

太湖蓝藻爆发与水温的关系的 MODIS 遥感*

王得玉¹, 冯学智¹, 周立国¹, 郝景燕², 徐晓雄³

(1: 南京大学地理信息科学系, 南京 210093)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210018)

(3: 浙江省测绘大队, 杭州 310030)

摘要: 利用 MODIS 高光谱遥感数据动态监测太湖地区蓝藻水华发展过程, 并结合水温环境因子, 探讨蓝藻爆发的环境条件。首先, 通过简单的比值植被指数, 实现蓝藻生物量的遥感估算; 根据六期遥感估算结果, 监测太湖蓝藻动态发展过程。然后, 利用 MODIS 热红外波段(31 和 32), 采用分裂窗算法, 同步反演出的太湖表面水体温度, 探讨蓝藻爆发的水温条件, 及蓝藻生长与水体温度之间的关系。研究表明, 在水体富营养化前提下, 水体温度是影响蓝藻生长的重要环境因子; 合适的水体温度(24–30℃)是蓝藻爆发的必要条件; 大于 30℃ 的高温, 对蓝藻的生长有明显的抑制作用。

关键词: 遥感; MODIS; 蓝藻爆发; 水温; 太湖

Relationship between blue algal bloom and water temperature in Lake Taihu based on MODIS

WANG Deyu¹, FENG Xuezhì¹, ZHOU Liguó¹, HAO Jingyan² & XU Xiaoxiong³

(1: *Department of Geographic Information Science, Nanjing University, Nanjing 210093 P.R.China*)

(2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210018 P.R.China*)

(3: *Geological Surveying and Mapping Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310030 P.R.China*)

Abstract: Blue algal bloom in Lake Taihu was dynamically monitored using MODIS of hyper-spectral remotely sensed data, and combined with water temperature, environmental condition of algal blooming was also discussed. Firstly, blue algal biomass was estimated using simple ratio vegetation index, and progress of blue algal bloom was dynamically monitored using six sets of MODIS data. Then synchronous water temperature was retrieved from MODIS infrared bands 31 and 32 using window split model. The main environmental factor of blue algal bloom- water temperature was analyzed, as well as the relationship between blue algal growing and water temperature. The results showed that water temperature was an important environmental factor of blue algal growing; and appropriate water temperature (ranged from 24°C to 30°C) was necessary condition of blue algal bloom; and high temperature (> 30°C) significantly inhibited the growth of blue algae.

Keywords: Remote sensing; MODIS; blue algal bloom; water temperature; Lake Taihu

富营养化的湖泊中含有丰富的有机氮和有机磷, 通过光照发生生化反应, 就会生成蓝藻。遇到适合的天气条件(如高温), 蓝藻疯狂生长, 形成蓝藻水华。蓝藻水华是水体富营养化的主要标志。有的学者对蓝藻爆发的机理进行了研究^[1-2]。太湖水质逐年下降, 湖体中营养物增多, 湖泊富营养化加重是蓝藻暴发的主要原因, 而大量的农业面源污染是太湖蓝藻爆发的加速剂。基于蓝藻生长机理, 结合环境因子, 陈宇炜和丰江帆分别对蓝藻水华的预测模型进行了研究^[3-4]。研究的结果表明, 水温(WT)、水体透明度(SD)、总磷(TP)和总氮(TN)与蓝藻生物量相关性密切, 可以根据这些环境因子来建立蓝藻生长的预测模型。特别需要指出的是, 水温的四季变化对藻类的生长有重要的影响作用, 高温是蓝藻爆发的必要条件。

* 国家科技支撑计划(2007BAC26B01)资助。2007-09-24 收稿; 2007-11-06 收修改稿。王得玉, 男, 1979 年生, 博士; E-mail: gisnju@126.com.

