

基于 MODIS 的太湖蓝藻水华暴发 时空规律分析研究

刘晓艳,倪峰,周玉红

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,江苏南京210046)

[摘要] 太湖蓝藻水华的日益严重已经给太湖地区的经济建设和人民生活带来了巨大的损失.本文利用遥感技术的优势,对2002~2007年中611 d太湖地区MODIS遥感影像的蓝藻水华信息进行提取,引入暴发强度概念,统计蓝藻水华暴发频次,获取了2002~2007年间太湖蓝藻暴发变化情况.在此基础上分析了蓝藻水华暴发的时空规律,准确反映了太湖蓝藻水华暴发的强度、地点和分布范围,从而为太湖蓝藻应急预警工作及进一步进行环境因素的相关研究提供了有力保障.

[关键词] MODIS,太湖,蓝藻水华,暴发强度,时空规律

[中图分类号] X832 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2012)01-0089-06

Spatio-temporal Rules of the Blue-green Algae Blooms in the Taihu Lake Based on MODIS Data

Liu Xiaoyan, Ni Feng, Zhou Yuhong

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Blue-green algae blooms in the Taihu Lake region have been attracting increasing attention of society, as they have brought a huge loss in regional economy and public's life. Remote Sensing (RS) has a lot of advantages in earth observing. Taking advantages of RS, this paper firstly extracted blue-green algae blooms information based on MODIS images of 611 days selected from the year of 2002 to 2007, defined bloom intensity to count the frequency of blue-green algae blooms, and then studied spatio-temporal rules of the blue-green algae blooms in the Taihu Lake. The study results are expected to make progress in improving the early warning and predicting capacity for blue-green algae blooms, to provide support for decision making in reducing water pollution caused by blue-green algae blooms.

Key words: MODIS, Taihu Lake, blue-green algae blooms, bloom intensity, spatio-temporal rules

湖泊的富营养化是我国淡水湖面临的一个普遍环境问题,富营养化导致蓝藻水华频繁发生,尤其是位于人口稠密地区的湖泊流域,这个问题更加突出^[1].太湖流域位于我国长江三角洲的核心区域,该地区人口密度大,城市化程度高.近年来,随着经济的发展,污染的加重,湖泊富营养化日趋加剧^[2].湖泊水体中氮、磷等营养物质含量过高,加之夏秋季节湖水温度升高,引起了蓝藻水华暴发,严重影响了湖泊水功能,破坏了太湖生态系统的平衡状态,给太湖流域的经济建设和人民生活带来了巨大的损失.因此,准确及时地进行蓝藻水华监测预警,直接关系到太湖流域生态环境质量、生活用水安全、城市健康水平以及经济建设的发展.

遥感在环境监测中具有监测范围广、成本低,可以快速、实时监测水体表面水质参数的长期动态变化的特点^[3].鉴于此,遥感手段在监测蓝藻水华的空间和时间分布上,具有非常明显的优势.遥感图像不仅可以直观、全面地提供整个湖泊的蓝藻水华分布情况,还可以通过对蓝藻浓度的连续动态监测,实现蓝藻水华的预警^[4].近年来,由于中分辨率成像光谱仪(MODIS)具有覆盖范围广、空间和光谱分辨率高、回访

收稿日期:2011-07-21.

基金项目:国家“十一五”水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07527-008)、江苏高校优势学科建设工程项目.

