

· 研究报告 ·

基于卫星影像的太湖蓝藻水华遥感强度指数和等级划分算法设计

李旭文, 牛志春, 姜晟, 金焰

(江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210036)

摘要: 对太湖地区近 10 余年来共 32 景 Landsat TM/ETM 遥感影像进行大气校正处理, 获得地表反射率影像, 在这些影像上采集了分布在不同片区、不同发生季节、不同集聚程度的蓝藻水华样区, 提取了不同蓝藻水华的可见—近红外波段反射率数据。统计表明蓝藻水华在 TM 4 波段的反射率有较宽的动态范围, 能定量反映蓝藻集聚程度, TM 2 也是监测蓝藻水华不可或缺的波段, 其与 TM 3 波段反射率差与蓝藻密度关系密切。设计了蓝藻水华遥感强度 CBI 指数, 提出了划分蓝藻水华等级的遥感算法。

关键词: 卫星遥感; 蓝藻水华强度(CBI); 陆地卫星; 大气校正; 太湖

中图分类号: X87 文献标识码: B 文章编号: 1006-2009(2011)05-0023-08

Design of Intensity Index and Build-up Degree Classification Algorithm Development for Cyanobacteria Blooms in Lake Taihu Based on Satellite Remote Sensing

LI Xu-wen, NIU Zhi-chun, JIANG Sheng, JIN Yan

(Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

Abstract: 32 Landsat TM/ETM scenes of Lake Taihu spanning the past 10 years were atmospherically corrected to generate surface reflectance images, then region-of-interest (ROIs) were overlaid on cyanobacteria blooms which occurred at various locations on those images, the visible and NIR spectral reflectance means and other statistics information were collected and examined. It was shown TM band 4 spectral reflectance of cyanobacteria blooms usually have wide value range and can be used to quantitatively monitor the build-up of cyanobacteria. TM band 2 spectral reflectance also demonstrates similar spectral characteristics and its difference with spectral reflectance at band 3 can indicate cyanobacteria densities in water bodies. A new remote sensing based index, cyanobacteria bloom intensity (CBI), was designed and an algorithm for delineate cyanobacteria severity was put forward.

Key words: Satellite remote sensing; Cyanobacteria bloom intensity; Landsat; Atmospheric correction; Taihu

近年来,我国太湖、巢湖、滇池等湖泊蓝藻水华暴发时有发生,对饮用水源安全造成较大影响。卫星遥感利用蓝藻水华富含叶绿素 a、与陆面植被具有类似光谱响应特征的遥感机理提取蓝藻水华分布的空间范围和面积信息,是快速监测蓝藻水华的重要技术手段,主要利用 EOS-MODIS、Landsat、国产环境一号(HJ-1)卫星等遥感影像提取^[1-3]。随着流域水环境管理和生态保护工作的深化,在获得水华分布范围信息的同时,还希望能够了解蓝藻水华的强度并制订实用的等级划分标准。为了定

量、客观地对蓝藻水华发生的强度进行等级划分,收集了 20 世纪末以来、分辨率较高的太湖地区 Landsat TM/ETM 遥感影像,开展传感器定标和大气校正以尽可能消除大气传输对光谱辐射的影响,

收稿日期: 2011-06-10; 修订日期: 2011-06-25

基金项目: 国家水环境监测技术体系研究与示范(2009ZX07527-006); 国家科技支撑计划“基于环境一号等国产卫星的环境遥感监测应用技术集成与示范研究”(2008BAC34B07-01)

作者简介: 李旭文(1966—),男,江西宁都人,教授级高级工程师,硕士,从事环境信息化建设和遥感应用工作。

反演获得地表反射率图像,通过统计分析不同集聚程度的蓝藻水华典型样区、在遥感影像上无藻类光谱反应的“无藻”水体的 TM 各波段反射率数据规律,识别出太湖蓝藻水华遥感反射率特征,在此基础上设计合理的蓝藻水华遥感强度指数算法。

1 影像资料及数据处理

1.1 影像资料

自 20 世纪 90 年代以来,太湖蓝藻水华时有发生,近 10 年发生更加频繁。利用自 1999 年以来共计 32 景 Landsat 卫星的 TM/ETM 影像^[4],统计分析太湖蓝藻水华光谱特征,这些影像绝大多数有不同等级、空间分布范围的蓝藻水华现象,为定量研究蓝藻水华的反射光谱提供了十分难得的资料素材,这些数据的具体时相见表 1,具有较大规模蓝藻水华的影像见图 1(a)(b)(c)(d)。

表 1 太湖地区 Landsat TM/ETM 影像时相

Table 1 Dates of Landsat TM/ETM image acquisition and sensor types

成像日期	1999 年 8 月 6 日	2000 年 6 月 5 日	2000 年 7 月 7 日	2000 年 10 月 11 日	2002 年 5 月 26 日	2002 年 7 月 13 日	2002 年 10 月 1 日
卫星/传感器	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM
成像日期	2003 年 8 月 1 日	2004 年 8 月 3 日	2005 年 6 月 3 日	2005 年 10 月 17 日	2006 年 4 月 3 日	2006 年 5 月 21 日	2007 年 2 月 1 日
卫星/传感器	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L5/TM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM
成像日期	2007 年 3 月 21 日	2007 年 5 月 8 日	2007 年 7 月 11 日	2007 年 9 月 13 日	2008 年 4 月 24 日	2008 年 7 月 13 日	2008 年 10 月 1 日
卫星/传感器	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM
成像日期	2008 年 11 月 18 日	2009 年 5 月 29 日	2009 年 8 月 17 日	2009 年 10 月 20 日	2009 年 11 月 5 日	2010 年 4 月 30 日	2010 年 7 月 19 日
卫星/传感器	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM
成像日期	2010 年 8 月 4 日	2010 年 8 月 20 日	2010 年 9 月 5 日	2010 年 9 月 21 日			
卫星/传感器	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM	L7/ETM			

