

应用 MODIS 监测太湖蓝藻水华时空分布特征

赵家虎^{1,2}, 高俊峰^{1*}, 刘聚涛³, 许妍^{1,2}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029)

摘要: 利用波段比值算法对经几何校正和大气校正后的 MODIS/Terra L-1B 数据进行处理, 获取了 2004~2010 年天气晴好条件下太湖及各分湖区蓝藻水华的面积与时空分布, 并在此基础上对太湖蓝藻水华的时空变化特征进行了分析。结果表明: 2004~2010 年太湖地区共暴发蓝藻水华 539 次; 2004~2007 年太湖蓝藻水华首次暴发时间逐年提前, 暴发频次逐年增加, 2007~2010 年太湖蓝藻水华首次暴发时间逐年推迟, 暴发频次逐年减少; 2004~2010 年 3~8 月份蓝藻水华暴发次数有增加的趋势, 8~12 月份蓝藻水华暴发次数有减小的趋势; 2004~2010 年太湖蓝藻水华主要发生在北部和西部湖区, 东部和南部湖区发生次数较少, 各分湖区蓝藻水华暴发概率大小的顺序为: 西部沿岸 > 大太湖 > 梅梁湾 > 南部沿岸 > 竺山湖 > 贡湖。

关键词: 太湖; MODIS; 蓝藻水华; 时空分布

中图分类号: X17 文献标识码: A 文章编号: 1004-8227(2011)12-1475-06

太湖是中国第三大淡水湖, 水面面积 2 338.1 km², 湖泊平均水深 1.9 m, 最大水深 2.6 m, 是典型的浅水型湖泊^[1], 在中国东部地区的经济发展中起着举足轻重的作用。近年来, 随着经济的快速发展, 太湖流域生态环境急剧恶化, 特别是水体污染与富营养化日趋严重^[2], 并由此引起的蓝藻水华频繁暴发, 给太湖周边地区的居民生活与经济发展带来了严重影响。因此, 为了快速、准确、高频率地监测太湖水环境质量及蓝藻水华分布范围及其特征, 迫切需要采用各种高新技术手段, 尤其是遥感技术提供技术支持, 依托环境遥感技术, 快速、准确地检测和监测蓝藻水华特征及其时空变化。

中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据由于具有全球免费获取、光谱分辨率高、观测周期短等优势, 使其在水质遥感监测方面的应用受到越来越多的重视。国内外不少学者^[3~9] 利用 MODIS 数据进行了近岸和内陆水质遥感监测方面的研究。马荣华等建立了基于多元卫星遥感影像的太湖蓝藻水华信息提取的普适模式, 获取了 2008 年之前太湖蓝藻水华的面积和空间分布^[10], 刘聚涛等根据 MODIS 影像和实地监测的叶绿素 a 浓度数据, 对 2004~2008 年太

湖不同蓝藻水华类型进行了评估^[11]。本文利用每日 MODIS 影像数据对 2004~2010 年太湖及其各个分湖区 (图 1) 蓝藻水华分布情况进行研究, 从时间和空间上对蓝藻水华暴发进行了特征分析, 宏观上揭示了太湖及各分湖区蓝藻水华的变化特征, 可以更好地了解太湖水域生态环境的时空变化规律, 为太湖水污染的治理和水环境的改善服务。

1 数据与方法

1.1 数据的获取与预处理

本文所用数据为 2004~2010 年, 时间分辨率为 1 d、空间分辨率为 250 m 的 EOS MODIS/Terra L-1B 数据, 选取太湖地区天气晴好条件下的影像进行分析。

MODIS L-1B 是地理数据和科学数据尚未关联的数据, 边缘存在 Bow-tie 现象, 需要进行几何校正^[10]。本文利用 MODIS L-1B 数据中自带的经纬度信息对影像进行几何校正, 投影采用 Geographic Lat/Lon 投影, 校正后的位置精度为 0.5 个像素以内; 并利用 HDF 数据集中的 Offsets、Scales 参数对

收稿日期: 2011-03-22; 修回日期: 2011-05-18

基金项目: 国家“973”项目 (2008CB418106); 科技部科技基础性工作专项 (2006FY110600)

