

利用 Himawari-8 高频次监测太湖蓝藻水华动态*

王 萌, 郑 伟, 刘 诚

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘 要: 新一代静止气象卫星 Himawari-8 以其 10 min/次的高观测频次, 为连续动态监测蓝藻水华提供了有力的数据支持. 基于太湖实地光谱测量资料, 提出 Himawari-8 卫星资料太湖蓝藻水华动态监测方法. 以 2015 年 10 月 2 日蓝藻水华发生过程为例, 利用连续、多时次 Himawari-8 资料, 动态监测了太湖蓝藻水华的发展变化, 分析蓝藻水华的出现、发展和消失, 计算蓝藻水华强度的动态变化, 认识蓝藻水华程度及变化特征, 估算蓝藻水华的动态变化速度. 上述分析为研究蓝藻水华的生长消亡过程提供了支持. 进一步探讨蓝藻水华动态变化与气象要素的关系, 发现在相同的温湿条件下, 风场对蓝藻水华的形成、运动和消失有直接的驱动作用.

关键词: Himawari-8; 蓝藻水华; 动态变化; 太湖; 风场

Application of Himawari-8 data with high-frequency observation for Cyanobacteria bloom dynamically monitoring in Lake Taihu

WANG Meng, ZHENG Wei & LIU Cheng

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, P.R.China)

Abstract: Himawari-8 as a new generation geostationary meteorological satellite can provide the observation data for dynamically monitoring of Cyanobacteria bloom, with high time resolution at an interval per 10 minutes. According to the spectrum measuring data of Lake Taihu area, a method using the Himawari-8 data was proposed for dynamically monitoring of the Cyanobacteria bloom. In this paper, the outbreak processes of Cyanobacteria bloom on October 2nd, 2015 were monitored continuously including the Cyanobacteria bloom's appearing, increasing and disappearing. The dynamic changes of the intensity and speed of Cyanobacteria bloom were calculated, and the extent and variation were analyzed. All the analysis provided useful information for studying the growth and death of Cyanobacteria bloom. Furthermore, this paper discussed the relation between Cyanobacteria bloom's dynamic changes and meteorological elements of temperature and humidity under the same conditions. Results showed that wind is a direct driving effect on appearing, increasing and disappearing of the Cyanobacteria blooms.

Keywords: Himawari-8; Cyanobacteria bloom; dynamic change; Lake Taihu; wind

蓝藻是地球上最早出现的水生生物之一,在水生态系统的物质循环和能量流动中起着重要作用. 蓝藻过度繁殖会导致水体发生蓝藻水华,水质恶化,造成区域景观、经济和生态的巨大损失^[1-3]. 蓝藻水华目前已成为国内外浅水湖泊中最常见的水环境问题,如我国的太湖、巢湖、滇池等都长期受到蓝藻水华的困扰^[4].

为保障太湖水环境安全和水生态功能,国家和当地政府一方面加大了太湖污染物排放的管控力度和太湖蓝藻治理力度,另一方面开展了蓝藻水华发生机理及治理技术优化等多方面的研究. 要对太湖蓝藻水华进行有效治理,必须对其发生、发展、消亡的整个过程有清晰的把握. 太湖蓝藻水华的发生具有暴发面积大、时空变化剧烈的特点^[5],利用卫星遥感技术可以对蓝藻水华进行有效监测. 很多研究者开展了利用 EOS/MODIS (中分辨率成像光谱仪)、FY3、Landsat TM 等卫星资料的蓝藻水华监测方法研究,取得了一定的研究成果;周立国、李亚春等利用 MODIS 卫星数据监测了太湖蓝藻水华^[6-8];马荣华、段洪涛等利用多源卫星数据

* 国家高技术研究发展计划“863”项目(2012AA120903)和中国气象局 2015 年专业气象服务“高分卫星蓝藻水华监测”子课题联合资助. 2016-06-01 收稿;2016-11-22 收修改稿. 王萌(1982~),女,硕士; E-mail: wangmeng@cma.gov.cn.

(MODIS, Landsat TM 等) 分析了太湖蓝藻水华的时空分布^[9-12]; 韩秀珍等基于水面实测光谱及 FY3 和 MODIS 数据反演了太湖的水质参数^[13]. 但蓝藻水华受到湖泊水质环境、气象条件等多因素影响, 其发生发展变化快, 极轨卫星资料在时效性与动态跟踪等方面都不能很好地满足对蓝藻水华的动态监测需求.

Himawari-8(向日葵 8 号) 是日本气象厅 2014 年 10 月 7 日发射的地球同步静止气象卫星, 10 min 可完成 1 幅地球全圆盘图, 具备了高空间覆盖度、高时间分辨率的特点, 在识别蓝藻水华的同时, 可及时发现蓝藻水华的空间动态变化, 研究其在湖泊中的动态迁移过程, 对于治理太湖、防止水华发生具有重要的现实意义.

1 数据

表 1 Himawari-8/AHI 通道参数
Tab.1 Channel parameters of Himawari-8

通道	中心波长/ μm	空间分辨率/km
1	0.46	1
2	0.51	1
3	0.64	0.5
4	0.86	1
5	1.6	2
6	2.3	2
7	3.9	2
8	6.2	2
9	7.0	2
10	7.3	2
11	8.6	2
12	9.6	2
13	10.4	2
14	11.2	2
15	12.3	2
16	13.3	2

表 2 FY3B/MERSI 1~5 通道参数
Tab.2 Channels 1-5
parameters of FY3B/MERSI

通道	波长范围/ μm	空间分辨率/m
1	0.45~0.50	250
2	0.53~0.58	250
3	0.63~0.66	250
4	0.84~0.89	250
5	10.50~12.50	250

表 3 EOS/MODIS 1~2 通道参数
Tab.3 Channels 1-2
parameters of EOS/MODIS

通道	波长范围/ μm	空间分辨率/m
1	0.62~0.67	250
2	0.841~0.876	250

研究中使用的主要数据包括 2015 年 10 月 2 日 Himawari-8、FY3B/MERSI(中分辨率光谱成像仪)、EOS/MODIS 和 GF1(高分 1 号) 卫星对太湖的观测数据. Himawari-8 具有 16 个波谱通道(表 1), 包含 3 个可见光通道、3 个近红外通道和 10 个红外线通道, 空间分辨率为 0.5~2 km 不等, 全部通道 10 min 可完成 1 幅地球全圆盘图, 针对特定目标可实现 2.5 min 一次. 本文利用 Himawari-8 0.5 和 1 km 分辨率的通道数据(3、4 通道) 动态监测太湖蓝藻水华, 结合具有更高空间分辨率的 FY3B/MERSI(250 m)、EOS/MODIS(250 m) 和 GF1(16 m) 数据, 对 Himawari-8 数据监测结果进行分析验证. 对所用遥感数据进行辐射校正、几何校正、投影转换和裁剪等预处理, 并分别提取蓝藻水华信息.

