

## 多源卫星遥感数据监测巢湖蓝藻水华爆发研究

张东彦<sup>1</sup>, 尹 勋<sup>1</sup>, 余 宝<sup>2</sup>, 丁玉婉<sup>1</sup>, 梁 栋<sup>1</sup>, 黄林生<sup>1</sup>, 赵晋陵<sup>1</sup>, 郜允兵<sup>3</sup>

- (1. 安徽大学 农业生态大数据分析与应用技术国家地方联合工程研究中心, 安徽 合肥 230601;  
2. 安徽理工大学 测绘学院, 安徽 淮南 232001; 3. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

**摘 要:** 湖泊蓝藻水华的精准动态监测, 可为水利及环保部门评价污染水体的防治效果、优化和调整防治政策提供依据。论文以巢湖为研究对象, 利用 Landsat TM/OLI、HJ-1B CCD/IRS 和 NPP-VIIRS 三种不同空间分辨率的影像数据, 通过归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)实现巢湖水域范围提取, 利用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和浮游藻类指数 (Floating Algae Index, FAI) 提取 2010~2014 年共 22 景巢湖蓝藻的爆发区域。进一步的, 对 NDVI 和 FAI 两种方法计算的蓝藻爆发区域进行对比分析, 评价 Landsat、HJ-1B 以及 VIIRS 三种影像数据对巢湖蓝藻水华空间和时间的监测效果及适用性, 进而结合气象因素分析不同气象因子对蓝藻水华爆发的影响。研究表明:(1) 相比 NDVI 指数, FAI 指数(Landsat 和 HJ-1B 数据为主, VIIRS 数据辅助)能降低薄云对蓝藻水华提取效果的影响, 可提高蓝藻水华爆发区域、程度的识别能力;(2) 气象因子中气温和日照时长加重了蓝藻水华爆发的严重程度, 降水则对蓝藻水华的爆发起到一定的抑制作用。综上所述, 论文引入 VIIRS 卫星影像研究巢湖蓝藻水华爆发, 利用 FAI 指数降低薄云对蓝藻水华爆发面积提取精度的影响, 取得的研究结果可为基于多源卫星遥感数据的巢湖蓝藻水华动态监测系统开发提供重要的方法支持, 有利于推进卫星遥感技术在安徽省“河长制”和“湖长制”中发挥重要作用。

**关键词:** 浮游藻类指数; 归一化水体指数; VIIRS 影像; 巢湖蓝藻; 气象因子

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0726004

## Using multi-source satellite imagery data to monitor cyanobacterial blooms of Chaohu Lake

Zhang Dongyan<sup>1</sup>, Yin Xun<sup>1</sup>, She Bao<sup>2</sup>, Ding Yuwan<sup>1</sup>, Liang Dong<sup>1</sup>, Huang Linsheng<sup>1</sup>,  
Zhao Jinling<sup>1</sup>, Gao Yunbing<sup>3</sup>

- (1. National Engineering Research Center for Agro-Ecological Big Data Analysis & Application, Anhui University, Hefei 230601, China;  
2. School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science & Technology, Huainan 232001, China;  
3. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** Dynamically, accurately monitoring of cyanobacteria blooms in the inland lakes can provide a basis for evaluating the control effects of polluted water bodies, moreover optimize and adjust prevention policies for water conservancy and environmental protection departments. In this paper, Chaohu Lake was

收稿日期: 2019-02-07; 修订日期: 2019-03-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0801205, 2016YFD0800904); 国家自然科学基金(41771463, 61672032)

作者简介: 张东彦(1982-), 男, 副教授, 博士, 主要从事卫星遥感图像处理及应用方面的研究。Email: zhangdy@ahu.edu.cn

通讯作者: 梁栋(1963-), 男, 教授, 博士, 主要从事模式识别、人工智能等应用方面的研究。Email: dliang@ahu.edu.cn

chosen as their search object, the satellite imagery data with different spatial resolution such as the Landsat TM/OLI, HJ-1B CCD/IRS and NPP-VIIRS, were used to extract the Chaohu water body by the Normalized Difference Water Index (NDWI). And then the areas of cyanobacterial blooms in the Chaohu Lake were calculated using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Floating Algae Index (FAI). Further, the extracted cyanobacterial areas using the different methods were compared and analyzed, and the monitoring effects and applicability were evaluated by the spatial and temporal characteristics for Landsat, HJ-1B and VIIRS imagery data. Additionally, the effects of different meteorological factors on the cyanobacterial blooms were also analyzed. The research results displayed that comparing with the NDVI index, the FAI index calculated from the Landsat, HJ-1B and VIIRS imagery data can reduce the effect of thin cloud on the extraction of cyanobacterial blooms, and improve the recognition ability of cyanobacterial blooms and extents. Secondly, the temperature and sunshine duration of meteorological factors aggravate the severity of cyanobacterial blooms, and the rainfall plays a certain role in inhibiting the outbreak of cyanobacterial blooms. In summary, this study introduced the VIIRS imagery data to study the cyanobacterial blooms in Chaohu Lake, and used the FAI index to reduce the influence of thin cloud on the extraction precision of cyanobacterial blooms. These results show that multi-source satellite imagery data can provide the important method support for the development of dynamically monitoring system on cyanobacterial blooms. This is useful to promote the satellite remote sensing technology to improve the "river system" and "lake system" in Anhui Province.

**Key words:** floating algae index; normalized difference water index; VIIRS imagery; cyanobacterial blooms of Chaohu Lake; meteorological factor

## 0 引言

目前,蓝藻水华已经成为一个世界性的环境问题<sup>[1]</sup>。大规模的蓝藻水华不仅降低了水资源的利用效能,还引起了严重的生态环境问题。巢湖是我国富营养化湖泊的典型代表之一,近年来蓝藻水华频繁爆发,引起的水环境事件直接威胁到巢湖流域的生态环境及环湖居民的生产生活<sup>[2]</sup>,因此,加强对巢湖水环境的动态实时监测及制定合理防治措施已迫在眉睫。由于常规的湖泊水华监测手段时效性差、成本高且只能代表监测点周围一定范围内的情况,无法满足动态、高效的监测需求<sup>[3]</sup>,迫切需要一种更加有效的手段取代传统方法实现湖泊水华的时空动态监测。

卫星遥感手段具有高效、大范围和时效性强的特点,可以有效弥补常规监测手段的不足,具有无可比拟的技术优势,已经成为水环境动态监测以及蓝藻水华预测、预警不可缺少的技术手段之一<sup>[4]</sup>。国内外学者使用 MODIS (Moderate Resolution Imaging