作者简介: 赵家虎 (1983~), 男, 河南省商丘人, 硕士研究生, 主要从事环境遥感信息研究。E-mail: zhaojiahu@yahoo.cn

* 通讯作者 E-mail: gaojunf@niglas.ac.cn

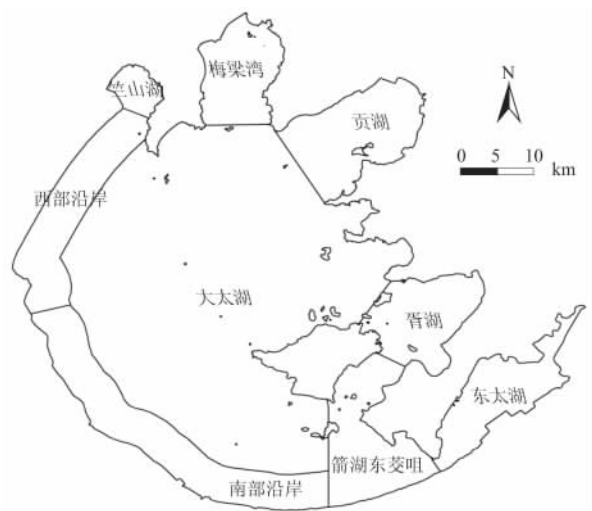


图 1 太湖分区图

Fig. 1 Sketch Map of Different Regions in Taihu Lake

MODIS 影像进行了辐射定标^[12],在此基础上,采用 ENVI 软件提供的 FLASH 模块进行大气矫正^[13]。

1.2 蓝藻水华的提取方法

蓝藻的遥感监测是基于蓝藻的光谱效应。在可

见光波段,蓝藻与水体的反射率光谱特征比较相似;在近红外波段,蓝藻与水体有较大差异,更接近于植被光谱特征^[14]。段洪涛、马荣华等基于蓝藻的这一光谱特性,利用近红外波段与可见光波段的比值 $\text{band2}/\text{band4} > 1$,迅速提取了太湖蓝藻水华^[15]。胡尊英等的研究表明,经过大气矫正且无云层干扰的 MODIS 影像数据,通过 $\text{band2}/\text{band4}$ 所获得的蓝藻水华信息与目视解译的吻合效果较好^[16]。

本文利用 $\text{band2}/\text{band4} > 1$ 的方法来提取太湖及各分湖区的蓝藻水华信息(图 2b),并通过统计蓝藻水华分布区域的像素数来计算蓝藻水华的覆盖面积。由于水体中藻类与大型浮游植物的光谱特征近似,只利用遥感数据很难把它们区分开^[17]。如东太湖区域是沼泽型浅水湖泊,分布有许多大型浮游植物,在遥感影像识别过程中往往会被误认为蓝藻。因此,本文利用太湖分区图把箭湖东茭咀水域、东太湖水域、胥湖水域的绿色信息人工识别为大型浮游植物(图 2c)。

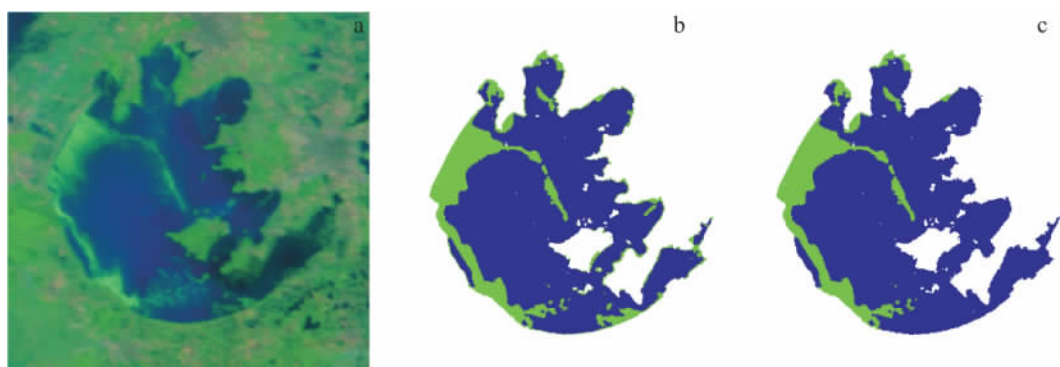


图 2 2008 年 5 月 22 日太湖蓝藻水华分布

Fig. 2 Distribution of Cyanobacteria Bloom in Taihu Lake on May 22, 2008

2 结果与分析

2.1 太湖蓝藻水华的发生的次数与覆盖面积

2004~2010 年,太湖地区共暴发蓝藻水华 539 次,蓝藻水华总面积 7 5678 km²,平均每次发生蓝藻水华面积 140.4 km²,占太湖总面积的 5.94%。