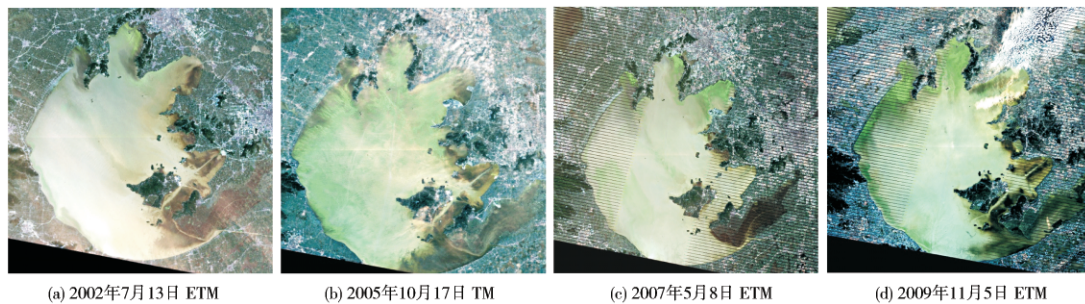


图 1 部分具有较大规模蓝藻水华的 TM/ETM 波段 3(R)2(G)1(B) 真彩色合成影像

Fig. 1 Natural color composite of Landsat TM/ETM image showing cyanobacteria blooms, Band 3, Band 2, Band 1 as red, green and blue color, respectively

1.2 数据处理

蓝藻水华反射率信息提取的处理流程见图 2。

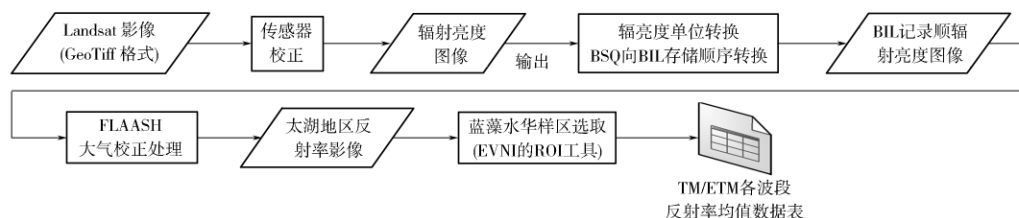


图 2 基于 Landsat TM/ETM 影像计算蓝藻水华光谱反射率的处理流程

Fig. 2 Flowchart of retrieval of spectral reflectance for cyanobacteria blooms on Landsat TM/ETM images

表 1 所列影像资料时间序列长, 每年跨度从春季到秋季甚至初冬, 卫星遥感不可避免地受到大气中水蒸气、氧气、二氧化碳、甲烷和臭氧等分子、颗粒物对辐射传输的影响, 为了反演获得蓝藻水华、含藻水体、无藻水体在 TM/ETM 各波段的反射率数据, 必须先完成大气校正处理, 尽可能消除季节、成像时间、大气中水汽、气溶胶等因素对遥感反射率测量的影响, 获得地物反射率和辐射率、地表温度等真实物理模型参数。

使用了大气校正精度较高、最为常用的遥感软件 ENVI 中的大气校正工具 FLAASH(Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) 最大程度地消除成像时间、大气和气溶胶散射对太湖地区 TM/ETM 影像各类地物反射的影响, 获得接近真实的 TM1—TM5、TM7 波段地表反射率信息。FLAASH 基于 MODTRAN 4 + 辐射传输模型, 算法精度高, 可以通过遥感影像元光谱上的特征估计大气的属性, 不依赖遥感成像时同步测量的大气参数数据, 可以有效地去除水蒸气、气溶胶散射对光谱的影响, 同时基于像素级的校正, 考虑了目

标像素和邻近像素交叉辐射的“邻近效应”, 可对 Landsat, SPOT, MODIS 等常见的多光谱、高光谱数据、航空影像及自定义格式的高光谱影像进行快速大气校正分析, 能有效消除大气和光照等因素对地物反射的影响。

MODTRAN 中影响大气校正结果的重要参数条件设置是大气模式和气溶胶模式的选择, MLS (Mid-Latitude Summer) 大气模式适用于近地表空气温度约 21℃、假设大气柱水汽含量 2.92 g/cm², T (Tropical) 模式适用于近地表空气温度约 27℃、假设大气柱水汽含量 4.11 g/cm²。根据 ENVI 联机帮助, 结合太湖所处亚热带北缘偏于湿润、地理纬度 (31°N) 及各景影像数据成像季节, 其中对 6 月份的数据使用中纬度夏季 (Mid-Latitude Summer, MLS) 和 Tropical 大气模式进行了比较, 计算发现在 MLS 和 Tropical 大气模式下, 反演得到的地物反射率很接近, 相差大约 1% ~ 4%, 光谱特征基本一致, 因此, 对 6 月份数据统一采用 MLS 进行大气校正。气溶胶模式选取乡村 (Rural) 模式。大气模式的选择见表 2。

表 2 太湖地区 Landsat 影像大气校正采用的大气和气溶胶模式

Table 2 The atmospheric modes and aerosol modes for Landsat image atmospheric correction

影像月份	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月
大气模式	MLS	MLS	MLS	MLS	T	T	T	MLS	MLS
气溶胶模式	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural	Rural

1.3 数据统计结果

差异植被指数 DVI 和归一化植被指数 NDVI 计算公式如下:

$$DVI = \rho_{0.83} - \rho_{0.66}$$

$$NDVI = \frac{\rho_{0.83} - \rho_{0.66}}{\rho_{0.83} + \rho_{0.66}}$$

数据处理得到各波段反射率, 以及计算获得的 TM 2 波段与 TM 3 波段反射率之差 ($\rho_{0.56} - \rho_{0.66}$)、差异植被指数 DVI 和归一化植被指数 NDVI, 结果见表 3。