Spectroradiometer)、NOAA/AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration/Advanced Very High Resolution Radiometer)、MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer)等卫星影像,研究海洋、太湖、巢湖等水体藻类水华的监测方法,取得了卓有成效的监测效果<sup>[5-6]</sup>。通过文献调研发现,国内外科学家借助不同卫星影像(MODIS、NOAA、MERIS、Landsat等)计算 NDVI、EVI 等植被指数对海洋和湖泊水体的蓝藻水华进行监测<sup>[7-12]</sup>。其中,中分辨率卫星 MODIS 在时效性和数据选择上常用于较大的研究区(海洋近海岸水体),其他数据源 Landsat、HJ-1A/B 等多在内陆水体面积较小的湖泊(太湖、巢湖等)上应用。同时,也发现基于卫星遥感监测湖泊水体水华时,影像数据易受云雾影响,藻类爆发面积提取面临数据源不足的问题以及需要改进提取方法。针对此问题,一些学者探索了消除云雾影响的藻类水华提取方法。张娇等利用 1999~2014 年 Landsat 卫星遥感影像数据,采用浮游藻类指数(Floating Algae Index,

FAI)方法识别、提取洱海蓝藻水华信息,进而获取蓝藻水华时空分布数据,为进一步分析洱海蓝藻水华发生规律及监测预警提供参考<sup>[13]</sup>;Wang 等使用 MODIS 影像计算浮游藻类替代指数(Alternative Floating Algae Index, AFAI) 检查浮游藻类的红边反射率,用于监测马尾藻的覆盖区域<sup>[14]</sup>。上述研究为云雾天气干扰下巢湖蓝藻提取提供了重要的方法支持。但是,由于巢湖水体中蓝藻连年爆发区域较为固定,该水体的动态、准确监测直接关系到防治措施的制定,迫切需要开展点-面结合的新技术、新方法的探索研究。然而,中分辨率卫星及单一数据源卫星难以满足业务化需求,需要引入新的数据源如 NPP-VIIRS (NPOESS Preparatory Project-Visible Infrared Imaging Radiometer)开展针对性研究,以便满足当今湖泊动态遥感监测的新需求。

综上,论文利用 Landsat-TM/OLI、HJ-1B-CCD/IRS 多时相影像,结合 NPP-VIIRS 卫星数据,以巢湖湖区蓝藻水华发生情况为研究对象,筛选适用的蓝藻水华提取方法;考虑气象条件(降水、温度等)因子,综合多源卫星遥感数据监测巢湖蓝藻水华爆发情况并评估,以期为基于多源遥感影像的巢湖蓝藻水华动态监测系统开发提供技术支持。

## 1 数据获取与处理

### 1.1 研究区域

巢湖(31°25'-31°43'N, 117°17'-117°51')位于安徽省中部,是中国第五大淡水湖泊(如图 1 所示)。巢湖现有湖面面积约为 770 km<sup>2</sup>,平均深度为 3.0 m。巢湖流域内共有大小河流 33 条,呈放射状汇入巢湖,位于巢湖东侧的裕溪河是唯一的流出河流,也是巢

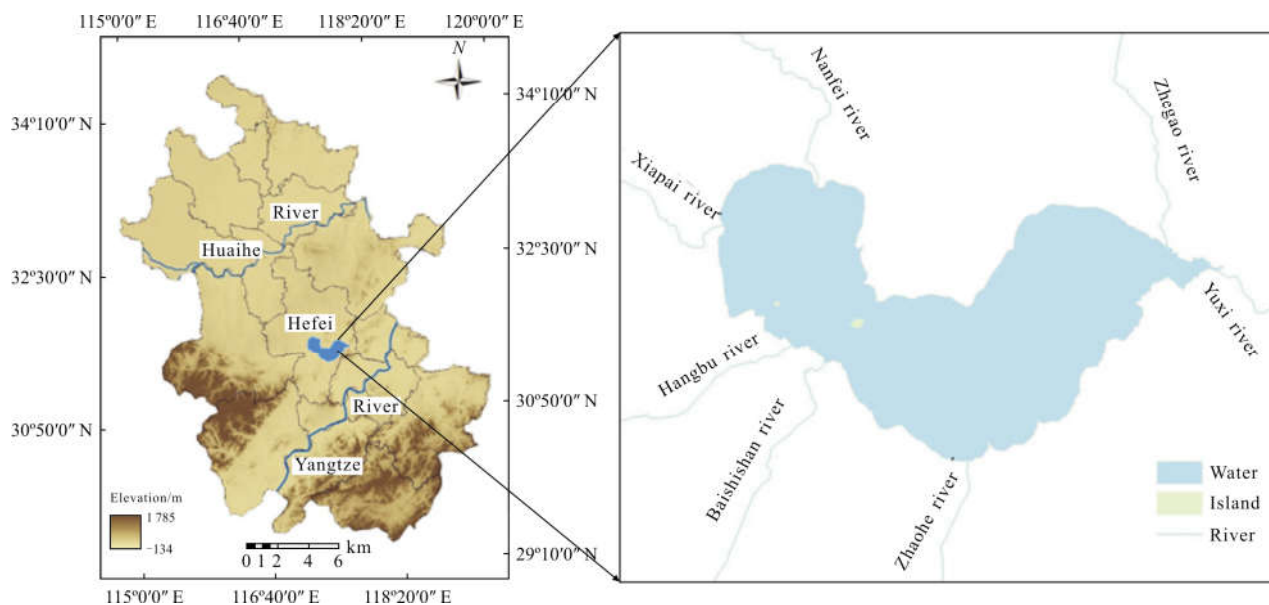


图 1 巢湖水体地理位置示意图

Fig.1 Location of Chaohu Lake

湖唯一流入长江流域的河流<sup>[15]</sup>。

### 1.2 数据选择

#### 1.2.1 数据获取

论文采用 Landsat-TM/OLI、HJ-1B CCD/IRS 和 NPP-VIIRS 三种卫星遥感数据源进行巢湖蓝藻水华爆发区域提取并评估效果。其中,Landsat 影像数据 5 景、HJ-1B CCD/IRS 影像 8 景、VIIRS 影像 9 景,

详细参数见表 1。上述影像分别从美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)、中国卫星资源中心网站、CLASS (NOAA's Comprehensive Large Array-Data Stewardship System)下载,从 2010 年 8 月至 2014 年 11 月的时间范围内筛选出巢湖蓝藻水华爆发频繁且无云或少云的影像数据,尽量降低云雾对蓝藻面积提取结果的影响<sup>[16]</sup>。

