

## 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识\*

马荣华<sup>1</sup>, 孔繁翔<sup>1</sup>, 段洪涛<sup>1</sup>, 张寿选<sup>1</sup>, 孔维娟<sup>2</sup>, 郝景燕<sup>1</sup>

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 南京大学地理信息科学系, 南京 210093)

**摘要:** 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. 近年来, 太湖蓝藻水华暴发时间逐渐提前至 3-4 月, 暴发的高频繁期发生在 6-7 月, 其次是 10-11 月; 2000 年以来, 蓝藻水华的持续时间有所增加, 几乎全年(3-12 月)都有发生. 北部(梅梁湾、竺山湾)是蓝藻水华的最初暴发地, 是蓝藻水华暴发的重灾区, 每年都有发生; 2001 年以来, 南部沿岸区(浙江附近水域, 即夹浦新塘一带的沿岸水体)也几乎每年都有发生, 且集聚面积逐年扩大, 持续时间越来越长, 逐渐成为太湖蓝藻的最早暴发地; 2003 年以来, 蓝藻水华开始向湖心扩散, 严重时几乎覆盖整个太湖的非水生植被区; 值得注意的是, 2005 年以来, 以前很少有蓝藻水华发生的贡湖湾, 也开始有大规模蓝藻水华覆盖, 2007 年发生的频率显著增加.

**关键词:** 蓝藻水华; 遥感; 太湖

## Spatio-temporal distribution of cyanobacteria blooms based on satellite imageries in Lake Taihu, China

MA Ronghua<sup>1</sup>, KONG Fanxiang<sup>1</sup>, DUAN Hongtao<sup>1</sup>, ZHANG Shouxuan<sup>1</sup>, KONG Weijuan<sup>2</sup> & HAO Jingyan<sup>1</sup>

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

(2: *Department of Geography Information Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, P.R. China*)

**Abstract:** Of all the cloudless 340 satellite imageries 11 were shot by Landsat MSS/TM/ETM sensor since 1979, 216 by EOS MODIS sensor since 2002, 10 by CEBERS CCD sensor since 2005 and 3 by IRS P6 LISS-3 sensor in 2007. On the basis of the spectral analysis, an applicable model was developed to extract the cyanobacteria bloom information from multi-source remote sensing images. And then, the model was used to acquire cyanobacteria bloom-covered area and its spatial distribution. The result showed that the initial time of cyanobacteria bloom was moved from June or July to March or April at present, three-four months advanced than the normal. The statistics showed that the cyanobacteria bloom occurs most frequently in June or July and the second was in October or November. Additionally, the duration of cyanobacteria bloom is becoming longer and longer and almost over time of March to December at present. The most intensity of cyanobacteria bloom occurred in September and the second was in June. The north of Lake Taihu, including Meiliang Bay and Zhushan Bay, was the initial location of cyanobacteria bloom and also the heavy disaster area, where the cyanobacteria bloom occurred every year since its first time. However, cyanobacteria bloom also occurred along the south bank of Lake Taihu almost every year since 2001, where the cyanobacteria bloom-covered area was becoming larger and larger and the duration time was becoming longer and longer, and which was becoming the earliest location of cyanobacteria bloom. It was noticeable that the cyanobacteria bloom was pervading gradually from the north, the west and the south to the center since 2003, and it sometimes covered almost the whole non-vegetation area. Additionally, there were cyanobacteria blooms occurring at Gonghu Bay since 2005, and it occurred more frequently in 2007.

**Keywords:** Cyanobacteria blooms; remote sensing; Lake Taihu

---

\* 国家科技支撑计划项目(2007BAC26B01)和中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者”科研启动专项资金(07YJ01100)联合资助. 2007-11-15 收稿; 2008-05-28 收修改稿. 马荣华, 男, 1972 年生, 博士, 副研究员; E-mail: rhma@niglas.ac.cn.

蓝藻暴发形成水华后, 在外力(如风、水流等)的作用下, 大面积积聚, 在卫星遥感影像上产生类似陆生植被的光谱特征<sup>[1]</sup>. 遥感具有快速、大范围、周期性的特点, 已经成为蓝藻水华监测的重要手段, 几乎所有的卫星遥感传感器如 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)、CZCS(Coastal Zone Color Scanner)、SeaWiFS(Sea-Viewing Wide-Field-Of-View Sensor)、MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer)、Landsat TM/ETM(Thematic Mapper/ Enhanced Thematic Mapper)、ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)、MODIS(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)、SAR(Synthetic Aperture Radars)、Hyperion & ALI(Advanced Land Imager), 都能够识别和监测蓝藻水华的空间分布和暴发范围, 在时间系列影像数据的支持下, 可以发现蓝藻水华的空间分布规律. 本文使用多源卫星遥感影像数据(EOS MODIS、CEBERS CCD、LANDSAT TM/ETM、IRS P6 LISS-3), 试图获取太湖蓝藻水华的时空分布规律, 为蓝藻的预测预警提供基础和依据.