FY3B 搭载的 MERSI 有 5 个 250 m 分辨率的通道(表 2), 包括 3 个可见光通道、1 个近红外通道和 1 个远红外通道, 其 1~4 通道的波长范围与 Himawari-8 1~4 通道的波长范围基本一致. EOS/MODIS 数据有 36 个光谱通道, 其 250 m 分辨率的 1、2 通道(表 3) 波长范围与 Himawari-8 3、4 通道的波长范围基本一致, 是监测蓝藻水华的主要通道. GF1 号卫星搭载的多光谱相机(WFV) 包括可见光到近红外范围的 4 个通道(表 4), 其数据与 Himawari-8 1~4 通道的波长范围基本一致. 上述数据可用于对 Himawari-8 蓝藻水华监测结果进行检验.

2 Himawari-8 太湖蓝藻水华动态监测方法

2.1 蓝藻水华监测方法

蓝藻水华发生以后, 在外力(风、水流等) 的作用下, 大面积积聚于水面, 在卫星遥感影像上产生类似陆生植被的光谱特征. 蓝藻水华在近红外波段有强的反射, 其反射率明显高于水体, 是反映蓝藻水华的主要波段; 在可见光红光波段有较强的吸收, 其反射率甚至低于水体(图 1). 利用近红外波段和可见光红光波段生成的归一化植被指数 $NDVI$ 或者比值指数 $RI(NDVI = (NIR - R) / (NIR + R), RI = NIR / R$, 其中 NIR 和 R 分别为近红外波段和可见光红光波段反射率) 可以反映蓝藻水华信息, 在湖泊水面这一单一下垫面条件下, 蓝藻水华可以被清楚地识别出来.

Himawari-8 可见光波段(3 通道) 和近红外波段(4 通道) 的波段设置正是可以反映蓝藻水华的主要波段, 针对 Himawari-8 的波段设置, 利用 $NDVI$ 模型, 采用阈值法提取蓝藻水华信息, 判别公式为:

$$NDVI > NDVI_t \tag{1}$$

式中, $NDVI$ 代表判别像元 $NDVI$ 值, $NDVI_t$ 代表 $NDVI$ 判别阈值,为保证蓝藻水华提取精度,该阈值通过人机交互判别确定. 对于太湖水域内的像元,当 $NDVI$ 值大于阈值时,认为该像元为蓝藻水华像元.

2.2 蓝藻水华监测精度验证

为清晰反映太湖蓝藻水华的分布区域,结合环太湖行政区划,参考已有太湖分区^[14],将太湖水域划分为 12 个区域(图 2),包括:湖心中区、湖心北区、湖心南区、西北部沿岸区、西南部沿岸区、南部沿岸区、东部沿岸区、东太湖、竺山湖、贡湖、梅梁湖和五里湖.

表 4 GF1/WFV 通道参数
Tab.4 Channels parameters
of GF1/WFV

通道	波长范围/ μm	空间分辨率/ m
1	0.45~0.52	16
2	0.52~0.59	16
3	0.63~0.69	16
4	0.77~0.89	16

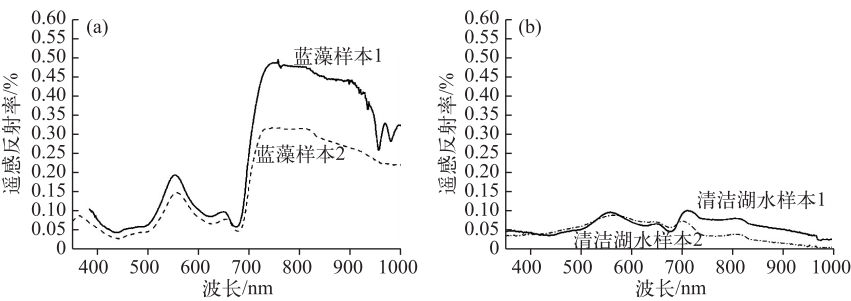


图 1 太湖蓝藻水体(a)和清洁水体(b)遥感反射率光谱曲线

Fig.1 Reflectance spectral curves of cyanobacteria water (a) and clean water (b) in Lake Taihu

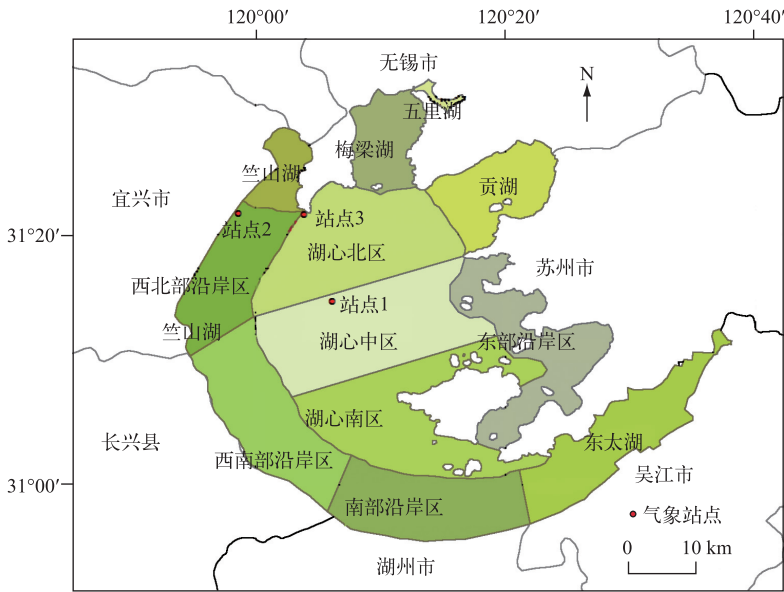


图 2 太湖水域分区

Fig.2 Partition map of Lake Taihu

从 2015 年 10 月 2 日 10:20(北京时间,下文同上) Himawari-8 和 10:17 MODIS 太湖蓝藻水华监测图像(图 3a、b)可见,蓝藻水华主要分布在西南部沿岸区、西北部沿岸区、湖心北区和梅梁湖, Himawari-8 与 MODIS 监测的太湖蓝藻水华在分布区域上是完全一致的. 从 2015 年 10 月 2 日 11:00 Himawari-8 和 11:02

