

太湖藻华水体的遥感监测与预警

宋 瑜^{1,2}, 宋晓东¹, 郭青海¹, 唐立娜^{1*}

1. 中国科学院城市环境研究所, 城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361021
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 受水体富营养化的影响, 藻华暴发已成为目前我国湖泊和水库面临的主要环境问题之一。针对藻华水体的动态监测, 特别是提前预警技术的研究对于内陆水体的污染防控具有重要意义。该文结合高光谱实验数据, 综合运用指数法和遥感影像假彩色合成法, 建立了基于 MODIS 数据的太湖藻华水体遥感信息提取模型, 并在此基础上, 对 2007 年 3~5 月间太湖藻华形成过程进行了遥感实时动态监测研究。通过对春夏季节蓝藻水华的空间分布特征和藻华不同形成阶段的特征分析, 提出了太湖藻华水体预警的技术方法, 即当 MODIS 水体绿度指数 GI 集中分布于 0.6~0.8 区间时, 可认为太湖水域已进入蓝藻水华大规模暴发前的预警阶段。

关键词 蓝藻水华; 高光谱; MODIS; 遥感监测; 太湖

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)03-0753-05

引 言

自 20 世纪 80 年代起, 太湖就常出现以微囊藻为优势种的蓝藻水华。蓝藻暴发性繁殖消耗了大量的溶解氧, 使得水体处于缺氧甚至无氧状态; 蓝藻大量死亡后, 释放出蓝藻毒素等有害物质, 最终将会导致水生态系统的迅速崩溃^[1]。因此, 针对太湖藻华的监测预警研究对于及时、有效的水体污染防治工作具有重要意义。

遥感监测技术相对于传统水质监测手段具有范围广、速度快、成本低和便于进行长期实时监测等优势^[2,3]。水质遥感监测方法经历了 20 世纪 80 年代前的分析方法^[4]、20 世纪 80~90 年代的经验方法和 20 世纪 90 年代后的半经验方法^[5,6]的发展进程; 遥感数据源也由陆地资源卫星 Landsat MSS/TM^[7,8]发展到了水色传感器 SeaWiFS^[9,10]、MERIS^[11,12]和 MODIS(中分辨率成像光谱仪)数据^[6,13]。作为新一代“图谱合一”的光学遥感仪器, MODIS 数据具有高时间分辨率(4 time · d⁻¹)、光谱分辨率(36 个光谱通道)和较高的空间分辨率(250~1 000 m), 对于各类突发、快速演变的自然灾害具有更强的实时监测能力, 可满足太湖水域藻华遥感监测的需要。本研究结合太湖水体高光谱遥感实验, 建立了基于 MODIS 数据的藻华水体遥感信息提取模型, 通过对

2007 年 5 月底太湖蓝藻暴发事件时空监测结果的分析, 提出了针对太湖藻华水体预警的技术方法。

1 数据与方法

1.1 水体高光谱遥感实验

水体反射光谱的测量使用的是美国 ASD 公司生产的便携式分光辐射光谱仪。实验当日天气晴朗无云, 水面基本处于平静状态。仪器测量探头垂直于水面上方 1 m 左右进行测量, 借助于参考板, 仪器自动将水体向上辐射率转化为水体的反射率(图 1); 同时采集太湖水体表层水样, 室内叶绿素 a 浓度的测定采用分光光度法^[14]。

1.2 MODIS 数据获取与预处理

本研究所选用的遥感同步数据为 2007 年 11 月 2 日的 MODIS L1B 250 和 500 m 分辨率的数据, 同时选用在时间尺度上覆盖了 2007 年 5 月底太湖蓝藻暴发事件整个过程的 6 期(3 月 22 日、3 月 31 日、4 月 4 日、4 月 20 日、5 月 9 日和 5 月 20 日)MODIS 数据。

遥感数据预处理主要包括几何校正、大气校正和云检测等过程。几何校正结合 L1B 数据中自带的经纬度信息校正^[15], 校正后的位置精度控制在 0.5 个像素以内; 大气校正通过集成在 ENVI 遥感处理软件中的 FLAASH 模块实现,