表 3 Landsat 影像上水华样区 TM 各波段反射率、DVI 和 NDVI 统计结果

Table 3 Statistics of spectral reflectances, DVI and NDVI for ROIs of cyanobacteria blooms on Landsat images

时相	样区位置	蓝藻水华 集聚程度	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	$\rho_{0.56} - \rho_{0.66}$	DVI	NDVI
			$\rho_{0.485}$	$\rho_{0.56}$	$\rho_{0.66}$	$\rho_{0.83}$	$\rho_{1.65}$	$\rho_{2.22}$			
1999 年 8 月 6 日	梅梁湖	中度	0.057	0.106	0.065	0.173	0.028	0.01	0.041	0.108	0.454
	梅梁湖	轻度	0.068	0.102	0.069	0.086	0.02	0.009	0.033	0.017	0.110
	湖心区	无藻水体	0.095	0.12	0.098	0.041	0.022	0.019	0.022	-0.057	-0.410
2000 年 6 月 5 日	西部沿岸区	无藻水体	0.073	0.097	0.076	0.033	0.02	0.016	0.021	-0.043	-0.394
	梅梁湖	中度	0.076	0.122	0.083	0.212	0.052	0.018	0.039	0.129	0.437
	贡湖沙渚	轻—中度	0.08	0.127	0.094	0.136	0.043	0.023	0.033	0.042	0.183
	长兴片沿岸	轻—中度	0.066	0.12	0.095	0.153	0.033	0.016	0.025	0.058	0.234

续表

时相	样区位置	蓝藻水华 集聚程度	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	$\rho_{0.56}^-$	DVI	NDVI
			$\rho_{0.485}$	$\rho_{0.56}$	$\rho_{0.66}$	$\rho_{0.83}$	$\rho_{1.65}$	$\rho_{2.22}$	$\rho_{0.66}$		
2000 年 7 月 7 日	竺山湖外口	轻度	0.096	0.13	0.11	0.124	0.048	0.035	0.02	0.014	0.060
	竺山湖	中度	0.099	0.132	0.088	0.32	0.069	0.023	0.044	0.232	0.569
	竺山湖外口	轻度	0.11	0.127	0.097	0.155	0.044	0.029	0.03	0.058	0.230
2000 年 10 月 11 日	长兴片沿岸	无藻水体	0.13	0.151	0.139	0.084	0.037	0.03	0.012	-0.055	-0.247
	灵山大佛南侧	重度	0.058	0.132	0.076	0.411	0.068	0.018	0.056	0.335	0.688
	灵山大佛南侧	轻度	0.062	0.114	0.082	0.14	0.034	0.013	0.032	0.058	0.261
	灵山大佛南侧	轻微	0.059	0.105	0.08	0.101	0.025	0.011	0.025	0.021	0.116
	贡湖沙渚	无藻水体	0.07	0.101	0.084	0.043	0.012	0.007	0.017	-0.041	-0.323
	湖心区	无藻水体	0.071	0.108	0.095	0.038	0.008	0.005	0.013	-0.057	-0.429
	湖州片	无藻水体	0.052	0.088	0.065	0.023	0.006	0.004	0.023	-0.042	-0.477
	梅梁湖	无藻水体	0.07	0.101	0.085	0.052	0.013	0.008	0.016	-0.033	-0.241
	南太湖	无藻水体	0.074	0.109	0.092	0.039	0.01	0.006	0.017	-0.053	-0.405
	宜兴片	无藻水体	0.055	0.09	0.078	0.053	0.01	0.006	0.012	-0.025	-0.191
2002 年 5 月 26 日	长江水体	无藻水体	0.073	0.123	0.15	0.078	0.008	0.005	-0.027	-0.072	-0.316
	长兴片	轻度	0.051	0.104	0.079	0.091	0.023	0.011	0.025	0.012	0.071
	梅梁湖外口	轻度	0.074	0.109	0.092	0.094	0.023	0.012	0.017	0.002	0.011
	椒山附近	轻度	0.069	0.106	0.089	0.112	0.032	0.017	0.017	0.023	0.114
	湖心	无藻水体	0.091	0.119	0.111	0.059	0.024	0.019	0.008	-0.052	-0.306
2002 年 7 月 13 日	宜兴附近	色暗无藻水体	0.056	0.076	0.066	0.043	0.013	0.009	0.01	-0.023	-0.211
	鼋头渚附近	重度	0.058	0.109	0.062	0.406	0.065	0.016	0.047	0.344	0.735
	鼋头渚附近	中度	0.061	0.104	0.067	0.175	0.032	0.011	0.037	0.108	0.446
	蓝山嘴附近	轻度	0.084	0.118	0.097	0.109	0.034	0.025	0.021	0.012	0.058
	梅梁湖	色亮无藻水体	0.065	0.101	0.084	0.05	0.019	0.016	0.017	-0.034	-0.254
	梅梁湖	色暗无藻水体	0.048	0.072	0.058	0.038	0.017	0.014	0.014	-0.02	-0.208
	湖心	无藻水体	0.115	0.139	0.127	0.068	0.031	0.025	0.012	-0.059	-0.303
2002 年 10 月 1 日	鼋头渚附近	重度	0.064	0.121	0.083	0.366	0.066	0.022	0.038	0.283	0.630
	竺山湖	重度	0.053	0.116	0.073	0.462	0.068	0.021	0.043	0.389	0.727
	拖山附近	隐约蓝藻水体	0.062	0.101	0.079	0.069	0.016	0.011	0.022	-0.01	-0.068
	拖山附近	无蓝藻水体	0.063	0.095	0.078	0.053	0.017	0.011	0.017	-0.025	-0.191
2003 年 8 月 1 日	鼋头渚附近	重度	0.063	0.135	0.069	0.43	0.074	0.016	0.066	0.361	0.723
	长兴附近	中度	0.07	0.123	0.075	0.226	0.043	0.015	0.048	0.151	0.502
	宜兴附近	轻度	0.056	0.087	0.064	0.141	0.025	0.014	0.023	0.077	0.376
	宜兴附近	轻微蓝藻水华	0.062	0.095	0.071	0.106	0.022	0.014	0.024	0.035	0.198
	湖心	无藻水体	0.07	0.1	0.079	0.036	0.014	0.01	0.021	-0.043	-0.374
2004 年 8 月 3 日	竺山湖	中度	0.032	0.066	0.042	0.205	0.023	0.01	0.024	0.163	0.660
	小湾里水厂附近	轻度	0.037	0.081	0.053	0.102	0.015	0.011	0.028	0.049	0.316
	拖山南	无藻高亮水体	0.076	0.109	0.097	0.051	0.024	0.019	0.012	-0.046	-0.311
2005 年 6 月 3 日	梅梁湖	中度	0.099	0.138	0.112	0.312	0.075	0.03	0.026	0.2	0.472
	梅梁湖	轻度	0.095	0.122	0.108	0.138	0.036	0.021	0.014	0.03	0.122
	拖山附近	轻度	0.093	0.13	0.109	0.151	0.045	0.027	0.021	0.042	0.162
	拖山南	轻度	0.098	0.133	0.113	0.139	0.042	0.027	0.02	0.026	0.103
	湖心区	无藻水体	0.134	0.161	0.15	0.098	0.045	0.036	0.011	-0.052	-0.210
	拖山南	无藻水体	0.111	0.142	0.127	0.084	0.041	0.033	0.015	-0.043	-0.204
2005 年 10 月 17 日	梅梁湖	重度	0.069	0.15	0.112	0.371	0.076	0.028	0.038	0.259	0.536
	椒山附近	重度	0.053	0.125	0.09	0.378	0.057	0.022	0.035	0.288	0.615
	平台山附近	轻一中度	0.063	0.124	0.105	0.146	0.024	0.013	0.019	0.041	0.163
	兰山嘴附近	隐约蓝藻水华	0.053	0.112	0.098	0.094	0.016	0.009	0.014	-0.004	-0.021
	长兴附近	轻度	0.045	0.111	0.092	0.127	0.021	0.011	0.019	0.035	0.160