GF1 太湖蓝藻水华监测图像(图 3c、d)可见,蓝藻水华主要分布在西南部沿岸区、西北部沿岸区、湖心北区和梅梁湖,除湖心中区少量丝缕状蓝藻水华外,Himawari-8 与 GF1 监测的太湖蓝藻水华在分布区域上是一致的.从 2015 年 10 月 2 日 13:40 Himawari-8 和 13:45 FY3B 太湖蓝藻水华监测图像(图 3e、f)可见,蓝藻水华分布在西北部沿岸区、湖心北区和梅梁湖,Himawari-8 与 FY3B 监测的太湖蓝藻水华在分布区域上是完全一致的.

为定量对比分析,分区计算蓝藻水华面积.结果表明,Himawari-8 与 MODIS、GF1 和 FY3B 监测的太湖蓝藻水华面积整体差别很小,其中 10:20 Himawari-8 与 10:17 MODIS 相比,误差为 2%;11:00 Himawari-8 与 11:02 GF1 相比,误差为 2.3%;13:40 Himawari-8 与 13:45 FY3B 相比,误差为 6.9%(表 5).

表 5 太湖蓝藻水华分区面积统计

Tab.5 Regional statistics of Cyanobacteria bloom areas in Lake Taihu

卫星	分区面积/km ²							全太湖
	西南部沿岸区	西北部沿岸区	湖心北区	梅梁湖	湖心中区	竺山湖	湖心南区	
Himawari-8(10:20)	20	110	130	85	10	18	0	373
MODIS(10:17)	18	113	140	84	15	11	0	381
Himawari-8(11:00)	16	101	139	82	22	20	8	388
GF1(11:02)	18	100	149	75	33	14	8	397
Himawari-8(13:40)	0	5	74	26	0	16	0	121
FY3B(13:45)	0	10	81	24	0	15	0	130

2.3 蓝藻水华强度计算

蓝藻水华强度是指像元内蓝藻水华的覆盖程度,通常分为无蓝藻水华、轻度蓝藻水华、中度蓝藻水华和重度蓝藻水华.本文设定为:像元内蓝藻水华覆盖度为 0,则为无蓝藻水华;介于 0~30%之间,为轻度蓝藻水华;介于 30%~60%之间,为中度蓝藻水华;大于 60%,为重度蓝藻水华.蓝藻水华强度对反映藻水华发生程度和空间分布有一定的指示意义.

NDVI 是反映蓝藻水华强度的重要指标,本文采用 NDVI 的平均分布来反映蓝藻水华的空间分布状态,基于混合像元分解原理计算蓝藻水华强度,以整点数据为代表.

$$NDVI = \sum_{i=1}^{10} (NDVI_i / 10) \quad (2)$$

式中, $i=1,2,3,\dots,10$ 分别代表 07:00—16:00 整点时间.

线性光谱混合模型是混合像元分解中最常用的方法,在该模型中,像元在某一光谱波段的反射率是由构成像元的基本组分的反射率及其所占像元面积的比例为权重系数的线性组合.考虑太湖湖区的组分主要是蓝藻和水体,根据线性光谱混合模型,NDVI 可表示为:

$$NDVI = NDVI_v \cdot C + NDVI_w(1 - C) \quad (3)$$

式中, $NDVI_v$ 为蓝藻 NDVI,通常采用 0.81 作为参考值^[15]; $NDVI_w$ 为水体 NDVI,通常采用 -0.3 作为参考值^[15]; C 为蓝藻覆盖度,则有:

$$C = \frac{NDVI - NDVI_w}{NDVI_v - NDVI_w} \times 100\% \quad (4)$$

2.4 蓝藻水华变化速度估算

为研究蓝藻水华的动态变化速度,本文引用衡量土地覆盖面积变化速度的土地利用动态度进行分析^[16-17],规定其动态度的大小为研究水域蓝藻水华的平均变化速度,其计算公式为:

$$K = \frac{A_{t2} - A_{t1}}{A_{t1}} \cdot \frac{1}{t2 - t1} \quad (5)$$

式中, K 为蓝藻水华动态变化速度, A_{t1} 为蓝藻水华在研究水域初期面积(km²), A_{t2} 为蓝藻水华在该水域末期面积(km²), $t1$ 为研究初始时间, $t2$ 为结束时间;当研究时长($t2-t1$)设定为 1 h 时, K 为研究水域蓝藻水华的