收稿日期: 2010-05-02, 修订日期: 2010-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(30800148)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-450)资助

作者简介: 宋 瑜, 女, 1983 年生, 中国科学院城市环境研究所博士研究生 e-mail: ysong@iue.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: lntang@iue.ac.cn

采用中纬度夏季标准大气模型 (mid-latitude summer atmosphere model) 和乡村气溶胶模型 (rural aerosol model) 进行^[6]; 最后, 采用 NASA 标准算法 MOD35 数据进行云检测, 并基于 1:100 万地形数据完成研究区数据剪裁。

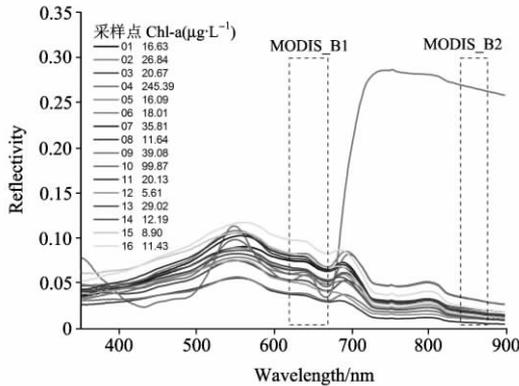


Fig 1 Spectral reflectance curves of the sampling points in Taihu lake

1.3 藻华水体遥感信息提取

(1)MODIS 假彩色合成: 首先, 将 MODIS 500m 分辨率数据的第 7 波段(2 105~2 138 nm)重采样为 250 m; 对采样后的第 7 波段、MODIS 250 m 分辨率数据的第 2 波段(841~876 nm)和第 1 波段(620~670 nm)进行 RGB(红、绿、蓝)合成(图 2); 并根据假彩色合成图像中绿色藻华与周边蓝黑色水体区别明显这一特征, 实现藻华水体遥感信息识别。

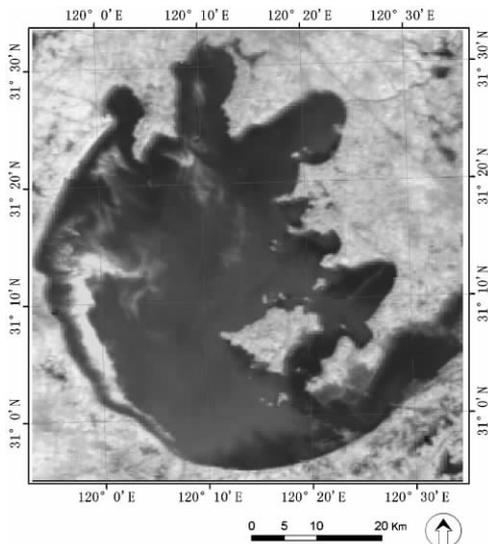


Fig 2 MODIS_B7, 2, 1 false color composite image of Nov. 20, 2007

(2)水体绿度指数: 随着水体中藻类生物量的增加, 叶绿素浓度升高, 水体光谱反射率在红光波段的吸收峰明显, 而在近红外波段光谱反射率升高; 藻华生成并发生堆积后, 藻华水体呈现类似于植被的光谱特征(图 1)。因此, 根据实测水体反射光谱数据与 MODIS 卫星通道设置特性, 构建基于 MODIS 波段 1 和波段 2 的水体绿度指数 (green index, GI)

$$GI = B2/B1$$

式中, B1(620~670 nm)和 B2(841~876 nm)分别为 MODIS 第 1 和第 2 波段的反射率。

根据野外实验现场调查, 采样点 10 有蓝藻水华呈零星漂浮, 采样点 04 的蓝藻污染严重, 呈块状堆积, 其水体绿度指数 (GI) 分别为 0.6 和 5.2。因此, 结合实验数据与 MODIS 假彩色合成图像的目视解译结果, 发现当 $GI > 0.8$ 时, 可实现藻华水体信息的准确提取。据此设置 GI 为 0.8~1, 1~1.5, 1.5~3 和 >3 的几个阈值区间, 将藻华水体划分为由稀疏到稠密的 4 个等级(图 3)。

