

太湖蓝藻水华遥感监测方法*

段洪涛¹, 张寿选¹, 张渊智²

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 香港中文大学太空与地球信息科学研究所, 香港 沙田)

摘要: 利用遥感技术监测太湖蓝藻水华具有重要的现实意义。基于不同遥感数据, 包括 MODIS/Terra、CBERS-2 CCD、ETM 和 IRS-P6 LISS3, 结合蓝藻水华光谱特征, 采用单波段、波段差值、波段比值等方法, 提取不同历史时期太湖蓝藻水华。结果表明: MODIS/Terra 数据可以利用判别式 $\text{Band}2 > 0.1$ 和 $\text{Band}2/\text{Band}4 > 1$ 提取蓝藻水华; CBERS-2 CCD、ETM 和 IRS-P6 LISS3 数据可以利用 $\text{Band}4$ 大于一定阈值和 $\text{Band}4/\text{Band}3 > 1$ 提取蓝藻水华; 波段比值(近红外/红光 >1)算法稳定, 可以发展成为蓝藻水华遥感提取普适模式。同时, 本文成功利用 ETM 和 IRS-P6 LISS3 数据 $\text{Band}4$ 波段对蓝藻水华空间分布强度进行了五级划分。这为今后利用遥感技术, 建立太湖蓝藻水华监测和预警系统奠定了基础。

关键词: 蓝藻; 卫星监测; 多源数据; 太湖

Cyanobacteria bloom monitoring with remote sensing in Lake Taihu

DUAN Hongtao¹, ZHANG Shouxuan¹ & ZHANG Yuanzhi²

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P.R.China*)

(2: *Institute of Space and Earth Information Science, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, NT, Hong Kong, P.R.China*)

Abstract: It is significant that remote sensing methods is used for monitoring cyanobacteria bloom in Lake Taihu, since it breaks out frequently each year. Based on spectral characters of cyanobacteria bloom, different algorithm including single band, band subtraction and band ratio, were used for bloom mapping, with different instruments such as the MODIS/Terra, CBERS-2 CCD, ETM and IRS-P6. They noted that all these sensors were able to detect cyanobacteria bloom, while the algorithm of band ratio between infrared and red band has a stable correlation with blooms, and it can be developed into a universal pattern. Except that, spatial cyanobacteria bloom concentrations were separated into five classes based on digital number values (DNs) in ETM and IRS-P6 Band 4. This study showed that satellite observations was effectively applied to cyanobacteria bloom monitoring and early-warning for Lake Taihu.

Keywords: Cyanobacteria bloom; satellite monitoring; multi-source data; Lake Taihu

水是生命之源, 而湖泊是地球上最重要的淡水资源之一, 是湖泊流域地区经济可持续发展和人们赖以生存的重要基础^[1]。目前, 我国内陆湖泊面临的一个主要问题是水体的富营养化^[2], 其重要特征是藻类物质, 特别是蓝藻大量繁殖。蓝藻异常生长, 极易堆积、腐烂沉降, 形成水华, 在河口以及近岸淤积^[3], 不仅破坏水体景观和生态系统平衡, 而且由于蓝藻在生长过程中释放毒素, 消耗溶解氧, 引起水体生物大量死亡, 湖泊水质恶化, 严重威胁了湖泊周围地区的饮水安全^[4]。如2007年5-6月, 由于太湖蓝藻爆发, 无锡重要水源地贡湖南泉水厂取水口遭受严重污染, 导致100多万人饮水困难。因此, 快速、全面掌握蓝藻分布信息, 对于控制蓝藻水华、评价蓝藻生态环境风险、研究蓝藻异常生长的原因以及建立水质的预

* 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”、国家科技支撑计划项目(2007BAC26B01)和江苏省自然科学基金(BK2007261)联合资助。2007-09-05 收稿; 2007-11-06 收修改稿。段洪涛, 男, 1979年生, 博士, 助理研究员; E-mail: htduan@niglas.ac.cn.

