

巢湖蓝藻水华时空分布(2000—2015年)*

唐晓先¹, 沈明², 段洪涛²

(1: 巢湖管理局环境保护监测站, 巢湖 238000)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 巢湖是我国五大淡水湖之一, 近年来水体富营养化严重, 蓝藻水华频繁暴发. 通过收集 2000—2015 年晴好天气下 2478 景 MODIS Terra 和 Aqua 影像, 利用浮游藻类指数, 提取巢湖蓝藻水华时空分布数据. 结果显示, 巢湖蓝藻水华覆盖面积、暴发频率以及持续时间都在增加, 每年最初暴发时间提前. 从分布上来看, 西巢湖依然严重, 中巢湖、东巢湖水华暴发面积较以往大大增加; 过去 16 年内巢湖蓝藻水华暴发频率持续增长, 其中 2007 年最为严重, 2008—2010 年暴发频率出现缓和, 此后又出现增长趋势. 这些研究结果有助于掌握蓝藻水华的情况, 为巢湖科学治理提供了数据支持.

关键词: MODIS; 蓝藻水华; 时空分布; 巢湖; 浮游藻类指数

Temporal and spatial distribution of algal blooms in Lake Chaohu, 2000 – 2015

TANG Xiaoxian¹, SHEN Ming² & DUAN Hongtao²

(1: Monitoring Station of Chaohu Lake Management Authority, Chaohu 238000, P.R.China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Algal blooming in eutrophic lakes has become a critically important issue. As the fifth largest freshwater lake in China, Lake Chaohu has drawn increasing attentions due to the declining of water quality and the occurrence of massive algal blooms. This study applied 2478 free cloud MODIS images onboard Terra and Aqua satellites over the period of 2000 – 2015 to extract algal blooms with a floating algal index algorithm. The results showed that blooms coverage, frequency, and duration noticeably increased during these years, and the initial blooming occurs earlier. Particularly, algal blooms became more serious during 2000 – 2015. The conditions for algae blooming was getting better during 2008 – 2010, and the growth trend has emerged since 2011. 16-year series algal blooms data will help to understand the change in water quality of the Lake Chaohu.

Keywords: MODIS; algal blooms; temporal and spatial distribution; Lake Chaohu; floating algae index

巢湖主体位于安徽省合肥市, 面积约 760 km², 是我国第五大淡水湖, 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]. 近 30 年来, 随着巢湖流域经济的快速发展, 大量点源、面源污染进入水体, 巢湖水质污染严重, 水体富营养化情况日益严峻, 蓝藻水华频繁发生^[2]. 蓝藻异常生长, 极易堆积形成水华, 在河口以及近岸淤积, 不仅破坏水体景观和生态系统平衡, 而且由于蓝藻在生长和死亡过程中释放毒素, 消耗溶解氧, 容易引起水体中的生物大量死亡, 湖泊水质恶化, 严重威胁湖泊周围地区的饮用水安全^[3]. 因此, 快速、全面掌握蓝藻分布信息, 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.

卫星遥感技术提供了快速、大范围监测蓝藻水华变化的可能. 蓝藻水华暴发, 水体中叶绿素 a 浓度显著升高, 导致水体光谱特征发生变化^[2,4]. 蓝、红光反射率降低; 近红外波段具有明显的植被特征“陡坡效应”, 反射率升高; 同时荧光峰位置向长波方向移动^[5-7]. 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, 这为利用光学卫星数据进行蓝藻水华监测提供了理论基础. MODIS 数据具有较高的时间分辨率 (Terra 和 Aqua 白天分别过境一次) 和光谱分辨率, 可以快速生产几乎实时的图像; 特别是 Terra 星 2000 年发射以

* 国家高技术研究发展计划“863”项目 (2014AA06A509) 资助. 2016-01-12 收稿; 2016-06-29 收修改稿. 唐晓先 (1978~), 男, 学士, 高级工程师; E-mail: txchep@sina.com.

来已积累近 16 年数据,是研究蓝藻水华时空分布规律最为理想的数据源^[8].

目前利用 MODIS 数据监测蓝藻水华的算法有很多,常用的有单波段法、比值法、归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)法、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, *EVI*)法和浮游藻类指数(Floating Algae Index, *FAI*)法等^[9-11]. 但在实际应用中,由于卫星影像都是栅格影像,像元大小取决于空间分辨率;如 MODIS 卫星影像最高空间分辨率为 250 m,也就是说 MODIS 卫星影像是由一系列 250 m×250 m 的像元组成. 但水华呈现形式千姿百态,既有茫茫一片的,也有呈条带状的,更有不规则分布的;即使茫茫一片的,也存在强度的不同^[10,12]. 这些不同形态的水华,都呈现在 MODIS 像元(250 m×250 m)内. *FAI* 算法通过统计设置固定阈值,利用简单的像元分解,被认为是最为简单、有效和高精度的蓝藻水华提取算法^[13].