蓝藻生物量在春秋冬季与月均水温有很好的对应关系,而在夏季藻类爆发时与水温的差异较大,主要由夏季蓝藻水华爆发时,藻类受风浪和湖流影响而迁移^[1]。此外,高温对蓝藻的生长有一定的抑制影响。

蓝藻爆发时,水中的溶解氧被蓝藻大量消耗,鱼等其他水生生物会因缺氧而死亡,蓝藻释放的毒素和异味物质对人体有直接的危害。随着内陆湖泊富营养化的加重,蓝藻水华频频发生,对沿湖地区的供水和渔业生产造成严重的危害。蓝藻水华的监测、预防和治理,离不开数据的支持。遥感技术的出现为湖泊和近海藻类的监测提供了有效的手段。近年来,国内学者在这方面做了大量的研究,李旭文等以 TM 数据为数据源,利用叶绿素 a 与差值植被指数 DVI(TM4/TM3)之间很高的相关性,建立了藻类生物量遥感定量模型,对梅梁湖湖区叶绿素 a 及蓝藻生物量进行了遥感估算^[5];黄家柱等利用 Landsat TM 遥感数据监测了 1998 年 8 月的太湖蓝藻爆发^[6];胡雯等利用 FY-1C/C AVHRR 数据对巢湖的蓝藻叶绿素含量进行了遥感估算^[7];李炎等基于 AVHRR 红光波段和近红外波段,建立了藻华识别模式,实现了浓度为 64–256 $\mu\text{g/L}$ 叶绿素浓度遥感估算^[8]。

这些研究都是基于蓝藻的光谱特征,实现蓝藻生物量的遥感监测,没有考虑到水温等环境因子。本文利用 MODIS 高光谱遥感数据,采用简单的比值植被指数模型,实现蓝藻生物量的遥感估算,对太湖蓝藻爆发进行动态监测;并反演出同步的太湖表层水体温度。基于遥感估算的蓝藻生物量数据和水体温度数据,探讨蓝藻爆发的水温条件,和蓝藻生长与水温之间的关系。

1 研究区与数据

太湖位于长江三角洲的太湖,是流域内最大的湖泊。水面面积约 2338.1 km^2 ,位于 30°55'40"–31°32'58"N, 119°52'32"–120°36'10"E 之间流域。太湖南北长 68.5km,东西平均宽 24km,最宽处 56km,湖泊平均水深 1.9m,最大水深 2.6m,是一个典型的浅水湖泊或积水洼地^[9]。太湖是我国五大淡水湖之一,其主要功能包括:饮用水源、农业灌溉、游览、航运、水产养殖、工业用水等,太湖在该流域的经济发展和人类活动中的作用举足轻重^[10]。太湖流域不仅是我国人口和城镇最密集的地区,也是经济最发达、城市化程度最高的地区之一。由于经济的快速发展,太湖在资源、环境等方面也付出了巨大的代价,造成了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,大部分水体处于中度甚至极度富营养状态^[9]。严重的富营养化常常诱发蓝藻水华,如太湖北部的梅梁湾湖区,几乎每年都会发生蓝藻水华现象^[11]。1991 年太湖蓝藻水华爆发,使无锡市城区生产和生活用水发生困难,110 家工厂停产,严重影响了居民的日常生活和经济的正常发展。2007 年 5 月底至 6 月初,太湖又发生了蓝藻水华大规模爆发事件,造成无锡市自来水无法饮用,饮用水源的严重短缺,不得不人工降雨稀释太湖污染水体。

