

曹 鹏,梁其椿,李淑敏. 基于 Otsu 算法的太湖蓝藻水华与水生植被遥感同步监测方法[J]. 江苏农业科学,2019,47(14):288-294.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.14.067

# 基于 Otsu 算法的太湖蓝藻水华与水生植被 遥感同步监测方法

曹 鹏<sup>1</sup>, 梁其椿<sup>2</sup>, 李淑敏<sup>2</sup>

(1. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871; 2. 中国电子科技集团海洋信息技术研究院, 海南陵水 572427)

**摘要:**蓝藻水华与水生植被在光学遥感影像上容易混淆,传统方法将太湖划分为藻型湖区和草型湖区进行分区监测,近年来太湖梅梁湖等蓝藻水华易发区域出现了大量的水生植物,分区的方法已无法满足蓝藻水华和水生植被遥感监测要求。基于光谱特征分析,采用蓝藻水华与水生植被指数(cyanobacteria and macrophytes index,简称 CMI)判别蓝藻水华与水生植被水域,采用浮游藻类指数(floating algae index,简称 FAI)识别蓝藻水华、浮叶/挺水植被与沉水植被,构建同步监测决策树,基于 Otsu 算法自动获取阈值,将中分辨率成像光增仪(MODIS)卫星影像分成湖水、蓝藻水华、沉水植被和浮叶/挺水植被几种类型。结果表明,分类结果较好,符合太湖不同地物类型实际分布情况;与相关研究 HJ 卫星影像东部湖区水生植被监测结果进行交叉检验,水生植被的空间分布基本一致,一致性检验结果显示,2 种分类结果一致的像元比例为 70.11%。实现蓝藻水华及水生植物的同步遥感监测,有助于精确评估蓝藻水华的实际强度和水生植被区范围,为富营养化湖泊的水环境管理和决策提供重要的科技支撑。

**关键词:**蓝藻水华;水生植被;太湖;Otsu;MODIS

**中图分类号:**Q178.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)14-0288-07

藻类大量繁殖引起的水华现象对湖泊水环境影响显著,表现为降低水体透明度、提高 pH 值以及大量消耗水中氧气<sup>[1]</sup>,进而影响水生动植物的群落结构和生物多样性<sup>[2]</sup>,水华是湖泊水体富营养化的重要特征<sup>[3]</sup>。我国是世界上蓝藻水华暴发最严重、分布最广的国家之一<sup>[4]</sup>。卫星遥感具有快速、周期性、大范围等特点,已经成为湖泊蓝藻水华监测与预测预警不可或缺的技术手段<sup>[5]</sup>。卫星监测蓝藻水华的主要依据是近红外波段处明显的植物特征“陡坡效应”<sup>[6]</sup>,而水生植被也有类似的光谱特征,在光学遥感影像上容易与水华混淆<sup>[7]</sup>。由于太湖水生植被主要分布在太湖东部<sup>[8]</sup>,区别于水华易发区(太湖西部和北部)<sup>[5]</sup>,所以目前太湖蓝藻水华的遥感监测通常将东太湖水生植被区进行掩膜处理,该水域不再考虑水华的发生<sup>[9]</sup>。

2012 年以来,随着太湖各种污染整治和生态修复措施的深入实施,太湖梅梁湖、贡湖以及南太湖等蓝藻水华易发区域,出现了大量的水生植物(以菹草、马来眼子菜、荇菜为主),面积可达数十平方公里<sup>[10]</sup>。此时,传统太湖蓝藻水华日常遥感监测方法会将水生植物误判为蓝藻水华,严重影响了蓝藻水华的遥感监测精度;此外,为减少大量水生植物对航运带来的不利影响,当地相关部门会定期收割,造成水生植物区

的人为性变化;再加上太湖主要优势水生植物具有不同的生活史,生长期差异显著,水生植物的时空分布短期变化显著。综合上述因素,采取固定水生植物区方式已无法适应水生植物的时空变化情形和满足蓝藻水华与水生植被遥感监测的要求。

由于蓝藻水华水体与水生植被水体均具有植被的光谱特征,尤其是红光波段的反射谷和近红外波段的反射峰,导致卫星遥感难以判别蓝藻水华与水生植被,加大了同步监测蓝藻水华与水生植被的难度<sup>[7,11-12]</sup>。相关研究表明,水生植被在短波红外波段(short-wave infrared,简称 SWIR)的反射率高于蓝藻水华水体<sup>[13-14]</sup>。Oyama 等基于短波红外波段处蓝藻水华水体与水生植被水体的光谱差异,使用 Landsat TM/ETM+ 数据,结合归一化水指数(normalized difference water index,简称 NDWI)和浮游藻类指数(floating algae index,简称 FAI)构建决策树判别日本 3 个湖(Lakes Kasumigaura, Inba-numa, Tega-muma)的蓝藻水华水体与水生植被水体<sup>[7]</sup>,笔者将该方法应用于太湖,结果显示不能有效实现太湖蓝藻水华与水生植被的同步检测,主要由于太湖蓝藻水华强度较大,而水生植被多为浮叶植被和沉水植被交替生长,导致蓝藻水华与水生植被的 NDWI 值不能被显著区分。Liu 等则结合了植被信号出现频率指数(vegetation presence frequency,简称 VPF)和 FAI 建立决策树,应用 2003—2013 年的中分辨率成像光谱仪(MODIS)卫星数据,实现了太湖蓝藻水华与水生植被的卫星遥感判别<sup>[15]</sup>,不过这种判别方法不能应用于太湖蓝藻水华与水生植被的日常遥感同步监测,因为 VPF 是基于整年的遥感数据统计分析所得。Liang 等基于蓝藻水华与水生植被的光谱特征在蓝光波段、绿光波段和短波红外波段处的差异,构建蓝藻水华与水生植被的判别指数(cyanobacteria and