表 1 不同卫星遥感影像的参数

Tab.1 Parameters of different satellite imagery data

Satellites	Sensors	Time		Spatial resolution/m
Landsat-5	TM	2010/08/10	-	30
Landsat-8	OLI	2014/05/01	2014/07/20	30
		2014/08/05	2014/10/24	
		2010/08/10	2014/05/01	
HJ-1B	CCD/IRS	2014/05/20	2014/06/05	30/150
		2014/07/10	2014/09/07	
		2014/10/05	2014/10/24	
		2014/05/01	2014/05/20	
		2014/06/05	2014/07/10	
NPP	VIIRS	2014/07/20	2014/08/05	375
		2014/09/07	2014/10/05	
		2014/10/24	-	

1.2.2 数据预处理

文中三种卫星遥感影像 Landsat-TM/OLI、HJ-1B 和 VIIRS 均需要进行数据预处理, 主要包括: 辐射定标、大气校正、几何校正和影像裁剪等步骤。其中, 大气校正利用 ENVI 软件的 FLAASH 模块实现; HJ-1B 和 VIIRS 数据的几何校正以 Landsat-8 OLI 影像作为基准影像, 校正精度控制在 0.5 个像元内。VIIRS 影像数据需要将其重投影到 UTM-WGS84 坐标系再继续后续预处理; HJ-1B 卫星的 CCD 和 IRS 影像的波段空间分辨率不同, 需对 IRS 影像进行重采样, 将 150 m 空间分辨率的影像通过双线性内插法重采样成 30 m。

2 巢湖蓝藻水华提取方法

2.1 巢湖蓝藻水华提取流程

巢湖蓝藻水华提取流程如图 2 所示。

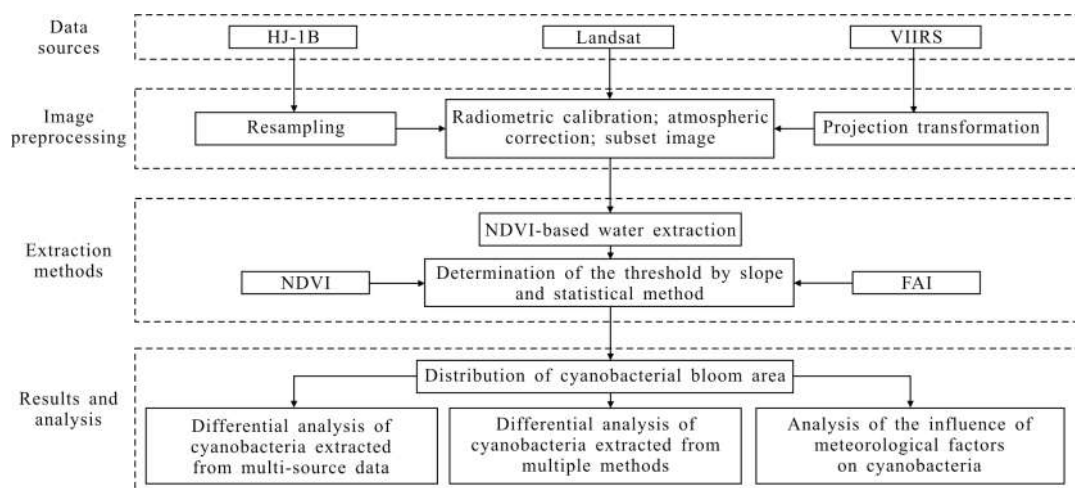


图 2 巢湖蓝藻水华提取流程

Fig.2 Flow chart of cyanobacterial area extraction in Chaohu Lake

2.2 巢湖水体提取

巢湖水体面积的准确提取是进行水华爆发状况遥感监测的基础<sup>[17]</sup>。前人研究表明, NDWI(Normalized Difference Water Index) 和 MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) 水体指数在遥感监测水体方面具有优势<sup>[18-19]</sup>。其中, NDWI 是基于绿波段与近红外波段归一化比值构建的水体指数<sup>[20-21]</sup>, 该指数能够显著增强水体信号便于提取水体的分布区域, 论文中用于巢湖水体面积提取。其表达式如下:

$$NDWI = \frac{R_{Green} - R_{NIR}}{R_{Green} + R_{NIR}} \quad (1)$$

式中:  $R_{Green}$  为绿光波段的反射率;  $R_{NIR}$  是近红外波段的反射率; NDWI 值的范围在 [-1~1] 之间, 水体的 NDWI 取值通常大于 0。

在使用 NDWI 指数进行水体提取时, 根据水体在影像中的分布选择合适的阈值将水体与其他地物区分开来, 由水体光谱曲线可知, 水体的反射主要集中在蓝绿光波段, 而在近红外波段的反射率特别低, 根据该光谱特征利用 NDWI 指数增强水体信息, 抑

制其他地物信息<sup>[22]</sup>。文中分别使用 Landsat TM/OLI 和 HJ-1B CCD 影像计算 NDWI 值,对得到的 NDWI 影像使用统计数据直方图的方法决定提取的阈值,将提取的水体与基于原始影像的判读结果进行对比,以提取水体准确率较高为原则,确定每景影像中水体阈值。经计算,不同时相和不同数据源下 NDWI 阈值不完全相同,在 0~0.08 间变化。

### 2.3 巢湖蓝藻水华识别

#### 2.3.1 归一化植被指数

归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 常被用来估测植被覆盖度和植被生长情况<sup>[23]</sup>,由于蓝藻水华的光谱特征与植被相似,尤其是在近红外波段具有和植被类似的“陡坡效应”,论文利用 NDVI 提取蓝藻水华的面积。NDVI 被定义为红光和近红外两波段的归一化比值<sup>[24]</sup>,其表达式如下:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (2)$$

