

太湖蓝藻水华的 MODIS 卫星监测*

周立国¹, 冯学智¹, 王春红¹, 王得玉¹, 徐晓雄²

(1: 南京大学地理信息科学系, 南京 210093)

(2: 浙江省测绘大队, 杭州 310030)

摘要: 本文基于 MODIS 卫星影像探讨太湖蓝藻水华的识别、监测问题. 通过比较 MODIS 影像上不同蓝藻浓度的波段反射率值的差别, 得到对蓝藻信息响应的敏感波段, 利用特定波段的合成, 可基本识别蓝藻的分布信息, 并基于蓝藻的光谱响应特征, 采用比值模型方法、进一步确定蓝藻分布的相对浓度信息. 最后通过不同时相蓝藻浓度的叠加分析, 得出了蓝藻水华的动态变化信息.

关键词: MODIS 数据; 蓝藻; 监测; 太湖

Monitoring cyanobacteria bloom based on MODIS data in Lake Taihu

ZHOU Ligu¹, FENG Xuezh¹, WANG Chunhong¹, WANG Deyu¹ & XU Xiaoxiong²

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

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

Abstract: This paper discusses the method and mechanism of identifying and monitoring the cyanobacteria bloom based on MODIS data in Lake Taihu. Through the comparison of spectral reflectance value of different cyanobacteria concentration, it can be found that several wave bands are sensitive to cyanobacteria. Making use of the color composition, we can get the macroscopic distribution information of the cyanobacteria bloom. Furthermore, using the ratio index model, we can further confine the relative content of the cyanobacteria bloom. Finally through overlaying analysis of the cyanobacteria concentration distribution from multi-temporal MODIS data, dynamic changing information of cyanobacteria bloom can be obtained.

Keywords: MODIS data; cyanobacteria; monitoring; Lake Taihu

太湖是我国第三大淡水湖, 近年来太湖富营养化严重, 因湖水富营养化引起的蓝藻水华频繁暴发, 不仅恶化了水体的感官性状, 而且破坏了太湖生态系统的总体平衡, 严重降低了太湖的使用功能^[1]. 并且太湖蓝藻暴发的严重性有逐年增加的趋势, 特别 2007 年 5 月, 更是出现了超厚的蓝藻水华, 沿岸几百米水面上的蓝藻厚度达 10cm 左右, 给居民生活、经济发展等带来严重影响. 因此突破传统水质采样监测方法, 运用快速的遥感监测手段, 及时准确地获取蓝藻信息, 进而进行有效的预防、控制就显得非常必要.

国内许多学者利用遥感技术对太湖的叶绿素、悬浮物等参数的测定作了大量的研究, 例如马荣华等利用实测光谱和水质采样数据, 通过多种方法对太湖叶绿素和悬浮物等水质指标进行估测^[2-3]; 闻建光、肖青等基于传统的经验模型, 提出基于混合光谱模型的估测叶绿素浓度的新方法, 并和其它模型作了比较分析^[4]; 李旭文等以 TM 数据为数据源, 利用叶绿素与差值植被指数之间的高相关性, 建立了藻类生物量遥感定量模型, 对梅梁湖湖区叶绿素及蓝藻生物量进行了遥感估算^[5]. Lefelier 等利用 MODIS 较高的辐射分辨率(12bit, TM 图像 8bit)来估算叶绿素浓度, 研究结果表明在最适宜的观测条件下利用 MODIS 的特定波段可以很灵敏的检测到叶绿素在海洋表面 0.5mg/m³ 的浓度变化^[6]. 本文在基于以上研究的基础上, 利用 MODIS 影像数据, 力求建立一种简单、快速、实用的监测方法, 实现蓝藻信息的动态监测.

* 国家科技支撑计划(2007BAC26B01)资助. 2007-09-05 收稿; 2007-11-06 收修改稿. 周立国, 男, 1980 年生, 博士; E-mail: zhouli-guo@tom.com.

1 研究区域与图像数据

太湖位于长江三角洲南翼的太湖平原, 介于东经 $119^{\circ}52'32''$ – $120^{\circ}36'10''$, 北纬 $30^{\circ}55'40''$ – $31^{\circ}32'58''$ 之间, 水面面积约 2338.1km^2 , 平均水深仅 2m 左右, 是典型的浅水型湖泊^[7]. 太湖因其独特的地理位置在我国东部地区的社会、经济发展中起着举足轻重的作用, 其梅梁湖区、贡湖区、胥湖区是无锡、苏州等城市的主要供水水源地.

