake Taihu using MODIS images and its applications [D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.

[23] 唐晓先, 沈明, 段洪涛. 巢湖蓝藻水华时空分布(2000-2015 年)[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(2): 276-284.
Tang X X, Shen M, Duan H T. Temporal and spatial distribution of algal blooms in Lake Chaohu, 2000-2005[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(2): 276-284.

[24] 鲁韦坤, 余凌翔, 欧晓昆, 等. 滇池蓝藻水华发生频率与气象因子的关系[J]. 湖泊科学, 2017, **29**(3): 534-545.
Lu W K, Yu L X, Ou X K, *et al*. Relationship between occurrence frequency of cyanobacteria bloom and meteorological factors in Lake Dianchi[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, **29**(3): 534-545.

[25] 贾晓会, 施定基, 史绵红, 等. 巢湖蓝藻水华形成原因探索及"优势种光合假说"[J]. 生态学报, 2011, **31**(11): 2968-2977.
Jia X H, Shi D J, Shi M H, *et al*. Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(11): 2968-2977.

[26] 王起峰, 李超, 王守峰, 等. 巢湖富营养化的时间变化规律分析[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(31): 19324, 19354.
Wang Q F, Li C, Wang S F, *et al*. Analysis on temporal variation characteristics of entrophication in Chao Lake[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(31): 19324, 19354.

[27] 黄明. 巢湖水质富营养化综合评价方法探讨[J]. 皖西学院学报, 2012, **28**(5): 23-25.
Huang M. Study on comprehensive assessment method for water quality eutrophication in Chaohu Lake[J]. Journal of West Anhui University, 2012, **28**(5): 23-25.

[28] 荣洁, 王腊春. 指数平滑法-马尔科夫模型在巢湖水质预测中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2013, **24**(4): 98-102.
Rong J, Wang L C. Application of the exponential smoothing law-Markov model in prediction of water quality of Chaohu lake [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2013, **24**(4): 98-102.

[29] 朱余, 王凤. 巢湖流域水质状况与环境目标可达性分析[J]. 环境监测管理与技术, 2004, **16**(6): 22-23, 26.
Zhu Y, Wang F. Water quality in Chaohu Lake watershed and the its envirnmental object's [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2004, **16**(6): 22-23, 26.

[30] 张民, 孔繁翔. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984-2013 年)[J]. 湖泊科学, 2015, **27**(5): 791-798.
Zhang M, Kong F X. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984-2013)[J]. Journal of Lake sciences, 2015, **27**(5): 791-798.

[31] 朱庆春. 巢湖水体富营养化成因分析及治理对策[J]. 安徽农学通报, 2017, **23**(9): 97-98.
Zhu Q C. Cause analysis and governance measures of eutrophication in Chaohu lake[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, **23**(9): 97-98.

[32] 杨敏, 张晟, 胡征宇. 三峡水库香溪河库湾蓝藻水华暴发特性及成因探析[J]. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 371-378.
Yang M, Zhang S, Hu Z Y. Characteristics and preliminary regulating factors of cyanobacterial bloom in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Lake Sciences, 2014, **26**(3): 371-378.

[33] Ma J R, Brookes J D, Qin B Q, *et al*. Environmental factors controlling colony formation in blooms of the cyanobacteria *Microcystis* spp. in Lake Taihu, China[J]. Harmful Algae, 2014, **31**: 136-142.

[34] Ndong M, Bird D, Nguyen-Quang T, *et al*. Estimating the risk of cyanobacterial occurrence using an index integrating meteorological factors: application to drinking water production [J]. Water Research, 2014, **56**: 98-108.

[35] Zhang M, Duan H T, Shi X L, *et al*. Contributions of meteorology to the phenology of cyanobacterial blooms: implications for future climate change[J]. Water Research, 2012, **46**(2): 442-452.

[36] 吕凯. 太湖蓝藻水华的遥感监测预警研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
Lv K. Remote sensing monitoring of algae in Taihu Lake and its early warning[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

[37] 金鑫, 秦辉. 湖水流动对湖泊藻类生长的影响[J]. 轻工科技, 2012, (2): 80-81.

[38] 余丽. 巢湖微囊藻毒素和产毒微囊藻时空变化特征及其与环境因子的关系[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.

[39] 刘健, 王文成. 基于多源遥感数据的藻华信息提取研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, **36**(5): 63-66, 69.
Liu J, Wang W C. Information extraction of algal bloom water body based on multi-source remote sensing data[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2013, **36**(5): 63-66, 69.

[40] 蒋大林. 基于 GIS/RS 的滇池藻类水华时空变化及驱动因子分析[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
Jiang D L. Research on temporal and spatial variation of algae blooms and its driving factors in Lake Dianchi based on GIS/RS [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.

HUANJING KEXUE Vol. 39 No. 11
Environmental Science (monthly) Nov. 15, 2018

CONTENTS