式中:  $R_{NIR}$  为近红外波段的反射率;  $R_{RED}$  为红光波段的反射率。NDVI 值的范围在 [-1~1] 之间。

NDVI 比值处理可以部分消除与太阳高度角、卫星观测角、地形、云/阴影和大气条件有关的辐照度条件变化等的影响<sup>[24]</sup>。由植被的光谱曲线可以知道,植被在红光波段具有很强的吸收特性,在近红外波段具有很强的反射特性,因此 NDVI 值趋于正值;而水体刚好相反,NDVI 值趋于负值,裸露的土地接近于 0<sup>[25]</sup>。论文采用坡度与统计分析的方法确定蓝藻水华阈值<sup>[25]</sup>,首先使用  $NDVI < 0$  的阈值排除水体及水体中的悬浮物(泥沙等)像元,  $NDVI > 0.2$  排除高浓度的蓝藻水华,即可排除纯净水体(包括其中的悬浮物)及已确定为蓝藻的像元的影响,对  $0 < NDVI < 0.2$  以外的数据进行掩膜处理,得到掩膜的影像;其次,利用 ARCGIS 软件中的 Slope 工具对处理后的数据进行坡度分析得出坡度图,根据坡度图可知蓝藻水华与清洁水体分界处坡度较大;最后将坡度图与掩膜后的图像进行波段运算并将结果做成直方图,由直方图可知上述波段运算后的数据基本分布于蓝藻水华与纯净水体的分界线附近,取最大坡度值对应像元的 NDVI 值作为单幅影像蓝藻水华提取的阈值,对所有影像的阈值进行平均化处理,最终得到的结果大约是 0.12,因此将  $NDVI > 0.12$  的区域判读为蓝

藻水华爆发区。

#### 2.3.2 浮游藻类指数

浮游藻类指数 FAI 是由胡传民于 2009 年提出的<sup>[26]</sup>。由水体的光谱曲线发现水体在红光波段、近红外波段以及短波红外波段具有强烈的吸收特性。漂浮在水体表面的蓝藻水华在近红外波段比在其他波段反射率高,这就使蓝藻水华很容易与周围水域区分,因此浮游藻类指数可用于蓝藻水华的提取,它的表达式如下<sup>[27]</sup>:

$$FAI = R_{rc,NIR} - R_{rc,NIR}' \quad (3)$$

$R_{rc,NIR}' = R_{rc,NIR} + (R_{rc,SWIR} - R_{rc,RED}) \times (\lambda_{NIR} - \lambda_{RED}) / (\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED})$  (4)  
式中:  $R_{rc,RED}$ 、 $R_{rc,NIR}$ 、 $R_{rc,SWIR}$  分别为红光、近红、短波红外波段的反射率;  $\lambda_{RED}$ 、 $\lambda_{NIR}$ 、 $\lambda_{SWIR}$  分别为红光、近红外、短波红外波段的中心波长;  $R_{rc,NIR}'$  为插值反射率,即在红光波段和短波红外波段之间采用线性内插得到近红外波段处的反射率信息。

FAI 指数使用红光波段、近红外波段以及短波红外波段组合进行计算,通过减除基准线,是一种简单且快速的大气校正方法。FAI 值不易受到环境变化的影响,可以有效地监测蓝藻水华<sup>[26]</sup>。

识别蓝藻水华较为关键的步骤就是确定分割的阈值。传统的目视解译方法主观性强,阈值具有不确定性。蓝藻水华与水体的 FAI 值相差明显,分界区域坡度差异较大,因此对 FAI 也采用坡度与统计分析的方法确定蓝藻水华阈值。首先使用  $FAI < -0.01$  和  $FAI > 0.02$  的阈值分别排除纯净水体(包括其中的悬浮物)和已确定为蓝藻的像元的影响;其次利用坡度图和直方图得到单幅影像蓝藻水华提取的阈值,最后对所有影像的阈值进行平均化处理,最终得到的结果约为 -0.002,将  $FAI > -0.002$  的区域判读为蓝藻水华爆发区。采用坡度与统计分析的方法确定阈值,大大降低了人工确定阈值的主观性和不准确性,使识别结果变得更加客观和准确。

## 3 结果与分析

### 3.1 巢湖蓝藻水华面积提取结果分析

#### 3.1.1 基于不同卫星传感器的巢湖蓝藻水华面积提取结果比较

利用不同遥感数据源的 22 景影像计算 NDVI 和 FAI 值提取巢湖蓝藻爆发面积,结果见表 2。

表 2 不同卫星影像提取巢湖蓝藻爆发面积的结果

Tab.2 Cyanobacterial area extraction results of Chaohu Lake for different satellite images

Date	Landsat TM/OLI area/km <sup>2</sup>		HJ-1B CCD/IRS area/km <sup>2</sup>		NPP-VIIRS area/km <sup>2</sup>	
	NDVI	FAI	NDVI	FAI	NDVI	FAI
2010/08/10	127.27	126.86	127.48	126.82	-	-
2014/05/01	42.21	39.36	41.15	39.87	37.69	36.28
2014/05/20	-	-	14.97	12.84	9.70	8.58
2014/06/05	-	-	68.93	68.88	65.81	64.97
2014/07/10	-	-	183.49	182.84	173.11	168.89
2014/07/20	173.74	135.41	-	-	121.36	121.08
2014/08/05	78.06	75.43	-	-	74.25	73.27
2014/09/07	-	-	106.54	104.17	105.75	103.22
2014/10/05	-	-	275.38	293.28	248.63	247.36
2014/10/24	23.08	24.05	24.15	21.12	19.97	18.98

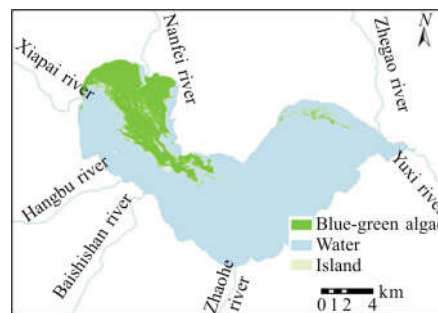
备注：“-”为无数据或数据不可用。

由表 2 可看出, Landsat 和 HJ-1B 影像符合同时具有可用数据(较少云雾或成像质量好)条件的只有三个时相,分别为 2010 年 8 月 10 日、2014 年 5 月 1 日和 2014 年 10 月 24 日。其中,2010 年 8 月 10 日的蓝藻水华爆发面积最大,占全湖的 17%左右。其次,2010 年 8 月 10 日两种数据源下 NDVI 和 FAI 方法提取蓝藻分布区的重叠度可达 89%以上;2014 年 5 月 1 日和 10 月 24 日两种不同数据源下两种方法提取结果的重叠度仅为 65%,上述结果可为不同时相、环境因素(云雾)干扰下的比较研究提供数据支撑。