## 1 数据和方法

共收集包含太湖的、天气状况良好的卫星遥感影像/图片 340 景/幅(表 1), 其中自 2002 年以来的 EOS MODIS 卫星影像共 216 景(2002 年 13 景、2003 年 26 景、2004 年 16 景、2005 年 30 景、2006 年 39 景、2007 年截止至 11 月 3 日共 92 景), 自 1979 年以来的 Landsat MSS/TM/ETM 卫星影像 16 景(1979 年 5 月 25 日, 1984 年 8 月 4 日, 1986 年 7 月 25 日, 1987 年 6 月 26 日, 1988 年 10 月 18 日, 1989 年 10 月 21 日, 1991 年 7 月 23 日、11 月 12 日, 1994 年 6 月 29 日, 1998 年 8 月 11 日, 2000 年 5 月 4 日, 2001 年 7 月 26 日, 2002 年 1 月 2 日、7 月 13 日, 2003 年 11 月 13 日, 2004 年 7 月 26 日), 包含有太湖的 Landsat MSS/TM/ETM 卫星影像图片 95 幅(5/4/3 或 4/3/2 波段合成)(1986 年 10 月 29 日, 1987 年 1 月 17 日、2 月 2 日、5 月 25 日, 1988 年 4 月 25 日、11 月 3 日、11 月 19 日、12 月 5 日, 1989 年 5 月 14 日、5 月 30 日、7 月 17 日、12 月 8 日, 1990 年 2 月 26 日、6 月 2 日、7 月 20 日、12 月 11 日, 1991 年 1 月 12 日、3 月 17 日、8 月 24 日、10 月 11 日、10 月 27 日, 1992 年 1 月 15 日、2 月 16 日、4 月 4 日、4 月 20 日、5 月 6 日、5 月 22 日、6 月 7 日、7 月 25 日、10 月 13 日、10 月 29 日、11 月 30 日、12 月 16 日, 1993 年 2 月 2 日、6 月 10 日、6 月 26 日、7 月 12 日、9 月 30 日、12 月 19 日, 1994 年 3 月 25 日、11 月 4 日、12 月 6 日、12 月 22 日, 1995 年 2 月 24 日、7 月 18 日、8 月 3 日、8 月 19 日、11 月 23 日、12 月 9 日, 1996 年 1 月 10 日、5 月 1 日、7 月 20 日、9 月 6 日、12 月 11 日, 1997 年 1 月 12 日、1 月 28 日、2 月 13 日、5 月 4 日、

表 1 不同卫星遥感影像的蓝藻水华提取方法<sup>[2]</sup>

Tab.1 The approaches to acquire cyanobacteria blooms in Lake Taihu from different satellite imageries

| 卫星遥感影像         | 方法            | 说明  |
|----------------|---------------|---|
| EOS MODIS      | Band2/Band4>1 | Band2 可以提取蓝藻水华, 但易与高浑浊水体相混淆, 阈值很难准确判定. 蓝藻水华在近红外波段具有高反射特性, 在可见光波段具有低反射特性, 水体恰好相反, 因此可以利用近红外波段与可见光波段的比值来提取蓝藻水华; 而 Band2/Band1 不能有效区分低浓度蓝藻和高浑浊水体. 实际上, 蓝藻具有“陡坡效应”, 近红外波段的反射明显大于绿光波段, 使得 Band2/Band4>1, 因此利用 Band2/Band4>1, 可以迅速确定蓝藻水华. |
| CEBERS CCD     | Band4/Band3>1 | Band4 可以提取蓝藻水华, 但易与高浑浊水体相混淆, 河流入湖口处高悬浮物水体常被误作为蓝藻水华; 进一步发现, 浑浊水体的 DN 值从 Band3 到 Band4 逐渐降低, 而蓝藻水华恰好相反, 因此可利用 Band4/Band3 提取蓝藻水华, 剔除高悬浮物水体.   |
| LANDSAT TM/ETM | Band4/Band3>1 | 说明同 CEBERS CCD  |
| IRS P6 LISS-3  | Band4/Band3>1 | 说明同 CEBERS CCD  |