2004~2007 年太湖蓝藻水华年平均面积与最大面积都有逐年增大的趋势,最大面积出现时间有逐年提前的趋势;2007~2009 年太湖蓝藻水华年平均面积与最大面积都有逐年减小的趋势;2010 年太湖蓝藻水华年平均面积和最大面积与 2009 年相比

有所增大,但仍没有达到 2006 和 2007 年的程度;除 2007 年太湖蓝藻水华最大面积出现在 6 月份外,其他年份的蓝藻水华最大面积都出现在 9 月份,说明 9 月份为太湖蓝藻大面积暴发的高潮期(图 3)。

2.2 太湖蓝藻水华的时间分布

2.2.1 蓝藻水华发生年际变化特征

太湖蓝藻水华暴发的初始时间有在 2007 年前逐年提前而在 2007 年后逐年推迟的趋势,从 2004 年的 6 月 11 日逐年提前至 2007 年的 3 月 27 日,而后又逐年推迟至 2010 年的 6 月 6 日(图 4a)。除竺山湖外,其他各个分湖区蓝藻水华暴发的初始时间与太湖整体趋势相同,都在 2007 年之前逐年提前,

而在 2007 年之后逐年推迟(图 4a、4b)。竺山湖除 2005、2006 年外,其他年份蓝藻水华暴发初始时间

的趋势也与太湖整体趋势相同(图 4a)。

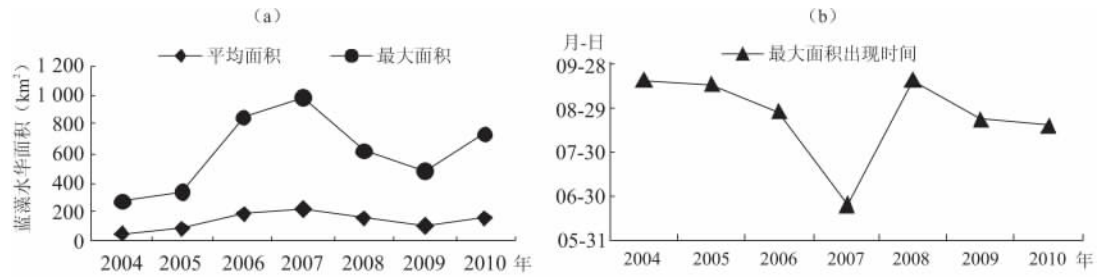


图 3 2004~2010 年太湖蓝藻水华面积特征

Fig. 3 Area Character of Cyanobacteria Bloom in Taihu Lake During 2004~2010

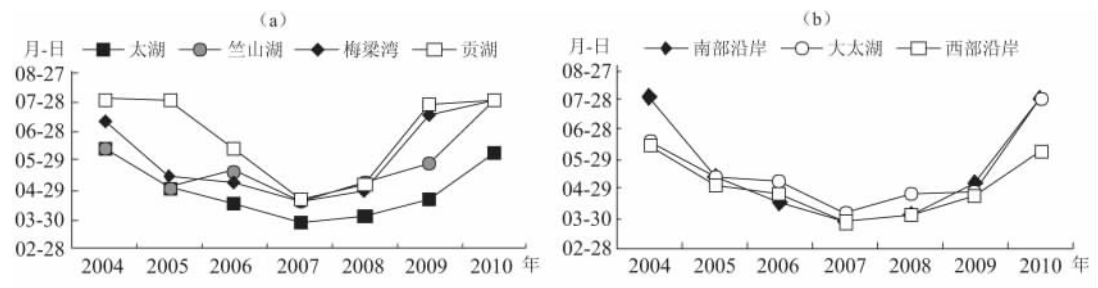


图 4 太湖及各分湖区 2004~2010 年蓝藻水华暴发初始时间

Fig. 4 Initial Time of Cyanobacteria Bloom in Taihu Lake and Its Regions During 2004~2010

太湖蓝藻水华暴发频次也有相同的趋势,从 2004 年的 53 次逐年增加至 2007 年的 112 次,而后又逐年减少至 2010 年的 52 次(表 1)。竺山湖、梅梁湾与西部沿岸蓝藻水华暴发的频次与太湖整体趋势相同,都在 2007 年之前逐年增加,而在 2007 年之后逐年减少(表 1)。贡湖、南部沿岸与大太湖除 2009、2010 年外,其他年份蓝藻水华暴发频次的趋势也与太湖整体趋势相同(表 1)。