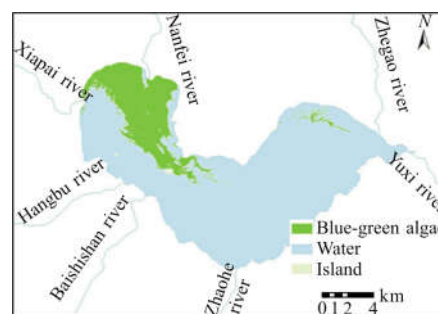
图 3~5 分别为 Landsat 和 HJ-1B 卫星数据在三个时相下计算 NDVI 指数和 FAI 指数提取的巢湖蓝藻水华分布结果图。每年 5 月、10 月分别是蓝藻水华爆发的初期和末期,该时期蓝藻水华爆发面积都较小;8 月是蓝藻水华爆发面积最大的时候,该时段蓝藻水华的浓度相对较高。图 3~5 对蓝藻水华提取结果和实际情况相符。此外,2010 年 8 月的 Landsat 和 HJ-1B 卫星数据的提取结果差异最小。

对比图 3~5 发现,相比 HJ-1B 卫星数据, Landsat-OLI 影像能够更好地捕捉到低浓度的水华分布区域,对蓝藻爆发区域的边界的刻画更为清晰,因此提取效果更好;HJ-1B 影像整体色彩稍显暗淡,仅能够识别粗糙的蓝藻纹理,且边界模糊,因此提取

结果不够理想。综合分析上述差异,可能是因为 HJ-1B 影像的辐射定标精度、成像质量等方面低于 Landsat 影像,影响到 HJ-1B 卫星提取蓝藻水华面积的精度。

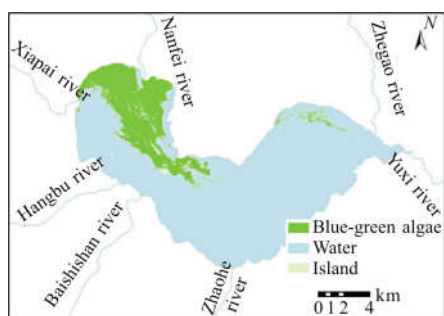


(a) Landsat-TM 影像使用 NDVI 提取蓝藻水华分布图  
(a) NDVI<sub>TM</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



(b) HJ-1B 影像使用 NDVI 提取蓝藻水华分布图  
(b) NDVI<sub>HJ-1B</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms

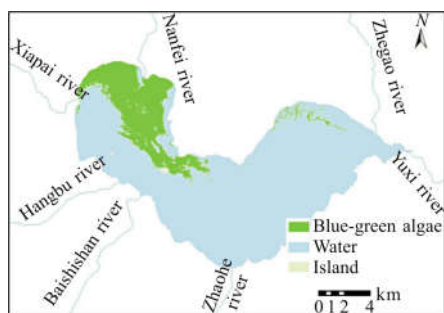




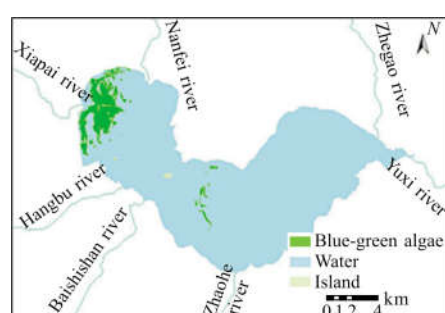
(c) Landsat-TM 影像使用 FAI 提取蓝藻水华分布图  
 (c) FAI<sub>TM</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



(c) Landsat-OLI 影像使用 NDVI 提取蓝藻水华分布图  
 (c) FAI<sub>OLI</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



(d) HJ-1B 影像使用 FAI 提取蓝藻水华分布图  
 (d) FAI<sub>HJ-1B</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



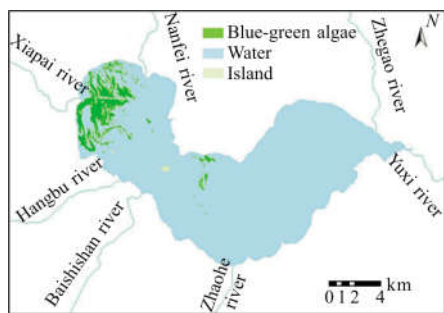
(d) HJ-1B 影像使用 NDVI 提取蓝藻水华分布图  
 (d) FAI<sub>HJ-1B</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms

图 3 2010 年 8 月 10 日蓝藻水华分布图

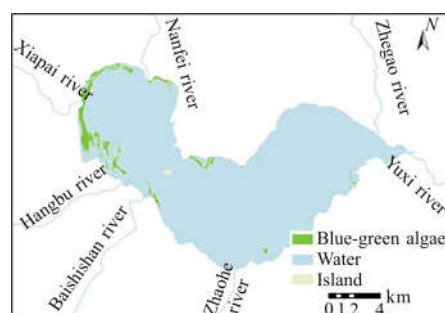
图 4 2014 年 5 月 1 日蓝藻水华分布图

Fig.3 Extraction results of cyanobacterial blooms on August 10th, 2010

Fig.4 Extraction results of cyanobacterial blooms on May 1st, 2014



(a) Landsat-OLI 影像使用 NDVI 提取蓝藻水华分布图  
 (a) NDVI<sub>OLI</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



(a) Landsat-OLI 影像使用 FAI 提取蓝藻水华分布图  
 (a) FAI<sub>OLI</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



(b) HJ-1B 影像使用 NDVI 提取蓝藻水华分布图  
 (b) NDVI<sub>HJ-1B</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms

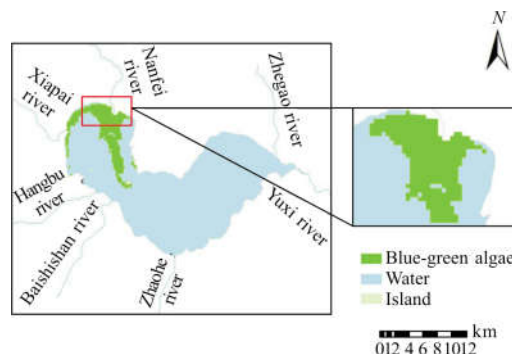


(b) HJ-1B 影像使用 FAI 提取蓝藻水华分布图  
 (b) FAI<sub>HJ-1B</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



(c) Landsat-OLI 影像使用 FAI 提取蓝藻水华分布图

(c) FAI<sub>OLI</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



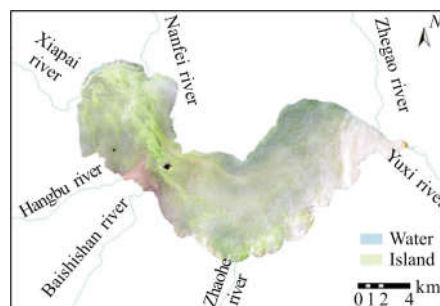
(b) NPP-VIIRS 影像使用 FAI 提取蓝藻水华局部放大图

(b) Local magnification of cyanobacterial blooms was extracted from NPP-VIIRS image using FAI