收稿日期:2018-04-23

基金项目:国家自然科学基金(编号:41625003);中电科海洋信息技术研究院创新基金(编号:xyxt)。

作者简介:曹 鹏(1992—),男,江苏南通人,硕士研究生,主要从事遥感技术应用、地理空间信息研究。E-mail: caopeng@pku.edu.cn。

通信作者:梁其椿,硕士,工程师,主要从事环境遥感研究。E-mail: liangqc@cetcocean.com。

macrophytes index, 简称 CMI), 结合 CMI 和 FAI 构建太湖蓝藻水华与水生植被 MODIS 卫星同步监测决策树, 并基于 2010—2015 年 MODIS/Aqua  $R_{re}$  数据统计分析获取遥感指数的阈值<sup>[16]</sup>, 通过统计学方法确定的阈值对于不同季节、不同蓝藻水华暴发强度等情况会存在较大的误差。

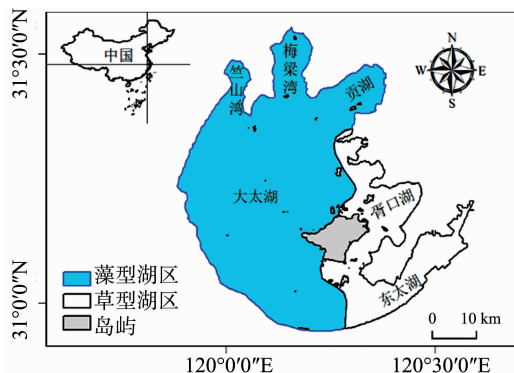
本研究针对富营养化湖泊中蓝藻水华水体和水生植被水体在光学遥感影像上容易混淆的问题, 以太湖为研究区, 结合已有的研究理论基础分析太湖典型地物的光谱特征差异, 基于光谱特征差异选用遥感指数识别蓝藻水华和水生植被, 并进一步识别不同类型水生植被, 提出太湖蓝藻水华与水生植被的 MODIS 卫星同步监测方法。本研究拟解决蓝藻水华和水生植物遥感监测混淆的问题, 实现太湖蓝藻水华及水生植物的同步遥感监测, 是提高太湖蓝藻水华遥感监测精度研究中亟待解决的一个科学问题和关键技术, 有助于精确评估蓝藻水华的实际强度和水生植被区范围, 正确把握蓝藻水华及湖泊生态系统的态势, 提高预测精度, 为富营养化湖泊的环境管理和决策提供重要的科技支撑。

## 1 研究区与数据来源

### 1.1 研究区

太湖 (119° 52′ 32″ ~ 120° 36′ 10″ E, 30° 55′ 40″ ~ 31° 32′ 58″ N) 位于长江中下游平原, 是典型的大型浅水湖泊<sup>[17]</sup>。太湖区位条件独特, 在我国东部地区的社会、经济发展中发挥着重要的作用, 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<sup>[18]</sup>。太湖水域面积为 2 338 km<sup>2</sup>, 南北长约 68.5 km, 东西平均宽 34 km, 湖岸线总长 405 km。太湖正常水位下容积为 44.3 亿 m<sup>3</sup>, 平均水深为 1.9 m, 多年平均年吞吐量为 52 亿 m<sup>3</sup>, 具有蓄洪、供水、灌溉、航运、旅游等多种功能<sup>[19]</sup>, 同时又是流域内最重要的供水水源地, 不仅担负着无锡、苏州、湖州等大中城市的城乡供水, 还具有向下游地区供水并改善水质的作用<sup>[20]</sup>。

太湖蓝藻水华通常暴发在梅梁湾、贡湖、竺山湾以及大太湖等湖区<sup>[21]</sup>, 而胥口湖、东太湖等湖区则多分布着大量的水生植被, 极少出现蓝藻水华<sup>[15]</sup>, 所以相关研究将太湖划分为藻型湖区和草型湖区 (图 1)<sup>[22]</sup>。



藻型湖区为蓝藻水华易发湖区, 草型湖区为水生植被大量分布的湖区

图1 太湖地理位置及其分区

根据水生植物的生长状态可以分为浮叶植物、挺水植物、沉水植物<sup>[23]</sup>, 由于植物叶片和水体光谱特征差异较大, 在遥感影像上有明显的区别, 所以本研究将太湖不同类型的水生

植被归结为 2 种类型: 叶片在水面以上的 (浮叶/挺水植被) 与叶片在水面以下的 (沉水植被), 与已有研究一致<sup>[24]</sup>。

### 1.2 MODIS 卫星数据

MODIS 数据的获取廉价、方便, 数据光谱范围广 (波长范围为 405 ~ 14 385 nm, 光谱分辨率为 10 ~ 15 nm), 时间分辨率高 (Terra 和 Aqua 这 2 个卫星每天至少各覆盖太湖区域 1 次), 空间分辨率适用于太湖这样的大型湖泊, 对富营养化湖泊蓝藻水华日常监测和蓝藻水华短期空间分布变化等研究具有重要意义, 是目前太湖蓝藻水华日常监测通常采用的卫星传感器<sup>[9]</sup>。

从美国国家航空航天局 (NASA) 官方网站可以免费下载获得 MODIS L0 级产品 (DN 值), L0 级产品需要进行辐射定标、大气校正和几何校正, 其中, 大气校正包括瑞利校正和气溶胶校正, 由于大气中的分子成分较为固定, 瑞利散射校正可以通过数值计算进行瑞利散射部分的去除<sup>[25]</sup>, 而气溶胶成分、浓度和粒径分布随时间、区域和高度均发生变化, 难以估算其对遥感信号的贡献<sup>[25]</sup>。对于内陆湖泊水体, 由于其复杂的气溶胶与水体特征, 目前还没有普适的大气校正方法, 如果采用传统的大气校正方法, 会导致可见光范围出现明显的错误<sup>[26]</sup>。所以, 本研究借鉴国际上基于 MODIS 的水色遥感研究, 使用经过瑞利校正和吸收气体校正的反射率 (rayleigh corrected reflectance, 简称  $R_{re}$  无量纲)<sup>[27]</sup>。

$$R_{re} = \frac{\pi L_t^*}{F_0 \cos \theta_0} - R_r \quad (1)$$

式中:  $L_t^*$  为经过臭氧及其他大气吸收校正的传感器辐射亮度;  $F_0$  为大气层外太阳辐照度;  $\theta_0$  为太阳天顶角;  $R_r$  为瑞利散射反射率,  $R_r$  可以通过 6S (second simulation of the satellite signal in the solar spectrum) 辐射模型算法计算<sup>[28]</sup>。