本研究针对 2000—2015 年巢湖 MODIS 卫星影像,利用 *FAI* 指数,提取长时间序列水华数据,研究巢湖蓝藻最初暴发时间、持续时间、覆盖度和空间分布频率等,揭示蓝藻水华时空分布规律.

1 数据与方法

1.1 研究区概况

巢湖(31°25′28″~31°43′28″N, 117°16′54″~117°51′46″E;图 1)位于安徽省中部,水域面积约为 760 km²,水深 0.98~7.98 m,最大蓄水量可达 48×10⁸ m³^[1]. 近年来,由于当地经济的迅速发展,人口的迅猛增加,巢湖受污染越来越严重,水体富营养化程度加剧,蓝藻水华暴发频繁^[14].

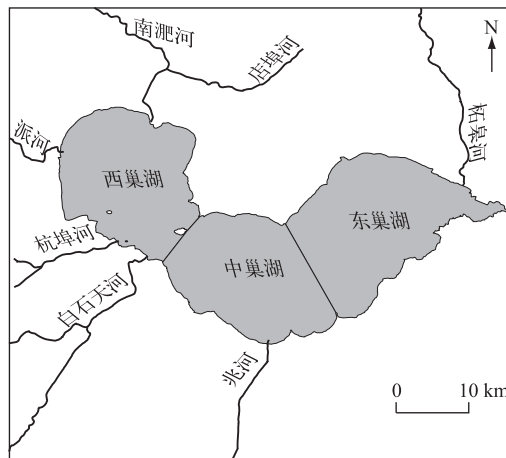


图 1 巢湖及其分区

Fig.1 Location of Lake Chaohu and its partition

1.2 MODIS 卫星数据

从 NASA 网站上获取了 2000—2015 年间包含巢湖天气状况良好的 MODIS 卫星遥感影像 2478 景(表 1),基本涵盖了 2000—2015 年全年各月份,特别是水华暴发最为严重的夏、秋季节. MODIS 数据处理是利用 SeaDAS 软件进行辐射定标获得 L1B 数据然后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(Rayleigh-corrected reflectance, R_{re})数据^[15-17].

1.3 蓝藻水华提取算法

当蓝藻大量繁殖并在水面聚集时,会使水体表现出类似植被的光谱特征. 针对 MODIS R_{re} 数据, Hu 等^[18-19]提出一种快速、简单的蓝藻识别指标算法,即 *FAI* 法,本文直接使用 *FAI* 算法用于计算巢湖蓝藻水华时空分布数据,其计算公式为:

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

其中:

$$R'_{re}(859) = R_{re}(645) + [R_{re}(1240) - R_{re}(645)] \cdot \frac{859 - 645}{1240 - 645}$$

(2)

表 1 2000—2015 年巢湖卫星影像数据
Tab.1 MODIS data list of Lake Chaohu during 2000—2015

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计
2000	0	4	12	14	14	13	17	5	11	8	11	14	123
2001	10	9	17	13	14	4	15	12	17	13	20	9	153
2002	18	14	10	6	9	13	16	17	17	17	19	7	163
2003	17	8	12	6	9	15	14	14	16	16	15	10	152
2004	12	17	14	12	13	15	19	15	13	20	20	12	182
2005	15	6	19	18	18	16	13	5	10	15	9	18	162
2006	9	7	15	16	13	13	9	20	13	14	11	15	155
2007	10	15	11	15	20	5	12	17	11	13	19	9	157
2008	9	19	14	14	18	9	15	17	10	12	16	19	172
2009	16	5	9	16	15	15	10	12	7	15	10	16	146
2010	12	6	12	9	13	14	11	20	8	15	19	22	161
2011	15	13	13	21	19	9	13	9	10	11	13	15	161
2012	12	8	11	18	14	9	17	16	14	16	18	14	167
2013	9	7	16	19	13	10	17	19	15	16	14	16	171
2014	12	1	11	8	12	5	12	7	7	18	7	0	100
2015	14	9	8	13	11	7	11	17	15	17	7	10	153
合计	190	148	204	218	225	172	221	222	194	236	228	206	2478

1.4 蓝藻水华时空分布分析方法

利用 16 年(2000—2015 年)的遥感数据分析巢湖蓝藻水华时空分布规律的统计量包括:蓝藻水华覆盖面积、最初暴发时间、持续时间、月平均覆盖度以及年暴发频率. 水华覆盖面积为 $0.25 \times 0.25 C_{MODIS} \text{ km}^2$, 其中 C_{MODIS} 为 MODIS 蓝藻水华像元数. 针对水华最初暴发时间和持续时间以水华面积最初出现 50 km^2 为基础进行统计. 水华年暴发频率为年内所有 MODIS 数据中水华暴发次数的比例.