警系统都非常重要^[5]。

遥感技术提供了快速大范围监测蓝藻的可能。蓝藻水华爆发, 水体中叶绿素含量显著升高, 导致水体光谱特征发生变化。蓝、红光反射率降低; 近红外波段具有明显的植被特征“陡坡效应”, 反射率升高; 同时荧光峰位置向长波方向移动^[6-7]。通常蓝藻覆盖区域光谱特征与无藻湖面有较为明显差异。李旭文等基于TM数据研究发现植被差异指数(DVI)对藻类的含量反映灵敏^[8]; 黄家柱和赵锐等曾成功利用TM数据监测1998年8月11日太湖蓝藻爆发情况^[9]; 胡雯等建立了基于FY-1C/CAVHRR数据的巢湖蓝藻叶绿素a含量遥感估算模型。但是, 这些研究的卫星数据源都相对单一。蓝藻爆发周期长, 变化快, 数据需求急, 单一遥感数据已经无法满足实际需求。MODIS数据具有较高的时间分辨率(Terra和Aqua白天分别过境一次)和光谱分辨率, 且有长时间序列数据, 可以生产几乎实时的图像, 但是其空间分辨率较低; CBERS-1、TM、ETM以及IRS-P6 LISS3数据拥有较高的空间分辨率, 但是其光谱分辨率低, 重返周期长^[10], 很难满足蓝藻监测和预警要求的实效性。如果综合利用这些数据, 扬长避短, 采用MODIS长时间序列数据, 重点时间和区域采用中巴资源卫星CBERS-2 CCD、Landsat TM /ETM、IRS-P6 LISS3等较高空间分辨率数据, 将能更好的满足蓝藻监测和预警需要。因此, 如何利用多源遥感数据, 建立准确、快速提取蓝藻的方法, 是目前蓝藻遥感面临的一个主要问题。而利用蓝藻光谱特征, 针对不同遥感数据源, 研究提取蓝藻分布范围和面积的方法, 对于蓝藻遥感监测具有重要的现实意义。本文利用MODIS、CBERS-2 CCD、ETM以及IRS-P6 LISS3等遥感影像, 尝试研究适合不同数据源的太湖蓝藻提取方法, 为今后快速获取蓝藻分布信息, 建立太湖蓝藻水华预警系统奠定基础。

1 研究方法

1.1 蓝藻水体光谱特征

内陆湖泊水体遥感反射率 R_w 是其水体各种物质的综合反映, 可由描述水体的固有光学特性参数来反映。除纯水本身外, 影响因素大致可分为叶绿素、悬浮物质和黄色物质三类, 可以用(1)式的简单模型近似描述各种物质对水体反射率的影响:

$$R_w \approx \frac{b_w + b_s + b_p}{a_w + a_s + a_p + a_y} \quad (1)$$

式中: R_w 为水面反射率; b_w 、 b_s 和 b_p 分别为水、无机悬浮物质和藻类物质的后向散射系数; a_w 、 a_s 、 a_p 和 a_y 分别为水、无机悬浮物质、藻类物质和黄色物质的吸收系数。各物质的吸收、后向散射系数均可分别写成比吸收系数、比后向散射系数和相应物质浓度的乘积^[11]。

蓝藻水华爆发, 水体中叶绿素 a 含量显著增加。藻华水体叶绿素 a 浓度与 440nm、680nm 吸收系数呈正相关关系, 水体可见光波段 440nm、680nm 反射率减小, 吸收峰增加; 藻华水体叶绿素 a 浓度与位于 700nm 附近的反射峰高度呈正相关关系, 也与 690-740nm 区间的荧光峰位置红移呈正相关关系^[12-13]; 同时, 近红外波段具有明显的植被特征“陡坡效应”, 反射率升高^[6]。因此, 基于这些显著光谱特征的波段或波段组合算法, 是本文研究的重点。

1.2 遥感数据及其处理方法

1.2.1 遥感数据 通过调查太湖蓝藻历史爆发时段, 分别选取部分蓝藻存在时段内的 EOS MODIS/Terra(空间分辨率 250m、500m、1km)、CBERS-2 CCD(空间分辨率 19.5m)、Landsat ETM(空间分辨率 30m)、以及 IRS-P6 LISS3(空间分辨率 23.5m)等卫星影像数据, 具体时间分别为 2007 年 4 月 25 日、2007 年 3 月 28 日、2002 年 7 月 13 日、2007 年 4 月 28 日。其中 EOS MODIS/Terra 直接选用 NASA 地表反射率产品(surface reflectance products), 包含有 250m 数据 2 个波段, 500m 数据 7 个波段(1、2 波段通过对 250m 数据重采样获得), 1km 数据由于空间分辨率较低^[14-15], 没有选用。

1.2.2 数据处理 MODIS/Terra L1B 影像数据自带地理坐标, 通过 ERDAS 9.1 对其进行重投影和几何纠正, 并利用 Band3 波段进行掩膜去云处理。CBERS-2 CCD、Landsat ETM、以及 IRS-P6 LISS3 遥感影像利用 1:50000 地形图进行几何精纠正, 误差均在 0.5 个像元之内。本研究只针对各数据单幅影像, 且主要为了获取蓝藻空间分布信息, 因此没有进行大气纠正。

