

· 研究报告 ·

太湖湖泛现象的卫星遥感监测

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: 2010年8月20日太湖地区 Landsat ETM 影像显示,太湖西部沿岸带存在湖泛黑水团现象,对该景遥感影像进行了大气校正,提取了湖泛样区、其他水体样区的 ETM 各波段光谱反射率数据统计特征。结果表明,湖泛样区在可见光波长的 ETM 波段 1、2、3 具有很低的反射率,水色暗黑,与人眼观察一致,而在反射红外波长的 ETM 波段 4 则有比波段 3 高的反射率,差异植被指数 $DVI > 0$,其原因为湖泛黑水团中,虽然大量蓝藻死亡分解,然而水中还残留有一定数量的活体蓝藻,残余叶绿素及细胞造成了虽然较弱、但仍较为稳定的反射红外波长处的光谱反射能力。提出了识别湖泛现象的遥感判据为 $\rho_{0.485} < 0.05$ and $\rho_{0.56} < 0.08$ and $\rho_{0.66} < 0.065$ and $(\rho_{0.83} - \rho_{0.66}) > 0$ and $\rho_{0.83} < 0.1$ 。

关键词: 太湖; 卫星遥感; 湖泛; 蓝藻; 差异植被指数

中图分类号: X87

文献标识码: B

文章编号: 1006-2009(2012)02-0012-06

Satellite Remote Sensing Monitoring of Black Color Water Blooms in Lake Taihu

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

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

Abstract: Landsat ETM image of Lake Taihu acquired on Aug. 20, 2010 showed that there was black color water bloom (BCWB) near the shore of western part of the lake, the remotely sensed image was atmospherically corrected, several ROIs (Region Of Interest) were placed on BCWB area and other water bodies, the spectral reflectance statistics were extracted for these ROIs. Results showed that BCWB ROIs had very low reflectance at ETM visible bands 1, 2 and 3, hence had very dark to black water color, but at ETM reflective infrared band 4, they showed slightly high reflectance than band 3, hence the Difference Vegetation Index (DVI) had positive value. The cause was that despite the rapid degeneration of cyano-bacteria in BCWB, there still remain some live cyano-bacteria cells in the water bloom, the remnant chlorophylls and cell structure were able to reflect solar radiation at reflective infrared wavelengths. The criteria for identifying BCWB was proposed as $\rho_{0.485} < 0.05$ and $\rho_{0.56} < 0.08$ and $\rho_{0.66} < 0.065$ and $(\rho_{0.83} - \rho_{0.66}) > 0$ and $\rho_{0.83} < 0.1$.

Key words: Lake Taihu; Satellite remote sensing; Black color water bloom (BCWB); Cyano-bacteria; Difference vegetation index

近20年来,太湖蓝藻水华暴发时有发生,对饮用水源安全造成较大影响,蓝藻水华严重时,有可能导致湖泛现象。有关研究认为,湖泛是指湖泊富营养化水体在藻类大量暴发、积聚和死亡后,在适宜的气象、水文条件下,与底泥中的有机物在缺氧和厌氧条件下产生生化反应,释放硫化物、甲烷和二甲基三硫等硫醚类物质,形成褐黑色伴有恶臭的“黑水团”,从而导致水体水质迅速恶化、生态系统受到严重破坏的现象^[1-2]。藻类死亡和受污染的

底泥是湖泛形成的物质基础,适宜的水温、气压、风速为湖泛现象的发生提供了条件。湖泛的危害是

收稿日期: 2011-11-10; 修订日期: 2012-01-28

基金项目: 国家水环境监测技术体系研究与示范基金资助项目(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”课题基金资助项目(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。

多方面的,可导致水体包括鱼类等各种生物死亡并腐败分解,局部生态环境崩溃,如果发生在饮用水源地,将造成严重的供水危机。

因此,对湖泛的研究、监测受到高度重视^[3],但仅靠地面手段难以及时准确地捕捉湖泛的发生。卫星遥感是直接观测湖泊水色^[4]、蓝藻水华、湖泛黑水团等水环境生态状况十分重要的技术手段,可通过具有生物物理机理的可遥感指数、水色、图像纹理等特征提取分布空间范围、强度和面积信息,主要利用 EOS-MODIS、Landsat、国产环境一号(HJ-1)卫星等遥感影像提取^[5-7]。随着可有效监测湖泊水环境的卫星遥感数据源不断增多,能为更快速、客观地捕捉和监测湖泛现象提供丰富的数据支持。