2 结果与分析

2.1 蓝藻水华覆盖面积长时间趋势

利用 FAI 算法统计 2000—2015 年所有巢湖 MODIS 影像的蓝藻水华面积,并对巢湖各分区(西巢湖、中巢湖和东巢湖)及整个湖区分别进行面积统计(图 2). 西巢湖蓝藻水华面积一直居高不下,而中巢湖和东巢湖水华面积一直呈增加趋势并在 2011—2012 年达到峰值,2013—2014 年水华面积呈现下降趋势,2015 年又再次增加. 整个巢湖蓝藻水华面积在 2000—2005 年呈上升趋势,2005—2010 年较稳定,最大水华暴发面积都在 300 km^2 左右,2011 年出现次高峰,2012—2014 年水华暴发面积又有所下降,2015 年再次呈现上升趋势,最大水华暴发面积一度达到 500 km^2 ,由于合肥位于巢湖上游,近些年随着经济的快速发展,合肥市人口和工厂数量急剧增加,同时上游流域还存在大量的畜禽养殖,导致大量的污染物通过南淝河、十五里河和派河等流入西巢湖,因此西巢湖的富营养化较中巢湖、东巢湖更为严重.

为了研究巢湖不同程度水华覆盖面积的变化情况,根据蓝藻水华面积进行分类:无水华覆盖(面积小于 10 km^2)、轻度水华覆盖(面积在 $10 \sim 50 \text{ km}^2$ 之间)、中度水华覆盖(面积在 $50 \sim 100 \text{ km}^2$ 之间)和重度水华覆盖(面积大于 100 km^2). 2000—2015 年巢湖不同程度水华覆盖面积比例变化表明(图 3)无水华覆盖总体呈减少趋势,并且在 2007 年达到最小值,轻度水华覆盖和中度水华覆盖近年来基本持平,而重度水华覆盖在 2000—2012 年呈增加趋势,并在 2013 年之后有所下降. 因此,巢湖水体蓝藻水华暴发的总趋势为:2000—2002 年中度以上蓝藻水华暴发面积小,2003 年后水体恶化,2007 年水华面积达到最大,2008—2011 年水华面积逐年减少,2012 年出现了次高峰,2013—2015 年中度以上水华暴发面积又有所下降.