续表

时相	样区位置	蓝藻水华 集聚程度	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	$\rho_{0.56}^-$	DVI	NDVI
			$\rho_{0.485}$	$\rho_{0.56}$	$\rho_{0.66}$	$\rho_{0.83}$	$\rho_{1.65}$	$\rho_{2.22}$	$\rho_{0.66}$		
2006 年 4 月 3 日	湖心区	隐约蓝藻水华	0.066	0.118	0.102	0.107	0.02	0.012	0.016	0.005	0.024
	南部	无藻区	0.065	0.116	0.104	0.061	0.011	0.009	0.012	-0.043	-0.261
	小湾里水厂附近	色暗水体	0.044	0.078	0.081	0.054	0.029	0.021	-0.003	-0.027	-0.200
2006 年 5 月 21 日	拖山南	无藻水体	0.079	0.127	0.135	0.093	0.034	0.027	-0.008	-0.042	-0.184
	拖山西侧	轻微蓝藻水华	0.052	0.107	0.084	0.098	0.027	0.017	0.023	0.014	0.077
2007 年 2 月 1 日	湖心	无藻水体	0.093	0.14	0.144	0.082	0.032	0.028	-0.004	-0.062	-0.274
	湖心	色亮无藻水体	0.051	0.098	0.113	0.073	0.008	0.008	-0.015	-0.04	-0.215
2007 年 3 月 21 日	长兴片	色亮无藻水体	0.047	0.097	0.119	0.102	0.007	0.008	-0.022	-0.017	-0.077
2007 年 5 月 8 日	梅梁湖	色暗无藻水体	0.035	0.07	0.065	0.025	0.007	0.006	0.005	-0.04	-0.444
2007 年 7 月 11 日	鼋头渚附近	重度	0.051	0.14	0.084	0.56	0.102	0.028	0.056	0.476	0.739
	贡湖	中度	0.036	0.104	0.07	0.188	0.032	0.012	0.034	0.118	0.457
	沙渚附近	轻度	0.06	0.114	0.089	0.134	0.036	0.026	0.025	0.045	0.202
	湖心区	隐约蓝藻水华	0.075	0.129	0.114	0.103	0.028	0.019	0.015	-0.011	-0.051
	竺山湖色	暗含藻水体	0.051	0.088	0.073	0.103	0.028	0.022	0.015	0.03	0.170
	长兴片	色亮无藻水体	0.101	0.143	0.145	0.092	0.031	0.027	-0.002	-0.053	-0.224
	乌龟山附近	色亮无藻水体	0.089	0.127	0.124	0.072	0.034	0.03	0.003	-0.052	-0.265
	小湾里附近	中度	0.05	0.108	0.077	0.193	0.036	0.02	0.031	0.116	0.430
	梅梁湖	重度	0.086	0.18	0.109	0.649	0.141	0.04	0.071	0.54	0.712
	宜兴附近	重度	0.059	0.15	0.083	0.705	0.117	0.026	0.067	0.622	0.789
2007 年 9 月 13 日	宜兴附近	中一重度	0.06	0.121	0.071	0.403	0.064	0.018	0.05	0.332	0.700
	宜兴附近	轻一中度	0.05	0.091	0.058	0.146	0.029	0.011	0.033	0.088	0.431
	宜兴附近	色暗无蓝藻水华区	0.041	0.057	0.045	0.035	0.014	0.009	0.012	-0.01	-0.125
	鱼洋山附近	色暗无藻水体	0.064	0.095	0.061	0.024	0.008	0.005	0.034	-0.037	-0.435
	梅梁湖	中一重度	0.075	0.169	0.102	0.564	0.099	0.027	0.067	0.462	0.694
	湖心区	中度	0.065	0.141	0.096	0.226	0.041	0.013	0.045	0.13	0.404
	拖山附近	中度	0.073	0.137	0.093	0.186	0.027	0.013	0.044	0.093	0.333
	湖心区	隐约—轻度水华	0.065	0.114	0.08	0.073	0.015	0.007	0.034	-0.007	-0.046
	乌龟山西南	隐约蓝藻水华	0.075	0.112	0.083	0.068	0.015	0.008	0.029	-0.015	-0.099
	长兴片	中等偏强	0.034	0.102	0.069	0.267	0.052	0.017	0.033	0.198	0.589
2008 年 4 月 24 日	长兴片	轻度	0.049	0.108	0.086	0.155	0.029	0.013	0.022	0.069	0.286
	长兴片 2	轻度水华	0.05	0.112	0.09	0.159	0.031	0.013	0.022	0.069	0.277
	湖心区	无藻水体	0.081	0.124	0.124	0.073	0.013	0.011	0	-0.051	-0.259
	兰山嘴	中度	0.072	0.125	0.085	0.245	0.046	0.015	0.04	0.16	0.485
	贡湖	轻度	0.093	0.134	0.096	0.125	0.024	0.009	0.038	0.029	0.131
2008 年 7 月 13 日	兰山嘴	轻微蓝藻	0.059	0.095	0.071	0.099	0.027	0.02	0.024	0.028	0.165
	湖心区	无藻水体	0.139	0.151	0.121	0.066	0.03	0.02	0.03	-0.055	-0.294
	宜兴片	色暗水体	0.082	0.1	0.078	0.044	0.027	0.021	0.022	-0.034	-0.279
	梅梁湖	中度	0.065	0.105	0.068	0.198	0.037	0.012	0.037	0.13	0.489
	竺山湖外口	轻度	0.052	0.093	0.068	0.123	0.024	0.009	0.025	0.055	0.288
2008 年 10 月 1 日	平台山附近	无藻水体	0.11	0.142	0.135	0.074	0.011	0.006	0.007	-0.061	-0.292
	沙渚西南	隐约蓝藻水体	0.086	0.11	0.09	0.081	0.012	0.007	0.02	-0.009	-0.053
	梅梁湖	轻微—轻度	0.045	0.078	0.05	0.067	0.012	0.005	0.028	0.017	0.145
	宜兴官渎港附近	重度	0.019	0.099	0.061	0.408	0.082	0.024	0.038	0.347	0.740
	小湾里水厂附近	重度	0.022	0.089	0.061	0.335	0.062	0.023	0.028	0.274	0.692
	拖山附近	中度	0.009	0.075	0.051	0.177	0.037	0.014	0.024	0.126	0.553
	长兴片	轻微蓝藻水体	0.031	0.092	0.088	0.09	0.017	0.009	0.004	0.002	0.011
	西山西侧	隐约蓝藻水体	0.026	0.083	0.075	0.064	0.013	0.008	0.008	-0.011	-0.079
	湖心区平台山附近	色亮无藻水体	0.041	0.084	0.086	0.035	0.005	0.005	-0.002	-0.051	-0.421