由于湖泛发生需要特定的条件、面积不大、持续时间只有1d~5d等原因,MODIS影像虽然时间上重访较快,可达2次/d,但空间星下点分辨率在250m~500m,较难识别出湖泛的分布,Landsat空间分辨率可达30m,较适合监测湖泛这一类中小尺度的水环境问题,但是重访周期需要16d,在时间上不容易捕捉到湖泛现象。

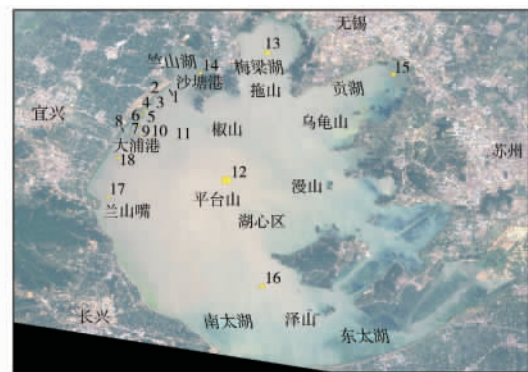
目前,湖泛在卫星遥感影像上的光谱特征研究尚未见报道。2010年8月,太湖地区持续较长时间的高温天气,在8月20日上午过境太湖的Landsat ETM影像上,在太湖西部沿岸区显示有湖泛发生,通过对该景遥感影像上湖泛区和其他水域光谱反射率的对比,对太湖湖泛的遥感反射率特征进行了初步的分析。

1 数据处理方法

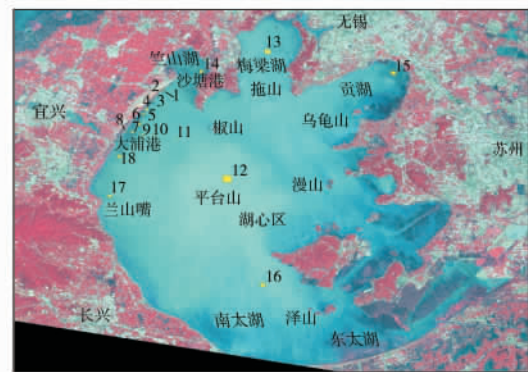
1.1 影像资料

选取了2010年7月19日、8月20日和9月21日共3景Landsat 7 ETM影像数据,其中,8月20日的影像在太湖西部沿岸区沙塘港—大浦港一带有湖泛现象,采用ETM波段3(R)2(G)1(B)、4(R)3(G)2(B)彩色合成,见图1(a)(b)。

7月19日和9月21日为湖泛发生前后约1个月的影像,主要供湖泛发生前后同一地理区域水面状况对比。由于Landsat ETM的扫描行校正器出故障后数据有一定程度的条带问题,为便于显示,在ENVI中制图时采用landsat-apfill程序进行了缝隙修补处理,但在圈定各样区、统计光谱信息时避免落入缺失数据的缝隙带,而是选择有原始数据的



(a) 波段3(R) 2(G) 1(B)



(b) 波段4(R) 3(G) 2(B) 彩色合成影像

图1 2010年8月20日太湖Landsat ETM彩色合成影像

Fig. 1 Color composites of Landsat ETM data acquired on Aug. 20, 2010 for Lake Taihu, (a) image: and 3(R) 2(G) 1(B), (b) image: band 4(R) 3(G) 2(B)

水体作为样区。

1.2 数据处理

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。利用遥感处理软件ENVI完成了数据处理,太湖湖泛现象的遥感反射率影像信息提取的处理流程见图2。

使用了大气校正精度较高、最为常用、集成在遥感软件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ETM影像各类地物反射的影响,获得接近真实的ETM1~5、ETM7波段地表反射率信