从 NASA 网站下载 MODIS L0 级数据, 用 SeaDAS (7.4 版本) 软件包进行辐射定标、大气吸收和瑞利散射的校正, 得到  $R_{re}$ , 最后对  $R_{re}$  进行几何校正为等距圆柱投影。本研究采用 MODIS 前 5 个波段, 均为非饱和波段, 波段 1 ~ 5 对应的中心波长分别是 645, 859, 469, 555, 1 240 nm, 前 2 个波段的空间分辨率是 250 m, 后 3 个波段的空间分辨率是 500 m, 将后 3 个波段数据重采样到 250 m。

## 2 研究方法

本研究技术路线如图 2 所示: (1) 对太湖典型地物光谱特征进行分析, 研究蓝藻水华、沉水植被、浮叶/挺水植被、普通湖水的光谱差异; (2) 基于不同地物的光谱特征差异, 选用遥感指数对不同地物进行识别; (3) 基于 Otsu 算法进行遥感指数阈值自动化获取; (4) 构建太湖蓝藻水华与水生植被的同步监测决策树; (5) 对遥感指数和同步监测决策树进行结果验证; (6) 分别围绕 Otsu 获取阈值偏差、云覆盖、气溶胶与观测角度以及混合像元等展开监测精度干扰因素分析。

### 2.1 光谱特征分析

结合相关文献研究太湖水体光谱特征, 太湖水体呈典型的湖泊水体光谱特征: 由于叶绿素 a 在蓝紫光波段的吸收峰以及黄色物质的吸收作用, 在蓝光范围内  $R_{rs}$  较低<sup>[29]</sup>; 绿光范围属于叶绿素和胡萝卜素弱吸收区域, 加上细胞散射作用的影响, 所以该范围附近出现反射峰<sup>[30]</sup>; 630 nm 附近呈肩状或

反射谷,原因是藻蓝素在此处的吸收峰,以及叶绿素等有机质反射能力在 600 nm 后逐步下降<sup>[31]</sup>;685~715 nm 范围反射峰的出现是含藻类水体最显著的光谱特征,其存在与否通常被认为是判定水体是否含有藻类叶绿素的依据,反射峰的位置和数值是叶绿素 a 浓度的指示,其出现的原因是水和叶绿素 a 的吸收系数之和在该处达到最小值<sup>[32]</sup>。

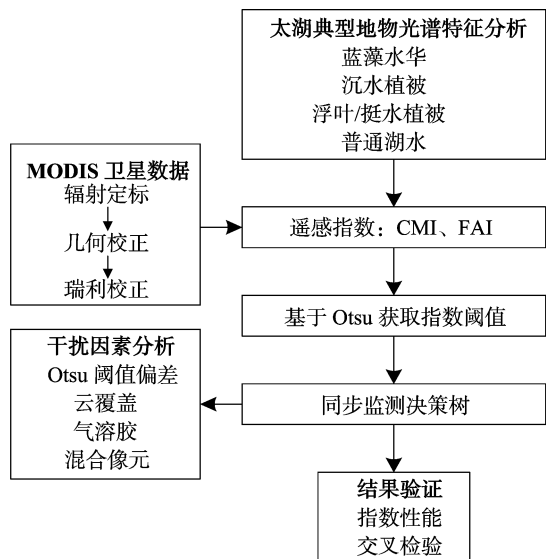


图2 太湖蓝藻水华与水生植被遥感同步监测方法研究的技术路线

水生植被区别于蓝藻水华的光谱特征主要有 3 个<sup>[16]</sup>: 440 nm 附近是有色可溶性有机物 (CDOM) 的吸收峰,蓝藻水华 CDOM 吸收系数比浮叶/挺水水生植被大,反射率低于浮叶/挺水水生植被;550 nm 附近藻类色素的低吸收和无机悬浮物的高散射使得蓝藻水华反射率高于浮叶/挺水水生植被水体反射率;短波红外波段处,蓝藻水华反射率下降,而浮叶/挺水水生植被由于体内细胞多次反射,仍处于“近红外高台”,水体近乎零反射。沉水植被由于叶片位于水体表面以下,光谱特征受水体影响较大,除了近红外波段有明显的“植被特征”,在可见光和短波红外波段由于水体的强吸收,反射率都较低。

## 2.2 遥感指数

2.2.1 蓝藻水华与水生植被指数 Liang 等基于蓝藻水华与水生植被的光谱特征在蓝光波段、绿光波段和短波红外波段处的差异,并考虑到短波红外是大气校正的关键波段,构建蓝藻水华与水生植被水体的判别指数  $CMI$ <sup>[16]</sup>:

$$CMI = R_{rs, GREEN} - R_{rs, BLUE} - [R_{rs, SWIR} - R_{rs, BLUE}] \times \frac{(\lambda_{GREEN} - \lambda_{BLUE})}{(\lambda_{SWIR} - \lambda_{BLUE})} \quad (2)$$

式中:  $R_{rs, GREEN}$ 、 $R_{rs, BLUE}$ 、 $R_{rs, SWIR}$  分别为绿光波段、蓝光波段和短波红外波段的遥感反射率;  $\lambda_{GREEN}$ 、 $\lambda_{BLUE}$ 、 $\lambda_{SWIR}$  分别是绿光波段、蓝光波段和短波红外波段的中心波长。