2 结果与讨论

2.1 MODIS

2007年4月25日太湖水域各类典型地物光谱特征曲线, MODIS 按照其波段分布特征从可见光到近红外进行了重新排序(图 1). 其中, 蓝藻选自蓝藻水华带上典型像元, 浑浊水体选自大太湖水体浑浊水体像元, 清洁水体选自东太湖, 而植被选自西山岛上典型森林植被像元(图 2(a)). 在可见光范围内 (Band 3, 4, 1), 蓝藻水华与混浊水体的光谱特征类似, 均在绿光 Band 4 波段内形成反射峰, 峰值大小没有显著差别, 但明显高于清洁水体和植被; 在近红外波段(Band2, 5, 6, 7), 蓝藻与水体有较大差异, 更接近于植被光谱特征, 尤其在 Band2(841-876nm)出现植被的“陡坡效应”, 之后形成近红外高台. 由于太湖水体范围确定, 蓝藻提取过程中可以排除太湖周边及其岛屿植被的干扰, 因此如何区分蓝藻与水体, 特别是浑浊水体的光谱特征, 是利用 MODIS 数据成功提取蓝藻分布信息的关键^[16-18].

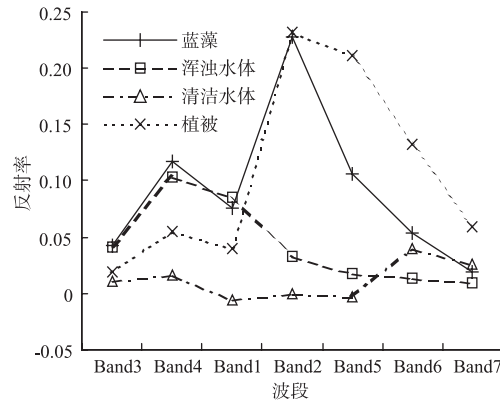


图1 各类典型地物 MODIS 波段光谱特征
Fig.1 Spectral character in MODIS

Band2 是区分蓝藻水华与浑浊、清洁水体最好的波段. 可以利用 ENVI4.3 Mask 工具, 建立阈值, $Band2 > 0.1$, 提取蓝藻水华, 如图 2(b)所示. 但是由于部分浑浊水体近红外波段反射率相对较高, 蓝藻水华光谱易与高浑浊水体混淆, 因此仅使用单波段容易扩大或者减小蓝藻信息. 同时, 由于蓝藻水华在近红外波段高反射, 可见光波段低反射; 而水体恰好相反, 可见光波段反射率较高, 而在近红外波段强吸收, 因此可以利用近红外与可见光波段比值, 区分蓝藻水华和其它水体, 从而提取蓝藻. 近红外波段与可见光波段比值, 通常利用近红外 Band2 与红光 Band1 二者比值区分蓝藻水华和水体. 但同样由于高浑浊水体的缘故, $Band2/Band1$ 也不好区分低浓度蓝藻和高浑浊水体. 如果使用 $Band2/Band4$, 由于 Band4 是叶绿素的反射峰, 该波段水体反射率多明显高于近红外 Band2 波段, $Band2/Band4 < 1$; 蓝藻由于“陡坡效应”, 近红外(Band2)明显高于绿峰(Band4), $Band2/Band4 > 1$. 因此利用 $Band2/Band4$, 判断比值是否大于 1, 可以迅速确定蓝藻水华. 图 2(c)是利用判别式 $Band2/Band4 > 1$ 提取的蓝藻水华分布图, 与图 2(a)比较可以发现比较真实的反映了蓝藻水华的分布情况, 而与利用单波段 Band2 提取的蓝藻分布图(图 2(b))看, 两者基本一致, 但 $Band2/Band4$ 有效剔除了太湖西南岸河流入湖口的高悬浮物非蓝藻水华水体.

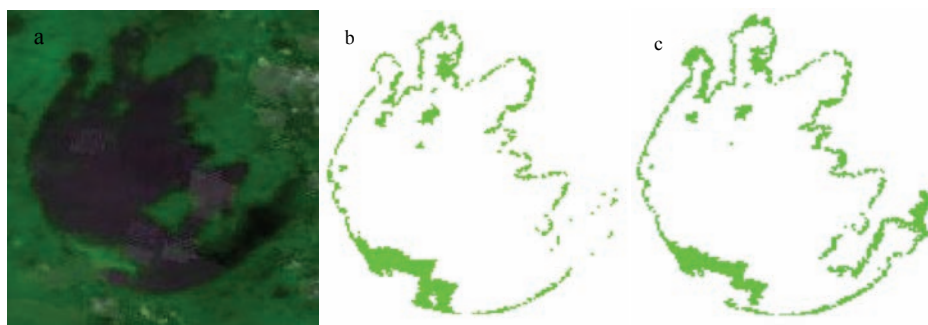


图2 2007年4月25日太湖蓝藻分布
Fig.2 Distribution map of cyanobacteria bloom on April 25th, 2007