蓝藻水华爆发的监测与预警对遥感数据的要求主要表现在波谱分辨率、空间分辨率和时间分辨率。MODIS 传感器具有 0.14–14 μm 波谱范围内的 36 个波段,1d 的时间分辨率,完全能满足遥感数据对光谱和空间分辨率的要求。其 250m, 500m, 1000m 的空间分辨率,对太湖这样大型的内陆湖泊来说,是能够满足遥感监测的需求。最重要的是,MODIS 数据完全免费,大大节约了湖泊蓝藻遥感监测的成本。本文选取的是 2007 年 4 月 13 日、5 月 19 日、5 月 27 日、5 月 29 日、6 月 11 日和 7 月 29 日 6 期数据,在这 6 期数据内,太湖及周边上空基本无云层覆盖。MODIS 数据从 NASA 网站下载,选取 MODIS Lever-1B 影像数据:1–7 波段 500m 分辨率的反射率数据和 31、32 波段 1000m 分辨率的热红外数据。温度反演时还用到 2、19 波段 1000m 分辨率的反射率数据。利用第 7 波段反射率数据来识别水体像元,反射率小于 0.05 的像元为水体像元,得到太湖 500m 分辨率的水体掩模。

2 蓝藻的遥感估算

藻类属低等浮游植物,细胞中含有叶绿素,藻类的光谱特征与陆地植被类似,即在可见光波长范围内存在绿色光谱反射峰;在红外波段,由于藻类细胞结构特点存在强烈的反射率。地面实测的光谱分析表明^[5,12–13]水体中藻类的密度和光谱中主波长在 0.67 μm 处的谱谷与两侧主波长 0.55 μm , 0.80 μm 处谱峰的对比密切相关。由于 0.67 μm 处藻类反射率基本上稳定,而 0.8 μm 处的反射强度能敏感地反映水中藻类的生物量。

MODIS1、2 波段分别属于红光波段和近红外波段, 波长范围分别为 0.620–0.670 μm 和 0.841–0.876 μm . 研究表明, 叶绿素 a 浓度实测值和 MODIS 1、2 波段反射率的比值 r_2/r_1 呈现明显的线性关系, 相关系数 R^2 达到 0.8147^[14]. 波谱响应分析也表明, MODIS 卫星的第二个通道对藻类信息反应明显, 蓝藻水华区域为高值, 与背景水面的低值形成明显对比. 本文采用叶绿素 a 的 MODIS 估算模型 $C_{\text{chl.a}}=79.386 \times (r_2/r_1)-16.092$ ^[14], 来估算太湖水体中的蓝藻浓度(mg/L). 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来. 例如, 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, 在没有更好地识别模式之前, 本文把东太湖水域的绿色信息人工识别为大型浮游植物. MODIS 的反射率数据产品没有经过大气校正, 为了使遥感估算结果在时间序列上有可比性, 必须消除遥感数据中大气效应. 分别对六期 MODIS 数据进行了 6S 大气校正^[15], 采用中纬度夏季标准大气模型和大陆型标准气溶胶模型.

3 水体温度的遥感反演

在 MODIS 8 个热红外波段中, 31 和 32 波段最适合地表温度反演. 本文根据覃志豪提出的分裂窗方法^[16], 利用 MODIS31 和 32 热红外波段来反演太湖水体表面温度. 计算公式如下:

$$T_s=A_0+A_1T_{31}-A_2T_{32}$$

式中, T_s 是地表温度(K), T_{31} 和 T_{32} 分别是MODIS第31和32波段的亮度温度, 根据这2个波段的图像DN值来计算; A_0 , A_1 和 A_2 是分裂窗算法的参数. 分裂窗算法所需要许多参数中, 最主要的是大气透射率 $\tau_i(\theta)$ 和地表比辐射率 ϵ_i , 其中 $i=31, 32$. 根据MODIS波段2和19的反射率估算出大气水汽含量数据, 然后根据大气透射率与大气水汽含量之间的线性关系估算出大气透射率, 并对大气透射率数据做了温度和视角校正; 地表比辐射率对于水体像元假设为常数值 $\epsilon_{31}=0.99683$, $\epsilon_{32}=0.992324$. 分裂窗算法参数的估算方法详见文献[17].