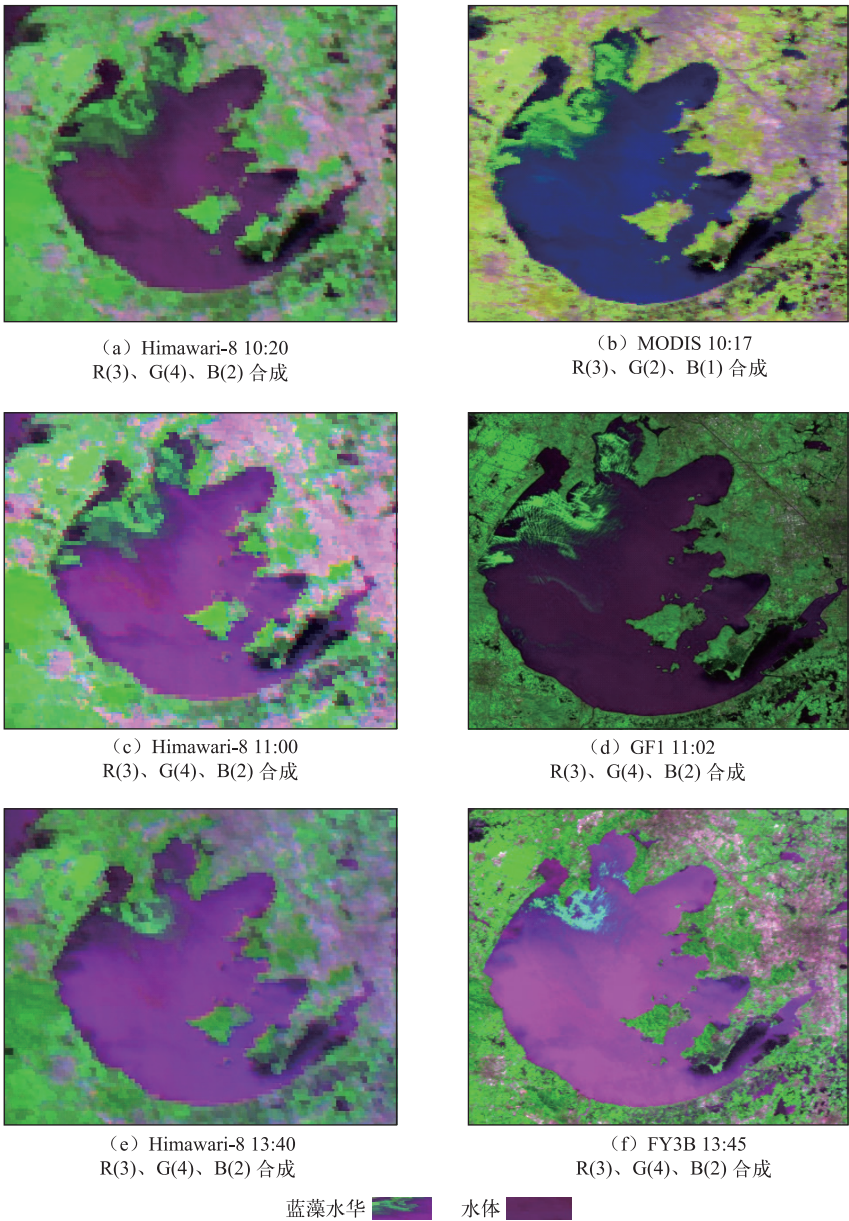


图 3 2015 年 10 月 2 日太湖蓝藻水华监测图像(北京时间)

Fig.3 Cyanobacteria bloom monitoring images of Lake Taihu on Oct. 2, 2015

逐小时变化速度.

3 Himawari-8 太湖蓝藻水华动态监测应用

3.1 蓝藻水华发生过程分析

蓝藻快速增殖并达到一定密度而形成水华需要一定的条件,如足够的能量和营养、适宜的环境条件等.分析蓝藻水华发生过程——出现、发展、消失,是太湖蓝藻水华监测的第一步,可作为预警和控制蓝藻水华发生的依据,Himawari-8 10 min/次的覆盖,为分析蓝藻水华发生过程提供了数据支持.图 4 反映了太湖

蓝藻水华的动态演变过程. 10月2日06:10, 蓝藻水华首先出现在太湖的西北部沿岸区和湖心北区的北部沿岸, 水华面积相对较小(图4a); 06:30时, 蓝藻水华在该区域几乎没有明显变化(图4b); 07:00开始, 水华逐渐扩大, 梅梁湖开始出现少量蓝藻(图4c); 随后, 水华自西北部沿岸区、湖心北区和梅梁湖继续扩大, 到11:00时, 水华面积达到最大, 西北部沿岸区大部分水域、湖心北区西部水域、梅梁湖大部分水域均被蓝藻覆盖, 西南部沿岸区和湖心中区有少量蓝藻水华(图4l); 12:00开始, 蓝藻水华逐渐减少(图4m), 到16:00时, 仅湖心北区北部沿岸有少量蓝藻水华(图4q), 17:00时, 受云的影响, 没有监测到蓝藻水华信息(图4r).

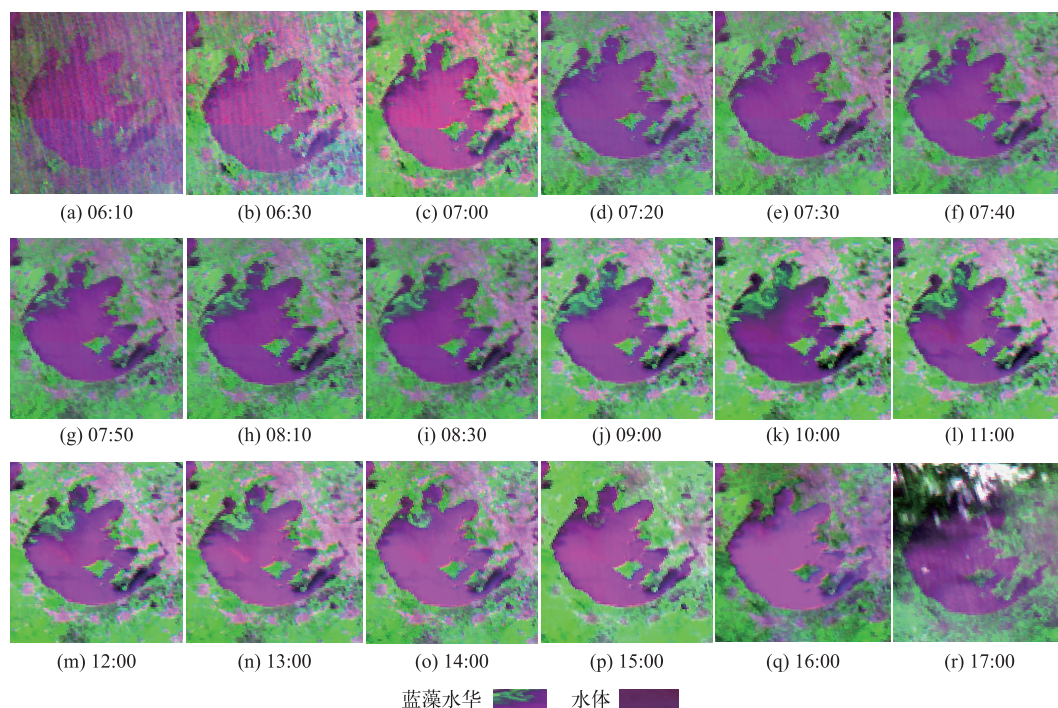


图4 2015年10月2日 Himawari-8 太湖蓝藻水华监测图像(北京时间)(R(3)、G(4)、B(2)合成)

Fig.4 Multi-channel composition color images of Lake Taihu based on Himawari-8 on Oct. 2, 2015
(R(3), G(4), B(2) color composition)

3.2 蓝藻水华强度动态变化分析

利用公式(2)和(4)分别计算平均NDVI及蓝藻水华强度等级. 结果表明, 重度蓝藻水华主要分布在湖心北区、西北部沿岸区和梅梁湖, 这与NDVI的高值区域是一致的; 中度蓝藻水华主要分布在湖心北区的南部水域, 轻度蓝藻水华主要分布在湖心中区和西南部沿岸区, 这与NDVI的低值区域是一致的(图5).