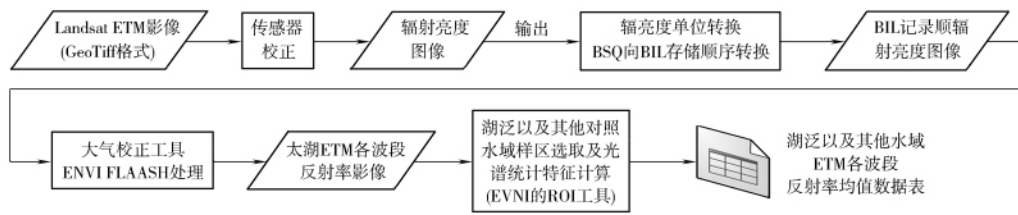


图 2 基于 Landsat ETM 影像计算太湖湖泛现象的光谱反射率的处理流程

Fig. 2 Flowchart of retrieval of spectral reflectance for BCWB on Landsat ETM image

息。FLAASH 基于 MODTRAN⁴⁺ 辐射传输模型, 算法精度高, 可以通过遥感影像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, 2010 年 8 月中旬, 太湖地区持续高温, 结合太湖所处亚热带北缘偏于湿润、地理纬度(31°N) 等因素, 大气模式选用了 T (Tropical) 模式, 适用于近地表空气温度约 27 °C、假设大气柱水汽含量 4.11 g/cm²。气溶胶模式选取乡村(Rural) 模式。

完成大气校正后, 对影像进行 ETM 波段 3(R) 2(G) 1(B) 以及 ETM 波段 4(R) 3(G) 2(B) 彩色合成发现(图 1), 太湖西部沿岸区的沙塘港一大浦口

一带近岸附近水域, 有一长条状延伸的暗色水体, 延伸达 12.69 km, 面积约 8 km²。对比之前、之后约 1 个月的 Landsat 影像, 该区域并没有长期、稳定的暗色水体, 因此, 可以剔除水浅、底泥等影响因素。

结合近年来该区域是入湖河流污染物的主要汇入区、长期水质较差、蓝藻发生频繁、曾发生过湖泛^[1-2] 的实际, 对这条长条状延伸的暗色水体采用 ROI 样区工具设立了 1—7 号样区(图 1) 在该暗色水体的近岸侧的相对偏亮水体, 以及该暗色水体的湖心侧的水体, 分别设置了 8—11 号样区。为与太湖其他湖区的水体进行光谱特征对比, 还在湖心、梅梁湖、贡湖、南太湖等不同湖区圈定了 12—18 号样区。

利用 ENVI 的光谱统计工具数据处理得到的这些样区的各波段反射率统计结果, 另外, 还计算了差异植被指数 DVI 和归一化植被指数 NDVI, 见表 1 和图 3。

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

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

表 1 Landsat ETM 影像上湖泛区域、其他水体的 ETM 各波段反射率、DVI 和 NDVI 统计结果
Table 1 Statistics of spectral reflectances, DVI and NDVI for ROIs of BCWB and other water bodies without Cyano-bacteria degeneration on Landsat ETM images

样区	波段 1 $\rho_{0.485}$	波段 2 $\rho_{0.56}$	波段 3 $\rho_{0.66}$	波段 4 $\rho_{0.83}$	波段 5 $\rho_{1.65}$	波段 7 $\rho_{2.22}$	$\rho_{0.56} - \rho_{0.66}$	DVI	NDVI	
湖泛	1	0.040 2	0.054 6	0.044 5	0.090 0	0.023 1	0.018 0	0.010 1	0.045 5	0.338 29
水域	2	0.041 7	0.055 8	0.045 1	0.087 6	0.023 3	0.017 9	0.010 7	0.042 5	0.320 27
	3	0.041 6	0.054 5	0.044 8	0.075 3	0.020 7	0.016 3	0.009 7	0.030 5	0.253 96
	4	0.049 9	0.072 9	0.057 6	0.071 7	0.021 0	0.017 5	0.015 3	0.014 1	0.109 05
	5	0.048 5	0.071 0	0.057 9	0.066 6	0.020 9	0.017 4	0.013 1	0.008 7	0.069 88
	6	0.052 3	0.072 8	0.061 3	0.064 6	0.023 7	0.019 6	0.011 5	0.003 3	0.026 21
	7	0.053 5	0.073 9	0.064 1	0.064 3	0.023 4	0.019 3	0.009 8	0.000 2	0.001 56