(d) HJ-1B 影像使用 FAI 提取蓝藻水华分布图

(d) FAI<sub>HJ-1B</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms

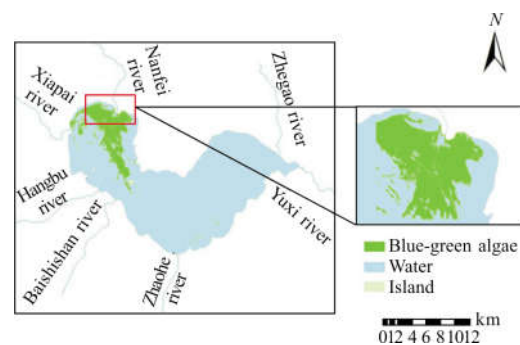


(c) Landsat-OLI 影像真彩色合成

(c) Color composition image of Landsat-OLI

图 5 2014 年 10 月 24 日蓝藻水华分布图

Fig.5 Extraction results of cyanobacterial blooms on October 24th, 2014



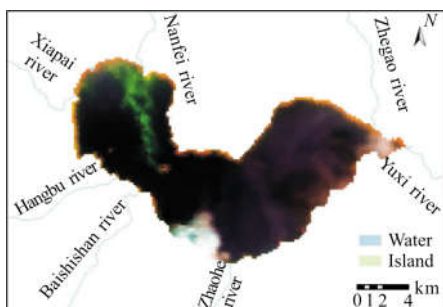
(d) Landsat-OLI 影像使用 FAI 提取蓝藻水华局部放大图

(d) Local magnification of cyanobacterial blooms was extracted from Landsat-OLI image using FAI

图 6 2014 年 8 月 5 日蓝藻水华分布局部对比图

Fig.6 Local comparison of cyanobacterial blooms distribution on August 5th, 2014

图6(a)、(c)分别是 VIIRS 和 Landsat 数据原始影像, (b)、(d)分别是 VIIRS 和 Landsat 影像的蓝藻水华局部区域提取结果。由图 6(c)可看出, 巢湖湖区上空有一定量的薄云, 再结合表 2 数据, NDVI 和 FAI 方法提取巢湖蓝藻面积分别为 78.06 km<sup>2</sup> 和 75.43 km<sup>2</sup>, 说明薄云对蓝藻水华提取有一定影响。其次, 对比图 6(b)和图 6(d), 并结合表 2 可知, FAI 方法提取巢湖蓝藻面积分别为 75.43 km<sup>2</sup> 和 73.27 km<sup>2</sup>, VIIRS 影像提取的蓝藻水华像元数(面积)较少, 存在一些漏分的情况, 但是与 Landsat 卫星提取得结果差距不大。



(a) NPP-VIIRS 影像真彩色合成

(a) Color composition image of NPP-VIIRS

综上, 论文得出 HJ-1B、VIIRS 影像提取蓝藻水华的精度低于 Landsat 影像, 但 HJ-1B 具有高空间分辨率、短回访周期的数据优势; VIIRS 影像数据具有高覆盖频率和丰富的波段优势, 因此, 后续巢湖蓝藻水华提取研究, 可以考虑以 Landsat 和 HJ-1B 影



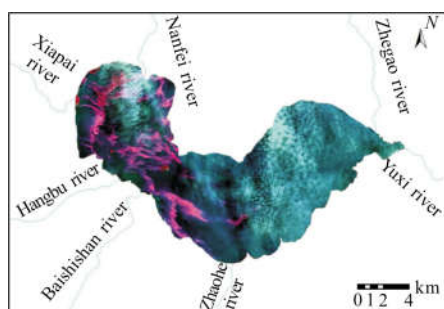
像作为主要数据源,VIIRS 数据作为补充,发挥各自数据优势,实现高时空分辨率、点面结合的蓝藻水华爆发情况遥感监测。

### 3.1.2 薄云对于不同方法提取蓝藻水华的影响分析

图 7(a)是 2014 年 7 月 20 日 Landsat 原始影像标准假彩色(NIR/R/G)显示,图 7(b)和图 7(c)分别是 NDVI 和 FAI 指数提取巢湖蓝藻水华分布图。由图 7 可知,在有薄云的情况下,影像中的蓝藻颜色相

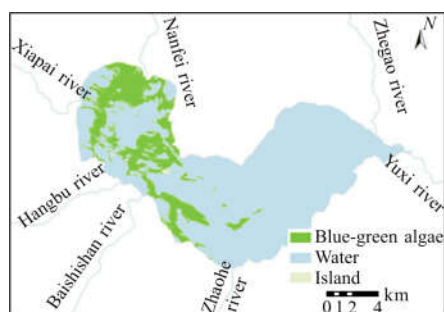
对较暗(图 7(a))。由于薄云的存在使得正常水体与蓝藻水面的 NDVI 值差异变小,造成部分薄云区域误判为蓝藻水面。相反的,FAI 方法提取蓝藻水华受薄云的影响较小。结合表 2 数据,NDVI 和 FAI 指数提取巢湖蓝藻水华面积的差异约为 39 km<sup>2</sup>,由此可说明,巢湖蓝藻水华提取精度受方法影响较大,因此采用能够有效降低薄云影响的方法显得十分必要。

图 8(a)是 2014 年 10 月 5 日 HJ-1B 原始影像标准假彩色显示,图 8(b)和图 8(c)分别是 NDVI 及 FAI



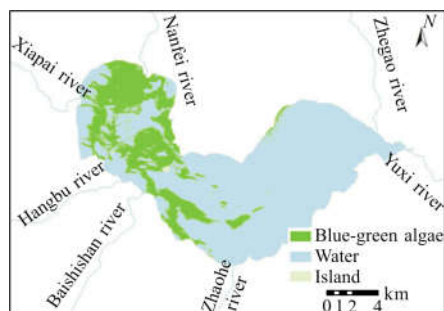
(a) Landsat-OLI 影像标准假彩色合成

(a) Color composition image of Landsat-OLI



(b) Landsat-OLI 影像使用 FAI 提取蓝藻水华分布图

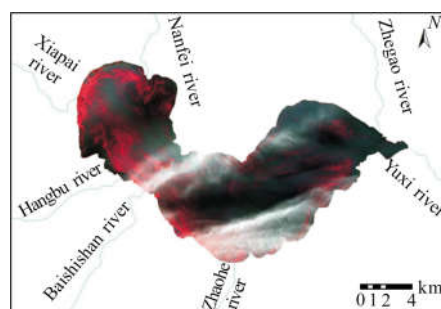
(b) FAI<sub>OLI</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