5月20日、6月5日、8月8日、10月11日、10月27日、12月14日, 1998年1月31日、7月10日、10月30日、11月15日、12月17日, 1999年2月3日、2月19日、10月1日、12月20日, 2000年6月13日、7月31日、9月17日、11月4日、12月6日、12月22日, 2001年2月8日、3月12日、4月13日、5月31日、6月16日、7月2日、7月18日、8月19日、11月7日、12月25日, 2002年2月11日、3月31日、8月22日、9月23日、10月9日、10月25日), 自2005年以来的CEBERS CCD卫星遥感影像10景(2005年6月16日、10月24日、11月16日, 2006年3月26日、6月12日、10月23日、11月15日, 2007年1月9日、3月28日、4月23日), 2007年IRS P6 LISS-3卫星遥感影像3景(4月14日、4月28日、6月15日)。

通过ERDAS 9.1对MODIS影像进行重投影和几何纠正, 通过1:50000地形图对其它卫星遥感影像进行几何精纠正, 误差均在0.5个像元之内。基于上述4种卫星遥感影像不同地物(水体、植被、蓝藻水华等)的光谱特征, 建立了若干种蓝藻水华的提取模式, 通过对比分析, 最终选取近红外和红光波段的比值作为蓝藻水华信息提取的普适模式(表1)。

## 2 结果和讨论

### 2.1 蓝藻水华形成的时间

1979年以来Landsat MSS/TM/ETM卫星遥感影像、天气晴好状况下的MODIS卫星遥感影像(2002年至今)、CEBERS卫星遥感影像(2004年至今)、IRS P6卫星遥感影像(2007年4月4日、4月28日、6月15日)表明: (1)太湖蓝藻水华大面积暴发于1987年6月(图1), 随着时间(年份)的推移, 暴发时间(月份)有逐渐提前的趋势(图2), 2005年提前至4月, 2007年再次提前, 3月28日便发现较大面积的水华, 值得注意的是, 2003-2004年, 暴发始于7月份; (2)2000年以前(1987-2000年), 蓝藻水华暴发的频繁期为6-7月, 9月最少, 10-11月为次频繁期(图3); (3)2000年以后(2001-2007), 蓝藻水华暴发的频率明显高于2000年以前(1987-2000年), 持续时间所有加长, 几乎全年(3-12月)都有蓝藻水华暴发, 7月为暴发频繁期, 10-11月的暴发频率稍高于8-9月(图3); (4)总体上认为, 3-4月逐渐成为蓝藻水华的初始暴发期, 6-7月为蓝藻水华暴发频繁期, 10-11月为蓝藻水华暴发次频繁期。

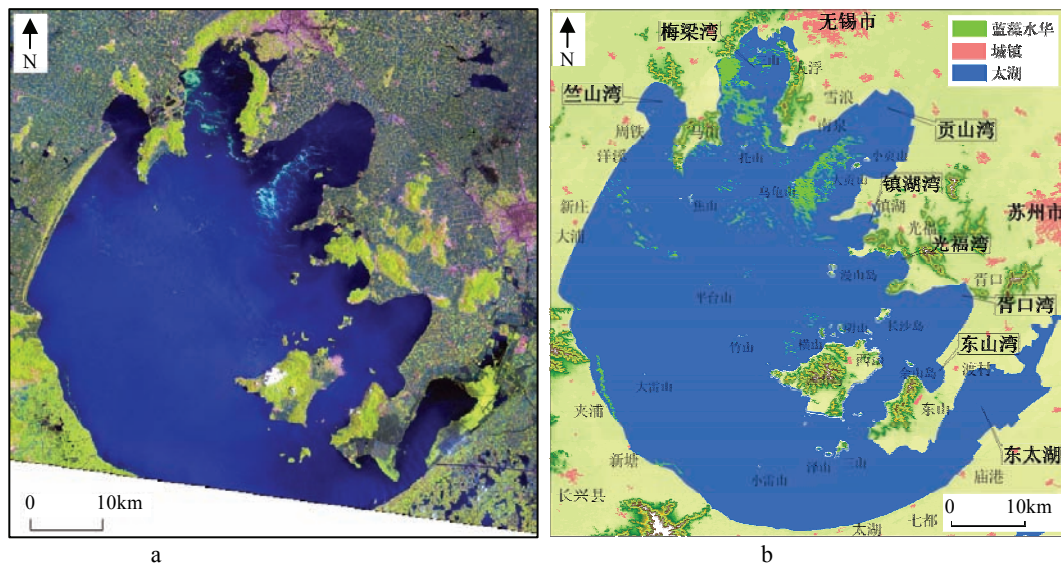


图1 1987年6月26日卫星遥感初次发现太湖蓝藻水华

(a: Landsat TM 卫星遥感影像; b: 蓝藻水华的空间分布及集聚规模)