蓝藻作为一种水生浮游藻类在有机氮、有机磷丰富, 无风晴好的天气环境条件下暴发突然, 因此要真正实现对蓝藻长期的、实时的动态监测, 要求遥感数据必须同时满足空间分辨率、时间分辨率、光谱分辨率、辐射分辨率等几项指标要求, 并且在经济上要可行. 本文采用 MODIS 数据源于其时间分辨率较高, 能满足每天至少覆盖目标区域 1 次, 这为蓝藻水华的监测提供了基本的时间条件. 在光谱分辨率方面 MODIS 传感器共有 36 个光谱通道, 分布在 $0.4\text{--}14\mu\text{m}$ 的电磁波谱范围内. MODIS 数据尽管空间分辨率不很高, 星下点的地面分辨率按波段不同分别为 250m 、 500m 和 1000m 不等, 但比 NOAA 卫星的 1100m 空间分辨率有了改进, 基本满足对蓝藻的大范围宏观监测需求.

综合以上因素, 本文采用 MODIS 影像数据进行蓝藻水华的监测分析. 本研究所用数据级别为 MODIS Level-1B 遥感影像数据, 选取时相为研究区 2007 年 4 月至 6 月的逐日数据中蓝藻水华暴发前后的有代表意义的 4 景数据. 对数据的选取要求湖泊上空晴朗无云, 能见度高.

2 蓝藻监测原理

2.1 MODIS 数据预处理

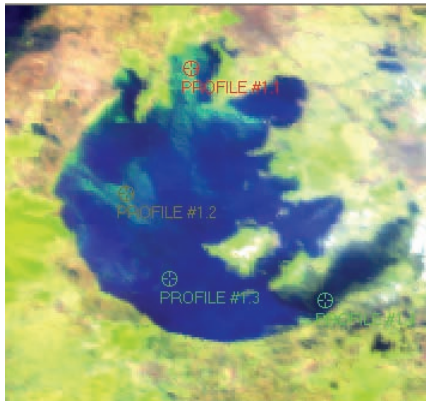


图 1 选点位置

Fig.1 Location of sampling points

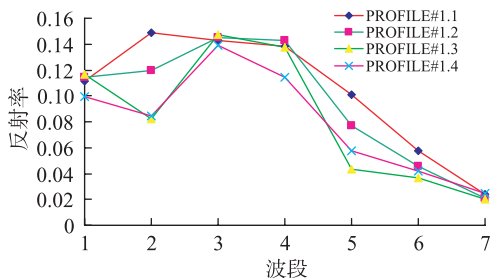


图 2 采样点反射率值变化曲线

Fig.2 Reflectivity value curve of sampling points

MODIS Level-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, 需要进行几何定位. 实验利用 MODIS L1B 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; 并结合 HDF 数据集中的 Offsets、Scales 参数对 MODIS 影像进行了辐射定标^[8-9], 计算公式为: $R = Scales (DN - Offsets)$.

其中, Scales 为反射率缩放系数, DN 为 MODIS 1B 的数据存储值, Offsets 为反射率缩放截距, R 为得到像元反射率.

2.2 波谱响应特征

蓝藻的遥感监测是基于蓝藻的光谱效应, 蓝藻呈绿颜色, 大量蓝藻覆盖在水面上像一层粘糊糊的绿油漆, 由于浮于水上的蓝藻浓度不同, 使水体颜色、密度、透明度等产生差异, 导致水体的反射能量发生变化, 进而在遥感图像上反映为色调、灰阶、形态、纹理等特征的差别, 因此选择恰当的响应波段, 可以初步识别蓝藻分布的范围、面积等信息^[10-11].

蓝藻暴发引起水体密度、水体主成分含量等一系列参数发生变化, 水体反射波谱特性也发生变化. 考虑空间分辨率需求, 实验选取 500m 分辨率的前七个波段做波谱响应特征测试, 首先通过 6S 模式对 5 月 29 日 MODIS 数据进行大气校正^[12], 得到像元的真实反射率值. 分别在高浓度蓝藻区, 中浓度蓝藻区, 低蓝藻区选择 PROFILE#1.1, PROFILE#1.2, PROFILE#1.3 三个样点, 由于东太湖区域水深较浅, 有其特殊性, 故增选 PROFILE#1.4 样点, 样

点位置(图 1), 得到四个采样点各波段的反射率值变化曲线(图 2).