将蓝藻水华和水生植被的特征波段差代入式(2),蓝藻水华和水生植被的  $CMI$  值关系为:

$$CMI_{\text{蓝藻水华}} > CMI_{\text{水生植被}} \quad (3)$$

2.2.2 浮游藻类指数 水生植被的光谱特征明显区别于普通水体,其中,浮叶/挺水植被与沉水植被由于叶片是否在水

面以上的区别,光谱特征也有明显的差异,叶片在水面以上的浮叶/挺水植被光谱“植被信号”要强于叶片在水面以下的沉水植被,沉水植被由于叶片位于水体表面以下,光谱特征受水体影响较大,除了近红外波段有明显的“植被特征”,在可见光和短波红外波段由于水体的强吸收,反射率都较低。本研究采用 FAI 识别蓝藻水华、浮叶/挺水植被与沉水植被,FAI 通常用于遥感识别浮游藻类<sup>[33]</sup>,不过相关研究也将 FAI 成功应用于水生植被的识别<sup>[7,15]</sup>。FAI 的计算公式如下:

$$FAI = R_{rs, NIR} - R_{rs, RED} - [R_{rs, SWIR} - R_{rs, RED}] \times \frac{(\lambda_{NIR} - \lambda_{RED})}{(\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED})} \quad (4)$$

式中:  $R_{rs, GREEN}$ 、 $R_{rs, BLUE}$ 、 $R_{rs, SWIR}$  分别为近红外波段、红光波段和短波红外波段的遥感反射率;  $\lambda_{GREEN}$ 、 $\lambda_{BLUE}$ 、 $\lambda_{SWIR}$  分别是近红外波段、红光波段和短波红外波段的中心波长。

普通湖水、蓝藻水华和水生植被的 FAI 值关系为:

$$FAI_{\text{蓝藻水华}} > FAI_{\text{湖水}}; \quad (5)$$

$$FAI_{\text{水生植被}} > FAI_{\text{湖水}} \quad (6)$$

## 2.3 基于 Otsu 算法自动获取遥感指数阈值

Otsu 是一种基于全局的二值化算法,是一种自适应获取阈值的方法。Otsu 算法根据影像的灰度特性,将影像分割为目标和背景 2 个部分,当取最佳阈值时,2 个部分的类间方差最大。

记  $t$  为分割阈值,目标像素点数占影像的比例为  $p_0$ ,平均灰度为  $g_0$ ;背景像素点数占影像的比例为  $p_1$ ,平均灰度为  $g_1$ ;目标像素值与背景像素值类间方差为  $v$ ,则:

$$v = p_0 \times p_1 \times (g_0 - g_1)^2 \quad (7)$$

当方差  $v$  最大时,可以认为此时前景和背景差异最大,此时的灰度  $t$  是最佳阈值。

采用 CMI 和 FAI 构建决策树对太湖蓝藻水华和水生植被进行卫星遥感同步监测需要确定 4 个分类阈值:CMI 判别蓝藻水华水体与水生植被水体阈值、FAI 识别蓝藻水华阈值、FAI 识别沉水植被阈值和 FAI 识别浮叶/挺水植被阈值。其中 FAI 识别蓝藻水华阈值和 FAI 识别沉水植被阈值采用现有研究中受认可的太湖植被信号 FAI 识别阈值 ( $-0.004$ )<sup>[33]</sup>,基于 Otsu 算法获取其他 2 个阈值。

对 MODIS 卫星数据进行预处理后,得到  $R_{rs}$  数据,使用 MATLAB (R2014a 版本) 计算  $R_{rs}$  数据的 CMI 和 FAI,并基于 Otsu 算法计算 CMI 和 FAI 的最佳分割阈值  $CMI\_Otsu$  和  $FAI\_Otsu$ ,即 CMI 判别蓝藻水华水体与水生植被水体阈值和 FAI 识别浮叶/挺水植被阈值。

## 2.4 构建同步监测决策树

结合 CMI 和 FAI 构建太湖蓝藻水华与水生植被 MODIS 卫星同步监测决策树,如图 3 所示。采用 MODIS 卫星  $R_{rs}$  数据,逐像元计算 CMI 和 FAI;CMI 大于  $CMI\_Otsu$  且 FAI 大于  $-0.004$  的像元为蓝藻水华像元;CMI 小于  $CMI\_Otsu$  且 FAI 大于  $-0.004$  而小于  $FAI\_Otsu$  的像元为沉水植被像元;CMI 小于  $CMI\_Otsu$  且 FAI 大于  $-0.004$  和  $FAI\_Otsu$  的像元为浮叶/挺水植被像元;其他情况的像元为普通湖水像元。

## 2.5 交叉检验

交叉检验即利用经过验证的已知精度的卫星产品对待检验卫星产品进行检验。本研究使用 ArcGIS (10.1 版本) 将分

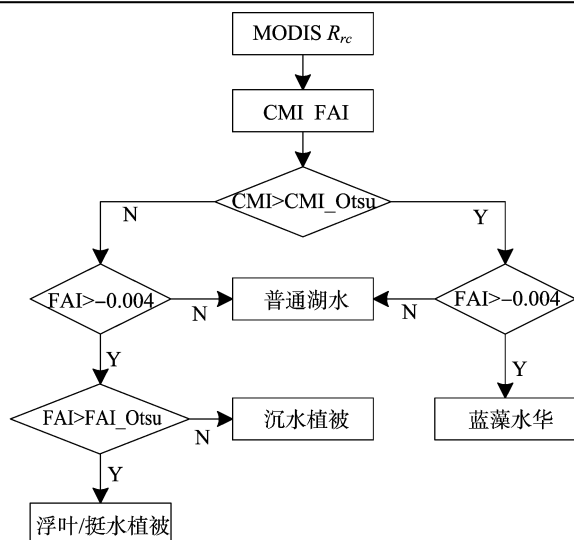
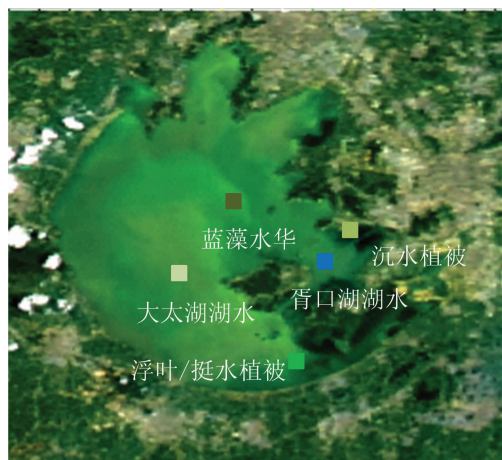