通讯联系人:刘晓艳,博士,讲师,研究方向:虚拟地理环境、地理可视化与分析、区域环境质量综合评估. E-mail: liuxiaoyan@njnu.edu.cn

周期短、时间分辨率较高、数据全球免费接受和较强的数据纠错等特点,其在生态环境监测和环境要素研究中受到广泛关注。

在利用遥感手段开展蓝藻水华时空分布规律的研究方面,典型的如马荣华等^[5]建立了基于多源卫星遥感影像的太湖蓝藻水华信息提取的普适模式,获取了天气晴好条件下蓝藻水华的面积和空间分布,分析了近年来太湖蓝藻水华暴发时间以及水华发生区域。周立国等^[6]运用植被指数差值比较了短期内蓝藻发生区域的变化。金焰等^[7]利用 MODIS 数据开展了蓝藻水华时间和空间分布规律的信息的提取方法研究。耿磊等^[8]应用 MODIS 资料反演出太湖蓝藻浓度的分布情况,可定量确定各蓝藻分布区域的蓝藻浓度大小。此外,基于和蓝藻生长相关的水质指标的研究,由于其可以对蓝藻水华发生的机理进行进一步探索而倍受关注。王得玉等^[9]利用 MODIS 光谱研究了水温和蓝藻分布区域的相关性,探讨了蓝藻暴发的水温条件及蓝藻生长与水体温度之间的关系。吴传庆等^[10]基于多个时相的 TM 影像对太湖水温、悬浮物、叶绿素等水质参数的浓度和分布进行了遥感反演,进而对太湖水华的成因、发展程度、影响因素等方面进行分析。吴敏等^[11]应用 MODIS 数据,结合巢湖生态环境要素实测数据,对 MODIS 在湖泊生态环境要素监测中的应用进行了探讨。沙慧敏等^[12]利用 MODIS 卫星遥感影像反演得到的太湖 MODIS 卫星表层水温、表层叶绿素浓度,结合真彩色合成影像,监测分析了太湖蓝藻的分布和变化情况。梅长青等^[13]构建了基于 MODIS 的叶绿素遥感提取模型,并应用模型成功提取出蓝藻暴发水域。而基于 MODIS 数据建立相应的蓝藻预警预测模型也有相关研究^[14]。

综上所述,遥感技术在蓝藻水华监测方面取得了长足进步。但由于较短时间范围内的监测值不能很好地体现蓝藻水华宏观变化规律,因此需要通过长时间序列的遥感影像反演获取蓝藻水华信息,从而更加全面细致地获取蓝藻水华暴发的时空规律。本文基于以上研究基础,应用长时间序列 MODIS 影像数据,对蓝藻水华时空规律进行分析,以建立科学、简单有效的蓝藻水华监测方法,为蓝藻预警应急工作提供有力支持。

1 数据获取与处理

1.1 MODIS 数据获取与处理

本文所使用的 MODIS Level 1B 数据来自美国国家航空航天局的 LAADS 网站(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/>),使用的是 250 m 和 1 km 两种分辨率的影像。其中 250m 分辨率的影像用来提取太湖蓝藻水华信息,1 km 分辨率数据用来反演计算太湖湖体表面水温。数据时间范围从 2002 年 1 月 1 日到 2007 年 12 月 31 日,筛选出 6 年间晴空少云的 611 景影像,其中 2002 年 85 景、2003 年 108 景、2004 年 108 景、2005 年 101 景、2006 年 102 景、2007 年 107 景,每一景包括 250 m 分辨率和 1 km 分辨率两个影像文件,数据量总计约 150 GB。

本文使用 ENVI 4.5 的 Georeference MODIS 模块对 MODIS 遥感影像进行几何校正和 Bow-tie 现象的去除。几何校正采用 Geographic Lat/Lon 投影,参考基点为 WGS-84。由于 MODIS 数据图幅范围广且波段信息丰富,所以原始的 MODIS 影像数据量比较大,单幅 250 m 分辨率的影像约为 179 MB,而用于研究的太湖区域在图像中只占很小的部分,因此需要进行图幅裁切,去除大量的冗余数据。区域裁切同样可以在 Georeference MODIS 功能模块中实现,只要输入裁切区域的地理范围信息便可以在几何校正与 Bow-tie 去除的同时将所选区域裁切,并可将其输出为 HDF 文件。这样不仅可以节省大量的硬盘存储空间,而且使几何校正的运算量减小、缩短运算时间,也可以大大提高遥感影像处理的效率。本文采用大气纠正的方法是直方图最小值去除法。其基本思想是:一幅图像中总可以找到某种或某几种地物,其辐射亮度或反射率接近于 0,这时在图像中对应位置的像元亮度值应为 0。而实测表明,这些位置上的像元亮度并不为零。这个值就应该是大气散射导致的程辐射度值。假设大气程辐射所导致的反射率增值 r 在图像的有限面积内是一个常数,其值的大小只与波段有关,并且近似认为每一波段的反射率最小值 r_{\min} 就是 r 。这样,将图像中每个像元的反射率值都减去本波段的 r_{\min} ,就可以粗略去除大气影响。