续表

样区	波段 1 $\rho_{0.485}$	波段 2 $\rho_{0.56}$	波段 3 $\rho_{0.66}$	波段 4 $\rho_{0.83}$	波段 5 $\rho_{1.65}$	波段 7 $\rho_{2.22}$	$\rho_{0.56} - \rho_{0.66}$	DVI	NDVI	
对照	8	0.070 5	0.096 4	0.089 9	0.084 6	0.027 4	0.022 2	0.006 5	-0.005 3	-0.030 37
水域	9	0.068 9	0.095 8	0.094 1	0.072 6	0.023 9	0.019 8	0.001 7	-0.021 5	-0.128 97
	10	0.079 7	0.108 6	0.106 3	0.079 6	0.026 4	0.022 2	0.002 3	-0.026 7	-0.143 63
	11	0.082 7	0.111 9	0.105 4	0.068 8	0.024 8	0.020 3	0.006 5	-0.036 6	-0.210 10
	12	0.093 2	0.129 0	0.130 1	0.077 8	0.024 3	0.021 2	-0.001 1	-0.052 3	-0.251 56
	13	0.076 4	0.114 9	0.098 8	0.074 7	0.022 6	0.018 9	0.016 1	-0.024 1	-0.138 90
	14	0.045 9	0.069 5	0.058 4	0.045 8	0.012 7	0.010 9	0.011 1	-0.012 6	-0.120 92
	15	0.047 0	0.071 8	0.058 6	0.033 8	0.019 0	0.016 3	0.013 2	-0.024 8	-0.268 40
	16	0.091 8	0.124 9	0.114 9	0.054 5	0.026 0	0.021 9	0.010 0	-0.060 4	-0.356 55
	17	0.071 0	0.099 7	0.095 5	0.066 3	0.022 2	0.018 7	0.004 2	-0.029 2	-0.180 47
	18	0.069 3	0.094 3	0.093 0	0.074 4	0.024 6	0.020 5	0.001 3	-0.018 6	-0.111 11