4 蓝藻与水温的关系分析

太湖6期蓝藻遥感估算的结果(图1), 图中受大型浮游植物影响而误判为蓝藻的象元进行了特别的标识, 清楚地表现了太湖蓝藻爆发前后的动态变化过程: 4月13日, 蓝藻浓度比较低, 基本上没有浓度大于 50mg/L 的水域; 到了5月19日、27日和29日, 在太湖北部的梅梁湾、竺山湾、贡山湾和太湖西部的部分水

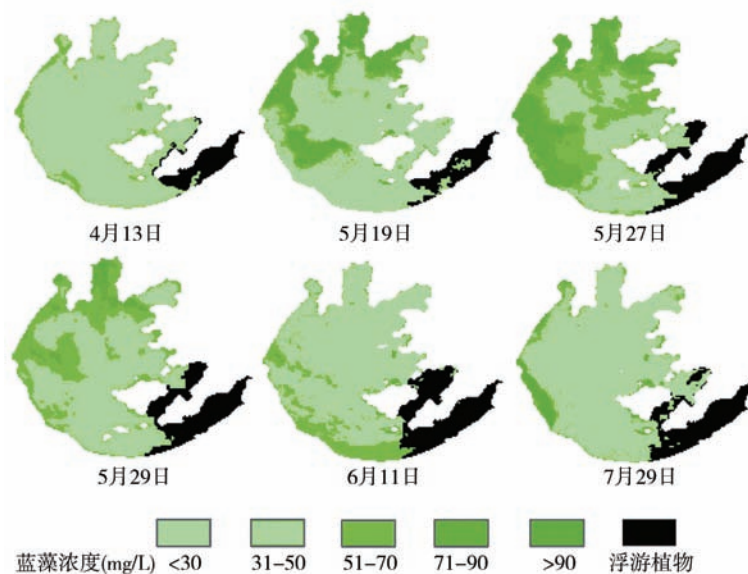


图 1 6 期太湖蓝藻分布示意图

Fig.1 Blue algal concentration of six days in Lake Taihu

域蓝藻浓度大于50mg/L, 甚至大于90mg/L; 到了6月11日北部太湖的蓝藻基本褪去; 到7月29日, 除了近岸极小部分水域有蓝藻外, 太湖绝大部分水域没有出现蓝藻爆发的迹象. 图2为6期水体表层温度遥感反演图像. 由于水陆混合光谱的影响, 太湖边缘出现了一些温度异常值, 在图2中用灰色标识. 剔除异常值后6期水温图像的平均值分别为: 17.32℃, 25.26℃, 24.98℃, 26.99℃, 24.34℃, 34.00℃.

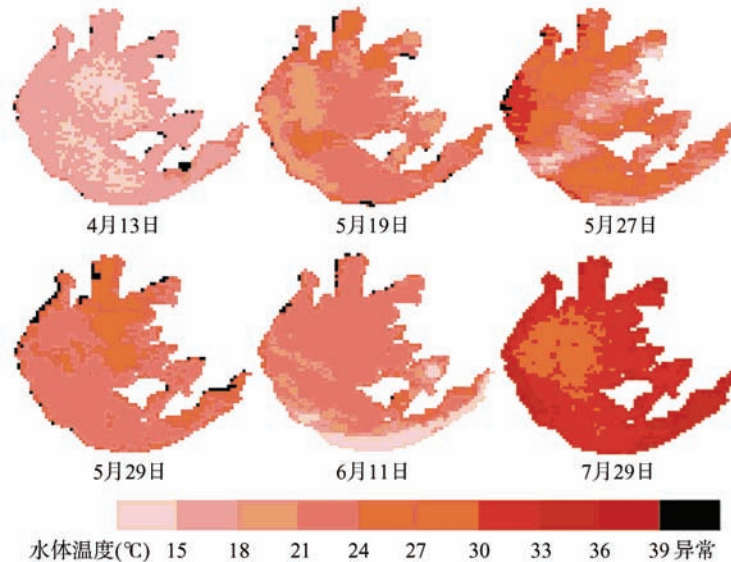


图2 6期太湖水体温度示意图

Fig.2 Water temperature of six days in Lake Taihu

4月13日水温大约在14-17℃的范围内, 太湖绝大部分水域蓝藻浓度较低, 没有爆发迹象. 5月19-29日, 水体温度达到了24-27℃, 蓝藻才开始大面积爆发(图1和图2). 由此可以推断, 较高的温度是蓝藻爆发的必要条件, 蓝藻生物量与水温有着一定的相关关系. 6月11日和7月29日, 太湖水体平均温度比较高, 7月29日甚至达到了34℃, 太湖并没有出现大规模的蓝藻暴发. 这可能与6月初蓝藻暴