(c) Landsat-OLI 影像使用 NDVI 提取蓝藻水华分布图

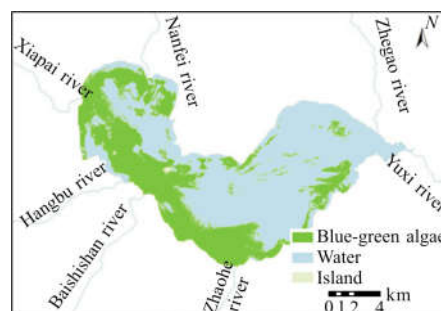
(c) NDVI<sub>OLI</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms

图 7 2014 年 7 月 20 日不同方法提取蓝藻水华效果对比图  
Fig.7 Comparison of cyanobacterial blooms area extraction for different methods on July 20th, 2014



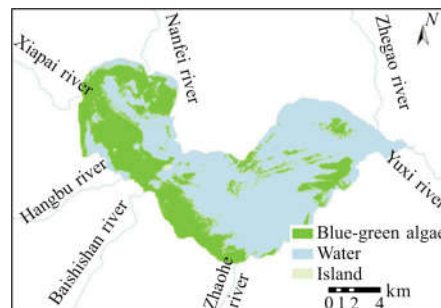
(a) Landsat-OLI 影像标准假彩色合成

(a) Color composition image of Landsat-OLI



(b) HJ-1B 影像使用 FAI 提取蓝藻水华分布图

(b) FAI<sub>HJ-1B</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms



(c) HJ-1B 影像使用 NDVI 提取蓝藻水华分布图

(c) NDVI<sub>HJ-1B</sub>-based distribution map of cyanobacterial blooms

图 8 2014 年 10 月 5 日不同方法提取蓝藻水华效果对比图  
Fig.8 Comparison of cyanobacterial blooms area extraction for different methods on October 5th, 2014

方法提取巢湖蓝藻水华的分布图。从图 8(a)中可看出,巢湖湖区中、东部水体受薄云影响较重,结合图 8(b)、图 8(c)和表 2,FAI 方法提取巢湖蓝藻面积为 293.28 km<sup>2</sup>,NDVI 提取的面积为 275.38 km<sup>2</sup>,两者相差 17.9 km<sup>2</sup>。相对来讲,FAI 方法受薄云影响较小,可以更好地提取薄云覆盖下的蓝藻水华。

结合图 7 和图 8 可以看出,相比 NDVI 方法提取的蓝藻水华结果,FAI 方法与原始影像目视直观判断的结果较一致,无论是蓝藻水华爆发的空间分布还是爆发的程度都较符合。造成上述差异原因可能是,NDVI 方法受环境和观测条件的影响较大,而 FAI 方法对太阳/观测几何不敏感,使用的是受天气条件影响相对较小的短波红外波段,该波段对云雾的穿透能力更强,并且使用基线相减的方法消除部分的大气影响。所以对于均匀的水体而言,FAI 方法更容易探测到水中的蓝藻水华。

### 3.2 巢湖蓝藻水华爆发的气象因素分析

蓝藻水华的形成一般是由蓝藻本身的生理特点以及气象条件、营养盐、其他生物等诸多环境因素所引发的<sup>[20]</sup>。其中,气象条件对蓝藻生长及水华形成产生的影响不可忽略,气象因子的变化是对蓝藻水华爆发预警预测的关键因素。论文将获取的合肥站 2014 年 4~11 月日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数和日降水量,与蓝藻水华爆发面积之间的关系进行统计分析,结果见图 9。

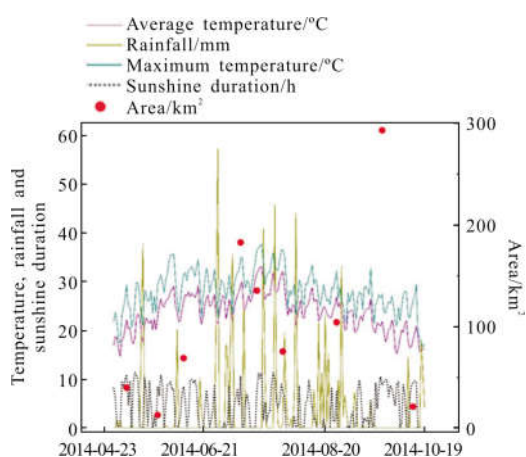


图 9 气象因素与巢湖蓝藻水华爆发面积关系图

Fig.9 Relationship between meteorological factors and cyanobacterial blooms area in Chaohu Lake

#### 3.2.1 气温因素对巢湖蓝藻水华爆发的影响分析

由图 9 可知,2014 年 5 月 1 日和 7 月 20 日的平

均气温分别为 23 ℃和 30.8 ℃,蓝藻水华爆发面积分别为 39.87 km<sup>2</sup>和 135.41 km<sup>2</sup>,由此可知,程度较轻的蓝藻水华爆发当天的平均气温明显较低,低温在一定程度上不利于蓝藻的增殖从而降低蓝藻水华爆发的程度。进一步的,气温的累积效果对蓝藻水华爆发程度有一定的影响,连续几天持续高温(气温在 20 ℃以上)在一定程度上加重了蓝藻水华的爆发程度。由上述可得出,若气温较低,蓝藻水华当日爆发概率较小,爆发程度也较轻,且气温对蓝藻水华爆发的影响存在一定的累积效应。但当受到其他气象因素(降水、风速)干扰时,也存在和上述规律相悖的情况,因此气温在蓝藻水华爆发事件中发挥的作用有限,导致二者的趋势不能完全一致,而且,蓝藻水华爆发同时受到多种气象因素共同影响,需要综合考虑其他因素的干扰。

#### 3.2.2 日照因素对巢湖蓝藻水华爆发的影响分析

由图 9 分析可得,在有足够日照时数的情况下,巢湖湖区均有蓝藻水华爆发的情况,且日照时数持续增长对蓝藻水华的爆发是非常有利的。因此日照时数与蓝藻水华爆发有一定的关联。一般而言,日照时数较高且每日呈持续增长的状态,蓝藻数量就越多,蓝藻水华爆发的概率也就越大,爆发程度也越严重。该现象主要是通过日照时数对蓝藻光合作用的影响进而对蓝藻水华的爆发产生影响。