1.2 蓝藻水华信息的提取

NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)是目前应用效果较好的植被指数方法之一,由于蓝藻水华的光谱特征与植被的特征相似,所以根据 NDVI 能够有效地提取蓝藻水华信息。NDVI 被定义为红光波

段和近红外波段两波段归一化比值,即:

$$NDVI = (NIR - RED) / (RED + NIR), \quad (1)$$

式中 NIR 和 RED 分别代表着近红外波段和红光波段的反射率,对 MODIS 影像而言,分别代表着第 2 和第 1 波段.由于 NDVI 为正值时表明水面有蓝藻覆盖,其值随着蓝藻密度的增大而增大^[5],因此以 0 为阈值界定蓝藻的范围.

由于东太湖地区及东部沿岸部分区域夏秋季节有大量的水生植物,使得水体反射率值在第 1 波段有所降低,影响了实验结果,因此在本文研究中,这些水域被视为非研究区域(图 1 2),不参与蓝藻水华水域面积的计算.



图 1 研究区域示意图
Fig.1 The interesting area

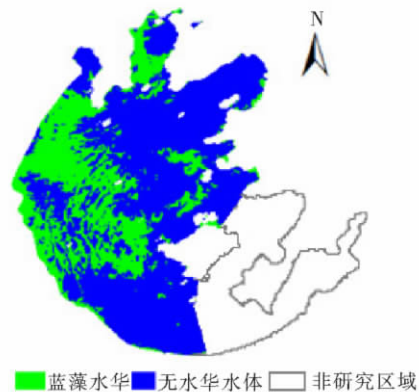


图 2 蓝藻水华水域提取结果(2007.9.12)
Fig.2 The water area with blue-green algae blooms

为了描述太湖单日的蓝藻水华暴发规模,本文引入蓝藻水华“暴发强度”的概念,其计算公式如下:

$$\text{蓝藻水华暴发强度} = \frac{\text{蓝藻水华暴发面积}}{\text{太湖湖体总面积}} \quad (2)$$

因此暴发强度是蓝藻水华暴发面积占太湖湖体总面积的百分率,以此来衡量太湖蓝藻水华单日的暴发规模.通过 NDVI 提取出蓝藻水华水域后,便可根据水华水域所包含的象元数估算水华水域的面积,从而得到当天太湖蓝藻水华的暴发强度.

1.3 蓝藻水华的等级划分

蓝藻水华的等级划分包括蓝藻水华暴发强度的等级划分和蓝藻水华密度的等级划分.按照蓝藻水华暴发强度由小到大的顺序,分为 4 个等级(表 1).

表 1 蓝藻水华暴发强度的等级划分

Table 1 Classification of blue-green algae blooms

等级	蓝藻水华暴发强度 / %	描述
一级	1 - 4	出现零星水华
二级	4 - 16	形成一定的聚集带
三级	16 - 35	形成局部的聚集面
四级	> 35	形成较大区域的聚集面

2 蓝藻水华暴发频次空间分布规律

根据 NDVI 提取出的太湖蓝藻水华单日暴发区域,制作出 2002 ~ 2007 年各年份蓝藻水华暴发频次空间分布图及总频次图(图 3 4).

由图 3 和图 4 可知,2002 ~ 2007 年间,太湖大部分区域都出现过蓝藻.总体来看太湖蓝藻水华暴发频次从东南向西北逐步递增,并且大致分为 4 个等级.