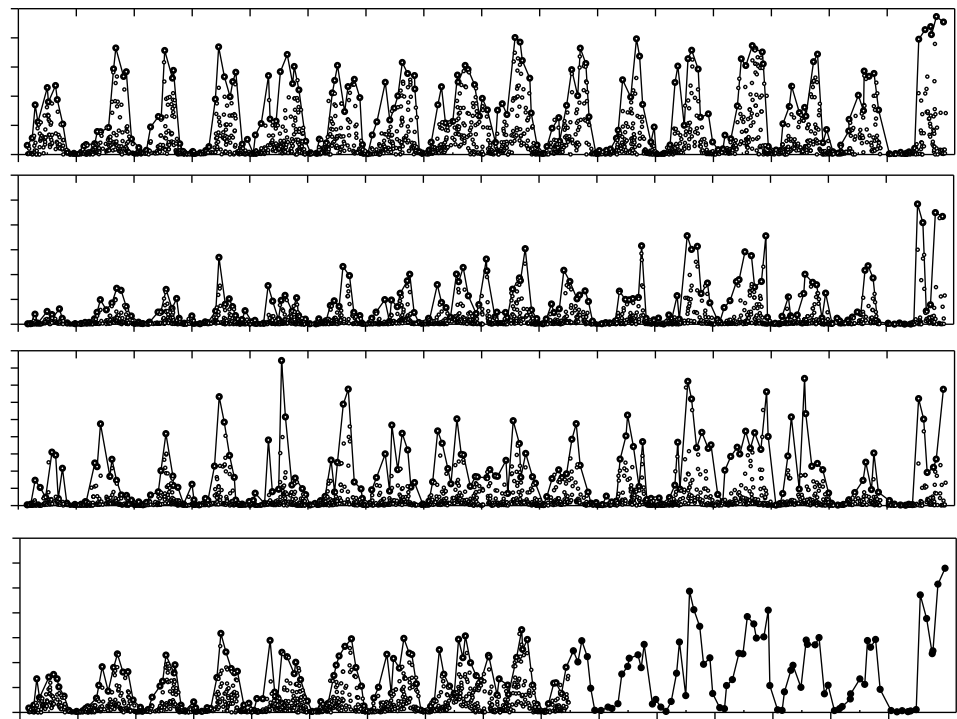


图 2 2000—2015 年巢湖蓝藻水华面积:a)西巢湖;b)中巢湖;c)东巢湖;d)全湖区
Fig.2 Time series of algal blooms distributions in Lake Chaohu during 2000 – 2015

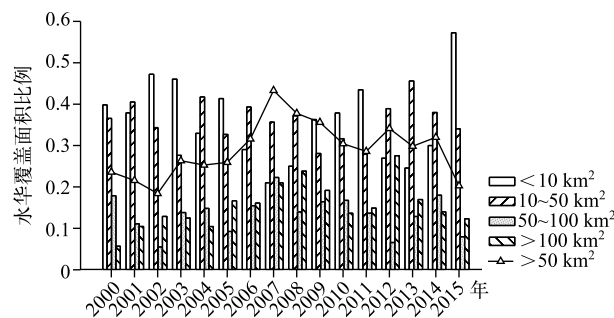


图 3 2000—2015 年巢湖不同程度水华覆盖面积比例变化
Fig.3 Annual different algal blooms percent in Lake Chaohu during 2000 – 2015

2.2 最初暴发时间和持续时间

考虑到巢湖蓝藻水华一般会持续到次年 1 月,水华最初暴发时间是从每年 2 月 1 日开始,统计第一次出现水华覆盖面积 50 km²时候的日期(表 2). 2000—2003 年水华起始暴发时间逐年推迟,2004 年以后逐年提前,并在 2008 年出现最小值,暴发时间最早. 2009 以后最初暴发时间又出现了推迟,2015 年水华起始暴发时间再次提前. 在大多数年份中,每年水华最初暴发都是从西巢湖沿岸开始,向中巢湖和东巢湖蔓延.

水华暴发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 km²以上的暴发日期相减得到,以每年 2 月 1 日为起始统计时间,次年 1 月 31 日为截止时间(表 2).最初暴发时间在 2007、2008 年出现

最早的同时,持续时间也最长. 从巢湖各区域来看,西巢湖水华暴发时间最早,持续时间最长,明显高于中巢湖和东巢湖.

另外,巢湖蓝藻除了微囊藻外,还有鱼腥藻、小环藻等分布^[20-21]. 微囊藻最适生长温度为 25℃或以上,水温是影响其水华暴发的重要条件^[22]. 3—4 月份,巢湖地区日均温小于 25℃,不利于微囊藻生长,鱼腥藻占据优势形成水华;5—9 月,日均温超过 25℃,微囊藻占据优势形成水华;10 月以后,日平均温度再次低于 25℃,蓝藻水华又以鱼腥藻为主导. 这种藻种间的变化,对于卫星遥感监测蓝藻水华有一定影响,但目前还没有有效手段对其进行区分.

表 2 巢湖蓝藻水华暴发起始时间与持续时间(d)*
Tab.2 Annual initiate blooming date and durations in Lake Chaohu

年份	西巢湖		中巢湖		东巢湖		全湖区	
	起始时间	持续时间	起始时间	持续时间	起始时间	持续时间	起始时间	持续时间
2000	56	228	104	156	106	172	56	248
2001	47	308	131	216	95	160	47	308
2002	96	190	151	213	151	213	93	271
2003	105	242	140	195	140	125	83	276
2004	32	318	115	198	115	214	32	318
2005	69	272	142	186	123	210	67	274
2006	38	281	65	240	35	270	35	284
2007	36	313	83	266	54	295	36	313
2008	34	313	34	285	34	303	34	315
2009	43	266	68	241	76	227	43	280
2010	116	238	127	163	130	159	53	308
2011	86	271	86	271	120	228	70	287
2012	70	273	70	273	70	273	57	301
2013	66	289	69	287	101	222	51	307
2014	68	242	148	151	158	149	51	267
2015	48	317	80	285	43	308	43	322

* 水华暴发起始时间为自每年 2 月 1 日开始,水华覆盖面积第一次达到 50 km²的年积日;持续时间为每年最初(2 月 1 日开始)和最后一次观测到的水华面积在 50 km²以上的暴发日期相减所得天数.