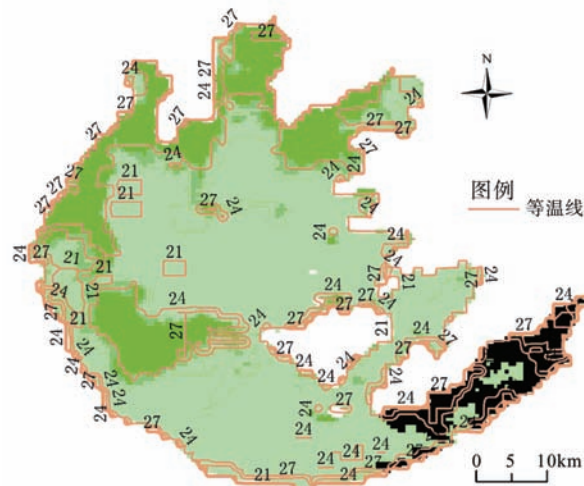


图3 2007年5月19日太湖水体等温线和蓝藻分布(蓝藻浓度图例见图1)

Fig.3 Temperature contour and algal bloom map of Lake Taihu on 19th May, 2007

发后,引起相关部门重视,开始了大规模的打捞有关,但可以肯定的是在达到了蓝藻爆发的临界温度之后,蓝藻生物量与水体温度没有明显的相关关系.同一天内,太湖不同水域的蓝藻浓度与水体温度也有着一定的相关关系,特别是5月19日和5月29日.太湖蓝藻爆发的水域与温度相对较高的水域基本一致(图3).

为了更直观地表现蓝藻生物量和水体温度之间的相关关系,选取了分布合理的十个样点,分别提取每一期相应样点的蓝藻浓度和水体温度数据(图4).水体温度在15–24℃时,蓝藻浓度都没有超过70mg/L,受温度制约,没有蓝藻暴发的迹象.在这个温度区间蓝藻浓度与水体温度也没有明显线形关系,因为除了水体温度,蓝藻的生长还受富营养化程度和不同时期其他环境因素影响.但是在这个温度区间,随着温度的升高,蓝藻浓度的最高值在增加,这说明水体温度是制约蓝藻生长的重要因素.水体温度达到24–30℃时,有9个样点的蓝藻浓度超过了70mg/L,而且所有超过70mg/L的样点都在这一温度区间.由此可以推断,24–30℃是蓝藻爆发的必要水温条件.水体温度超过30℃之后,蓝藻浓度的峰值都没有达到60mg/L,可见太高的水体温度反而对蓝藻的生长有一定的抑制作用.