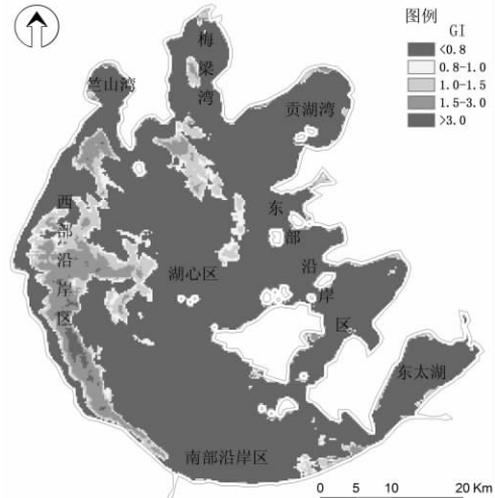


Fig 3 Distribution of algal blooms based on GI in Taihu Lake

2 结果与分析

2.1 藻华的空间分布特征

基于 MODIS 遥感数据的水体绿度指数 (GI), 反演得出了春夏季节(3~5 月)蓝藻暴发过程中不同时相的藻华分布信息(图 4)。遥感数据的连续监测表明:

(1)春夏季节太湖蓝藻暴发主要集中在北部湖湾区和南部沿岸区。梅梁湾、贡湖湾和竺山湾等北部湖湾区地理空间相对狭小, 除水体富营养化和气温因素外, 季节性南风 and 东南风的作用下, 使得蓝藻水华易于在此堆积。由图 4(d), 4(e)和 4(f)中藻华的空间分布特征可见, 除季节性风向的作用外, 太湖湖西自北向南的迎风贴岸流和梅梁湾东岸自北向南的沿岸流^[16]同样会影响西部沿岸区和梅梁湾至湖心区的藻华空间分布特征。此外, 太湖东部沿岸区藻类密度一直相对较低, 没有出现藻华大量富集的现象; 而东太湖水域由于水生植被的生长而被误分为藻华水域, 应在藻华信息反演结果中剔除。

(2)蓝藻水华的大面积暴发是通过表层水体藻类密度增大和空间富集得以实现的。在气象和水文等因素的作用下, 整个湖区绿度指数逐步增大、藻类密度空间分布差异明显加剧, 最终导致了 2007 年 5 月底蓝藻水华的大规模暴发。