#### 3.2.3 降水因素对巢湖蓝藻水华爆发的影响分析

结合图 9 和表 3 可知,夏季降水量明显多于秋季降水量,夏季蓝藻水华爆发面积小于秋季蓝藻水华爆发面积;2014 年 7 月 20 日和 8 月 5 日的降水量分别为 0 mm 和 23.3 mm,水华爆发面积分别为

表 3 巢湖 2014 年平均日降水量统计

Tab.3 Average daily rainfall statistics of Chaohu Lake in 2014

Seasons	Rainfall/mm	Notes
Summer (6-8 Month)	57.3	Max
	0	Min
	5.4	Ave
Autumn (9-11 Month)	33.3	Max
	0	Min
	2.7	Ave

135.41 km<sup>2</sup> 和 75.43 km<sup>2</sup>, 可推测出降水对巢湖蓝藻水华具有一定的抑制作用。这主要是因为降水会稀释湖水中聚集的蓝藻,且降水天气光照较少,使得蓝藻面积明显减少。因此,可以推断降水频率和降水量也是蓝藻爆发的重要影响因素之一。

## 4 结论

论文采用 Landsat、HJ-CCD 数据,并且以 NPP 数据为辅助,通过 NDVI 和 FAI 指数方法并结合坡度与统计分析法,提取 2014 年(2010 年 8 月数据作为对比数据)巢湖蓝藻水华爆发区域并比较方法之间差异。研究发现多源卫星影像数据综合使用可以兼顾到空间分辨率、时间分辨率以及宽覆盖度;与传统 NDVI 方法相比,FAI 方法可以较好地提取巢湖蓝藻水华爆发的区域;此外,气温和日照时间的增加能够加剧蓝藻的爆发程度,而降水对蓝藻水华爆发能够起到一定的抑制作用。

综上,采用遥感手段能够监测巢湖蓝藻水华的爆发区域,得到的结果较为准确和客观,研究结果可以为巢湖蓝藻水华预警提供实时数据,也可为开发融合多源卫星遥感数据的巢湖监测系统提供技术支持。

## 参考文献:

- [1] Ahn Y H, Shanmugam P. Derivation and analysis of the fluorescence algorithms to estimate phytoplankton pigment concentrations in optically complex coastal waters [J]. *Journal of Optics A Pure & Applied Optics*, 2007, 9(4): 352.
- [2] Liu E, Shen J. A comparative study of metal pollution and potential eco-risk in the sediment of Chaohu Lake (China) based on total concentration and chemical speciation [J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2014, 21(12): 7285–7295.
- [3] Wu P, Shen H, Cai N, et al. Spatiotemporal analysis of water area annual variations using a Landsat time series: a case study of nine plateau lakes in Yunnan province, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(24): 5826–5842.
- [4] Xue Yu, Zhao Yunlin, Zhang Wei, et al. Characteristics of spatial and temporal distribution of water blooms outbreak in dongting lake based on MODIS data [J]. *Wetland Science*, 2015, 13(4): 387–392. (in Chinese)
- [5] Zhang Y, Ma R, Duan H, 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 & Remote Sensing*, 2014, 7(7): 3060–3068.
- [6] Chen Chubo, Zhou Baotong, Tian Yongzhong, et al. Application of environmental satellite HJ1A/1B-CCD data for cyanobacteria dynamic monitoring in Chaohu Lake [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(1): 200–204. (in Chinese).
- [7] Gower J, Hu C, Borstad G, et al. Ocean color satellites show extensive lines of floating sargassum in the gulf of mexico [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3619–3625.
- [8] Xu Jingping, Zhang Bai, Li Fang, et al. Detecting modes of cyanobacteria bloom using MODIS data in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(2): 191–195. (in Chinese)
- [9] Duan Hongtao, Zhang Shouxuan, Zhang Yuanzhi. Cyanobacteria bloom monitoring with remote sensing in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(2): 145–152. (in Chinese)
- [10] Xie Huaming, Fan Fakang, Shu Ying, et al. Temporal and spatial distribution study of algal blooms in Chaohu Lake based on remoting sensing [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(21): 12825–12827. (in Chinese)
- [11] Ying Liu. Research on optimization of monitoring and early-warning for cyanobacterial bloom in Chaohu Lake [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] Li Yao, Zhang Lifu, Huang Changping, et al. Monitor of cyanobacteria bloom in Lake Taihu from 2001 to 2013 based on MODIS temporal spectral data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(5): 1406–1411. (in Chinese)
- [13] Zhang Jiao, Chen Liqiong, Chen Xiaoling. Monitoring the cyanobacterial blooms based on remote sensing in Lake Erhai by FAI [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, 28(4): 718–725. (in Chinese)
- [14] Wang M, Hu C. Mapping and quantifying Sargassum, distribution and coverage in the Central West Atlantic using MODIS observations [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 350–367.
- [15] Chen X, Yang X, Dong X, et al. Environmental changes in Chaohu Lake (southeast, China) since the mid-20th century: The interactive impacts of nutrients, hydrology and climate [J]. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2013, 43(1): 10–17.
- [16] Qin N, He W, Kong X Z, et al. Atmospheric partitioning

- and the air-water exchange of polycyclic aromatic hydrocarbons in a large shallow Chinese lake (Lake Chaohu) [J]. *Chemosphere*, 2013, 93(9): 1685–1693.
- [17] Boak E H, Turner I L. Shoreline definition and detection: a review[J]. *Journal of Coastal Research*, 2005, 21(4): 688–703.
- [18] Yashon O Ouma, Tateishi R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM +data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(15): 3153–3181.
- [19] Qiao C, Sheng Y, Shen Z, et al. An adaptive water extraction method from remote sensing image based on NDWI [J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2012, 40(3): 421–433.
- [20] Li W, Gong P. Continuous monitoring of coastline dynamics in western Florida with a 30-year time series of Landsat imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 196–209.
- [21] Mcfeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425–1432.
- [22] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1–2): 195–213.
- [23] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(1–2): 195–213.
- [24] Liu H Q, Huete A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457–465.
- [25] Wang D, Morton D, Masek J, et al. Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119(3): 55–61.
- [26] Zhang Y, Ma R, Duan H, 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 & Remote Sensing*, 2014, 7(7): 3060–3068.
- [27] Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118–2129.
- [28] Yu K, Hu C. Changes in vegetative coverage of the Hongze Lake national wetland nature reserve: a decade-long assessment using MODIS medium-resolution data[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, 7(1):3589.
- [29] Wang Chenglin, Huang Juan, Qian Xin. Spatio-temporal characteristics of wind filed under high temperature and gentle breeze in Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(1): 122–128. (in Chinese)