Fig.1 Cyanobacteria bloom was found firstly by satellite imagery in Lake Taihu on June 26th, 1987

(a: Landsat TM satellite imagery; b: its distribution and convergence size)

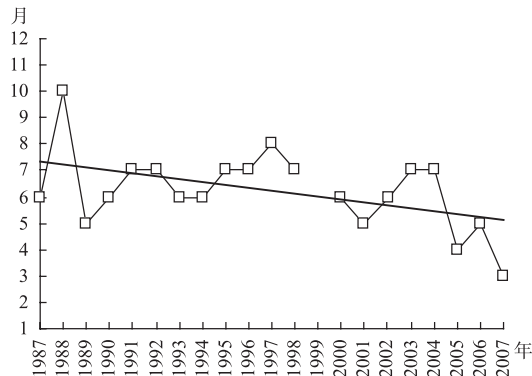


图2 1987年以来水华暴发初始时间(1999年数据缺失)  
Fig.2 The initial time of cyanobacteria bloom since 1987  
(no image data in 1999)

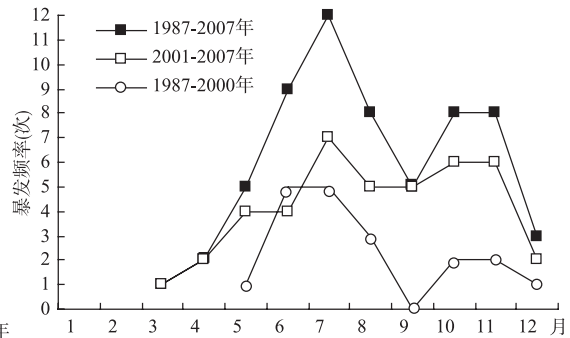


图3 1987年以来蓝藻水华暴发时间与频率分布  
Fig.3 The time and frequency of cyanobacteria bloom since 1987

2.2 蓝藻水华的空间分布

2.2.1 初次暴发地点 卫星遥感监测表明, 1987年6月太湖蓝藻水华初次暴发时, 主要分布在梅梁湾的直湖港和武进港附近以及贡山湾湾口乌龟山至大贡山以北之间的部分水域, 南部沿岸区夹浦一新塘附近的沿岸水域有极少量成线状分布. 统计表明(表2), 1987年以来, 梅梁湾是太湖蓝藻最初暴发最频繁的湖区, 共发生过14次, 其次是竺山湾(包括竺山湾湾口), 共发生过6次, 然后是南部沿岸区(浙江新塘附近), 共发生过4次, 最后是西部沿岸区, 共发生过2次; 2000年以前, 蓝藻水华几乎每年都首先在梅梁湾或竺山湾暴发; 近年来, 蓝藻最初暴发地点有向南部沿岸区转移的趋势.

表2 1987年以来太湖蓝藻水华最初暴发地点(1999年无数据)

Tab.2 The initial locations of cyanobacteria blooms in Lake Taihu since 1987(no image data in 1999)

| 时间    | 地点   | 时间    | 地点         |
|-------|--|-------|------------|
| 1987年 | 梅梁湾的直湖港和武进港附近水域、<br>乌龟山至大贡山以北之间的部分水域、<br>夹浦一新塘附近的南部沿岸区 | 1997年 | 竺山湾、梅梁湾    |
| 1988年 | 竺山湾湾口  | 1998年 | 梅梁湾        |
| 1989年 | 梅梁湾  | 2000年 | 梅梁湾、西部沿岸区  |
| 1990年 | 梅梁湾  | 2001年 | 南太湖浙江新塘沿岸区 |
| 1991年 | 竺山湾、梅梁湾  | 2002年 | 梅梁湾        |
| 1992年 | 梅梁湾  | 2003年 | 梅梁湾、竺山湾湾口  |
| 1993年 | 梅梁湾  | 2004年 | 竺山湾        |
| 1994年 | 竺山湾、梅梁湾  | 2005年 | 南太湖浙江新塘沿岸区 |
| 1995年 | 梅梁湾  | 2006年 | 西部沿岸区      |
| 1996年 | 梅梁湾  | 2007年 | 南太湖浙江新塘沿岸区 |