第 1 等级是暴发频次较高的地区,主要分布在梅梁湾、竺山湾、以及西太湖沿岸一带.其中竺山湾和西北太湖沿岸地区一般都在 40 次以上,局部区域甚至超过了 80 次,是蓝藻水华极易发生的地带.第 2 等级分布在湖心区北部、西部

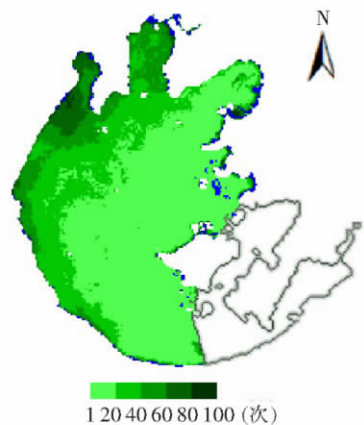


图 3 2002~2007 年太湖蓝藻水华暴发总频次图
Fig.3 The frequency of blue-green algae blooms in Taihu Lake during the year of 2002 to 2007

以及西南太湖沿岸地区,这些地区蓝藻水华暴发频次一般在20~40次之间,是蓝藻水华经常发生地区.第3等级主要分布在贡湖、湖心区中东部以及太湖南岸地区,这些地区蓝藻水华暴发频次一般在20次以下,是蓝藻偶尔发生的地区.第4等级是东太湖地区,该湖区水质较好,夏季有大量的大型水生植物生长,基本不出现蓝藻水华.

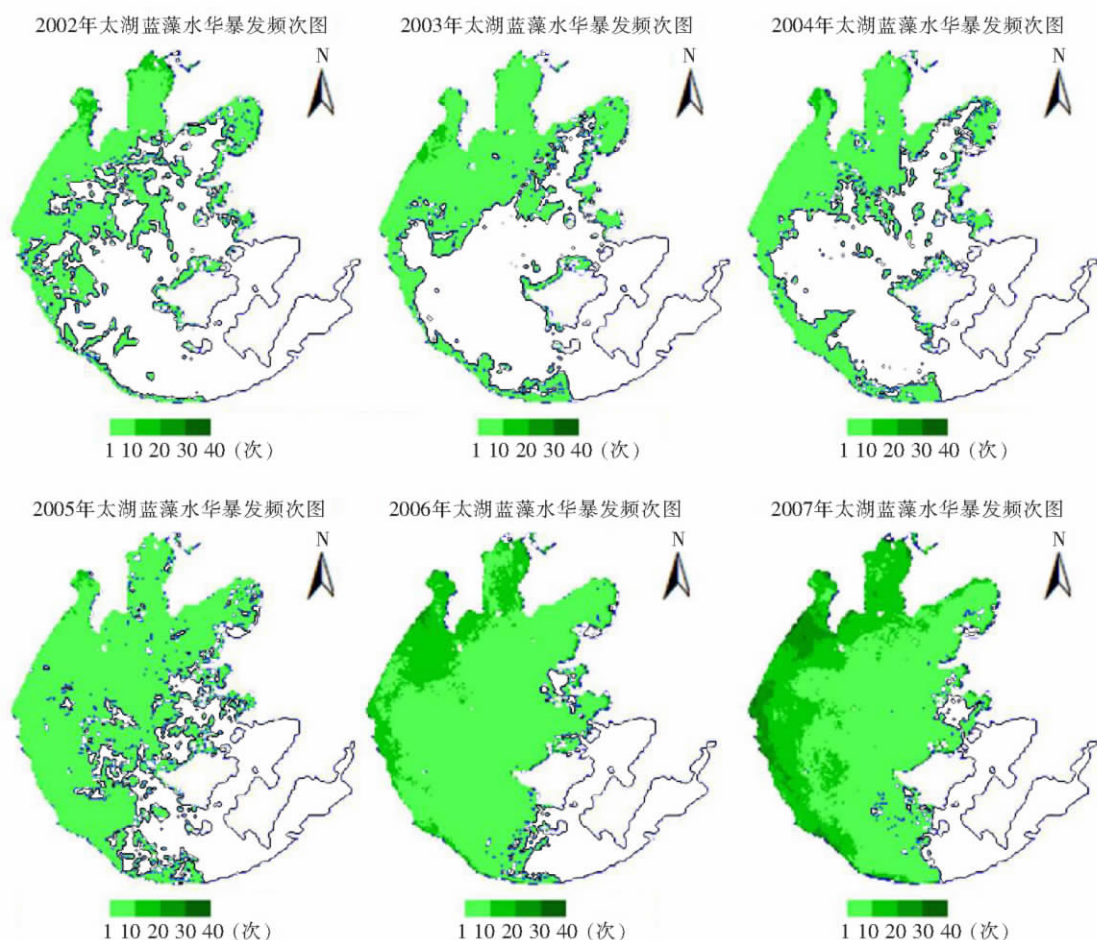


图4 2002~2007年各年份太湖蓝藻水华暴发频次图

Fig.4 The frequency of annual blue-green algae blooms in Taihu Lake from the year of 2002 to 2007