图3 太湖蓝藻水华与水生植被 MODIS 卫星同步监测决策树

类结果分别与相关研究的 HJ 卫星分类结果进行交叉检验, 主要有以下步骤:

第 1 步: 使用 project raster 工具对 MODIS 分类结果栅格数据进行重投影, 使 2 种分类结果投影保持一致。



a. 2013 年 8 月 7 日 MODIS/Aqua 影像真彩色图

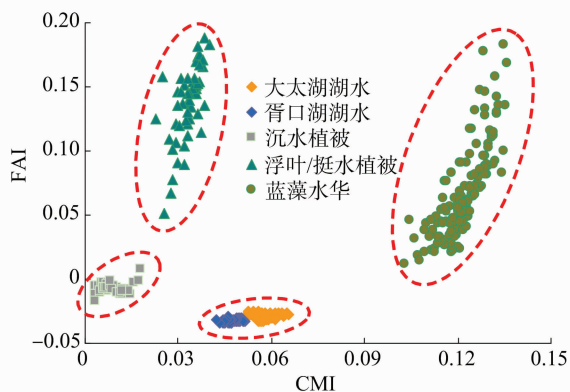
b. 选择 5 个不同地物类型的 10×10 像元 ROI 的  $R_{rc}$  计算所得 CMI、FAI

图4 太湖 5 种地物类型遥感指数的对比

### 3.2 太湖蓝藻水华与水生植被同步监测结果

选取 2017 年 4 月 29、30 连续 2 d 的 MODIS/Aqua 影像进行分类, 分类结果如图 5 所示, 将卫星影像分成湖水、蓝藻水

第 2 步: 使用 resample 工具对 MODIS 分类结果栅格数据进行重采样, 使 2 种分类结果的空间尺度保持一致。

第 3 步: 使用 raster calculator 工具进行栅格计算, 将 2 种卫星产品分类结果一致的栅格赋值 1, 2 种分类结果不一致的栅格赋值 0。

设检验结果中, 等于 1 的栅格数量为  $m$ , 等于 0 的栅格数量为  $n$ , 则 2 种分类结果一致的栅格占比为  $m/(m+n)$ 。

## 3 结果与验证

### 3.1 遥感指数识别性能

由图 4-a 可知, 在 2013 年 9 月 8 日 MODIS/Aqua 影像上选择 5 种典型地物类型 (蓝藻水华、大太湖湖水、胥口湖湖水、沉水植被和浮叶/挺水植被) 的 10×10 像元尺寸感兴趣区 (region of interest, 简称 ROI)。统计 5 种典型地物类型 ROI 中的  $R_{rc}$  值, 分别计算不同地物的 CMI、FAI 值, 结果如图 4-b 所示:  $CMI_{\text{蓝藻水华}} > CMI_{\text{水生植被}}$ ,  $FAI_{\text{蓝藻水华}} > FAI_{\text{普通湖水}}$ ,  $FAI_{\text{水生植被}} > FAI_{\text{普通湖水}}$ ,  $FAI_{\text{浮叶/挺水植被}} > FAI_{\text{沉水植被}}$ , 表明应用于 MODIS 卫星数据, CMI 能有效分离蓝藻水华水体和水生植被水体, FAI 能有效分离普通湖水和植被水体 (包括蓝藻水华与水生植被) 并识别不同类型的水生植被 (浮叶/挺水植被和沉水植被)。

华、沉水植被和浮叶/挺水植被几种类型。分类结果较好, 有效提取出 4 种太湖典型地物类型: 蓝藻水华主要分布在梅梁湾、贡湖、竺山湾以及大太湖等湖区; 胥口湖、东太湖等湖区则