2.2 CBERS

2007年3月28日各典型地物CBERS-2 CCD光谱特征(图3)。CBERS-2 CCD有5个波段, 除第5波段全波段外, 选取CBERS-2 CCD 1-4波段进行研究。该时间段蓝藻处于爆发初期, 仅西部和南部太湖沿岸区出现蓝藻水华, 呈条带状分布。蓝藻典型像元即取自该蓝藻水华带, 其余地物同MODIS。由于CBERS-2 CCD波段范围较宽, 光谱分辨率偏低, 不同地物光谱诊断性特征较难辨识。可见光波段范围内(Band1、2、

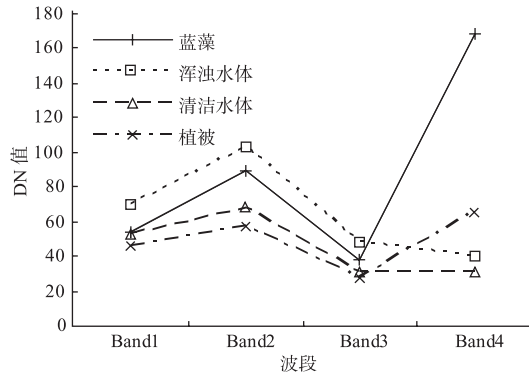


图3 各类典型地物CBERS光谱特征
Fig.3 Spectral character in CBERS

3), 蓝藻水华反射率低于混浊水体, 高于清洁水体和植被, 这是由于3月底森林植被刚开始发芽, 叶面积偏低, 而蓝藻水华爆发, 多呈聚集状, 反射率相对较高; 但同时蓝藻中叶绿素的吸收, 以及浑浊水体高悬浮物的反射, 导致蓝藻可见光波段反射率低于浑浊水体。近红外波段(Band4)蓝藻反射率明显高于其它地物, 甚至比森林植被高出两倍左右, 呈现典型的植被近红外高反射特征。

通过分析比较蓝藻水华与其它地物光谱特征, CBERS-2 CCD Band4波段蓝藻水华与其它地物区别明显。蓝藻DN值高达160, 而其它地物包括植被最多达到65左右, 可以利用这个差别进行蓝藻的提取。图4(a)为利用单波段判别式 $\text{Band4} > 70$ 提取的蓝藻分布图。由于在Band4波段, 部分混浊水体与蓝藻容易混淆, 河流入湖口处高浓度悬浮物水体被当作蓝藻错误提取。研究发现浑浊水体从Band3到Band4 DN值逐渐降低, 而藻类恰好相反, 因此可进一步利用 $\text{Band4}/\text{Band3}$ 判断比值是否大于1, 剔除高悬浮水体(图4(b))。考虑到该方法较为复杂, 更为便捷的方法可以借用Band4与Band3的差值。不同地物光谱特征可以看出(图3), 蓝藻Band4、Band3差值较大, 其余地物差异均明显小于蓝藻。利用该方法可以一次性剔除悬浮物的影响, 最终选用 $\text{Band4}-\text{Band3} > 30$ 提取蓝藻水体, 如图4(c)所示, 取得了比较好的效果。

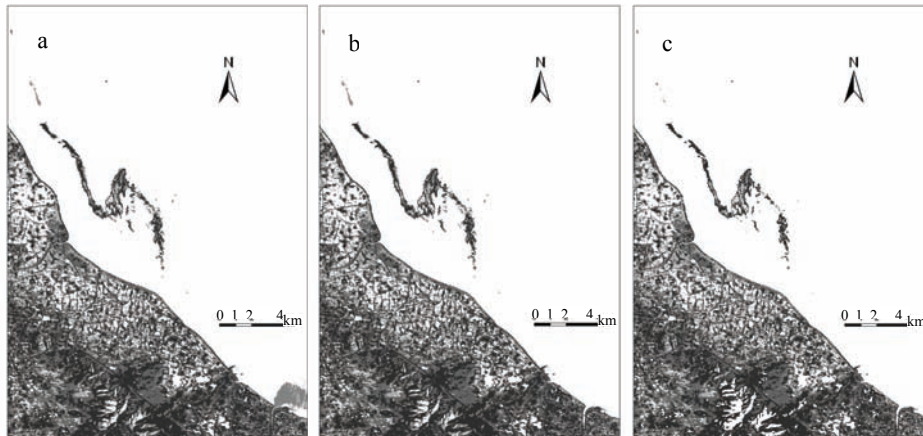


图4 2007年3月28日蓝藻水华分布

Fig.4 Distribution map of cyanobacteria bloom on March 28th, 2007

2.3 ETM 数据

2002年7月13日蓝藻大量聚集在太湖梅梁湾水域(图6(a)), 其光谱特征如图5所示。ETM前4个波段特征与CBERS-2 CCD基本相同, 但同时多了两个短波红外波段 Band 5(1.55-1.75 μm)和 Band 7(2.09-2.35 μm), 另外 Band 6是热红外波段, Band 8是全景波段。针对蓝藻的光谱特性, 选择前5个波段