2.2 藻华的动态监测与预警

根据 2007 年 5 月底太湖蓝藻暴发前, 太湖水体绿度指数 (GI) 所表现出的藻类密度变化特征(图 5), 分析得出了蓝

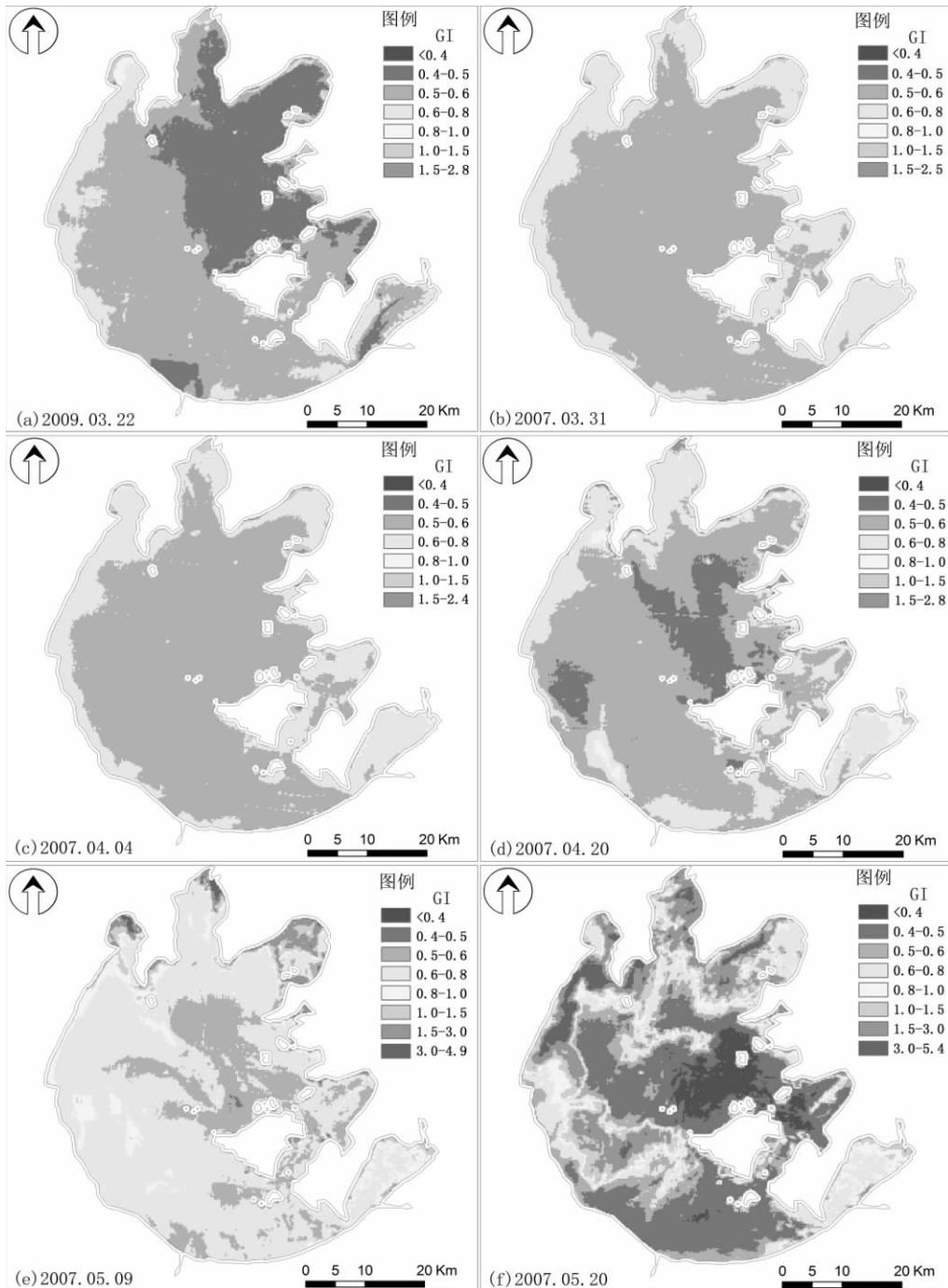


Fig 4 Distribution of GI at different times

藻水华主要形成过程为

第一阶段[图 5(a)] 太湖表层水体绿度指数 GI 主要分布在 0.4~0.6 区间, 整体水平已偏高, 绿度指数直方图分布尚未形成“单峰”形态。

第二阶段[图 5(b), 5(c), 5(d)] 水体绿度指数整体水平继续提高, GI 主要分布在 0.5~0.6 区间, 分布形态为“尖瘦单峰”, 峰值位置接近 0.6, GI 在 0.6~0.8 区间的水平已有所提高。

第三阶段[图 5(e)] 水体绿度指数主要分布在 0.6~0.8 区间。根据现场实验分析结果, 当 $GI > 0.6$ 时, 水体表

层已出现零星藻类, 如加之持续高温、偏南风 and 湖流等气象、水文因素, 必然会发生蓝藻水华大规模暴发事件。因此, 该阶段已进入太湖蓝藻大规模暴发预警期。

第四阶段[图 5(f)] 水体绿度指数 $GI > 0.8$ 增加, 藻华大规模生成。

如上所述, 太湖水体绿度指数 (GI) 在 0.6~0.8 区间发展水平是藻华水体预警的关键。此外, 为了保证周边城市的饮用水安全, 对藻华水体空间分布的实时动态遥感监测可以保证防治措施的有效性和及时性。