2015年10月2日07:00—15:00太湖蓝藻水华强度随时间不断变化. 在蓝藻水华发生之初, 07:00和08:10时, 以轻度蓝藻水华为主; 随着时间的推移, 到09:00和11:00时, 中度和重度蓝藻水华逐渐增多; 在蓝藻水华逐渐减少阶段, 首先快速消散的为轻度蓝藻水华, 如11:00—12:00时; 其次为重度和中度蓝藻水华, 如12:00—14:00时; 到15:00时, 仅余下少量轻度蓝藻水华(图6).

3.3 蓝藻水华动态变化速度分析

2015年10月2日, 在蓝藻水华发展阶段, 变化速度最快的为07:00—08:10时间段, 其次为08:10—09:00、09:00—10:00和10:00—11:00时间段, 即水华发展速度逐渐变慢; 在蓝藻水华逐渐减少阶段, 变化速度最快的为15:00—16:00时间段, 其次为13:00—14:00、14:00—15:00、11:00—12:00和12:00—13:00时间段(图6). 对比图5可知: 在水华发展阶段, 变化速度最快的为轻度蓝藻水华, 其次为中度蓝藻水华和重度蓝藻水华; 在水华减少阶段, 变化速度最快的为轻度蓝藻水华, 其次为重度蓝藻水华和中度蓝藻水华.

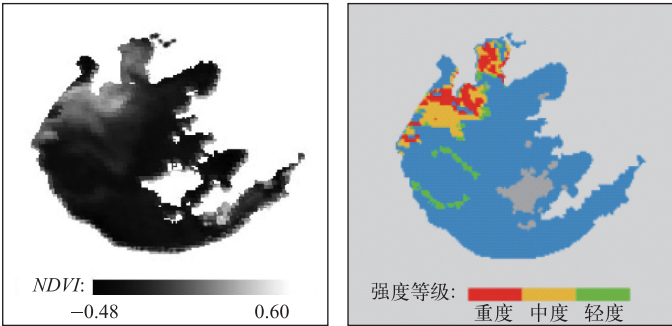


图 5 2015 年 10 月 2 日 Himawari-8 太湖 *NDVI* 平均分布及蓝藻水华强度等级
Fig.5 *NDVI* and Cyanobacteria bloom intensity of Lake Taihu based on Himawari-8 on Oct. 2, 2015

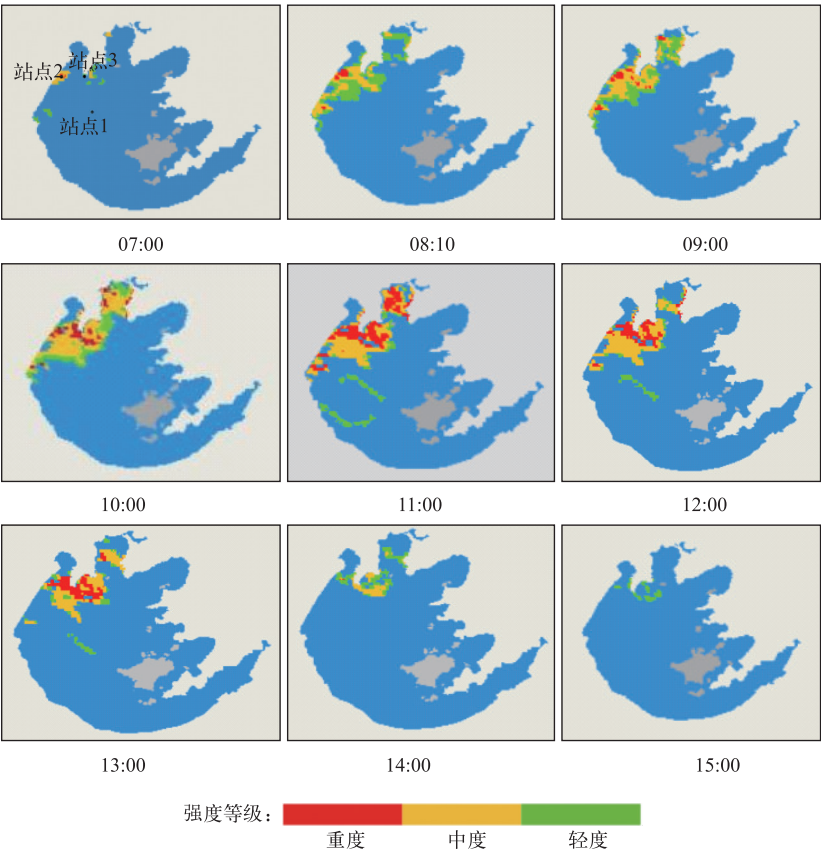


图 6 2015 年 10 月 2 日 Himawari-8 太湖蓝藻水华强度(北京时间)
Fig.6 Cyanobacteria bloom intensity of Lake Taihu based on Himawari-8 on Oct. 2, 2015

3.4 蓝藻水华动态变化与气象要素的关系

蓝藻水华的发生与很多因素相关,如藻类数量、风速、风向、降雨、氮磷营养盐浓度、光照强度、温度等,大量研究表明,各因子之间存在一定的综合作用和相互补偿作用^[18-21]. 根据太湖蓝藻水华形成的 4 阶段理论,在 5—10 月,水体中蓝藻生物量将一直高于发生水华的阈值,此时太湖的营养盐浓度、光照强度、温度等