3 蓝藻信息识别与监测

3.1 合成图像的信息识别

实验选取 4 月 13 日、5 月 19 日、5 月 27 日、5 月 29 日 4 期 MODIS 影像数据, 为蓝藻水华发生前、发生过程中的数据. 数据处理后采用 500m 空间分辨率的红外波段 6, 以及 250m 分辨率重采样为 500m 分辨率的近红外波段 2, 红光波段 1 进行假彩色合成. 图 3 为假彩色合成并进行相关增强处理之后的输出图, 浅绿色为浮在湖面之上的蓝藻颜色. 从图像上可基本识别蓝藻的分布情况, 并可通过影像对比可发现蓝藻的分布转移、聚集、扩散等信息. 通过目视解译, 4 月 13 日基本无蓝藻信息, 湖水为清澈的蓝色, 5 月 19 日梅梁湖区及太湖北部出现聚集的蓝藻信息, 5 月 27 日-5 月 29 日蓝藻分布范围变大, 呈扩散趋势. 图上反映结果基本和实际情况相符, 实验表明通过各波段间的假彩色合成可大范围监测蓝藻信息, 宏观掌握蓝藻水华情况.

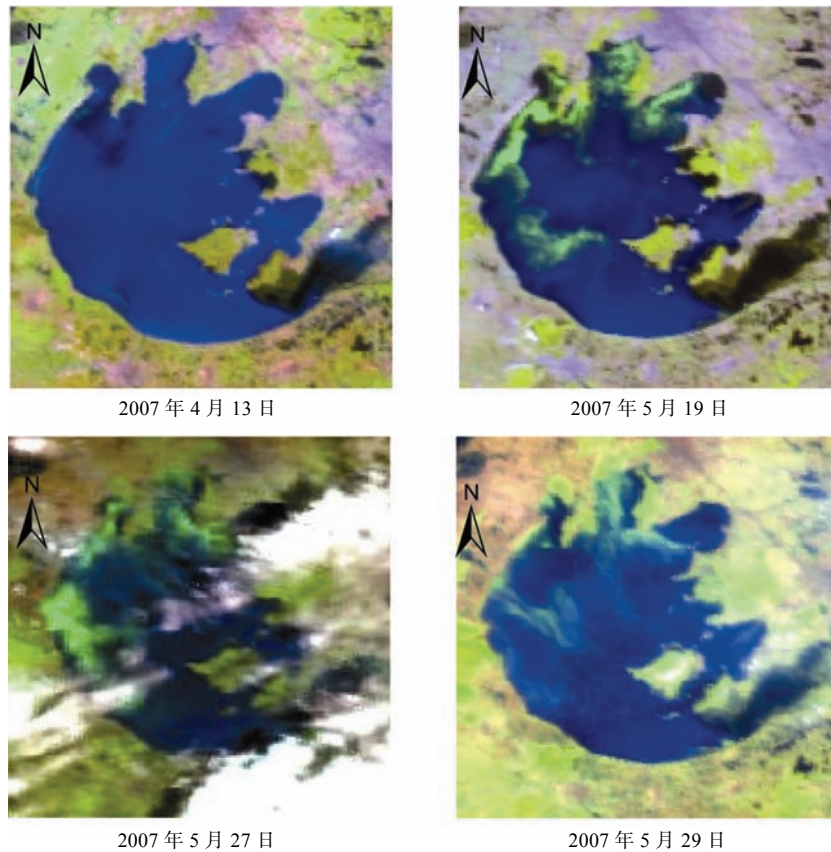


图 3 不同时相 MODIS 6、2、1 波段假彩色合成结果

Fig.3 Band 6, 2, 1 false color composite image

3.2 比值图像的识别模型

对比采样特征点的反射率曲线, 含藻水体的反射率值在 MODIS 第 1、3、4 波段(可见光红波段)处基本稳定, 变化最明显的为第二波段(近红外波段, $0.84-0.87\mu\text{m}$), 反射率值呈宽幅波动. 在蓝藻含量高、绿度高的特征点, 第二波段反射率明显升高, 而在蓝藻含量较低的特征点上, 第二波段的反射率明显降低. 这是因为水华暴发时蓝藻大量覆盖于水面, 藻类属于低等浮游植物, 细胞中的叶绿素同样进行光合作用,

因此在近红外波段反射率值的差别较大,呈现出类似于植被的光谱反射特性^[5,13].基于以上分析由于可见光红波段与近红外波段对蓝藻的光谱响应明显不同,通过两者简单的数值比便能充分表达两反射率之间的差异,比值植被模型可表达为: $RVI = \rho_{NIR} / \rho_R$, 式中 ρ_{NIR} 为近红外波段反射率, ρ_R 为红波段反射率.