对2002~2007年蓝藻水华暴发频次进行分年统计,可以得到6年太湖蓝藻水华暴发年频次图(图4).2002~2007年各年份太湖蓝藻水华暴发频次有如下规律:

(1) 2002年蓝藻水华主要出现在太湖西北部梅梁湾和竺山湾地区,暴发频次一般不超过10次;湖心区、贡湖以及太湖西岸地区有蓝藻水华出现,但出现次数均较少.

(2) 2003年蓝藻水华出现的区域扩展至湖心区北部和西部的大部分区域,但暴发频次仍旧较少,不超过10次;太湖西北沿岸部分地区的蓝藻水华暴发频次增长至10~20次.

(3) 2004年太湖绝大部分地区蓝藻水华暴发频次仍旧不及10次,但西南沿岸蓝藻水华出现的区域有明显增加,不过整体趋势仍是西北湖区频次高,东南湖区频次少.

(4) 2005年太湖蓝藻水华暴发的区域有明显增加,除了往年蓝藻水华出现频率较高的西北湖区和西南太湖沿岸,蓝藻水华暴发区域已经覆盖了贡湖、湖心区以及西南湖区的绝大部分区域,暴发频次仍旧不超过10次,研究区域中只有湖心区东南部和南太湖的小部分区域没有发生过蓝藻水华.

(5) 2006年太湖蓝藻水华暴发区域已经扩展至研究区的绝大部分区域;同时,梅梁湾、竺山湾和西北沿岸大部分地区的暴发频次都有所增加,均达到了10~20次,西北沿岸部分地区暴发频次突破20次.

(6) 2007年太湖蓝藻水华暴发区域仍旧遍布整个研究区域,太湖西北部地区暴发频次增加明显,西北沿岸和西部沿岸有相当一部分区域的暴发频次已经超过20次,并有极少部分区域的暴发频次超过30次.整个太湖初步形成了由西北向东南暴发频次等级递减的趋势.

3 蓝藻水华暴发强度时间变化规律

根据太湖单日蓝藻水华暴发水域面积,得到了 2002~2007 年太湖蓝藻水华暴发强度的时间变化.如图 5a 2005 年以前每年的最大暴发强度没有太大的变化,基本保持在 10%~20%.但从 2006 年开始,最大暴发强度迅猛上升,2006 年达到了 52.14%,创下了 6 年来的最高记录.2007 年的最大暴发强度虽然有所回落,但也在 30% 以上.

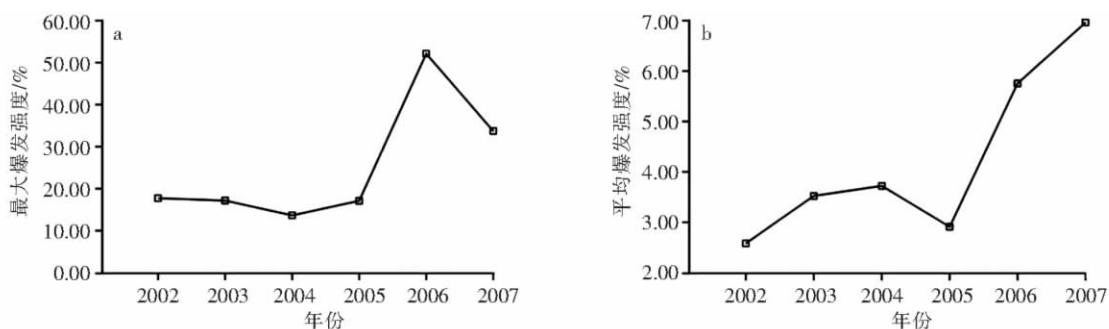


图 5 2002~2007 年太湖蓝藻水华年最大暴发 (a) 及平均暴发 (b) 强度

Fig.5 The yearly maximum (a) and average (b) intensity of blue-green algae blooms in Taihu Lake from the year of 2002 to 2007