进行蓝藻水华提取研究. 由图 5 可以发现, 与 CBERS-2 CCD 类似, 蓝藻在可见光波段范围内, (Band 1-3)DN 值低于浑浊水体, 高于清洁水体和植被; 但同时发现, 4 种典型地物在绿光波段(Band 2)DN 值偏低不突出, 绿峰没有显示. 近红外波段水体强烈吸收, 而蓝藻与植被相同, 出现“陡坡效应”, DN 值较高. Band 5 短波红外蓝藻反射率下降, 而植被由于体内细胞多次反射, 仍处于“近红外高台”.

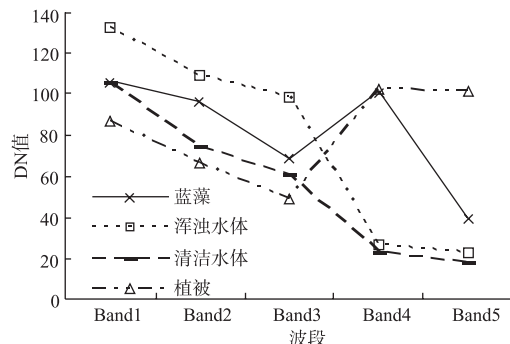


图 5 各类典型地物 ETM 光谱特征
Fig.5 Spectral character in ETM

基于不同地物的 ETM 光谱特征可以发现, 在 Band 4 波段, 蓝藻与水体光谱特征差异显著, 因此, 可以采用单波段 Band4 设立阈值提取蓝藻, 图 6(b)是利用判别式 $Band4 > 40$ 提取的蓝藻信息. 由于利用单波段需要设置阈值, 而阈值的大小直接影响蓝藻的提取. 图 6(c)是利用判别式 $Band4 > 50$ 提取的蓝藻信息.

而若综合考虑 Band4 和 Band3 两个波段, 蓝藻水华在 Band3 波段, DN 值显著提高, 而其它水体(包括浑浊水体)由于近红外强烈吸收, DN 值下降, 因此可以通过计算 $Band4/Band3$ 是否大于 1 判断蓝藻水华. 图 6(c)是利用判别式 $Band4/Band3 > 1$ 提取的蓝藻水华分布图. 比较图 6 各图可以发现, 单波段 $Band4 > 40$ 提取的蓝藻范围(图 6(b))与图 6(a)比较吻合, 而判别式 $Band4 > 50$ 和 $Band4/Band3 > 1$ (图 6(c)和图 6(d))范围较小. 这是由于梅梁湾部分蓝藻水华密度较小, 没有完全覆盖水体表面, 因此该区域遥感影像反映的是水体和蓝藻的综合信息, 而水体在近红外波段(Band4)的强吸收, 直接影响了蓝藻判别式 $Band4/Band3 > 1$ 的准确性. 因此, 判别式 $Band4/Band3 > 1$ 比较适合于蓝藻水华密度较大的区域, 而单波段由于人工设定阈值, 结果相对准确, 但是不利于自动判别蓝藻水华.