MODIS 1、2 波段空间分辨率为 250m, 分别属于红波段(R)和近红外波段(NIR), 故利用 MODIS 第 1、第 2 波段计算反射率比值来表征蓝藻信息.

通过波谱分析得到的波段比值模型, 可更直观的得出蓝藻浓度等级分布的专题信息. 利用 MODIS 卫星资料 2, 1 波段比值运算后通过密度分割得到的 5 月 19 日, 5 月 29 日蓝藻浓度信息分布(图 4), 根据比值模型结果, 结合以前学者研究及多次实验尝试^[14], 将比值大于 0.8 定义为轻度蓝藻, 并将蓝藻污染程度分为基本无蓝藻到高度蓝藻五个级别, 分级方法采用等差分级的方法. 分析得到的蓝藻分布情况基本和假彩色合成的目视结果相符. 比值模型的实验结果表现为东太湖区域也存在蓝藻信息, 而实际上东太湖水质较好、是太湖中无蓝藻爆发的水域. 这是因为东太湖水深较浅, 沿岸滩地上遍布芦苇和矮小树丛, 在夏秋季节具有高达 96% 的水生植被覆盖率, 使得水体反射率值在第一波段有所降低, 故影响了实验结果. 这在很多学者的研究中也得出了相同的结论^[15-16].

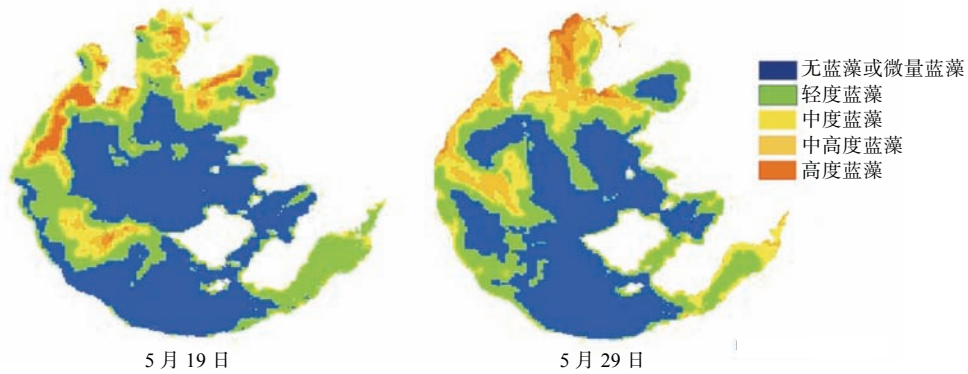


图 4 比值模型计算的太湖蓝藻等级分布图

Fig.4 Cyanobacteria thickness grade distribution of Lake Taihu based ratio model

3.3 蓝藻水华的动态监测

蓝藻水华的动态监测其中关键的一点就是获得蓝藻信息在时间 T 上的变化情况. 本文通过两两时相蓝藻浓度信息的叠加分析来获得蓝藻信息的动态变化情况. 蓝藻信息动态变化(图 5), 绿色表示蓝藻浓度的增加, 蓝色表示蓝藻浓度的减少, 以色彩的渐变表示动态变化的数量差别, 根据上述比值模型设定的