图 5b 为太湖蓝藻水华的年平均暴发强度分布图,年平均暴发强度等于计算得出的蓝藻水华暴发强度总和除以一年中参与蓝藻水华信息提取的天数总和.由图 6 可以看出,2002 年以来的年平均暴发强度呈总体上升趋势,从 2002 年的 2.58% 到 2007 年的 6.96%,年平均暴发强度增加了近 2 倍.虽然 2007 年的最大暴发强度小于 2006 年的最大暴发强度,但 2007 年的平均强度高于 2006 年,说明 2007 年的整体暴发强度大于 2006 年.

图 6 是太湖蓝藻水华在 2002~2007 年中的月最大暴发强度和平均暴发强度,由图可以看出,6 年来太湖蓝藻水华暴发时间主要集中在 4~11 月,其中 7~9 月暴发强度高于其余各月,特别是 8 月,无论是整体暴发强度还是单日暴发强度均达到了峰值.4~6 月是蓝藻水华暴发的起步和增长期,10~12 月是蓝藻水华的衰退和消亡期.4~6 月蓝藻水华暴发的总体规模略大于 10~12 月,1~3 月基本不再有蓝藻水华出现.

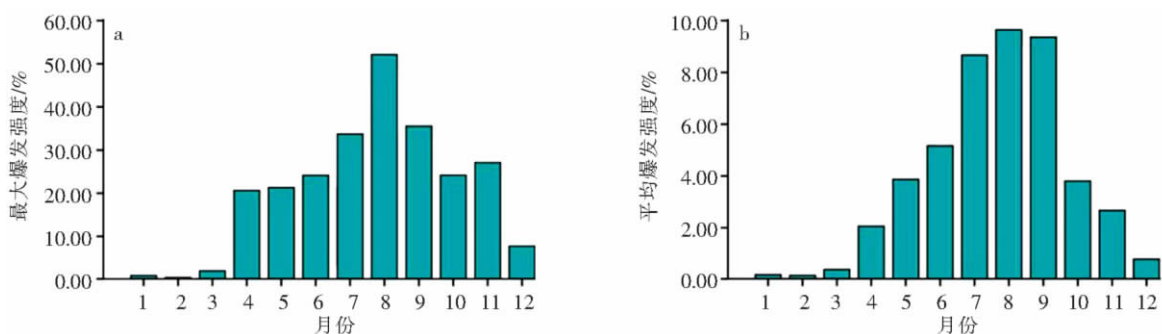


图 6 2002~2007 年太湖蓝藻水华月最大暴发 (a) 及平均暴发 (b) 强度

Fig.6 The monthly maximum (a) and average (b) intensity of blue-green algae blooms in Taihu Lake from the year of 2002 to 2007

一般认为,4~11 月是蓝藻水华的暴发期,而 2002~2007 年,太湖蓝藻水华每年的暴发起止日期也发生了较大的变化.从总体来看,太湖蓝藻水华暴发起始日期在逐步提前,而终止日期有逐渐延后的趋势.水华暴发起始日期从 2002 年的 6 月 18 日提前至 2007 年的 4 月 4 日,终止日期从 2002 年的 10 月 15 日延后至 2007 年的 12 月 8 日(图 7).