2.2.2 主要分布区域 2000年以前, 太湖蓝藻水华主要出现在梅梁湾、竺山湾, 以及竺山湾和梅梁湾相连的水域, 梅梁湾发生频率远高于竺山湾, 西太湖沿岸也时有发生. 2001年以来, 除梅梁湾和竺山湾继续每年继续都有发生外, 南部沿岸区浙江附近水域, 即夹浦新塘一带的沿岸水体, 也几乎每年都有发生, 且集聚面积逐年扩大, 持续时间越来越长, 有时会和西部沿岸区连成一片(图4), 形成整个开敞水体的沿岸区都被蓝藻水华覆盖的分布格局. 2003年以来, 蓝藻水华开始逐渐向湖心扩散(图5、图6), 严重时几乎覆盖整个太湖的非水生

植被区, 如 2007 年 9 月 7 日(图 5f). 2005 年以来(图 5c、5d), 贡湖湾也时有蓝藻水华发生, 2007 年贡湖湾蓝藻水华发生的频率明显增加(4 月 28 日、8 月 30 日、10 月 11 日、10 月 18 日). 总体上, 太湖蓝藻水华的空间分布是一个从梅梁湾和竺山湾逐渐向湖心区、最终布满整个非水生植被区的空间演化过程(图 6).