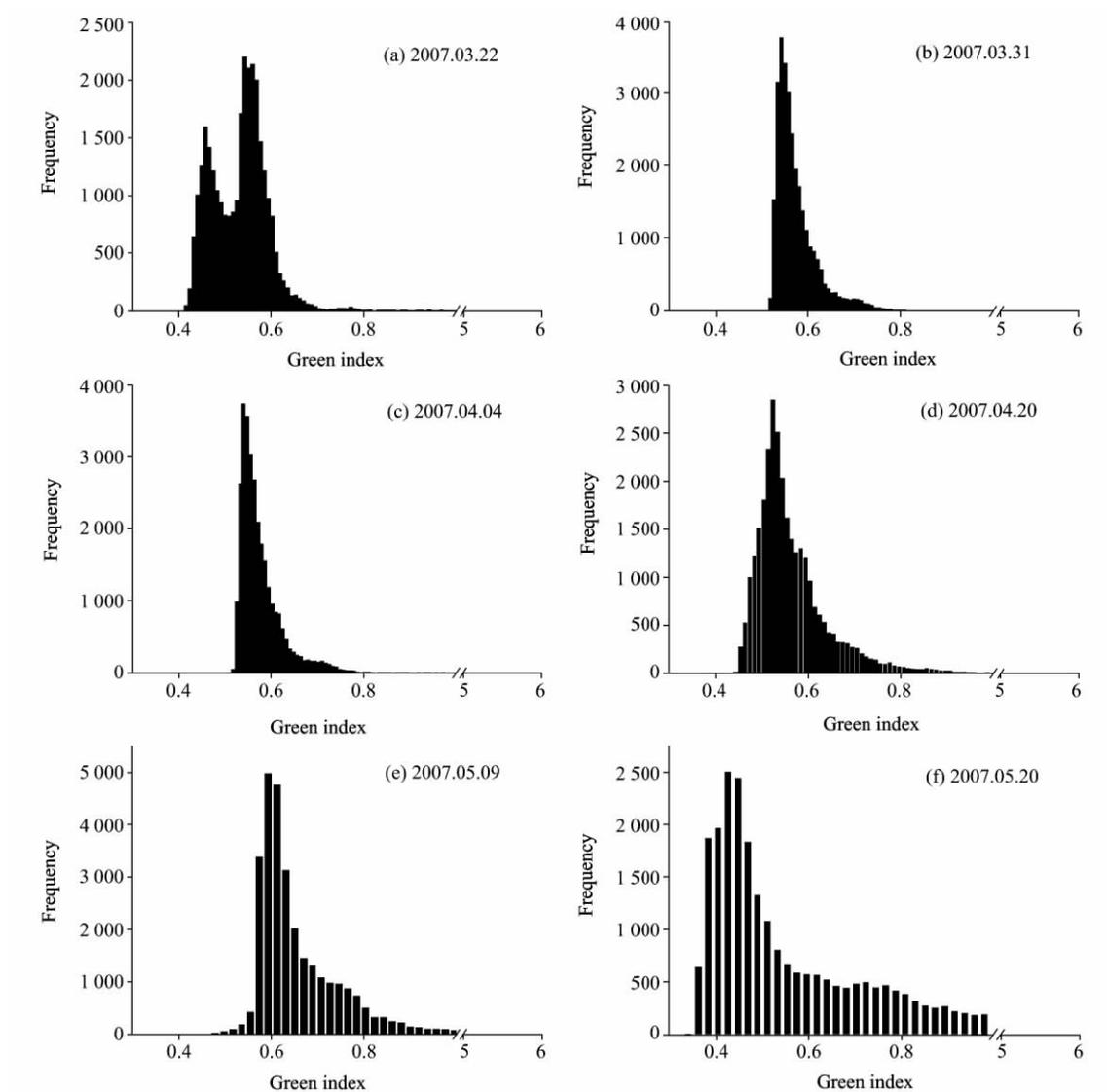


Fig 5 Histogram analysis for GI in Taihu Lake

3 结论

本文结合高光谱实验数据,建立了基于 MODIS 数据的藻华水体识别模型,并对 2007 年 3~5 月太湖藻华水体进行时空动态监测,得出以下主要结论:(1)基于藻类水体反射光谱特征,综合运用 MODIS 影像假彩色合成法和水体绿度指数阈值分割法,可实现藻华水体遥感信息的有效提取;