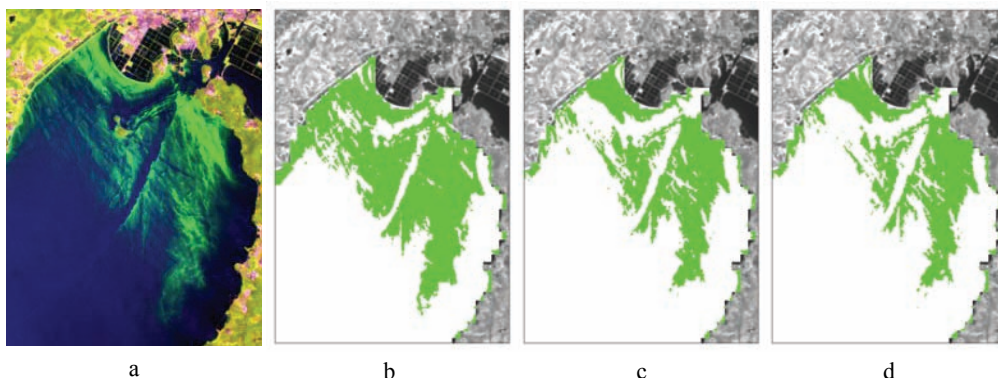


图 6 2002 年 7 月 13 日蓝藻水华分布

Fig.6 Distribution map of cyanobacteria bloom on July 13th, 2002

通过研究表明, 遥感影像可以较准确提取蓝藻, 但是如何利用遥感影像说明蓝藻爆发程度, 反映蓝藻水华强度, 对于蓝藻预警和政府决策更为重要. 蓝藻客观上存在浓度上的差异, ETM 数据由于空间分辨率较高, 因此可以较清楚反应蓝藻水华空间范围内浓度的差异. 图 6(b)和图 6(c)表明, 判别式 $Band4 > 40$ 或者 $Band4 > 50$, 提取的蓝藻范围不同, 而差异的部分就是蓝藻浓度较小的区域. 因此, 利用不同浓度蓝藻在 Band4 波段上的差异, 区分不同强度蓝藻水华是可能的. 本研究通过 ArcGIS 9.1, 将梅梁湾水域依照 Band4 DN 值大小, 分为五级, 一级为蓝藻最为严重区域, 依次递减, 最低级五级为无蓝藻区域. 梅梁湾浓度最高的蓝藻水华 DN 值 $Band4=149$, 梅梁湾南部蓝藻稀疏带 DN 值 $Band4=38$, 附近无藻区域水体 DN 值 $Band4=22$, 利用其建立分级系统, 蓝藻水华最为严重的一级区域主要是梅梁湾北部沿岸带, 二三级区域零星分布, 蓝藻带主要为四级区域, 呈面状分布, 无蓝藻五级区域交错其中. 该分类系统较

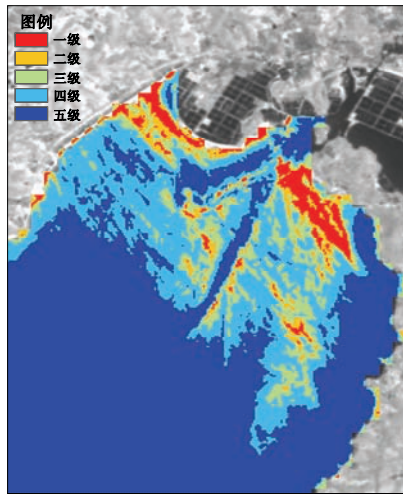


图 7 蓝藻水华分级图

Fig.7 Class map of cyanobacteria bloom

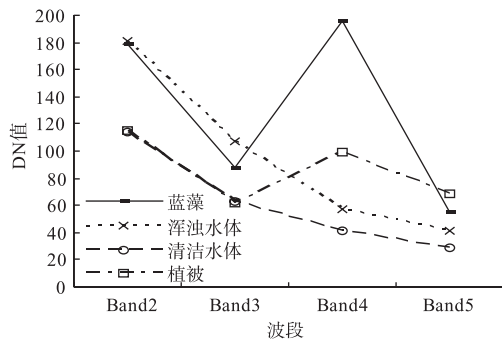


图 8 各类典型地物 P6 光谱特征

Fig.8 Spectral character in P6

好的反映了不同强度蓝藻的空间分布趋势(图 7). 这是 MODIS 数据难以做到的, 较高分辨率影像是

2.4 IRS-P6 数据

对 MODIS 数据监测蓝藻水华的一个有效补充. 图 9(a)为 543 波段假彩色合成, 绿色部分是蓝藻水华. 2007 年 4 月 28 日太湖蓝藻水华严重, 除西太湖和南太湖沿岸外, 梅梁湾、竺山湾和贡湖湾都有大量蓝藻水华聚集.