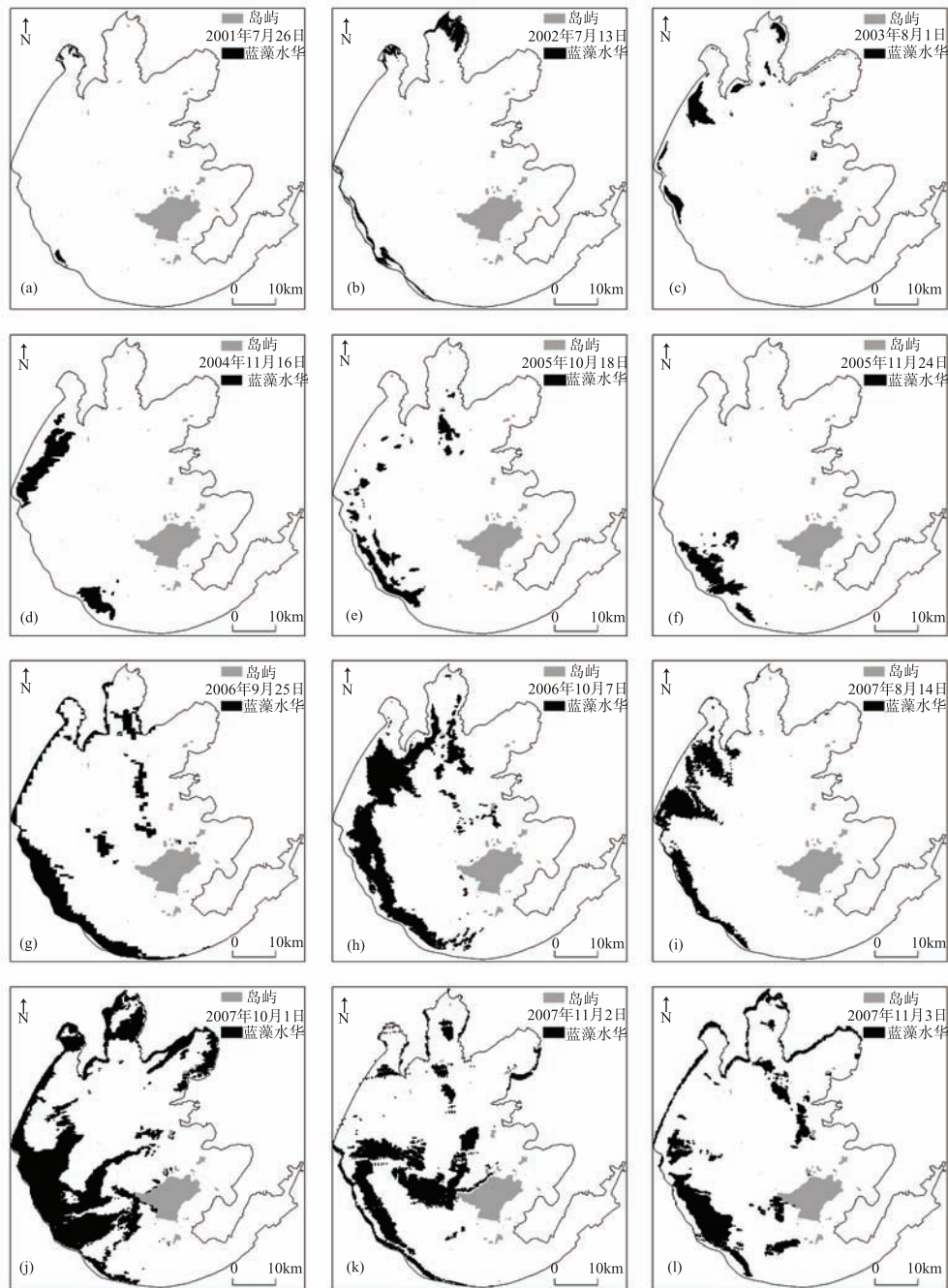


图 4 2001 年以来太湖南部沿岸水体蓝藻水华的发展趋势

Fig.4 A growing tendency of cyanobacteria blooms along the lake bank in the south of Lake Taihu since 2001

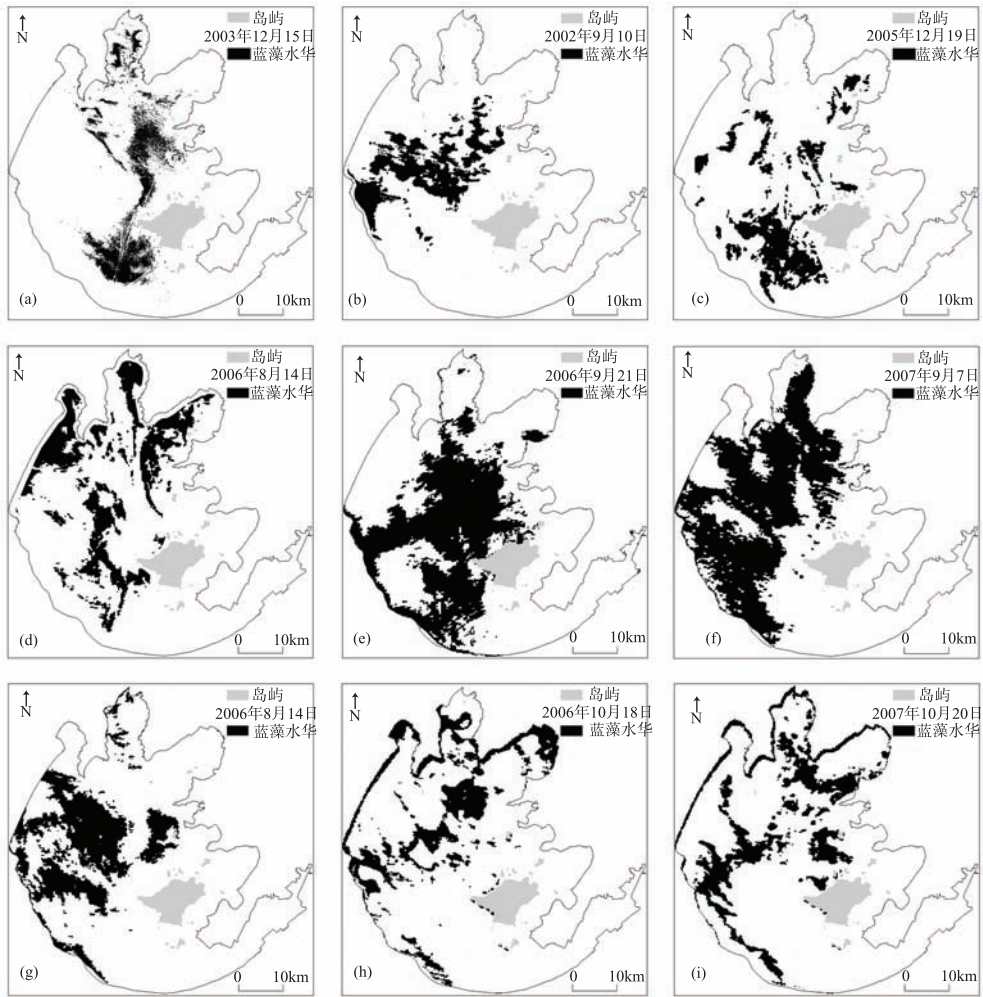


图 5 2003 年以来湖心区成为太湖蓝藻水华的主要分布区之一

Fig.5 The lake center becoming one of the main distributions of cyanobacteria blooms since 2003