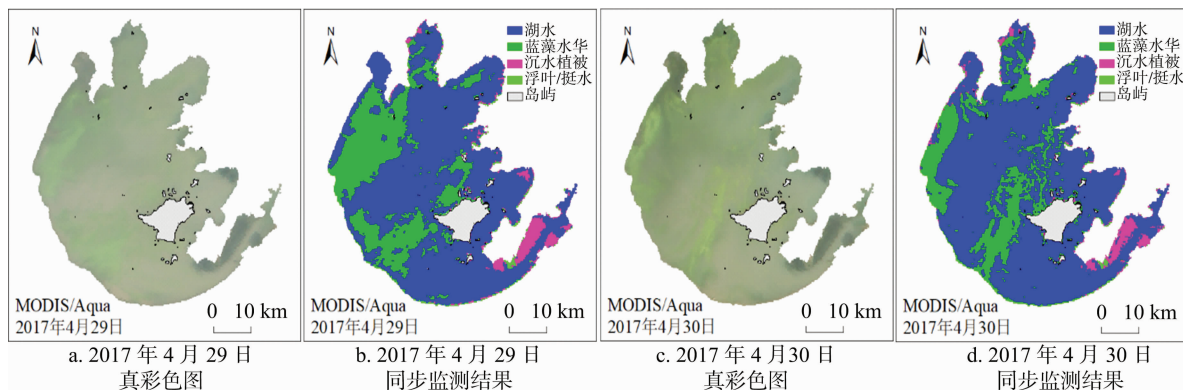


图5 2017 年 4 月 29、30 日连续 2 d 的 MODIS/Aqua 影像



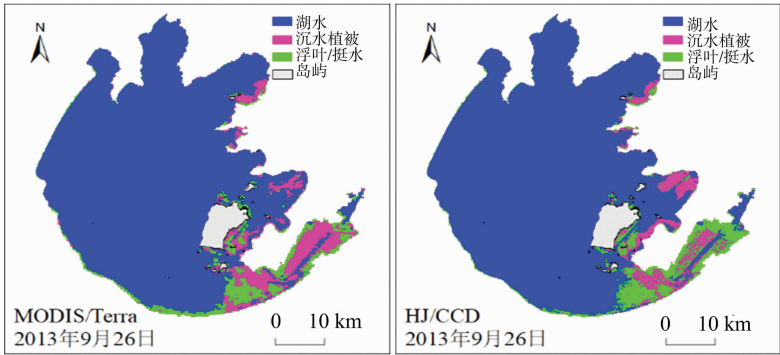
分布着大量的水生植被;在梅梁湾和竺山湾有少量沉水植被分布。对于连续 2 d 的分类结果,水生植被的空间分布变化不大,而蓝藻水华的空间分布有较大的差异,与实际情况相符。

3.3 东部湖区水生植被高空间分辨率卫星监测结果交叉检验

东部湖区是太湖水生植被的主要分布水域,Luo 等基于光谱特征构建太湖东部湖区水生植被监测决策树,对 2013 年 9 月 26 日 HJ/CCD 卫星影像(空间分辨率为 30 m)进行分类<sup>[10]</sup>。本研究采用 2013 年 9 月 26 日 MODIS 数据进行分类,与 Luo 等的分类结果进行交叉检验(图 6),2 种方法分类结果整体保持一致,贡湖、胥口湖、东太湖等区域中沉水植被和

浮叶/植被的分布都基本同步,贡湖南部以沉水植被为主,沿岸水域有少量浮叶/挺水植被分布;胥口湖区也是以沉水植被为主,在中间布有浮叶/挺水植被;太湖南部沿岸,沿着湖岸分布着浮叶/挺水植被,并夹杂着少量沉水植被;东太湖呈浮叶/挺水植被包围沉水植被生长之势。

使用 ARCGIS 对 MODIS 卫星分类结果进行重投影、重采样、栅格计算,与 HJ 卫星分类结果进行一致性检验,结果(图 7)表明,2 种分类结果一致的像元比例为 70.11%,不一致的像素主要分布在水陆交界带和不同地物交界带(湖水与水生植被的交界带和沉水植被与浮叶/挺水植被交界带),这是由于 MODIS 卫星影像空间分辨率(250 m)远低于 HJ 卫星影像空间分辨率(30 m)带来的混合像元问题。



a. 本研究方法 MODIS 卫星分类结果      b. Luo 等的 HJ/CCD 卫星分类结果

图6 2013 年 9 月 26 日太湖水生植被的卫星分类结果

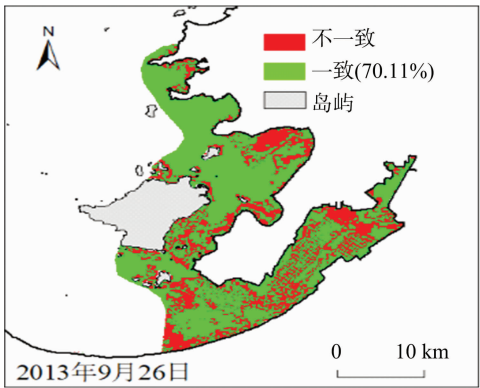


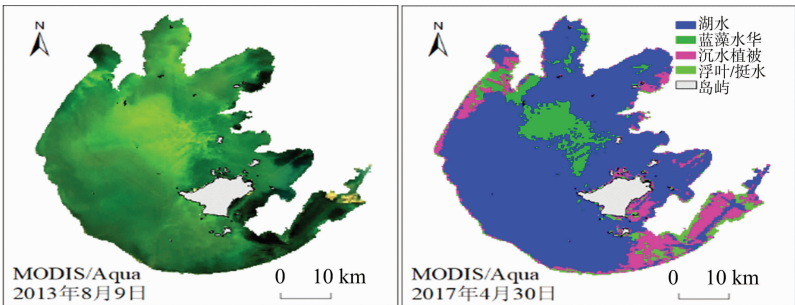
图7 9 月 26 日太湖水生植被 HJ/CCD 与 MODIS 卫星分类结果一致性检验

4 干扰因素分析

4.1 Otsu 获取阈值偏差

Otsu 算法对噪声以及目标大小十分敏感,它仅对类间方差为单峰的图像产生较好的分割效果。当目标与背景的大小比例悬殊时(例如受光照不均、反光或背景复杂等因素影响),类间方差准则函数可能呈现双峰或多峰,此时效果不好。

当蓝藻水华暴发强度极大时,高强度蓝藻水华和水生植被的 CMI 值悬殊,Otsu 算法对 CMI 值进行分割确定阈值时,类间方差出现多峰,如图 8 所示,对蓝藻水华暴发强度极大的 2013 年 8 月 9 日 MODIS 影像进行分类,Otsu 算法获取的 CMI 阈值为 0.063,导致竺山湾部分蓝藻水华被误判为沉水植被。



a. MODIS 影像真彩色图      b. 蓝藻水华与水生植被 MODIS 卫星同步监测结果

图8 2013 年 8 月 9 日 MODIS 影像

#### 4.2 云覆盖

云覆盖是遥感影像处理中最常遇到的噪声之一,给影像识别造成干扰,大大降低遥感影像分类精度<sup>[34]</sup>。目前,研究人员在实际应用中多采用多天数据的合成方式来减少云的影响。然而,短周期的合成数据不能完全排除云的干扰,周期过长又丧失时间效率,不适合短期监测<sup>[35]</sup>。因此,最有效的方法是对每天的数据均进行云检测处理,移除数据中的云像素<sup>[36]</sup>。云在可见光和红外波段与植被、土壤以及水域等下垫面介质的反射率和辐射亮温存在差异,云具有较高的反射率而具有较低的亮温<sup>[37]</sup>。