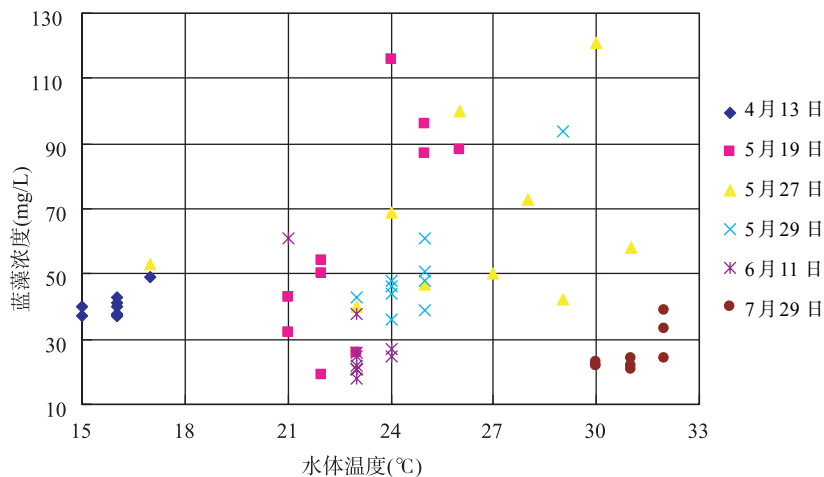


图4 蓝藻浓度与水体温度的相关关系图(由于数据相同,图中部分样点重合)

Fig.4 Correlation between blue algal concentration and water temperature

5 结论

本文基于遥感手段实现了太湖在蓝藻爆发前后的动态监测,并探讨了蓝藻的生长和爆发与水温的关系.结果表明:①水体温度是影响蓝藻生长的重要环境因子;②合适的水体温度(24–30℃)是蓝藻爆发的必要条件;③大于30℃的高温,对蓝藻的生长有明显的抑制作用.这与以前的研究结论基本一致.MODIS数据不但可以提供可见光、近红外波谱信息,直接用于藻类的遥感估算.还提供了热红外波段,用于水体表层温度反演.结合水温这个关键的环境因子,可以提高蓝藻爆发遥感预警的准确度和可靠性.

6 参考文献

- [1] 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, 12: 17-19.
- [2] 宋立荣, 李 林, 陈 伟等. 水体异味及其藻源次生代谢产物研究进展. 水生生物学报, 2004, 28(4): 434-439.
- [3] 陈宇炜, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测. 湖泊科学, 2001, 13(1): 63-71.
- [4] 丰江帆, 滕学伟, 张 宏等. 基于 GIS 的太湖蓝藻预警系统研究. 环境科学与技术, 2006, 29(9): 60-62.

- [5] 李旭文, 季耿善, 杨 静. 太湖梅梁湖湾蓝藻生物量遥感估算. 国土资源遥感, 1995, **2**: 23-28.
- [6] 黄家柱, 赵 锐. 卫星遥感监测太湖水域蓝藻暴发. 遥感信息, 1999, **4**: 43-44.
- [7] 胡 雯, 杨世植, 翟武全等. NOAA 卫星监测巢湖蓝藻水华的试验分析. 环境科学与技术, 2002, **25**(1): 16-19.
- [8] 李 炎, 商少凌, 张彩云等. 基于可见光与近红外遥感反射率关系的藻华水体识别模式. 科学通报, 2005, **50**(22): 2555-2561.
- [9] 秦伯强, 胡维平. 太湖水环境演化过程与机理. 北京: 科学出版社, 2004: 1-8.
- [10] 闻建光, 肖 青, 杨一鹏等. 基于 Hyperion 数据的太湖水体叶绿素 a 浓度遥感估算. 湖泊科学, 2006, **18**(4): 327-336.
- [11] 祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究[博士学位论文]. 中国科学院遥感应用研究所, 2006.
- [12] 马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度. 遥感学报, 2005, **9**(1): 78-86.
- [13] 王艳红, 马荣华, 邓正栋. 基于分区的太湖叶绿素 5 遥感估测模型. 河海大学学报(自然科学版), 2007, **35**(1): 86-91.
- [14] 祝令亚, 王世新, 周 艺等. 应用 MODIS 监测太湖水体叶绿素 a 浓度的研究. 遥感信息, 2006, **2**: 25-28.
- [15] Vermote EF, Tanré D, Deuzé JL *et al.* Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: An Overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1997, **35**(3): 675-686.
- [16] 覃志豪, 高懋芳, 秦晓敏等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法——以 MODIS 数据为例. 自然灾害学报, 2005, **14**(4): 64-71.
- [17] 高懋芳, 覃志豪, 徐 斌. 用MODIS数据反演地表温度的基本参数估计方法. 干旱区研究, 2007, **24**(1): 113-119.