份和 7~11 月份,尤其是 8~10 月份。8 月份蓝藻水华暴发次数最多,达 94 次,9、10 月份次之,暴发次数分别达到 74 次与 84 次(图 5)。

表 1 太湖及各分湖区 2004 年~2010 年蓝藻水华暴发频次
Tab. 1 Frequency of Cyanobacteria Bloom in Taihu Lake and Its Regions During 2004~2010

年份	太湖	竺山湖	梅梁湾	贡湖	南部沿岸	大太湖	西部沿岸
2004	53	25	26	3	13	29	37
2005	71	32	34	15	27	47	43
2006	95	44	60	25	59	72	77
2007	112	37	64	47	85	85	93
2008	102	27	63	42	52	74	85
2009	54	20	31	10	29	42	44
2010	52	12	31	23	37	47	41

2.2.2 蓝藻水华发生年内变化特征

2004~2010 年 3~8 月份蓝藻水华暴发次数有增加的趋势,8~12 月份蓝藻水华暴发次数有减小的趋势。总体看来,太湖蓝藻水华主要集中于 5 月

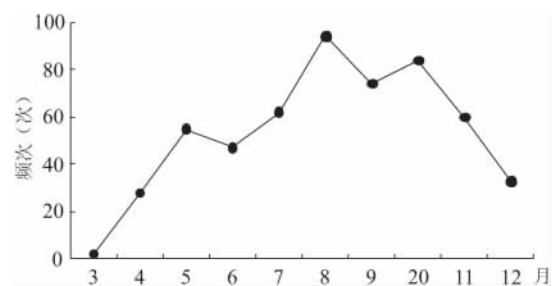


图 5 各月蓝藻水华暴发频次

Fig. 5 Monthly Frequency of Cyanobacteria Bloom

2.3 太湖蓝藻水华的空间分布

卫星监测表明,2004 年至 2010 年太湖蓝藻水华初次暴发地点主要集中在西部沿岸、竺山湖与南部沿岸,其中西部沿岸暴发 6 次,南部沿岸暴发 3 次,竺山湖暴发 2 次。

2004~2006 年西部沿岸、大太湖、竺山湖与梅梁湾蓝藻水华的暴发概率较大,南部沿岸与贡湖的暴发概率相对较小。2007~2010 年西部沿岸、大太湖、南部沿岸与梅梁湾的暴发概率较大,竺山湖与贡

湖的暴发概率较小。2004~2010 年总体上西部沿岸地区蓝藻水华暴发概率最大,高达 78.85%,大太湖、南部沿岸与梅梁湾的暴发概率较高,而竺山湖与贡湖的暴发概率较小。近几年,竺山湖蓝藻水华暴发的概率有减小的趋势,而西部沿岸、南部沿蓝藻水华暴发的概率有增大的趋势(图 6)。

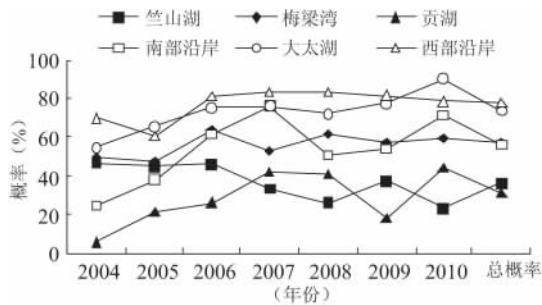


图 6 太湖各分湖区 2004~2010 年蓝藻水华暴发概率
Fig. 6 Probability of Cyanobacteria Bloom in Taihu Lake and Its Regions During 2004~2010

总体看来,2004~2010 年太湖蓝藻水华主要发生在北部和西部湖区,东部和南部湖区发生次数较少,而在东南部的胥湖、箭湖东茭咀和东太湖尚无发现大面积的蓝藻水华。

3 讨论

经过大气矫正且无云层干扰的 MODIS 影像数据,通过近红外波段 2 与可见光波段 4 的比值所获得的蓝藻水华信息与目视解译的吻合效果较好^[16],能够较准确的提取出蓝藻水体中蓝藻水华信息。虽然 MODIS/Terra 卫星的时间分辨率为 1 d,但影像质量受卫星过境时刻的天气影响,会丢失部分分布有蓝藻水华的信息,形成蓝藻水华时空分布信息的“卫星遥感盲区”,因此在某段时间内,有些受云干扰严重的 MODIS 影像虽然不能用来提取蓝藻水华信息,但实际上蓝藻水华可能存在。