在海洋水体中,波段阈值法比较受认可的是  $R_{rc}(869) >$

$0.027^{[38]}$ ;对于二类水体,Wang 等提出了  $R_{rc}(1\ 240) > 0.023\ 5$  和  $R_{rc}(1\ 640) > 0.021\ 5^{[39]}$ ,Hu 等提出了  $R_{rc}(1\ 640) > 0.03^{[33]}$ ;Liang 等基于 2010—2015 年太湖无云 MODIS/Aqua 影像数据计算  $R_{rc}(1\ 240)$  在取不同阈值时的可用数据比例, $R_{rc}(1\ 240)$  取 0.1 为阈值,可以保证每个月份的可用数据比例都高于 90%,而  $R_{rc}(1\ 240) > 0.03$  将损失 20% ~ 60% 的有用数据<sup>[16]</sup>。本研究基于 3 种算法对 2016 年 6 月 5 日的 MODIS 影像进行云提取,如图 9 所示, $R_{rc}(869) > 0.027$  和  $R_{rc}(1\ 240) > 0.03$  几乎将整个太湖水域误判为云,而  $R_{rc}(1\ 240) > 0.1$  云提取效果良好,所以本研究采用的去云方法为  $R_{rc}(1\ 240) > 0.1$ 。

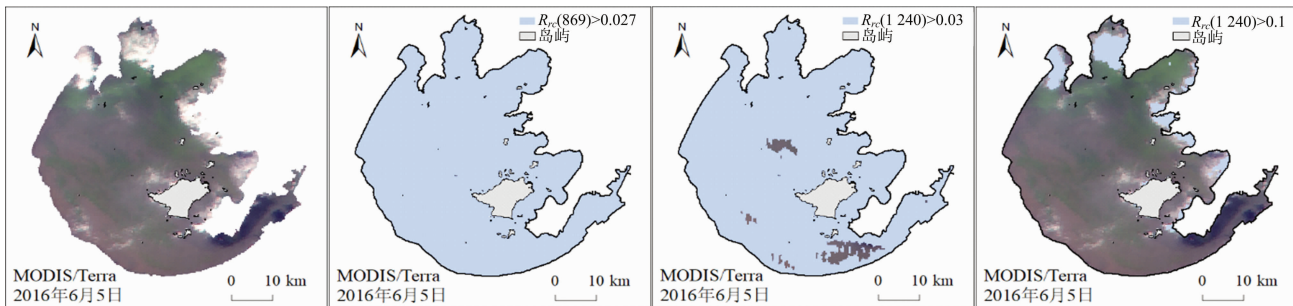


图9 2016年6月5日MODIS影像3种云提取算法提取结果

#### 4.3 气溶胶与观测角度

大气气溶胶是由大气介质和混合于其中的固体或液体颗粒物组成的体系,由不同相态物体组成,虽然其含量很少,但对大气中发生的许多物理化学过程都有重要的影响<sup>[40]</sup>。湖面上空气溶胶分布类型比海面更为复杂、多变,Ⅱ类水体的大气校正是国际水色遥感的难题<sup>[41]</sup>。不过相关研究已经证明,基于光谱形状构建遥感指数,能有效减小气溶胶等大气因素对指数的影响<sup>[27]</sup>。

相关研究已经证明,CMI 和 FAI 分别通过减除“蓝光—短波红外”和“红光—短波红外”基线,进行了简单快速的大气校正,相对不容易受气溶胶类型和厚度、太阳高度角和耀斑等环境和观测条件变化的影响<sup>[27]</sup>。

#### 4.4 混合像元

遥感影像中像元很少是由单一均匀的地表覆盖类组成的<sup>[42]</sup>,尤其是 MODIS 这样空间分辨率较低的卫星影像,一般都是覆盖几种地物的混合像元。混合像元问题也给遥感解译带来了困扰,降低了遥感分类的精度。

如图 6 所示,MODIS 卫星分类结果较 HJ 卫星分类结果缺少了在东太湖中心区域浮叶/挺水植被和沉水植被交替生长的细节。

### 5 结论

基于蓝藻水华与水生植被的光谱特征分析,采用 CMI 判别蓝藻水华与水生植被水域,采用 FAI 识别蓝藻水华、浮叶/挺水植被与沉水植被,在 MODIS/Aqua 影像上选择 5 种典型地物类型  $10 \times 10$  像元尺寸 ROI 计算不同地物的 CMI、FAI 值,结果表明,CMI 能有效分离蓝藻水华水体和沉水植被水体,FAI 能有效分离普通湖水和植被水体(包括蓝藻水华与水生植被)和识别不同类型水生植被(浮叶/挺水植被和沉水植被)。

结合 CMI 和 FAI 构建太湖蓝藻水华与水生植被 MODIS 卫星同步监测决策树,基于 Otsu 算法自动获取决策树阈值,将卫星影像分成了湖水、蓝藻水华、沉水植被和浮叶/挺水植被几种类型,分类结果较好,符合太湖不同地物类型实际分布情况。针对太湖水生植被的主要分布的东部湖区,与 Luo 等的 HJ/CCD 卫星影像分类结果进行交叉检验,2 种方法分类结果中不同类型水生植被的空间分布基本一致,一致性检验结果显示,2 种分类结果一致的像元比例为 70.11%,不一致的像素主要分布在水陆交界带和不同地物交界带(湖水与水生植被的交界带和沉水植被与浮叶/挺水植被交界带)。

分别围绕 Otsu 获取阈值偏差、云覆盖、气溶胶与观测角度以及混合像元等展开了监测精度干扰因素分析:当蓝藻水华暴发强度极大时,Otsu 算法获取的 CMI 阈值偏高;采用  $R_{rc}(1\ 240) > 0.1$  剔除云覆盖;本研究的监测方法对于气溶胶厚度、气溶胶类型和观测角度等因素有良好的阻抗性。