2.3 蓝藻水华月平均覆盖度

逐月平均覆盖度是根据 2000—2015 年内每月覆盖度统计出来的,范围在 0~100%之间,值越接近 100%表示该区域蓝藻水华覆盖度越高.巢湖在所有月份都有不同程度的蓝藻水华覆盖,4 月份开始水华覆盖度明显增加;蓝藻水华主要发生在 5—11 月,其中水华覆盖度在 9 月达到最高(图 4). 这是因为蓝藻生长与水华形成会经历越冬休眠、春季复苏、生长和集聚上浮 4 个阶段^[23]. 冬季(12—次年 2 月)随着温度降低蓝藻从上层水体下沉到水底越冬,表面蓝藻覆盖明显降低;春季(3—4 月)随着温度上升、光照增加,蓝藻从水底开始上浮复苏,蓝藻覆盖度明显增加;夏、秋季(5—11 月)蓝藻大量生长并上浮集聚,形成大面积水华. 从巢湖各区域来看,西巢湖月平均覆盖度最高,越靠近西北角越高,而东巢湖水域蓝藻水华覆盖度最低. 这与巢湖营养水平分布密切相关,西巢湖靠近安徽省省会合肥市,大量工业废水和生活污水经南淝河、十五里河、派河等河道流入西巢湖,导致西巢湖氮、磷浓度明显高于中巢湖和东巢湖,为蓝藻水华的发生提供了有利的物质基础^[24-26].

2.4 蓝藻水华年暴发频率

对巢湖各地区每年水华暴发频率进行统计(图 5 和图 6),西巢湖蓝藻水华暴发频率明显高于中巢湖和东巢湖. 其中西巢湖靠近南淝河、塘西河、十五里河的沿岸区域水华暴发频率最高. 尽管近十几年来巢湖污染治理的投资不断增加,湖泊环境状况得到改善,氮、磷浓度逐年下降,但湖泊富营养化仍保持在较高水