续表

时相	样区位置	蓝藻水华	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	$\rho_{0.56}^-$	DVI	NDVI
		集聚程度	$\rho_{0.485}$	$\rho_{0.56}$	$\rho_{0.66}$	$\rho_{0.83}$	$\rho_{1.65}$	$\rho_{2.22}$	$\rho_{0.66}$		
2009 年 5 月 29 日	长兴片	重度积聚	0.075	0.163	0.11	0.596	0.092	0.025	0.053	0.486	0.688
	梅梁湖十八湾附近	中度	0.072	0.126	0.096	0.19	0.037	0.014	0.03	0.094	0.329
	椒山西侧	轻度	0.06	0.096	0.071	0.142	0.027	0.01	0.025	0.071	0.333
	西山西南	无藻水体	0.104	0.139	0.12	0.063	0.031	0.026	0.019	-0.057	-0.311
2009 年 8 月 17 日	梅梁湖	中等偏强	0.067	0.119	0.071	0.322	0.052	0.014	0.048	0.251	0.639
	兰山嘴附近	中等偏强	0.054	0.117	0.071	0.411	0.071	0.016	0.046	0.34	0.705
	湖心区	中度	0.066	0.118	0.083	0.169	0.031	0.009	0.035	0.086	0.341
	梅梁湖	轻度	0.052	0.089	0.057	0.075	0.008	0.004	0.032	0.018	0.136
	长兴片	色偏亮无藻水体	0.11	0.167	0.166	0.068	0.012	0.007	0.001	-0.098	-0.419
	长兴片	色偏暗无藻水体	0.073	0.115	0.099	0.039	0.008	0.005	0.016	-0.06	-0.435
2009 年 10 月 20 日	灵山大佛南侧	重度积聚	0.002	0.08	0.039	0.399	0.047	0.015	0.041	0.36	0.822
	湖心区	无藻水体	0.05	0.099	0.089	0.03	0.009	0.009	0.01	-0.059	-0.496
	漫山西侧	无藻水体	0.041	0.091	0.08	0.026	0.01	0.009	0.011	-0.054	-0.509
2009 年 11 月 5 日	梅梁湖小湾里附近	重度积聚	0.041	0.121	0.071	0.593	0.074	0.02	0.05	0.522	0.786
	竺山湖沙塘港	重度积聚	0.037	0.125	0.073	0.586	0.1	0.027	0.052	0.513	0.778
	拖山东侧	中度	0.051	0.117	0.081	0.18	0.029	0.011	0.036	0.099	0.379
	拖山东南侧	轻度	0.059	0.117	0.089	0.105	0.018	0.009	0.028	0.016	0.082
	长兴片	轻度	0.049	0.124	0.11	0.104	0.016	0.007	0.014	-0.006	-0.028
	湖心区	无藻水体	0.078	0.139	0.148	0.081	0.002	0.002	-0.009	-0.067	-0.293
2010 年 4 月 30 日	湖心区	色暗无藻水体	0.034	0.08	0.073	0.039	0.023	0.02	0.007	-0.034	-0.304
	湖州片	色亮无藻水体	0.086	0.162	0.184	0.103	0.027	0.023	-0.022	-0.081	-0.282
	梅梁湖	无藻水体	0.051	0.092	0.082	0.051	0.029	0.025	0.01	-0.031	-0.233
	平台山东侧	偏亮无藻水体	0.062	0.113	0.107	0.048	0.021	0.019	0.006	-0.059	-0.381
	沙塘港附近	色暗水体	0.001	0.031	0.032	0.028	0.023	0.02	-0.001	-0.004	-0.067
	2010 年 7 月 19 日	兰山嘴附近	隐约—轻微蓝藻水华	0.061	0.09	0.071	0.083	0.031	0.024	0.019	0.012
2010 年 7 月 19 日	湖心区	无藻水体	0.099	0.118	0.083	0.042	0.03	0.023	0.035	-0.041	-0.328
	湖州注入	色偏亮水体	0.107	0.163	0.174	0.077	0.031	0.025	-0.011	-0.097	-0.386
	兰山嘴附近	无藻色暗水体	0.079	0.106	0.094	0.05	0.029	0.023	0.012	-0.044	-0.306