#### 参考文献:

- [1] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. Ecological Applications, 1998, 8(3): 559–568.
- [2] Havens K E. Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems [M]. New York: Springer, 2008: 68–69.
- [3] 孔繁翔, 高 光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589–595.
- [4] 吴庆龙, 谢 平, 杨柳燕, 等. 湖泊蓝藻水华生态灾害形成机理及防治的基础研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(11): 1115–1123.
- [5] 马荣华, 孔繁翔, 段洪涛, 等. 基于卫星遥感的太湖蓝藻水华时空分布规律认识[J]. 湖泊科学, 2008, 20(6): 687–694.
- [6] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 145–152.
- [7] Oyama Y, Matsushita B, Fukushima T. Distinguishing surface

- cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM + shortwave infrared bands [J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 157: 35 – 47.
- [8] 张寿选, 段洪涛, 谷孝鸿. 基于水体透明度反演的太湖水生植被遥感信息提取[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 184 – 190.
- [9] 马荣华. 湖泊水环境遥感[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 461.
- [10] Luo J H, Ma R H, Duan H T, et al. A new method for modifying thresholds in the classification of tree models for mapping aquatic vegetation in Taihu lake with satellite images[J]. Remote Sensing, 2014, 6(8): 7442 – 7462.
- [11] 李俊生, 吴迪, 吴远峰, 等. 基于实测光谱数据的太湖水华和水生高等植物识别[J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 215 – 222.
- [12] 朱庆, 李俊生, 张方方, 等. 基于海岸带高光谱成像仪影像的太湖蓝藻水华和水草识别[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(5): 879 – 885.
- [13] Gao B C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257 – 266.
- [14] Rogers A, Kearney M. Reducing signature variability in unmixed coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12): 2317 – 2335.
- [15] Liu X H, Zhang Y L, Shi K, et al. Mapping aquatic vegetation in a large, shallow eutrophic lake: a frequency – based approach using multiple years of MODIS data[J]. Remote Sensing, 2015, 7(8): 10295 – 10320.
- [16] Liang Q C, Zhang Y C, Ma R H, et al. A MODIS – Based novel method to distinguish surface cyanobacterial scums and aquatic macrophytes in lake taihu[J]. Remote Sensing, 2017, 9(2): 133.
- [17] 吕恒, 江南, 罗淑葱. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 a 浓度定量反演[J]. 地理科学, 2006, 26(4): 472 – 476.
- [18] 周立国, 冯学智, 王春红, 等. 太湖蓝藻水华的 MODIS 卫星监测[J]. 湖泊科学, 2008, 20(2): 203 – 207.
- [19] 王同生. 太湖流域防洪与水资源管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 342.
- [20] 许妍, 高俊峰, 黄佳聪. 太湖湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(6): 646 – 652.
- [21] Duan H T, Ma R H, Xu X F, et al. Two – decade reconstruction of algal blooms in China's lake Taihu[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(10): 3522 – 3528.
- [22] Zhao D H, Jiang H, Yang T W, et al. Remote sensing of aquatic vegetation distribution in Taihu Lake using an improved classification tree with modified thresholds[J]. Journal of Environmental Management, 2012, 95(1): 98 – 107.
- [23] Revenga C, Kura Y. Status and trends of biodiversity of inland water ecosystems[M]// Status and Trends of Biodiversity of Inland Water Ecosystems. 2003.
- [24] Luo J H, Li X C, Ma R H, et al. Applying remote sensing techniques to monitoring seasonal and interannual changes of aquatic vegetation in Taihu Lake, China[J]. Ecological Indicators, 2016, 60(50): 503 – 513.
- [25] Gordon H R. Atmospheric correction of ocean color imagery in the Earth Observing System era[J]. Journal of Geophysical Research – Atmospheres, 1997, 102(D14): 17081 – 17106.
- [26] Gordon H R, Clark D K. Clear water radiances for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery[J]. Applied Optics, 1981, 20(24): 4175 – 4180.
- [27] Hu C M. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2118 – 2129.
- [28] Vermote E F, El S N, Justice C O, et al. Atmospheric correction of visible to middle – infrared EOS – MODIS data over land surfaces: Background, operational algorithm and validation[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1997, 102(D14): 17131 – 17141.
- [29] 李素菊, 吴倩, 王学军, 等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 228 – 234.
- [30] 周艺, 周伟奇, 王世新, 等. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 312 – 317.
- [31] 冯伟, 冯学智, 马荣华. 太湖水体叶绿素浓度与反射光谱特征关系的研究[J]. 遥感信息, 2007(1): 18 – 21.
- [32] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field spectrometer and IRS – 1C satellite data in the Mecklenburg Lake District, Germany[J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 73(2): 227 – 235.
- [33] Hu C M, Lee Z, Ma R H, et al. Moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake, China[J]. Journal of Geophysical Research – Oceans, 2010, 115(999): 303 – 306.
- [34] 赵忠明, 朱重光. 遥感图象中薄云的去除方法[J]. 遥感学报, 1996(3): 195 – 199.
- [35] Chen P Y, Srinivasan R, Fedosejevs G, et al. An automated cloud detection method for daily NOAA – 14 AVHRR data for Texas, USA[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(15): 2939 – 2950.
- [36] 何全军, 曹静, 黄江, 等. 基于多光谱综合的 MODIS 数据云检测研究[J]. 国土资源遥感, 2006, 18(3): 19 – 22.
- [37] 周红妹, 杨星卫, 陆贤. NOAA 气象卫星云检测方法的研究[J]. 遥感学报, 1995(2): 137 – 142.
- [38] Jedlovac G J, Haines S L, Lafontaine F J. Spatial and temporal varying thresholds for cloud detection in GOES imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(6): 1705 – 1717.
- [39] Wang M H, Shi W. Cloud masking for ocean color data processing in the coastal regions[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(11): 3196 – 3205.
- [40] 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, 60(5): 625 – 634.
- [41] 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.
- [42] 吕长春, 王忠武, 钱少猛. 混合像元分解模型综述[J]. 遥感信息, 2003(3): 55 – 58, 60.