表 6 2015 年 10 月 2 日 Himawari-8

太湖蓝藻水华动态变化速度

Tab.6 Cyanobacteria blooms dynamic change speed of Lake Taihu based on Himawari-8 on Oct. 2, 2015

时间 (北京时间)	蓝藻面积/ km ²	K	平均风速/ (m/s)
07:00	25	—	0.6
08:10	198	6.92	0.7
09:00	283	0.43	0.5
10:00	334	0.18	0.77
11:00	388	0.16	1.7
12:00	274	-0.29	2.03
13:00	218	-0.20	1.7
14:00	97	-0.56	2.47
15:00	50	-0.48	2.57
16:00	18	-0.64	2.2

已不是藻类生长的限制因子,此时只要气象和水文条件适合,蓝藻就会发生水平、垂直位置改变而“暴发”^[22-23]. 气象因子对藻类在湖泊中的暴发和迁移影响有多大,蓝藻水华形成后如何运动,其运动方式是什么,成为气象、水文部门关注的核心问题.

吴晓东等研究指出,太湖特定湖区的短期蓝藻水华的蓝藻生长、漂移和上浮主要受气象条件的影响^[24]. 孔繁翔等认为,在大多数情况下,突然出现的“水华”只不过是已存在、分散在水体中的藻类群体在适宜条件下的上浮、聚集、迁移至水面并为人们肉眼所见过程,而非藻类在短时间内连续的快速生长所致;准确地说,“暴发”仅仅描述了短时间内大量水华蓝藻群体的空间位置的改变,主要是从水体中上浮到水体表层或者由于风的作用,在湖岸的局部地区大量聚集^[25]. 曹焕生研究指出水华的形成不是生物量的突然增加,而是其生物量在风浪的作用下垂直迁移的结果,当风速 $<3\text{ m/s}$ 时,蓝藻的水华就会

出现;营养盐对于水华的形成没有明显的作用,只是具有保持生物量的间接作用^[26]. 朱永春等研究指出不同风场对于藻类在湖泊中的水平及垂直分布影响很大,并且存在着一个“临界风速”,其范围在 $2\sim3\text{ m/s}$ 之间,当风速 $<$ 临界风速时,水面可以近似看作水力光滑,没有波浪产生,在水表面藻类顺着风向迅速向迎风岸边漂移,大量堆积;但当风速超过临界风速时,将产生波浪作用,波浪、风扰动及平均环流的共同作用使得藻类在水体中上下混合,分布比较均匀,不再出现藻类聚积现象,从而抑制了水华的形成^[27].

从 2015 年 10 月 1—2 日太湖气象自动站风速、气温观测数据^①可见,两日均无降水,温度也几乎没有差异,而风速则有较大不同(图 7). 10 月 1 日白天,太湖平均风速高达 4.6 m/s ,最大风速超过 7.9 m/s ;10 月 1 日 18:00 开始,风速逐渐下降,10 月 2 日,平均风速下降至 1.4 m/s ,远小于临界风速,且持续高温,湖区的大量蓝藻在风的驱动下上浮,聚集在西北部湖区,形成水华.

10 月 2 日,蓝藻水华首先出现在太湖的西北部沿岸区和湖心北区的北部沿岸,随后自西北部沿岸区、湖心北区和梅梁湖逐渐向东南扩散,太湖气象自动站^②监测显示 10 月 2 日 00:00—11:00 太湖湖面平均风速 0.83 m/s ,最大不超过 2 m/s ,风向均介于 $270^\circ\sim299^\circ$ 之间,以西偏北风为主,蓝藻在风的驱动下上浮、聚集形成水华并向湖泊的下风向漂移扩散;随着藻类的迅速聚集,11:00 水华面积达到最大;12:00 开始,蓝藻水华逐渐减少,自动站监测表明 12:00 开始,湖面风速有所增大,12:00—24:00 平均风速为 2 m/s ,最大风速超过 4 m/s ,风向与 00:00—11:00 时相比发生改变,以东偏南风为主,介于 $124^\circ\sim160^\circ$ 之间,受风的影响,蓝藻迁移路径发生改变,不再向东南方向扩散,由于瞬时风速的加大,风扰动使藻类在水体中上下混合,不再聚集,卫星监测显示蓝藻水华逐渐减少(图 4、表 7). 可见,风对蓝藻水华的形成、运动和消失有直接的驱动作用,以上卫星遥感监测的蓝藻水华动态变化结果与风速和风向的分析结论与已有的研究结果是一致的^[26-27].

结合图 6 和表 6 可知,07:00—11:00,蓝藻水华不断发展,水华动态变化速度逐渐变小,中度和重度蓝藻水华逐渐增多;11:00 时,受站点 3 风向改变的影响,蓝藻水华停止扩散;11:00—16:00 时,蓝藻水华逐渐减少,水华的动态变化速度与风速有一定的正相关关系,即风速越大,水华的减少速度越快. 从图 6 可见,站点 1 附近以轻度蓝藻水华为主,站点 2 附近以中度蓝藻水华为主,站点 3 附近以重度蓝藻水华为主,尽管风速为站点 $1<$ 站点 $2<$ 站点 3 ,但受风向和蓝藻水华强度影响,蓝藻水华的快速消失顺序分别为:站点 1、站点 2 和站点 3.

①,② 数据来源于国家气象信息中心.