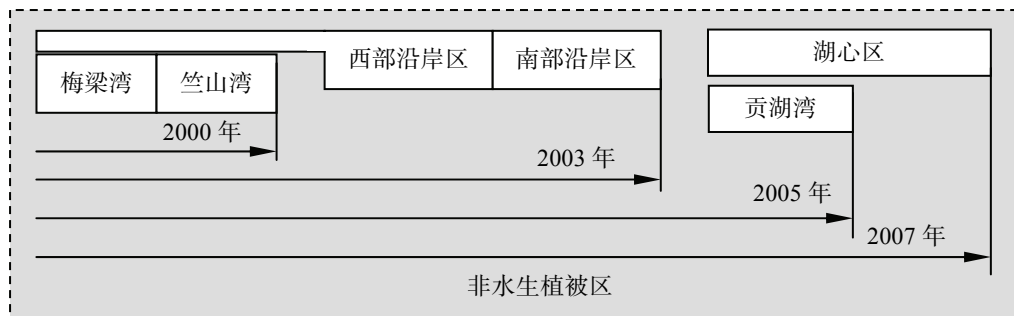


图 6 太湖蓝藻水华主要空间分布的历史演化过程

Fig.6 An evolution of spatial distribution of cyanobacteria blooms in Lake Taihu

### 2.3 蓝藻水华的覆盖面积

卫星遥感初次发现蓝藻水华时(图 1), 覆盖面积达  $62.2\text{km}^2$ (1987 年 6 月 26 日), 之后一直到 2000 年, 水华覆盖面积都维持在这个水平. 2000 年后, 特别近 4 年来, 水华集聚面积/暴发强度逐渐增大, 最大集聚面积和暴发强度出现的时间有提前的趋势, 主要表现在两个方面(图 7): (1)2004 年太湖蓝藻水华最大集聚面积约  $196.8\text{km}^2$ , 2005 年约  $316.9\text{km}^2$ , 2006 年约  $805.5\text{km}^2$ , 是 2004 年的 4 倍多、2005 年的 2 倍多, 上述 3 个年份中蓝藻水华的最大集聚面积和暴发强度均出现在 9 月; 2007 年, 蓝藻水华的暴发强度和集聚面积继续增大, 最大集聚面积达  $979.1\text{km}^2$ , 时间上提前到 6 月底, 9 月份出现二次暴发高潮, 集聚面积达  $855.1\text{km}^2$ ; (2)2004–2006 每年的 10–12 月, 蓝藻水华集聚面积基本上维持在  $200\text{km}^2$  以下的水平, 2007 年以来, 相同月份的水华集聚面积最大扩大到  $450\text{km}^2$  左右.