(2)春夏季节太湖藻华集中分布在北部湖湾和西部沿岸区,地理位置、风向和潮流等影响因素是导致其空间分布差异的主要因素,而蓝藻水华的大面积暴发正是通过表层水体藻类密度增大和空间富集过程得以实现的;(3)通过对蓝藻水华不同形成阶段的分析,指出当 MODIS 水体绿度指数 GI 集中分布在 0.6~0.8 区间时,可认为太湖水域已进入蓝藻水华大规模暴发前的预警阶段。

References

- [1] Codd G A. Ecological Engineering, 2000, 16(1): 51.
- [2] Carpenter D J, Carpenter S M. Remote Sensing of Environment, 1983, 13(4): 345.
- [3] SONG Yu, SONG Xiao-dong, JIANG Hong(宋瑜,宋晓东,江洪). Remote Sensing Information(遥感信息), 2008, (4): 102.
- [4] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Applied Optics, 1975, 14(2): 417.
- [5] Han L, Rundqu D C. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3): 253.
- [6] SONG Yu, SONG Xiao-dong, JIANG Hong, et al(宋瑜,宋晓东,江洪,等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2010, 30(4): 1075.

- [7] Baban S M J. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(7): 1247.
- [8] Vincent R K, Qin X, McKay R M L, et al. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(3): 381.
- [9] Vos R J, Hakvoort J H M, Jordans R W J, et al. *The Science of The Total Environment*, 2003, 312(1-3): 221.
- [10] Barale V, Jaquet J M, Ndiaye M. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(8): 3300.
- [11] Gower J, Hu C, Borstad G, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3619.
- [12] SONG Yu, SONG Xiao-dong, GUO Zhao-bing, et al(宋 瑜, 宋晓东, 郭照冰, 等). *Remote Sensing Information(遥感信息)*, 2009, (4): 19.
- [13] Hu C. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118.
- [14] MA Rong-hua, DAI Jin-fang(马荣华, 戴锦芳). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2005, 9(1): 78.
- [15] JIANG Geng-ming, LIU Rong-gao, NIU Zheng, et al(蒋耿明, 刘荣高, 牛 铮, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2004, 8(2): 158.
- [16] HUANG Jia-zhu, ZHAO Rui(黄家柱, 赵 锐). *Remote Sensing Information(遥感信息)*, 1999, (4): 43.

Remote Sensing Monitoring and Pre-Alerting of Algal Blooms in Taihu Lake

SONG Yu^{1, 2}, SONG Xiao-dong¹, GUO Qing-hai¹, TANG Li-na^{1*}

1. Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The explosive growth of algae in inland water bodies is one of the major water environmental problems in China, and it's very important to monitor the dynamic of algae in both temporal and spatial scales. In the present paper, a model, which was used to extract the algae information from the water body of Taihu Lake using MODIS data, was established based on the remote sensing index and image false color composite methods. Using this model, we studied the algae explosive growth formation process between March and May in 2007. Through the analysis of the temporal and spatial distribution features of the algae outbreak between the spring and summer seasons, an early warning method of algal blooms was proposed, that is, when the MODIS green index mainly concentrated in the range between 0.6 and 0.8, the water body of Taihu Lake can be considered to have been in the early alerting stage of algal blooms.

Keywords Algal blooms; Hyperspectral; MODIS; Remote sensing monitoring; Taihu Lake

(Received May 2, 2010; accepted Aug. 6, 2010)

* Corresponding author