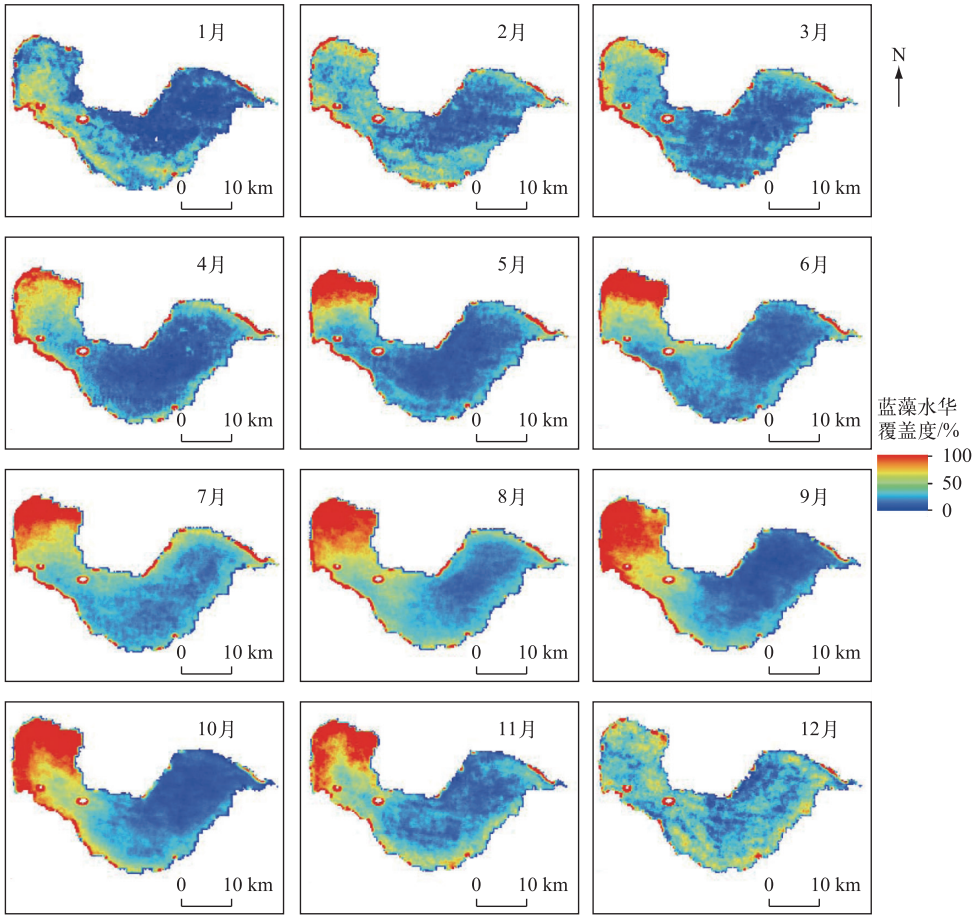


图 4 2000—2015 年巢湖蓝藻水华月平均覆盖度

Fig.4 Monthly algal bloom coverage in Lake Chaohu during 2000 – 2015

平^[21,24-26],并且远远满足蓝藻的生长条件^[27].而西巢湖作为水华主要发生湖区,年暴发频率变化较为复杂,呈现分段式的变化趋势.2000—2007 年年暴发频率持续增加;2007—2010 年年暴发频率有所下降,这可能随着国家和当地政府的高度重视,通过实施有效的治理措施^[28],使巢湖全湖区特别是西巢湖的蓝藻水华暴发频率明显减少;2010—2015 年西巢湖年暴发频率呈增加趋势,但有所波动.这意味着在合肥市飞速发展的经济背景下,原有的治理方案可能已经无法满足减缓蓝藻水华暴发的发生.

3 结论

随着巢湖周边人口、工厂增加和经济发展,巢湖水体富营养化也日益严重,蓝藻水华暴发日益频繁,面积也有所增加.尤其是在 2007 年最为严重,随着国家和当地政府的高度重视以及实施有效的治理措施^[28],在 2008—2010 年期间巢湖蓝藻水华的暴发频率出现缓和,但此后蓝藻水华的暴发频率又呈现一定增长趋势.另外,本文针对 MODIS 的 Terra 和 Aqua 星,使用 *FAI* 指数可以对巢湖蓝藻水华暴发面积和分布进行实时监测,为巢湖蓝藻水华监测和预警起到重要作用,同时本研究方法也可以尝试应用于其他湖泊的监测.