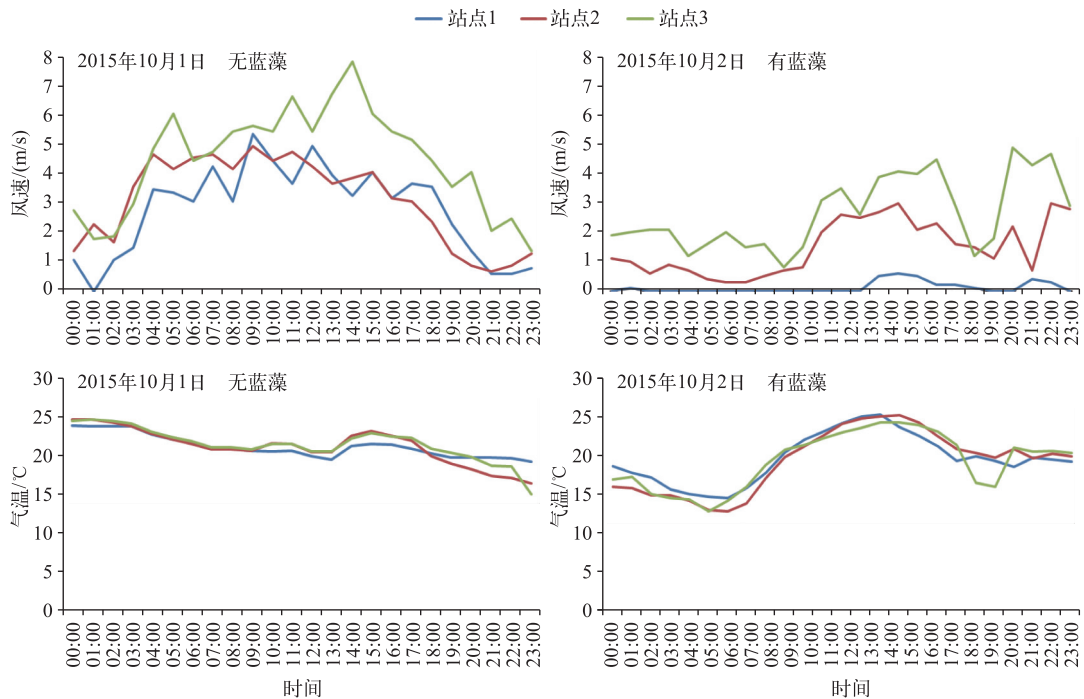


图 7 太湖气象自动站 2015 年 10 月 1—2 日风速和气温

Fig.7 Wind speed and air temperature of Lake Taihu on Oct. 1—2, 2015, observed by meteorological station

表 7 2015 年 10 月 2 日太湖气象自动站风向

Tab.7 Wind direction on Lake Taihu on Oct. 2, 2015, observed by meteorological station

站点	风向/°													
	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00
1	无	无	无	无	无	无	无	无	无	229	226	228	219	211
2	273	280	286	293	304	289	271	153	137	124	139	138	138	126
3	298	288	288	276	274	0	160	135	128	137	140	132	145	128

4 结论

新一代静止气象卫星 Himawari-8 以其高时间、高空间分辨率的特点,可以及时发现蓝藻水华的空间动态变化,为治理太湖蓝藻提供了有力的数据支持.

基于太湖实地光谱测量资料,提出 Himawari-8 卫星资料太湖蓝藻水华的动态监测方法:利用混合像元分解原理计算蓝藻水华强度,分析蓝藻水华发生程度及变化特征;通过引入衡量土地覆盖面积变化速度的土地利用动态度估算蓝藻水华变化速度. 以 2015 年 10 月 2 日为例,动态监测了太湖蓝藻水华的发展变化,分析了蓝藻水华的出现、发展和消失. 计算了蓝藻水华强度的动态变化:蓝藻水华强度随时间不断变化,在蓝藻水华发生之初,以轻度蓝藻水华为主,随着时间的推移,中度和重度蓝藻水华逐渐增多;在蓝藻水华减少阶段,首先快速消失的为轻度蓝藻水华,其次为重度和中度蓝藻水华. 估算了蓝藻水华的动态变化速度:在水华发展阶段,变化速度最快的为轻度蓝藻水华,其次为中度 and 重度蓝藻水华;在水华减少阶段,变化速度最快的为轻度蓝藻水华,其次为重度和中度蓝藻水华. 上述分析为研究蓝藻水华的生长消亡过程提供了支持.

探讨了蓝藻动态变化与气象要素的关系. 通过对比分析 2015 年 10 月 1—2 日太湖气象自动站的风速、

风向和气温观测数据,可知,风场对蓝藻水华的形成和移动有直接的驱动作用;当风速>临界风速时,则对蓝藻水华有一定的抑制作用;当风速<临界风速时,将有利于水华蓝藻的上浮、漂移和聚集. 风速大,则风力扰动较大,水华蓝藻无法上浮到水面并快速漂移集聚到局部湖区,因此对蓝藻水华有一定的抑制作用;风速适宜,水华蓝藻在风的驱动下上浮、漂移和聚集,容易形成水华. 水华形成后蓝藻在风的驱动下向湖泊的下风向漂移扩散. 同时,风扰动使蓝藻在水体中上下混合,沉降和上浮. 计算表明,蓝藻水华减少阶段,水华的动态变化速度与风速有一定的正相关关系,即风速越大,水华的减少速度越快.

利用卫星遥感探寻蓝藻水华发生过程,分析其动态变化,将有助于探索蓝藻水华的规律,为蓝藻水华的预测、预警提供参考. Himawari-8 10 min/次的高观测频次,为蓝藻水华的预测提供了很好的遥感支撑,为已有的蓝藻水华预报模型提供了更多遥感数据的修正和验证,对建立有效的太湖蓝藻水华预报技术有重要的意义.