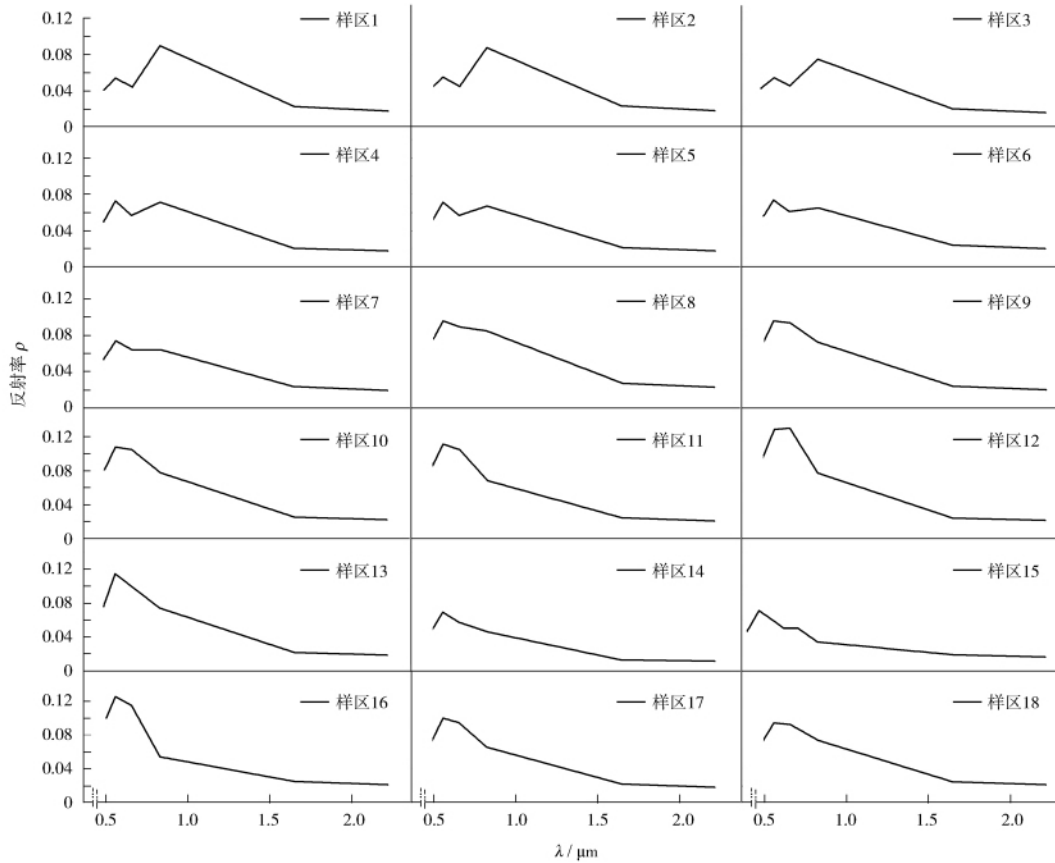


图 3 2010 年 8 月 20 日太湖西部沿岸区湖泛水域(样区 1—7)及对照水域(样区 8—18)的 TM 反射率曲线

Fig. 3 Spectral reflectance curves from Landsat images of Aug. 20, 2010 for BCWB near the shore of western Lake Taihu (ROIs 1—7), water bodies without Cyano-bacteria degeneration in other parts of the same lake (ROIs 8—18)

2 湖泛的识别

在 ETM 波段 3 (R) 2 (G) 1 (B) 真彩色合成影像上(图 1), ETM 可见光波段 1—3 和反射红外

ETM 4 波段的反射率均值分别为 $\bar{\rho}_{0.485} = 0.046 8$, $\bar{\rho}_{0.56} = 0.065 1$, $\bar{\rho}_{0.66} = 0.053 6$, $\bar{\rho}_{0.83} = 0.074 3$ 。湖泛样区 1—7 的 ETM 各波段反射率的均值见表 2。

表2 Landsat 影像上湖泛样区 ETM 各波段反射率均值和标准差

Table 2 Spectral reflectance means and standard deviations for ROIs of BCWB on Landsat images

样区	波段	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 7
		$\rho_{0.485}$	$\rho_{0.56}$	$\rho_{0.66}$	$\rho_{0.83}$	$\rho_{1.65}$	$\rho_{2.22}$
黑水团区	均值	0.046 8	0.065 1	0.053 6	0.074 3	0.0223 0	0.018 0
	标准差	0.002 1	0.003 6	0.003 2	0.004 0	0.000 5	0.000 4

从多年太湖在 Landsat 影像上的光学特征,太湖不同湖区、不同时段水体光学特性存在一定的差异,水色影响因素十分复杂,有水质、生物、底泥、入湖河流悬浮物质含量以及污染物含量,甚至还有风浪搅动底泥等原因导致水色变化,还有风浪导致水面粗糙度的反射差异。在太湖的竺山湖、贡湖两处水色较暗的位置选取了 14、15 号 2 个样区,它们的波段 1—3 反射率值也相对较低,但是其波段 4 的反射率比湖泛样区的波段 4 反射率低, $DVI < 0$ 。其他样区的波段 1—3 反射率值比湖泛样区高,但 $DVI < 0$ (表 1、图 3)。

太湖东部等遥感水色较暗的水体是由于湖水很浅,存在水体、底泥的混合光谱响应,部分湖区有沼泽化淤积现象及水草生长,在光谱上表现为可见光波段反射率较低而波段 4 反射率较高,可以通过空间纹理特征、时间序列的遥感影像对比,以及在 ETM 波段 4 相对高的反射率特性,在湖泛现象遥感监测时有效扣除水草因素。

这些不同样区的遥感光谱反射率数据对比分析表明,分布在西部沿岸区的暗色水团具有很低的反射率,在 ETM 可见光蓝、绿、红波段处均比太湖其他湖区大多数水体要低;然而,与太湖其他位置的暗色水域相比较,西部沿岸区的暗色水团区域具有一定强度的 ETM 波段 4 反射率 $\rho_{0.83} > \rho_{0.66}$, DVI 及 $NDVI > 0$,其他暗色水域则普遍为 $\rho_{0.83} < \rho_{0.66}$, DVI 及 $NDVI < 0$ 。

有研究认为湖泛现象是蓝藻水华暴发后蓝藻重度积聚,在特定的气象和水文条件下,藻水混合体缺氧导致蓝藻细胞大量死亡、分解腐败,标志是肉眼观察到水色发暗发黑。以上卫星遥感的光谱信号表明,延伸在太湖西部沿岸区沙塘港—大浦口一带的暗色水团,属于典型的湖泛现象。湖泛暗色水团中,虽然大量蓝藻死亡分解,然而水中还残留有一定数量的活体蓝藻,残余叶绿素及细胞造成了虽然较弱、但仍较为稳定的反射红外波长处的光谱反射能力,因此 $\rho_{0.83}$ 高于 $\rho_{0.66}$, $DVI > 0$ 。如果 ETM 波段 4 反射