IRS-P6 LISS-3 数据, 拥有 4 个波段, 与 ETM 数据相比缺少蓝波段(Band1), 但空间分辨率(23.5m)相对较高. 通过 CBERS 和 ETM 数据研究发现, 蓝波段对藻类不够敏感, 比较困难区分不同地物光谱特征, 因此不影响 P6 监测太湖蓝藻水华. 图 8 为四类典型地物在 P6 LISS-3 上的光谱特征. 由于 P6 波段设置与 ETM 相似, 相同地物光谱特征也比较相似. 可见光波段(Band2、3)不同地物难以区分, 近红外 Band4 蓝藻反射率明显增强, 不仅高于浑浊和清洁水体, 也大于植被, 这是由于蓝藻聚集严重, 生物量急剧增加, 形成水华, 导致近红外波段高反射. 短波红外蓝藻水华低反射, 但也大于水体. 因此, 与 CBERS、ETM 相同, 单波段采用 Band4, 比值采用 Band4/Band3 进行蓝藻提取. 由于太湖水体悬浮物较高, 利用单波段掩膜提取蓝藻, 容易导致低浓度蓝藻与高浓度悬浮物水体, 以及水生植被混淆, 难以区分和取舍. 阈值设的高, 将有损蓝藻信息; 阈值设的低, 将有可能将高悬浮物水体、东太湖水生植被和云误认为蓝藻. 图 9(b)是利用判别式 $Band4 > 60$ 提取的蓝藻分布信息, 通过与图 9(a)比较可以发现部分高悬浮物水体和东太湖水生植被以及有云的区域被当作蓝藻提取, 扩大了蓝藻的分布范围.

由于太湖蓝藻主要发生区域在竺山湾、梅梁湾和贡湖湾, 以及西太湖和南太湖沿岸, 如图 9(a)所示. 可以尝试对太湖分区, 首先将无藻区域人工剔除, 或者将有蓝藻区域分别专门提出, 再通过判别式 $Band4 > 60$ 提取蓝藻. 图 9(c)为划分湖区后利用判别式 $Band4 > 60$ 提取的蓝藻分布图, 与图 9(b)比较可以发

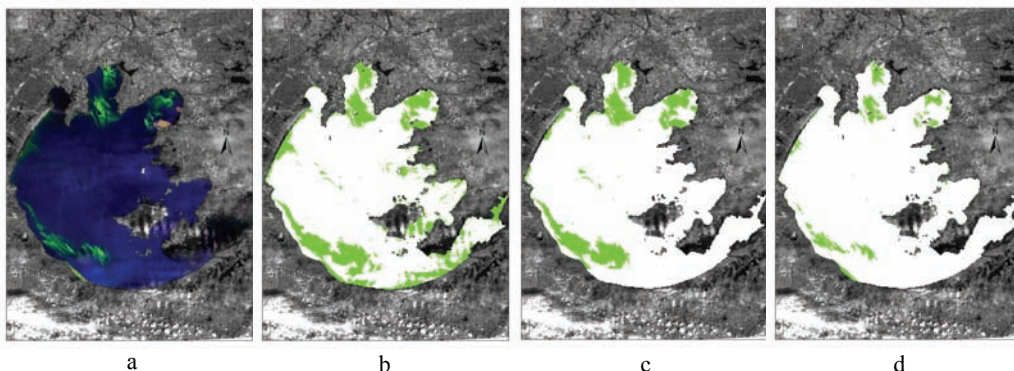


图 9 2007 年 4 月 28 日蓝藻水华分布

Fig.9 Distribution map of cyanobacteria bloom on April 28th, 2007

现,有效剔除了东太湖区域水生植被和云的影响,但是仍有部分高悬浮物水体被当作蓝藻水华存在.通过对CBERS和ETM数据研究表明,利用判别式波段比值 $\text{Band4}/\text{Band3}>1$ 进行蓝藻提取,可以有效剔除悬浮物和云的影响,如图9(d)所示,但遗漏了低浓度蓝藻,可是相对图9(c),较真实的反映了蓝藻的分布情况.同时,根据 Band4 波段谱值光谱值,对蓝藻水华强度进行了分级(图10),可以发现梅梁湾水域蓝藻水华比较严重,大部在一级区.

3 结论

通过以上研究表明,遥感数据可以成功的应用到太湖蓝藻水华监测中,近红外波段和近红外波段与红光波段的差值和比值,特别是比值,可以有效提取蓝藻分布信息.MODIS/Terra数据可以利用判别式 $\text{Band2}>0.1$ 和 $\text{Band2}/\text{Band4}>1$ 提取蓝藻水华;CBERS-2 CCD、ETM和P6数据空间分辨率相似,波段设置也基本相同,都可以利用 Band4 大于一定阈值和 $\text{Band4}/\text{Band3}>1$ 提取蓝藻,不同遥感数据最大的区别是阈值的不同.利用这些判别式提取蓝藻都取得了比较好的效果,但研究过程中发现也存在一些问题.