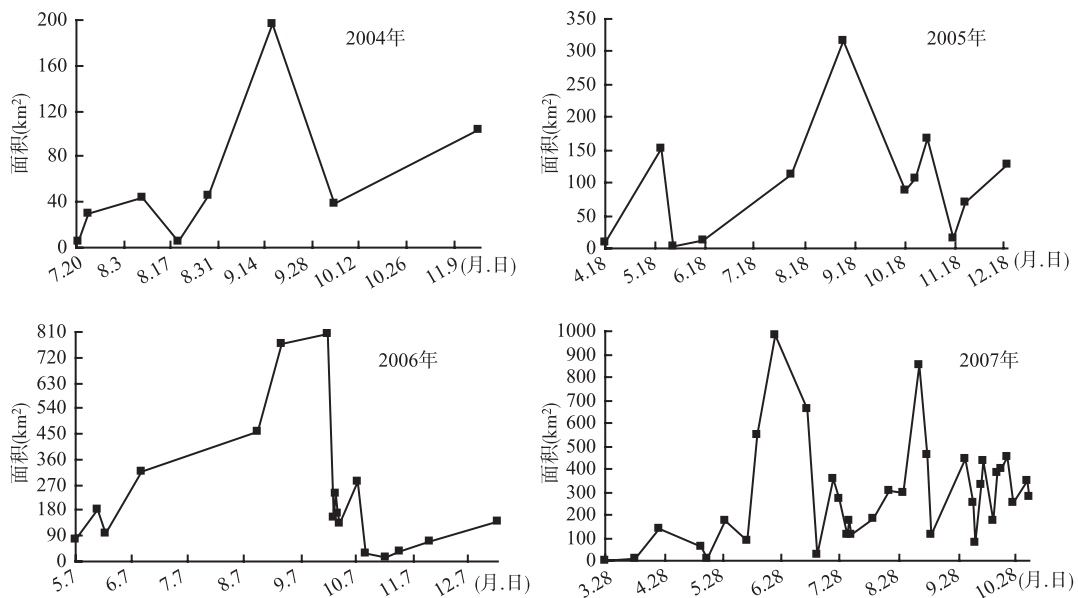


图 7 2004–2007 年太湖水面蓝藻集聚面积

Fig.7 The cyanobacteria bloom-covered area over time of 2004–2007

### 3 讨论与结论

近红外波段中, 蓝藻水华的光谱特征与其它地物差异较为明显, 但当蓝藻浓度较低时, 则表现出与高悬浮物含量水体相似的光谱特征, 在利用近红外单波段提取蓝藻水华信息时, 很难确定一个标准阈值, 阈值的较小变化, 会带来蓝藻水华的面积和空间分布的较大变化. 地物光谱特征的进一步分析表明, 通过近红外波段和红光波段的比值大于 1 来提取水华具有更好的效果, 但当蓝藻浓度很低、水体信息掩盖蓝藻信息时, 由于水体信息近红外波段的低反射率, 导致近红外波段和红光波段的比值小于 1, 从而低估了蓝藻水华的集聚和覆盖面积<sup>[3-5]</sup>. 因此本文获取的水华集聚面积带有一定的误差, 但可以作为长期监测与分析的依据. 特别需要说明的是, 本文的研究完全遵照卫星遥感影像/图片的既定事实, 但由于卫星遥感的时间分辨率, 或者在卫星过境时刻的天气原因, 大量分布有蓝藻水华的信息并没有被卫星传感器抓拍拍到, 形成蓝藻水华空间分布信息的“卫星遥感盲区”, 因此在某段时间内, 通过卫星遥感虽然没有发现蓝藻水华, 但实际上或许存在. 1960 年夏, 中国科学院南京地理与湖泊研究所在太湖进行科学考察时, 在托山附近以及托山与焦山之间就曾发现有条状分布的藻类; 20 世纪 70 年代, 夏至前后, 在梅雨少、日照好的情况下, 在闰江口附近就会有水华发生, 但历时不长, 一到初秋, 便逐渐消失; 80 年代初, 夏季太湖监测时, 常见条状水华, 但都是间断的, 范围较小; 1986 年 8 月, 在大浦口至平台山一带, 成片出现面积约  $20\text{km}^2$  的蓝藻水华<sup>[3-6]</sup>.

太湖蓝藻水华最初在夏季出现, 随着时间的推移, 暴发时间逐渐前移, 近年来, 3-4 月逐渐成为蓝藻水华的初始暴发期; 统计表明, 蓝藻水华暴发的频繁期发生在 6-7 月, 10-11 月成为蓝藻水华暴发的次频繁期. 2000 年以来, 蓝藻水华的持续时间有所加长, 几乎全年(3-12 月)都有发生, 9 月成为蓝藻水华暴发的高强度期, 其次是 6 月. 太湖北部(梅梁湾、竺山湾)是蓝藻水华的最初暴发地, 是蓝藻水华暴发的重灾区, 每年都有发生; 2001 年以来, 南部沿岸区(浙江附近水域, 即夹浦新塘一带的沿岸水体)也几乎每年都有发生, 且集聚面积逐年扩大, 持续时间越来越长, 逐渐成为太湖蓝藻的最早暴发地; 2003 年以来, 蓝藻水华开始向湖心扩散, 严重时几乎覆盖整个太湖的非水生植被区; 值得注意的是, 2005 年以来, 以前很少有蓝藻水华发生的贡湖湾, 也开始有大面积蓝藻水华覆盖, 2007 年发生的频率显著增加.

#### 4 参考文献

- [1] Dekker AG. Imaging spectrometry of water. In: Meer FD, Jong SM eds. *Imaging spectrometry: Basic principles and prospective applications*. Kluwer Academic, 2001: 307-359.
- [2] 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.
- [3] Barale V, Jaquet J, Ndiaye M. Algal blooming patterns and anomalies in the Mediterranean Sea as derived from the SeaWiFS data set (1998-2003). *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112: 3300-3313.
- [4] Guo L. Doing battle with the green monster of Taihu Lake. *Science*, 2007, 317: 1166.
- [5] Ma R, Ma X, Dai J. Hyperspectral feature analysis of chlorophyll a and suspended solids using field measurements from Taihu Lake, eastern China. *Hydrological Sciences Journal*, 2007, 52: 808-824.
- [6] 顾 岗. 太湖蓝藻暴发成因及其富营养化控制. *环境监测管理与技术*, 1996, 8(6): 17-19.