率低于可见光波段, $NDVI$ 表现为负值,则属于水体本身的非叶绿素导致的光学响应。因此,总结蓝藻导致的湖泛现象的遥感光谱信号特征为:

$$\rho_{0.485} < 0.05 \text{ and } \rho_{0.56} < 0.08 \text{ and } \rho_{0.66} < 0.065 \text{ and } (\rho_{0.83} - \rho_{0.66}) > 0 \text{ and } \rho_{0.83} < 0.1$$

在 ENVI 中对 ETM 波段反射率影像利用上式进行了湖泛分布区域的提取,得到太湖西部沿岸区的湖泛黑水团延伸约 10 km,分布面积约 2.7 km²,空间分布见图 4。

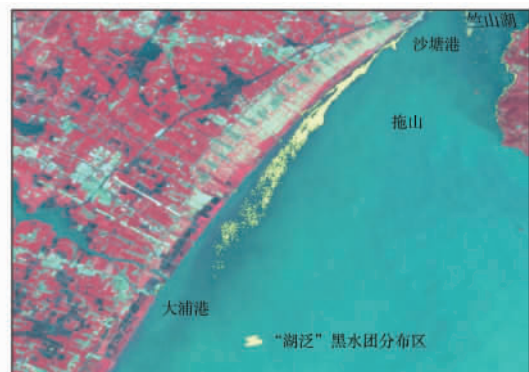


图 4 2010 年 8 月 20 日太湖西部沿岸区湖泛黑水团的空间分布信息提取结果

Fig. 4 Images of BCWB at west coast area in Lake Taihu on Aug. 20, 2010.

为了确证 8 月 20 日影像捕捉到湖泛现象,选取了相距约 1 个月的两景 ETM 影像进行对比,见图 5 (a) (b) (c) (d) (e) (f)。湖泛 7 号样区的附近,近岸侧的 8 号样区落于湖泛和岸线之间相对较亮的水域图 5 (c) (d),具有略高的波段 1—3 反射率值,分别为 0.070 5、0.096 4、0.089 9;偏太湖湖心侧的 9 号样区也是如此,波段 1—3 反射率值分别为 0.068 9、0.095 8、0.094 1;10、11、12 号样区则具有相对更高的波段 1—3 反射率值(表 1 图 3)。

除了图 5 (c) (d) 为该次湖泛发生的 ETM 影像,图 5 (a) (b) 为该次湖泛发生之前 1 个月,即 2010 年 7 月 19 日的 ETM 影像,图 5 (e) (f) 为该次