MODIS光谱分辨率高,较完整的反映了不同地物在可见光和近红外波段的光谱特征,为区分蓝藻与其它地物提供了足够多的波段.但是由于MODIS空间分辨率较低,250m只有2个波段,500m有5个,而1000m数据相对于太湖过于粗糙,不适合用于太湖蓝藻水华的监测.因此,MODIS 250m、500m数据可以用于太湖蓝藻水华监测,但精度不高,对于重点区域和时间段,应通过联合高空间分辨率卫星进行综合监测.对于较高空间分辨率卫星CBERS-2 CCD、ETM和IPS-P6,可以较好的反应蓝藻分布的空间情况,纹理清晰,是对MODIS数据的有效补充,但其主要问题是光谱分辨率偏低,波段较少,通过研究发现对于蓝藻监测,如果充分利用它们的近红外和红光波段,可以有效提取蓝藻信息.

利用不同算法对遥感影像提取的过程中发现,近红外单波段蓝藻与其它地物一般差异明显,但是低浓度蓝藻与高悬浮物水体光谱特征比较接近,或者重合,设定阈值不同,可能会有损蓝藻信息或者误将悬浮物水体当作蓝藻水华.而利用近红外和红光波段比值一般可以较好的区分蓝藻与其它地物,但是采用近红外波段/红光波段 >1 时发现,由于低浓度蓝藻没有完全覆盖水面,包含有水体信息,近红外波段反射率较低,导致有些蓝藻比值小于1,对完全提取蓝藻造成了一定障碍.因此,近红外与红光波段是蓝藻监测的重要波段,今后可以发展成为不同遥感数据提取蓝藻水华信息的普适模式,但同时也要考虑到单波段的应用.

4 参考文献

- [1] Duan H, Zhang Y, Zhang B *et al.* Estimation of chlorophyll-a concentration and trophic states for inland lakes in northeast China from Landsat TM data and field spectral measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 2007(in press).
- [2] 胡雯, 吴文玉, 孔庆欣. 用FY-1C/CAVHRR数据估算巢湖蓝藻叶绿素的含量. *南京气象学院学报*, 2002, **25**(1): 124-128.
- [3] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾2007年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议. *湖泊科学*, 2007, **19**(4): 357-358.
- [4] 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.
- [5] 杨顶田, 潘德炉. 蓝藻的卫星遥感研究进展. *国土资源遥感*, 2006, **4**: 1-5.

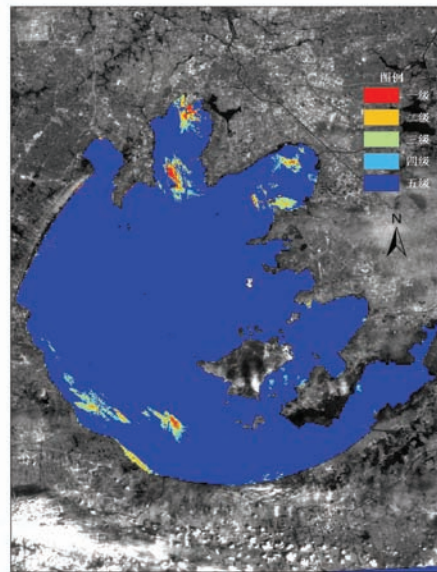


图10 蓝藻水华分级图

Fig.10 Class map of cyanobacteria bloom

- [6] Hu C, Muller-Karger FE, Taylor C *et al.* Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **97**: 311-321.
- [7] 段洪涛, 张 柏, 刘殿伟等. 查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 a 响应关系研究. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(5): 355-359.
- [8] 李旭文, 季耿善, 杨 静. 太湖梅梁湾蓝藻生物量遥感估算. *国土资源遥感*, 1995, **2**: 23-29.
- [9] 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.
- [10] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K *et al.* Use of Modis satellite sensor for remote sensing of phytoplankton blooms and turbidity in the Baltic Sea. *URSI/IEEE/IRC XXVII Convention on Radio Science, Espoo, Finland*, 2002: 17-18.
- [11] Morel A, Prieur L. Analysis of variation in ocean color. *Limnology and Oceanography*, 1997, **22**: 709-722.
- [12] 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.
- [13] Ma R, Tang J, Dai J. Bio-optical model with optimal parameter suitable for Lake Taihu in water colour remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4305-4328.
- [14] Hu C, Chen Z, Clayton TD *et al.* Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing and Environment*, 2004, **93**: 423-441.
- [15] Miller RL, Mckee BA. Using MODIS Terra 250m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing and Environment*, 2004, **93**: 259-266.
- [16] Dall'Olmo G, Gitelson AA, Rundquist DC *et al.* Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and near-infrared bands. *Remote Sensing and Environment*, 2005, **96**: 176-187.
- [17] Reinart A, Kutser T. Comparison of different satellite sensors in detecting cyanobacterial bloom events in the Baltic Sea. *Remote Sensing and Environment*, 2006, **102**: 74-85.
- [18] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K *et al.* Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. *Remote Sensing and Environment*, 2002, **79**: 51-59.