2004~2010 年 3~12 月太湖地区的 MODIS 遥感影像中,共有 881 幅被云层覆盖各月被云层覆盖的遥感影像幅数如表 2 所示:

通过表 2 可以看出,各月被云层覆盖的幅数中,6 月份最多,达 115 幅,8 月份最少,只有 64 幅,其他月份被云层覆盖的幅数相近。主要原因可能是 6 月份太湖地区受季风影响,降水较多,8 月份太湖地区被副热带高压控制,降水较少。

表 2 各月被云层覆盖的 MODIS 遥感影像幅数

Tab. 2 Monthly Members of Cloud Covered MODIS Image

月份(月)	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
幅数(幅)	91	78	97	115	94	64	97	74	90	81

由于缺少 2004~2010 年长时间序列的实测数据,无法确定被云层覆盖的遥感影像中哪些影像分布有蓝藻水华信息,所以数据缺失所导致的不确定性还不能精确计算,只能粗略利用下列公式计算:

不确定性 = 被覆盖的遥感影像幅数/总遥感影像幅数 $\times 100\% = 41.13\%$

这一计算结果说明在利用遥感数据监测长时间序列蓝藻水华的过程中由于数据缺失会使监测结果出现较大的不确定性。

2007 年太湖蓝藻水华初始暴发时间最早,暴发次数最多,蓝藻水华的平均面积与最大面积都最大,且最大面积暴发时间在 6 月份,这在一定程度上说明了 2007 年是近几年发生蓝藻水华灾害最严重的一年。造成这一结果的一个重要原因是气象因素。有关监测表明,2007 年春季太湖气温异常偏高,4 月 25 日以后,太湖水温一直维持在 20℃ 以上,正适合藻类的大量生长和繁殖^[18]。同时,由于 2007 年春季太湖地区降水偏少,使太湖水位持续偏低,水体富营养化程度更为严重,更加有利于蓝藻水华的暴发。2009 年与 2010 年太湖蓝藻水华暴发次数明显减少,与 2007 年 5 月蓝藻水华暴发后,政府采取一定的措施^[19]来减少入湖的营养物质有一定的关系。

4 月份藻类水华处于复苏阶段^[20],湖水温度相对较低,蓝藻水华暴发次数较少。5 月份达到第一个高峰期,是因为在这段时间里有适合于蓝藻水华暴发的气候和环境条件。受季风影响,6 月份太湖地区多阴雨天气,降水量较大,导致蓝藻水华暴发次数有所减少。8 月份太湖地区受副热带高压控制,出现伏旱天气,温度较高、降水较少,导致 8~10 月出现了蓝藻水华的第 2 个暴发高峰期。11 月份开始,蓝藻处于衰亡阶段^[19],蓝藻逐渐死亡和下沉,并且气温降低,从而导致蓝藻水华次数较少。

太湖蓝藻水华主要发生在北部和西部湖区,这主要是由于西部和北部湖区分布有众多入湖河流,入湖河流带来了大量的营养物质,导致该湖区水体富营养化较为严重。另外,由于太湖地区夏季东南风居多,使蓝藻水华向下风向的西部和北部湖区聚集。

图 6 所示大太湖地区蓝藻水华的暴发概率也较大,主要是因为大太湖为太湖最大分湖区(图 1),靠近竺山湖、梅梁湾、西部沿岸和南部沿岸的地区容易暴发蓝藻水华,而远离上述地区的湖心区则较少暴发蓝藻水华。

4 结论

(1)2004~2010 年,太湖地区共暴发蓝藻水华 539 次,蓝藻水华总面积 75 678 km²,平均每次发生蓝藻水华面积 140.4 km²,占太湖总面积的 5.94%。

(2)年际变化上,2004~2007 年太湖蓝藻水华首次暴发时间逐年提前,2007~2010 年太湖蓝藻水华首次暴发时间逐年推迟,各分湖区蓝藻水华首次暴发时间与太湖有相似的趋势;2004~2007 年太湖蓝藻暴发频次逐年增加,2007~2010 年太湖蓝藻水华暴发频次逐年减少。年内变化上,3~8 月蓝藻水华暴发次数有增加的趋势,8~12 月蓝藻水华暴发次数有减小的趋势。