4 结论

本文利用 MODIS 卫星遥感影像提取 2002~2007 年太湖蓝藻水华信息,通过分析过去 6 年间太湖蓝藻水华暴发的时空规律,结论如下:

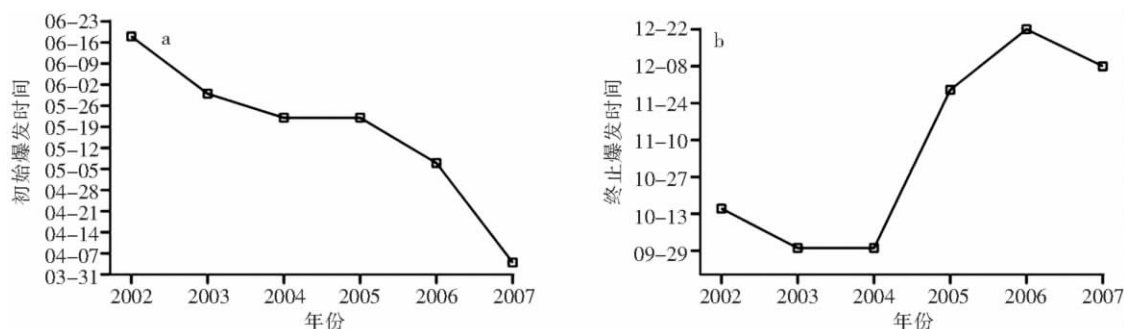


图7 2002~2007年太湖蓝藻水华暴发初始时间和终止时间

Fig.7 The initial time (a) and finish time (b) of blue-green algae blooms in Taihu Lake from the year of 2002 to 2007

从空间上来讲,太湖蓝藻水华暴发频次总体呈从东南向西北逐步递增趋势.从时间上来讲,2002~2007年期间,太湖蓝藻水华暴发年平均暴发强度呈总体上升趋势,从2002年的2.58%到2007年的6.96%,年平均暴发强度增加了近2倍.而太湖蓝藻水华每年的暴发起止日期也发生了较大的变化,从总体来看,太湖蓝藻水华暴发起始日期在逐步提前,而终止日期有逐渐延后的趋势.本研究结果表明,太湖总体水质还是恶化的,水质长期满足蓝藻的生长要求,只要满足条件的诱导因素,就能导致水华发生.因此,深入研究蓝藻暴发的时空规律,在此基础上建立蓝藻水华预测模型和预警体系,将为采取有效的预防 and 治理措施、减少由于蓝藻水华暴发及其导致的水质恶化带来的社会与经济的影响提供技术支撑.

[参考文献]

- [1] 秦伯强. 太湖水环境面临的主要问题研究动态与初步进展[J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 1-9.
- [2] 张红, 黄勇, 姚筠, 等. 巢湖藻类遥感监测和气象因子分析[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(1): 118-123.
- [3] 宋瑜, 宋晓东, 江洪. 太湖藻类的遥感监测研究[J]. 遥感信息, 2008(4): 102-108.
- [4] 魏清宇, 江南, 吕恒, 等. 太湖蓝藻水华遥感动态监测预警模型的建立[J]. 地球信息科学, 2008, 10(2): 156-160.
- [5] 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.
- [6] 周立国, 冯学智, 王春红, 等. 太湖蓝藻水华的MODIS卫星监测[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 203-207.
- [7] 金焰, 张咏, 姜晟. EOS/MODIS数据在太湖蓝藻水华时空分布规律提取中的应用研究[J]. 环境科技, 2009, 22(2): 9-12.
- [8] 耿磊, 郝凡, 李亚春. 基于MODIS资料的太湖蓝藻浓度监测[J]. 气象科学, 2010, 30(6): 827-831.
- [9] 王得玉, 冯学智, 周立国, 等. 太湖蓝藻暴发与水温的关系的MODIS遥感[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 173-178.
- [10] 吴传庆, 王桥, 杨志峰, 等. 太湖水华的遥感分析[J]. 中国环境监测, 2007, 23(3): 52-56.
- [11] 吴敏, 王学军. 应用MODIS遥感数据监测巢湖水质[J]. 湖泊科学, 2005, 17(2): 110-113.
- [12] 沙慧敏, 李小恕, 杨文波, 等. MODIS卫星遥感监测太湖蓝藻的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2009, 3: 9-16.
- [13] 梅长青, 王心源, 彭鹏. 应用MODIS数据监测巢湖蓝藻水华的研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(3): 328-332.
- [14] 徐京萍, 张柏, 李方, 等. 基于MODIS数据的太湖藻华水体识别模式[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 191-195.

[责任编辑:黄 敏]