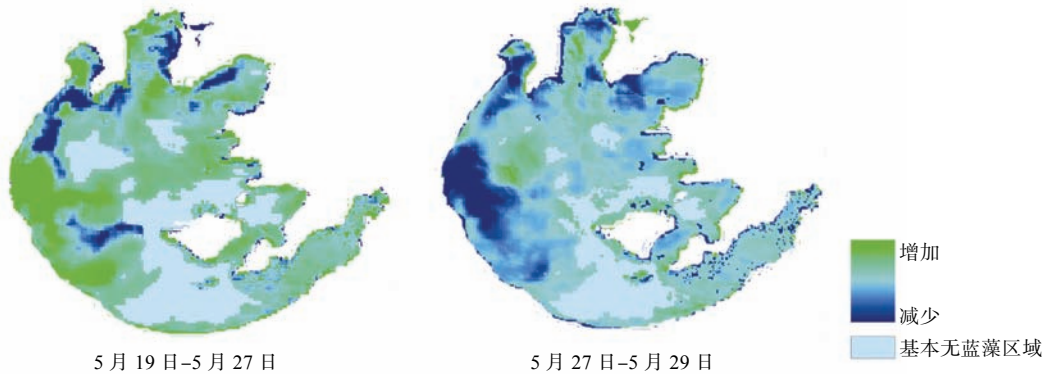


图 5 不同时相蓝藻信息动态变化图

Fig.5 Multi-temporal dynamic change information of cyanobacteria concentration

识别蓝藻的最低阈值, 两个时相都基本没有蓝藻信息的区域用浅灰色表示。

通过多个时相的蓝藻浓度分布的叠加分析不仅可以得到蓝藻分布的范围信息, 还可反映蓝藻水华程度的异同以及动态变化的趋势。例如从 5 月 27 日-5 月 29 日两个时相的叠加分析可发现太湖中西部蓝藻的消退和梅梁湖区中东部蓝藻浓度增加的趋势; 通过以上两幅叠加结果的综合分析还可得到这一时段梅梁湖区和西部沿岸区呈现为蓝藻的严重影响区, 中北部椒山一线表现为水华过渡区等信息。

4 结语

1)MODIS 数据可以用于内陆水体藻类水华监测。由于 MODIS 的高光谱分辨率, 对蓝藻的识别提取将有很大的发展前景; 而且观测周期短, 数据可以免费获得, 可以对对象进行快速连续的监测; 不足之处在于空间分辨率相对较低, 对中小型湖泊适用性不高, 比较适用于大型湖泊。

2)在监测方法上, 通过波段的假彩色合成能基本反映蓝藻的大体分布信息, 但目视结果可能受到湖中存在的浮藻、活体蓝藻的影响; 由于蓝藻暴发时, 蓝藻覆盖水面体现植被特征, 可用植被指数方法进一步确定水体所含蓝藻的数量信息; 但研究区时常存在高密度云等噪声, 影响日常监测顺利进行, 特别是蓝藻暴发的突然性, 更要求我们找到去除薄云等噪声的系列办法, 真正实现无限制的蓝藻监测。

3)本研究只是针对蓝藻暴发期间的遥感影像而言, 还需在快速监测基础上, 提高监测精度, 区分浮游蓝藻和湖底植物信息, 特别在东太湖区域; 下一步将在获得实测数据的基础上, 建立估测蓝藻确切含量的估算模型, 并进行模型参数与蓝藻含量的相关关系研究, 排除时间、环境等因素影响, 建立模型的监测参数体系, 进而实时定量的监测出蓝藻的含量。

5 参考文献

- [1] 王海君, 李云梅. 用 ASTER 数据监测梅梁湖湖区蓝藻分布的方法. 南京师大学报(自然科学版), 2005, **28**(1): 103-106.
- [2] Ma Ronghua, Tang Junwu, Dai Jingfang. Bio-optical model with optional parameter suitable for Lake TaiHu in water color remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**: 4305-4328.
- [3] 马荣华, 戴锦芳, 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量. 湖泊科学, 2005, **17**(2): 97-103.
- [4] 闻建光, 肖青, 柳钦火等. 基于混合光谱理论的太湖水体叶绿素 a 浓度提取. 地理科学, 2007, **27**(1): 92-97.
- [5] 李旭文, 季耿善, 杨静. 太湖藻类的卫星遥感监测. 湖泊科学, 1995, **7**(1): 65-68.
- [6] Lefelie RM, Abbott MR. An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the moderate resolution imaging spectromete-ter(MODIS). *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 215-223.
- [7] 吕恒, 江南等. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 A 浓度定量反演. 地理科学, 2006, **26**(4): 472-476.
- [8] 刘闯. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用. 遥感信息, 2000, (3): 45-48.
- [9] 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. 遥感信息, 2002, (3): 21-25.
- [10] 王艳红, 邓正栋, 马荣华. 基于实测光谱与 MODIS 数据的太湖悬浮物定量估测. 环境科学学报, 2007, **27**(3): 509-515.
- [11] 汪小钦, 王钦敏, 刘高焕等. 水污染遥感监测. 遥感技术与应用, 2002, **17**(2): 74-77.
- [12] 徐萌, 郁凡. 6S 模式对 EOS/MODIS 数据进行大气校正的方法. 南京大学学报(自然科学版), 2006, **42**(6): 582-589.
- [13] 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): 16-18.
- [14] 王云鹏, 闵育顺等. 水体污染的遥感方法及在珠江广州河段水污染监测中的应用. 遥感学报, 2001, **5**(6): 460-466.
- [15] 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, **26**(4): 472-476.
- [16] 雷坤, 郑丙辉, 王桥. 基于中巴地球资源 1 号卫星的太湖表层水体水质遥感. 环境科学学报, 2004, **24**(3): 376-380.