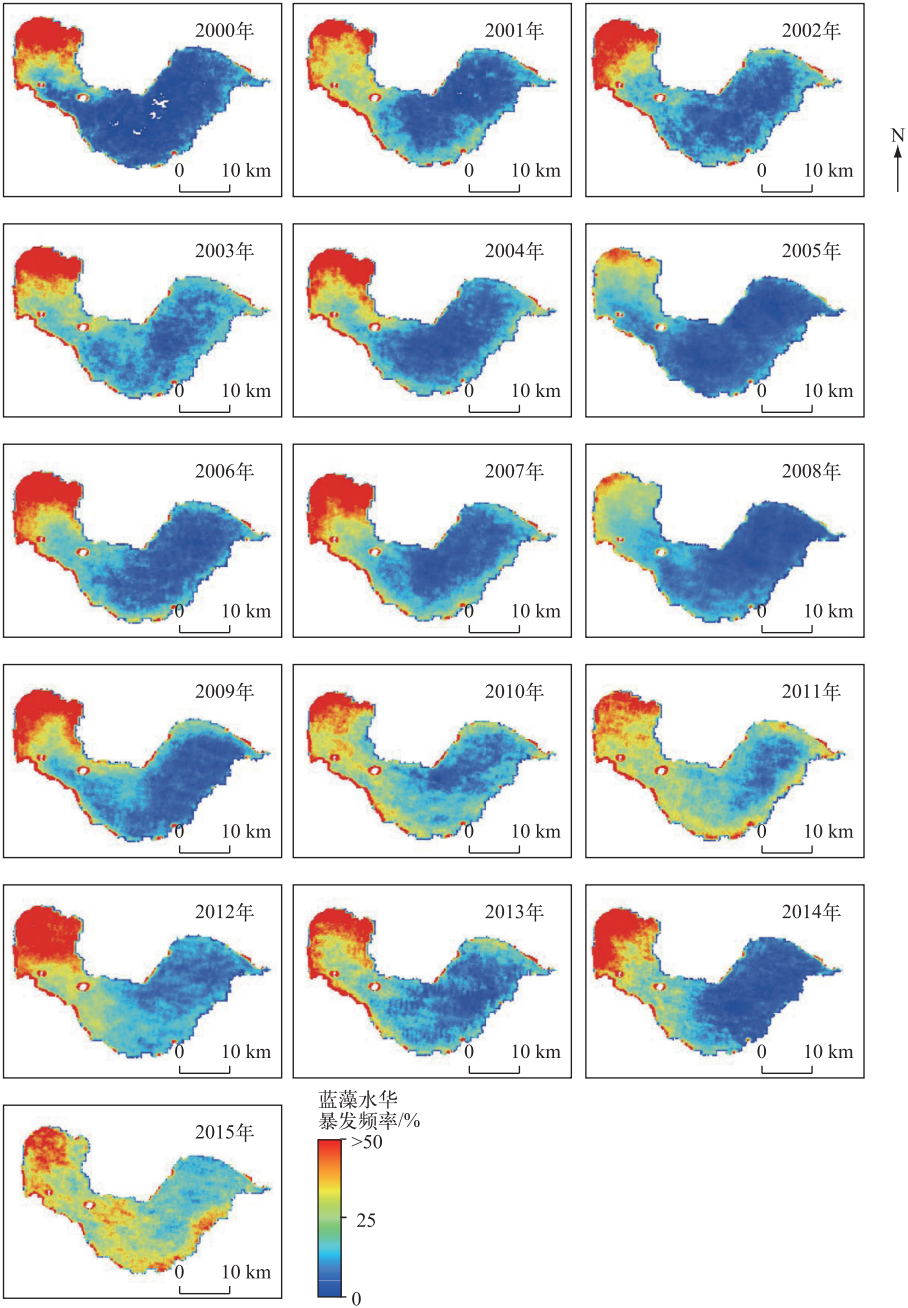


图 5 2000—2015 年巢湖蓝藻水华暴发频率分布
Fig.5 Annual algal bloom frequency in Lake Chaohu during 2000 – 2015