5 参考文献

- [1] Codd GA, Morrison LF, Metcalf JS. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection. *Toxicology & Applied Pharmacology*, 2005, **203**(3): 264-272.
- [2] Zhou Xiaobai, Zhang Ninghong, Zhang Yong *et al.* The temporal and spatial distribution pattern of cyanobacteria and its control method in Taihu Lake. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, **22**(12): 1930-1935. [周笑白, 张宁红, 张咏等. 太湖蓝藻的时空变化规律及治理方法. 生态环境学报, 2013, **22**(12): 1930-1935.]
- [3] Paerl HW, Xu H, McCarthy MJ *et al.* Controlling harmful cyanobacterial blooms in a hyper-eutrophic lake (Lake Taihu, China): The need for a dual nutrient (N & P) management strategy. *Water Research*, 2011, **45**: 1973-1983.
- [4] Qin Boqiang, Wang Xiaodong, Tang Xiangming *et al.* Drinking water crisis caused by bloom in Lake Taihu: Eutrophication and cyanobacterial 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.]
- [5] Zhang Yanhui, Li Weifeng, Chen Qiuwen. Algae bloom risk zoning of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1133-1139. DOI:10.18307/2015.0619. [张艳会, 李伟峰, 陈求稳. 太湖蓝藻水华发生风险区划. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1133-1139.]
- [6] Zhou Liguang, Feng Xuezhi, Wang Chunhong *et al.* Monitoring cyanobacteria bloom based on MODIS data in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2008, **20**(2): 203-207. DOI:10.18307/2008.0211. [周立国, 冯学智, 王春红等. 太湖蓝藻水华的 MODIS 卫星监测. 湖泊科学, 2008, **20**(2): 203-207.]
- [7] Li Yachun, Sun Jiali, Xie Zhiqing *et al.* Extraction methods of cyanobacteria bloom in Lake Tai based on MODIS vegetation index. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, **31**(6): 737-741. [李亚春, 孙佳丽, 谢志清等. 基于 MODIS 植被指数的太湖蓝藻信息提取方法研究. 气象科学, 2011, **31**(6): 737-741.]
- [8] Wang M, Shi W, Tang J. Water property monitoring and assessment for China's inland Lake Taihu from MODIS-aqua measurements. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**: 841-854.
- [9] Ma Ronghua, Kong Fanxiang, Duan Hongtao *et al.* Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite imageries in Lake Taihu, China. *J Lake Sci*, 2008, **20**(6): 687-694. DOI:10.18307/2008.0605. [马荣华, 孔繁翔, 段洪涛等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识. 湖泊科学, 2008, **20**(6): 687-694.]
- [10] 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.]
- [11] Duan HT, Ma RH, Hu CM. 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**: 126-135.
- [12] Qi L, Hu CM, Duan HT *et al.* A novel MERIS algorithm to derive cyanobacterial phycocyanin pigment concentrations in a eutrophic lake: Theoretical basis and practical considerations. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **154**: 298-317.
- [13] Han Xiuzhen, Wu Chaoyang, Zheng Wei *et al.* Satellite remote sensing of Cyanophyte using observed spectral measurements over the Taihu lake. *J App Met Sci*, 2012, **21**(6): 724-730. [韩秀珍, 吴朝阳, 郑伟等. 基于水面实测光谱的太湖蓝藻卫星遥感研究. 应用气象学报, 2012, **21**(6): 724-730.]
- [14] Han Xiuzhen, Zheng Wei, Liu Cheng eds. Cyanobacteria bloom's monitoring, evaluation and system build in Taihu by sat-

- ellite remote sensing. Beijing: China Meteorological Press, 2011: 110. [韩秀珍, 郑伟, 刘诚. 卫星遥感太湖蓝藻水华监测评估及系统建设. 北京: 气象出版社, 2011: 110.]
- [15] National Satellite Meteorological Center. Technical directives for monitoring of cyanobacterial blooms in lakes by satellite remote sensing. QT/T 207-2013. [国家卫星气象中心. 湖泊蓝藻水华卫星遥感监测技术导则. QT/T 207-2013.]
- [16] Duan Zengqiang, Zhang Fengrong, Kong Xiangbin. Method for information mining of land-use change and its application. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, **21**(12): 60-66. [段增强, 张凤荣, 孔祥斌. 土地利用变化信息挖掘方法及其应用. 农业工程学报, 2005, **21**(12): 60-66.]
- [17] Xiao Ming, Wu Jiqu, Chen Qiubo *et al.* Dynamic change of land use in Changhua downstream watershed based on CA-Markov model. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, **28**(10): 231-238. [肖明, 吴季秋, 陈秋波等. 基于 CA-Marko 模型的昌化江流域土地利用动态变化. 农业工程学报, 2012, **28**(10): 231-238.]
- [18] Huang Yuling, Chen Mingxi, Liu Defu *et al.* Effect of nitrogen, phosphorus, light and water temperature on the formation and disappearance of blue-green algae bloom. *Journal of Northwest A & F University (Nat. Sci. Ed.)*, 2008, **36**(9): 93-100. [黄钰玲, 陈明曦, 刘德富等. 不同氮磷营养及光温条件对蓝藻水华生消的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, **36**(9): 93-100.]
- [19] Huang Yuling, Chen Mingxi, Guo Jing. Simulation and forecast of blue-green algae (Cyanobacteria) bloom formation and disappearance under different water temperatures. *J of China Tree Gorges University (Natural Sciences)*, 2009, **31**(1): 84-88. [黄钰玲, 陈明曦, 郭静. 不同水温下蓝藻水华生消模拟与预测. 三峡大学学报(自然科学版), 2009, **31**(1): 84-88.]
- [20] Chen Mingxi. Simulation of the mechanism of blue-green algal bloom formation and disappearing [Dissertation]. Yichang: China Tree Gorges University, 2007. [陈明曦. 蓝藻水华生消机制室内模拟实验研究 [学位论文]. 宜昌: 三峡大学, 2007.]
- [21] 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. [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.]
- [22] Kong Fanxiang, Gao Guang. 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.]
- [23] Wang Wenlan, Zeng Mingjian, Ren Jian. Numerical study of the impact of surface wind changes on the cyanobacteria bloom in Lake Taihu. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2011, **31**(6): 718-725. [王文兰, 曾明剑, 任健. 近地面风场变化对太湖蓝藻暴发影响的数值研究. 气象科学, 2011, **31**(6): 718-725.]
- [24] Wu Xiaodong, Kong Fanxiang, Gao Junfeng *et al.* Progress and prospect of cyanobacteria bloom forecast in Taihu Lake. Guang Zhou: Symposium for Pollution Control and Ecological Restoration Techniques of Water Environments in China, 2008. [吴晓东, 孔繁翔, 高俊峰等. 太湖蓝藻水华的预测进展及展望. 广州: 中国水环境污染控制与生态修复技术学术研讨会, 2008.]
- [25] 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.]
- [26] Cao Huansheng. Study on the formation process and dominant ecological factors of cyanobacteria bloom in Taihu [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, 2006. [曹焕生. 太湖蓝藻水华形成过程及其主导生态因子研究 [学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2006.]
- [27] Zhu Yongchun, Cai Qiming. The dynamic research of the influence of wind field on the migration of algae in Taihu lake. *J Lake Sci*, 1997, **9**(2): 152-158. DOI:10.18307/1997.0210. [朱永春, 蔡启铭. 风场对藻类在太湖中迁移影响的动力学研究. 湖泊科学, 1997, **9**(2): 152-158.]