(3)空间上,太湖蓝藻水华主要发生在北部和西部湖区,东部和南部湖区发生次数较少,而在东南部的胥湖、箭湖东茭咀和东太湖尚未发现大面积蓝藻水华。各分湖区蓝藻水华发生概率大小的顺序为:西部沿岸>大太湖>梅梁湾>南部沿岸>竺山湖>贡湖。

参考文献:

- [1] 罗淑葱,秦伯强,朱广伟.太湖流域上游降水特征分析[J].地理科学,2004,24(4):472~476.
- [2] 秦伯强,胡维平.太湖水环境演过程与机理[M].北京:科学出版社,2004.
- [3] RICHARD L M, BRENT A M. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment 2009,93(1-2): 259~266.
- [4] 王世新,焦云清.应用 MODIS 监测太湖水体叶绿素 a 浓度季节变化的研究[J].遥感信息,2008,28(1):47~53.
- [5] 吴敏,王学军.应用 MODIS 数据遥感监测巢湖水质[J].湖泊科学 2005,17(2):109~113.
- [6] 陈晓玲,李毓湘,李志林.香港海域叶绿素浓度时空变化规律[J].地理学报,2002,57(4):422~428.
- [7] 胡好国,万振文,袁业立.南黄海浮游植物季节性变化的数值模拟与影响因子分析[J].海洋学报,2004,26(6):74~88.
- [8] EUN H N, SEOK S P. A hydrodynamic and water quality modeling study of spatial and temporal patterns of phytoplankton growth in a stratified lake with buoyant incoming flow[J]. Ecological Modeling, 2006, 199: 298~314.
- [9] 周国立,冯学智,王春红.太湖蓝藻水华的 MODIS 卫星监测[J].湖泊科学,2008,20(2):203~207.
- [10] 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[J].湖泊科学,2008,20(6):687~694.
- [11] 刘聚涛,杨勇生,高俊峰,等.太湖蓝藻水华分析及其时空变化[J].长江资源流域与环境,2011,20(2):156~160.
- [12] 王荣,唐伶俐,戴昌达. MODIS 数据在测量地物辐射亮度和反射率特性中的应用[J].遥感信息,2000,(3):21~25.
- [13] 李国砚,张仲元,郑艳芬. 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.
- [14] REINART A, KUTSER T. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102: 74~85.
- [15] 段洪涛,张寿选,张渊智.太湖蓝藻水华遥感监测方法[J].湖泊科学,2008,20(2):145~152.
- [16] 胡尊英,于海燕,周斌. MODIS 波段比值算法在太湖蓝藻水华预警及应急监测中的应用[J].湿地科学,2009,7(2):169~174.
- [17] 贾春燕.基于遥感技术的叶绿素 a 动态监测及改善空间制图详度的研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [18] 夏健,钱培东,朱玮.2007 年太湖蓝藻水华提前暴发气象成因探讨[J].气象科学,2009,29(4):531~535.
- [19] 秦伯强,王小东,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[J].地球科学进展,2007,22(9): 896~906.
- [20] 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[J].生态学报,2005,25(3):589~595.

DETERMINATION OF SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF CYANOBACTERIAL WATER BLOOM IN TAIHU LAKE USING MODIS IMAGE DATA

ZHAO Jia-hu^{1,2}, GAO Jun-feng¹, LIU Ju-tao³, XU Yan^{1,2}

(1. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, Nanchang 330029, China)

Abstract: Based on multi-temporal MODIS image data processed by band ratio algorithm, we extracted the distribution of cyanobacteria bloom in Taihu Lake during the period of 2004~2010 in sunny days and analyzed its spatiotemporal variation. Results showed that during 2004~2010, cyanobacteria bloom in Taihu Lake area happened 539 times totally. During 2004~2007 the initial time of cyanobacteria bloom was advanced and its frequency increased year by year, while during 2007~2010 the time was put off and its frequency decreased. The cyanobacteria bloom occurred more frequently between March and August while less frequently between August and December in each year. Spatial analysis results of 2004~2010 showed that the cyanobacteria bloom happened much more frequently in the northern and western lake areas than in the eastern and southern lake areas. The frequency of bloom happened in each lake areas can be ordered as: western offshore > main body of Taihu Lake > Meiliang Bay > Southern riverside area > Zhushan lake > Gonghu Lake.

Key words: Taihu Lake; MODIS; cyanobacteria bloom; spatial and temporal distribution