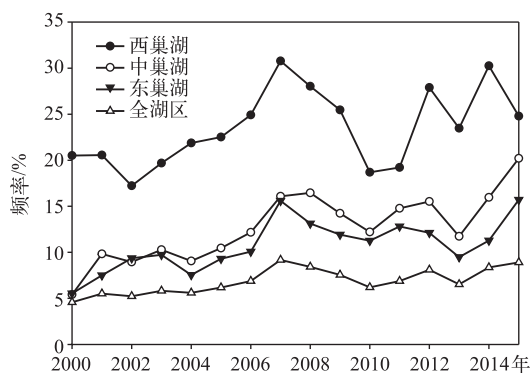


图 6 2000—2015 年巢湖蓝藻水华暴发频率统计

Fig.6 Annual algal bloom frequency in Lake Chaohu during 2000 – 2015

4 参考文献

- [1] Wang Sumin, Dou Hongshen eds. Memoirs of lakes in China. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [2] Yin Fucui, Zhang Zhiyuan. Survey of Chaohu Lake eutrophication research. *J Lake Sci*, 2004, **15**(4): 377-384. DOI: 10.18307/2003.0413. [殷福才, 张之源. 巢湖富营养化研究进展. 湖泊科学, 2004, **15**(4): 377-384.]
- [3] Ma Jianrong, Deng Jianming, Qin Boqiang *et al.* Progress and prospects on cyanobacteria bloom-forming mechanism in lakes. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(10): 3020-3030. DOI: 10.5846/stxb201202140200. [马健荣, 邓建明, 秦伯强等. 湖泊蓝藻水华发生机理研究进展. 生态学报, 2013, **33**(10): 3020-3030.]
- [4] Yang Dingtian, Pan Delu. Progress in the research on cyanobacteria remote sensing. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2006, **18**(4): 1-5. [杨顶田, 潘德炉. 蓝藻的卫星遥感研究进展. 国土资源遥感, 2006, **18**(4): 1-5.]
- [5] Duan Hongtao, Zhang Shouxuan, Zhang Yuanzhi. Cyanobacteria bloom monitoring with remote sensing in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2008, **20**(2): 145-152. DOI: 10.18307/2008.0202. [段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 145-152.]
- [6] Xie Huaming, Pan Fakang, Shu Ying *et al.* Temporal and spatial distribution study of algal blooms in Chaohu Lake based on remote sensing. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(21): 12825-12827. [解华明, 潘法康, 舒莹等. 巢湖蓝藻水华时空分布特征遥感监测研究. 安徽农业科学, 2011, **39**(21): 12825-12827.]
- [7] Jia Xiaohui, Shi Dingji, Shi Mianhong *et al.* Formation of cyanobacterial blooms in Lake Chaohu and the photosynthesis of dominant species hypothesis. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(11): 2968-2977. [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”. 生态学报, 2011, **31**(11): 2968-2977.]
- [8] Mei Changqing, Wang Xinyuan, Peng Peng. Application of MODIS data for monitoring blue-green algal bloom in Chaohu Lake. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, **23**(3): 328-332. [梅长青, 王心源, 彭鹏. 应用 MODIS 数据监测巢湖蓝藻水华的研究. 遥感技术与应用, 2008, **23**(3): 328-332.]
- [9] Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**(10): 2118-2129. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012.
- [10] Zhang Y, Ma R, Duan H *et al.* A novel algorithm to estimate algal bloom coverage to subpixel resolution in Lake Taihu. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, **7**(7): 3060-3068. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2327076.
- [11] Wang Ning, Huang Juan, Cui Tingwei *et al.* Capability comparison of 5 vegetation indices for detecting the green tide in different development phases and the application. *Acta Laser Biology Sinica*, 2014, **23**(6): 590-595. [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. 激光生物学报, 2014, **23**(6): 590-595.]
- [12] Zhang Y, Ma R, 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. *Remote Sensing*, 2015, **7**(8): 10523-10542. DOI: 10.3390/rs70810523.
- [13] Duan H, Loiselle SA, Zhu L *et al.* Distribution and incidence of algal blooms in Lake Taihu. *Aquatic Sciences*, 2015, **77**(1): 9-16. DOI: 10.1007/s00027-014-0367-2.
- [14] Li Lei, Dai Wanhong. Present status of water eutrophication in Chao Lake and countermeasures for prevention and control. *Soil and Water Conservation in China*, 2009, (7): 55-57. [李雷, 戴万宏. 巢湖水体富营养化污染现状及防治对策. 中国水土保持, 2009, (7): 55-57.]
- [15] Chavula G, Brezonik P, Thenkabail P *et al.* Estimating chlorophyll concentration in Lake Malawi from MODIS satellite imagery. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2009, **34**(13): 755-760. DOI: 10.1016/j.pce.2009.07.015.
- [16] Rodríguez-Guzmán V, Gilbes-Santaella F. Using MODIS 250 m imagery to estimate total suspended sediment in a tropical open bay. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 2009, **3**(1): 36-44.
- [17] Le C, Hu C, English D *et al.* Climate-driven chlorophyll-a changes in a turbid estuary: Observations from satellites and implications for management. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **130**(4): 11-24. DOI: 10.1016/j.rse.2012.11.011.
- [18] Hu C, Lee Z, Ma R *et al.* Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978 – 2012), 2010, **115**(C04002). DOI: 10.1029/2009JC005511.
- [19] Hu C, Chen Z, Clayton TD *et al.* Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **93**(3): 423-441. DOI: 10.1016/j.rse.2004.08.007.
- [20] Meng Renxian, Liu Zhenqiu. An evaluation of water pollution and eutrophication of the Chaohu Lake by means of phytoplankton. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1988, **12**(1): 13-26. [蒙仁宪, 刘贞秋. 以浮游植物评价巢湖水质污染及富营养化. 水生生物学报, 1988, **12**(1): 13-26.]
- [21] Yu Tao. Phytoplankton community structure in Chaohu Lake[Dissertation]. Hefei: Anhui University, 2010. [余涛. 巢湖浮游植物群落结构研究[学位论文]. 合肥: 安徽大学, 2010.]
- [22] Li Yinxia. Succession of *Microcystis* blooms in Lake Chaohu and competition between different bloom-forming cyanobacterial strains[Dissertation]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. [李印霞. 巢湖微囊藻水华演替及不同水华蓝藻竞争的研究[学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2013.]
- [23] Kong Fanxiang, Ma Ronghua, Gao Junfeng *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.]
- [24] Huang Ming. Study on comprehensive assessment method for water quality eutrophication in Chaohu Lake. *Journal of Wanxi University*, 2012, **28**(5): 23-25. [黄明. 巢湖水质富营养化综合评价方法探讨. 皖西学院学报, 2012, **28**(5): 23-25.]
- [25] Wang Qifeng, Li Chao, Wang Shoufeng *et al.* *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, **39**(31): 19324-19354. [王起峰, 李超, 王守峰等. 巢湖富营养化的时间变化规律分析. 安徽农业科学, 2011, **39**(31): 19324-19354.]
- [26] Zhu Yu, Wang Feng. Water quality in Chaohu Lake watershed and the its environmental object's. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2005, **16**(6): 22-23. [朱余, 王凤. 巢湖流域水质状况与环境目标可达性分析. 环境监测管理和技术, 2005, **16**(6): 22-23.]
- [27] 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.
- [28] Zhang Min, Kong Fanxiang. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu (1984–2013). *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 791-798. DOI: 10.18307/2015.0505. [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). 湖泊科学, 2015, **27**(5): 791-798.]