湖泛发生之后 1 个月,即 2010 年 9 月 21 日的 ETM 影像,它们均没有相应的湖泛现象卫星影像特征,水色相对均一,也排除了底泥的影像。

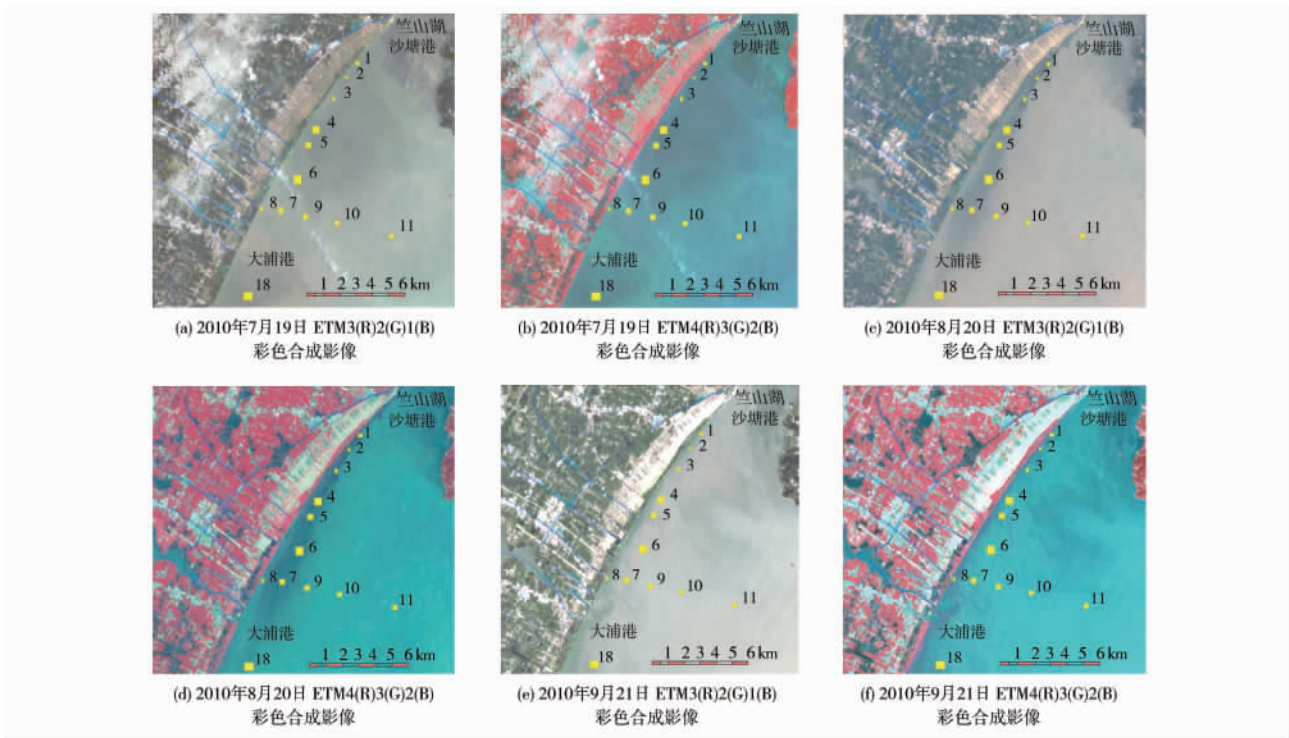


图 5 2010 年 8 月 20 日湖泛现象发生前后 1 个月的 ETM 影像对比

Fig. 5 Comparison of BCWB phenomena (c) (d) on ETM images acquired approximately 1 month before (a) (b) and after (e) (f) Aug. 20, 2010, respectively

3 结语

湖泛现象是富营养化较严重的湖泊在特殊的水质和气象水文条件下容易发生的生态问题,如果发生在饮用水源地、渔业养殖区等敏感水域,将带来严重的后果。快速捕捉湖泛的发生区域、分布范围,对于保障水生态安全和预警十分重要,单纯靠地面巡查要花费大量的人力物力,借助于较高空间分辨率的多源卫星遥感影像,能对湖泛现象快速捕捉,评估其影响范围,提取黑水团分布区域。

随着我国环境一号卫星 4 星组网构成每天的重访能力^[5],地面分辨率为 30 m 的 CCD 影像数据将能更加有力地支持对蓝藻水华、湖泛及其他时变较快的生态问题的监测预警,再加上资源卫星、海洋卫星等国产卫星影像,国外 Landsat 等对地观测、科学研究、公益性卫星影像资源不断丰富^[8]、互为补充和协同应用,可以预见,对湖泊等水体中的小尺度、光谱上弱幅(然而较稳定的)特征、时变快(一般 < 1 d,甚至仅 3 h ~ 5 h)的生态环境现象的

捕捉和持续监控将更加可行,多星遥感数据的湖泛协同监测具有很强的业务化应用潜力。

[参考文献]

[1] 陆桂华,马倩. 2009 年太湖水域“湖泛”监测与分析[J]. 湖泊科学, 2010, 22(4): 481-486.
 [2] 盛东,徐兆安,高怡. 太湖湖区“黑水团”成因及危害分析[J]. 水资源保护, 2010, 26(3): 41-44.
 [3] 王成林,张宁红,张咏,等. 基于气象条件的太湖湖泛预警研究[J]. 环境监控与预警, 2010, 2(5): 1-4.
 [4] 马荣华,唐军武,段洪,等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 143-151.
 [5] 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.
 [6] 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.
 [7] 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]. 环境监测管理与技术, 2010, 22(6): 54-57.
 [8] 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]. 环境监测管理与技术, 2009, 21(3): 54-57.