	漫山附近	色暗无藻水体	0.077	0.1	0.07	0.042	0.035	0.029	0.03	-0.028	-0.250
	2010 年 8 月 4 日	拖山附近	轻度	0.131	0.165	0.12	0.175	0.038	0.014	0.045	0.055
2010 年 8 月 20 日	梅梁湖	隐约—轻微蓝藻	0.124	0.153	0.112	0.105	0.028	0.013	0.041	-0.007	-0.032
2010 年 8 月 20 日	贡湖沙渚	无藻水体	0.081	0.114	0.103	0.061	0.02	0.017	0.011	-0.042	-0.256
	湖心区	无藻水体	0.092	0.126	0.126	0.071	0.025	0.021	0	-0.055	-0.279
	兰山嘴附近	无藻水体	0.079	0.108	0.108	0.076	0.026	0.022	0	-0.032	-0.174
	漫山附近	无藻水体	0.088	0.123	0.109	0.056	0.031	0.027	0.014	-0.053	-0.321
	梅梁湖	无藻水体	0.077	0.109	0.097	0.066	0.019	0.016	0.012	-0.031	-0.190
	沙塘港南岸边带	暗黑水体	0.042	0.056	0.045	0.086	0.022	0.017	0.011	0.041	0.313
	社渚港岸边带 2	色偏暗水体	0.049	0.072	0.058	0.068	0.021	0.018	0.014	0.01	0.079
	社渚港岸边带水体 3	无藻水体	0.069	0.093	0.086	0.073	0.022	0.018	0.007	-0.013	-0.082
	社渚港岸边带水体 4	无藻水体	0.07	0.097	0.093	0.077	0.022	0.018	0.004	-0.016	-0.094
	社渚港岸边带水体 5	无藻水体	0.075	0.102	0.1	0.077	0.024	0.02	0.002	-0.023	-0.130
	社渚港附近	暗黑水体	0.042	0.054	0.044	0.075	0.021	0.017	0.01	0.031	0.261
	拖山东南	无藻水体	0.09	0.122	0.115	0.075	0.028	0.024	0.007	-0.04	-0.211
	长兴片	略暗无藻水体	0.068	0.093	0.067	0.034	0.02	0.017	0.026	-0.033	-0.327
2010 年 9 月 5 日	竺山湖	色暗含蓝藻水华	0.056	0.083	0.065	0.084	0.021	0.018	0.018	0.019	0.128
	兰山嘴附近	中等积聚蓝藻水华	0.082	0.113	0.075	0.309	0.054	0.017	0.038	0.234	0.609
	兰山嘴附近	轻度积聚蓝藻水华	0.068	0.096	0.065	0.141	0.022	0.01	0.031	0.076	0.369
	湖心区	无藻水体	0.099	0.132	0.109	0.06	0.015	0.011	0.023	-0.049	-0.290

续表

时相	样区位置	蓝藻水华	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	$\rho_{0.56} -$	DVI	NDVI
		集聚程度	$\rho_{0.485}$	$\rho_{0.56}$	$\rho_{0.66}$	$\rho_{0.83}$	$\rho_{1.65}$	$\rho_{2.22}$	$\rho_{0.66}$		
2010 年 9 月 21 日	梅梁湖	无藻水体	0.132	0.152	0.124	0.079	0.026	0.018	0.028	-0.045	-0.222
	宜兴大浦港附近	轻微水华	0.042	0.071	0.061	0.081	0.011	0.008	0.01	0.02	0.141
	湖心区	无藻水体	0.068	0.104	0.107	0.058	0.01	0.009	-0.003	-0.049	-0.297
	漫山附近	无藻水体	0.054	0.089	0.066	0.026	0.012	0.01	0.023	-0.04	-0.435
	梅梁湖	无藻水体	0.059	0.09	0.082	0.048	0.01	0.009	0.008	-0.034	-0.262
	社渚港岸边带	无藻水体	0.052	0.08	0.078	0.041	0.012	0.01	0.002	-0.037	-0.311
	长江水体	无藻水体	0.063	0.109	0.127	0.049	0.014	0.012	-0.018	-0.078	-0.443
	长兴片	略偏暗无藻水体	0.043	0.08	0.06	0.027	0.01	0.009	0.02	-0.033	-0.379

2 蓝藻水华强度规律分析

由于蓝藻细胞内叶绿素 a 的生物物理响应,蓝藻水华在 0.56 μm 波长的 TM2 波段具有比 TM1、TM3 略高的反射率,构成了可见光波长范围的绿峰值,这也是蓝藻水华肉眼感官为绿色的光学响应特征^[5]。 $\rho_{0.56} - \rho_{0.485}$ 反射率差值在 0.05 ~ 0.083, 平均值 0.065 2; $\rho_{0.56} - \rho_{0.66}$ 反射率差值大约在 0.065 ~ 0.073, 平均值 0.068 3。水华集聚度越高, TM2 与两个相邻波段的反射率差值也更大(表 3)。在 TM4 波段,蓝藻水华具有很高的反射率 $\rho_{0.83}$ 可达 0.34 ~ 0.50 甚至更高,该波段反射率的标准差也较大,总体上呈现十分明显的水华越集聚则 TM4 波段反射率也越高的规律。在 TM5 波段,蓝藻水华的反射率明显降低,大致在 0.06 ~ 0.1。在 TM7 波段,蓝藻水华的反射率 $\rho_{2.22}$ 更加急剧降低,大致在 0.02 ~ 0.035。

所有重度蓝藻水华的 TM4 波段反射率 $\rho_{0.83}$ 均在 0.3 以上,在夏季 7 月—8 月可以高达 0.7,远超过相同波段陆地植被的反射能力,在影像上表现为集聚区域的水华大面积均匀、稠厚分布,没有水体像元的间杂,由于集聚程度高,单位面积内蓝藻生物量大,光谱反射效率比陆面植被都要高,因此, TM4 波段是反映蓝藻集聚、堆积的程度的灵敏波段。重度蓝藻水华的 TM2 波段反射率大于 TM3,且差异比中轻度水华大,这也是蓝藻水华越重、肉眼感觉更加呈鲜绿色的光学响应机理。

中等强度蓝藻水华的 TM4 波段反射率 $\rho_{0.83}$ 分布在 0.17 ~ 0.30 之间,均值和 1 倍标准差区间为 $0.231 \pm 0.016 0$ 。其 TM2 波段反射率比 TM3 波段高,差异介于重度水华和轻度水华之间。

轻度蓝藻水华 TM4 波段反射率均值和 1 倍标准差区间为 0.134 ± 0.006 , TM2 波段反射率比

TM3 波段略高。

轻微、隐约可见蓝藻水华的 TM4 波段反射率 $\rho_{0.83}$ 大致介于 0.1 ~ 0.06, 动态范围极窄,光谱信息较弱,缺乏特异性,此类像元的辐亮度既受蓝藻叶绿素 a 和细胞结构的影响,还包括了水体光学贡献,水浅时还要考虑底泥对反射光吸收和反射的影响,因此,仅通过 TM4 波段不足以定量分析蓝藻含量,还应充分利用 TM2($\rho_{0.56}$)、TM3($\rho_{0.66}$) 与 TM4($\rho_{0.83}$) 的反射率值间的关系,在遥感算法设计时更应搜索无藻或藻密度极低、蓝藻对可见—反射红外贡献比 < 5% 的水体像元,将其在 TM1—TM4 波段的反射率作为定量评价蓝藻水华等级的“空白”基准,有关研究工作在今后值得深化展开。可见,仅凭 $\rho_{0.83}$ 难以有效可靠地分出等级、藻密度的差异,必须综合 TM2、TM3、TM4 波段反射率信息得到更确定的划分。

无藻水体的 TM4 波段反射率 $\rho_{0.83}$ 总体低于 0.1,在 0.02 ~ 0.09 间窄幅波动,大致比轻微、隐约可见蓝藻水华略低,受到水体悬浮物、总磷、总氮、化学需氧量等复杂因素的影响,太湖不同湖区、不同时段水体反射率还存在一定的差异,如南太湖湖州片苕溪入湖水体由于携带有较多悬浮物,在可见光及反射红外呈现略亮的反射特征,从多年来太湖湖体在 Landsat 影像上的光学特征看,影响因素十分复杂,有水质、生物、入湖污染物,甚至还有风浪搅动底泥等原因导致水色的差异。

轻度、中度和重度蓝藻水华 DVI 和 NDVI 指数均为正值,且与水华集聚程度为正相关,无藻水体则 DVI 和 NDVI 指数均为负值。值得关注的是 2010 年 8 月 20 日影像上太湖西部沙塘港、社渚港附近的部分暗色水体 DVI 和 NDVI 指数显现出正的数值,与其他暗色水体有弱光谱信息差异,经初步研究,辨识为太湖“湖泛”现象。

3 蓝藻水华遥感强度指数及等级划分算法

3.1 水华遥感强度指数设计

在蓝藻水华遥感监测主要使用 3 大系列卫星遥感影像进行水华分布和强度信息的提取,它们具有中心波长基本一致的波段(通道),见表 4。

表 4 适用于蓝藻水华遥感监测的 3 大主要
卫星传感器波段 μm

卫星	传感器	绿光波段	红光波段	近红外波段
Terra/Aqua	MODIS	通道 4 0.545 ~ 0.565	通道 1 0.620 ~ 0.670	通道 2 0.841 ~ 0.876
HJ-1A、B 星	CCD1、CCD2 相机	波段 2 0.52 ~ 0.60	波段 3 0.63 ~ 0.69	波段 4 0.76 ~ 0.90
Landsat	TM、ETM	波段 2 0.52 ~ 0.60	波段 1 0.63 ~ 0.69	波段 1 0.76 ~ 0.90

由于中等到重度集聚的蓝藻水华近红外反射率极高,在归一化植被指数 NDVI 公式的分子和分母中同时起作用,因而灵敏度可能降低,此外,NDVI 和 DVI 指数均只用了反射红外通道和红光波长的光谱信息,没有合理使用绿光波长处反射率特征,在表征蓝藻水华强度时均存在一定的不足,综合上述蓝藻水华和无藻水体的光谱特征,提出蓝藻水华遥感强度指数(CBI, Cyanobacteria Bloom Intensity),计算式如下:针对 MODIS 影像, $CBI_{\text{MODIS}} = \rho_{\text{CH}_2} + \rho_{\text{CH}_4} - 2\rho_{\text{CH}_1}$

针对环境一号影像 $CBI_{\text{HJ-1}} = \rho_{\text{CCD4}} + \rho_{\text{CCD2}} - 2\rho_{\text{CCD3}}$

针对 Landsat 影像 $CBI_{\text{Landsat}} = \rho_{\text{TM4}} + \rho_{\text{TM2}} - 2\rho_{\text{TM3}}$

3.2 水华等级划分算法

对于蓝藻水华暴发等级的划分,根据水华在反射红外波长附近反射率 $\rho_{0.83}$ 动态范围宽、在绿光波长附近也有相当幅度的动态范围这两个典型特征,提出基于定量遥感的业务化算法。(1)反演得到太湖湖体各波段反射率影像,进行云及阴影、水草像元检测和剔除;(2)设定合适的 $n \times n$ 像元统计窗口 w ,对环境卫星和 Landsat,可采用 1×1 (单像元)、 3×3 像元窗口(接近 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$)、 17×17 像元窗口(接近 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$)、 33×33 (接近 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$) 像元窗口;(3)提取重度水华区:计算统计窗口 w 内像元的反射率均值 $\bar{\rho}_{0.83}$,若 $\bar{\rho}_{0.83} \geq 0.3$,为蓝藻重度水华区,窗口内所有像元标记为重度水华像元;(4)提取中度水华区:计算统计窗口 w

内像元的反射率均值 $\bar{\rho}_{0.83}$,若 $0.17 \leq \bar{\rho}_{0.83} < 0.3$,为蓝藻中度水华区,窗口内所有像元标记为中度水华像元;(5)提取轻度水华区:计算统计窗口 w 内像元的反射率均值 $\bar{\rho}_{0.83}$, $0.12 \leq \bar{\rho}_{0.83} < 0.17$ 且 $\bar{\rho}_{0.83} > \bar{\rho}_{0.66}$,判为蓝藻轻度水华区,窗口内所有像元标记为轻度水华像元;(6)提取轻微、隐约可见蓝藻水华区:在完成重度、中度、轻度水华区提取后,对剩余的湖体像元统计窗口综合比较 $\bar{\rho}_{0.83}$ 、 $\bar{\rho}_{0.66}$ 、 $\bar{\rho}_{0.56}$:
①若 $\bar{\rho}_{0.56} > \bar{\rho}_{0.66} < \bar{\rho}_{0.83}$,为蓝藻轻微水华区,窗口内所有像元标记为轻微水华像元;
②若 $\bar{\rho}_{0.56} > \bar{\rho}_{0.66} \cong \bar{\rho}_{0.83}$ 且 $(\bar{\rho}_{0.56} - \bar{\rho}_{0.66}) > 0.025$,判为蓝藻轻微水华区,窗口内所有像元标记为轻微水华像元;
③若 $\bar{\rho}_{0.56} > \bar{\rho}_{0.66} \cong \bar{\rho}_{0.83}$ 且 $(\bar{\rho}_{0.56} - \bar{\rho}_{0.66}) \leq 0.025$,如紧邻的统计窗口区被判为轻度以上水华区,则本窗口标记为蓝藻轻微水华区,窗口内所有像元标记为轻微水华像元;(7)其余不满足以上各条判别逻辑的窗口及其像元标记为无藻区。

4 结语

太湖蓝藻水华由于自身的集聚特性,显示出两项重要的反射率特征:(1)在 $0.83 \mu\text{m}$ 中心波长附近光谱反射率动态范围宽、且与水华强度吻合极好;(2)在 $0.56 \mu\text{m}$ 中心波长附近光谱反射率也与蓝藻水华有较稳定的正相关,均表现与蓝藻密度同增减模式。

基于这些特征,提出了蓝藻水华遥感强度指数公式,设计了判断水华等级的算法。对流域水生态环境监测的遥感数据除了 Landsat TM/ETM 之外,还有 MODIS 及国产环境一号卫星 CCD 相机数据,后两个卫星传感器具有与 Landsat 基本一致的蓝藻遥感光谱通道,因此,提出的蓝藻水华遥感强度指数及等级划分算法有一定的通用性。

[参考文献]

- [1] 王桥. 基于环境一号卫星的生态环境遥感监测[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 吴传庆, 王桥, 杨志峰, 等. 太湖水华的遥感分析[J]. 中国环境监测, 2007, 23(3): 52-56.
- [3] 李旭文, 牛志春, 姜晟. Landsat5 TM 遥感影像太湖蓝藻水华反射光谱特征研究[J]. 环境监测管理和技术, 2010, 22(6): 54-57.
- [4] 李旭文. Landsat-7 SLC-OFF ETM 遥感数据下载及在太湖蓝藻水华监测中的应用[J]. 环境监测管理和技术, 2009, 21(3): 54-57.
- [5] 马荣华, 唐军武, 段洪涛, 等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 143-158.