

引用格式: Zhang J, Duan H Y, Yao X J, *et al*, 2026. Evaluation and analysis of the extraction effect of *cladophora* blooms in Qinghai Lake based on the spectral indices of Sentinel-2 MSI imagery[J]. Remote Sensing Technology and Application, 41(3): 750-762. [张娟, 段红玉, 姚晓军, 等, 2026. 基于 Sentinel-2 MSI 影像光谱指数的青海湖刚毛藻水华提取效果评价分析[J]. 遥感技术与应用, 41(3): 750-762.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2026.3.0750

基于 Sentinel-2 MSI 影像光谱指数的青海湖 刚毛藻水华提取效果评价分析

张娟¹, 段红玉¹, 姚晓军^{1,3}, 张大弘¹, 靳惠安²

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃林业职业技术大学 林业工程学院, 甘肃 天水 741020;

3. 中国科学院青海湖综合观测研究站, 青海 刚察 812300)

摘要: 青海湖是中国最大的咸水湖, 也是维系青藏高原东北部生态安全的重要水资源。近年来, 受气候暖湿化的影响, 其西部和北部近岸部分区域出现刚毛藻水华。及时、准确地获取刚毛藻水华的空间分布范围, 对于有效保护青海湖水体环境和科学治理刚毛藻水华引发的生态问题至关重要。本研究基于 Sentinel-2 MSI 遥感影像与无人机正射影像, 结合 9 种藻类光谱指数提取布哈河口北侧刚毛藻水华的分布信息并对比提取效果及适用性。在此基础上, 利用表现优异的光谱指数对青海湖全湖区的刚毛藻水华进行提取, 选取最优指数反演 2019 年青海湖刚毛藻水华的分布特征并分析其变化规律。结果表明: SB、BD、NDVI、MCI、SABI 和 VB-FAH 共 6 种光谱指数在典型区域的提取效果较好 ($Kappa > 0.9$), 错分率和漏分率较低; VB-FAH 指数在全湖区提取效果最优 ($Kappa = 0.88$), NDVI 指数次之 ($Kappa = 0.86$), SABI 和 BD 指数提取效果相当 ($Kappa = 0.79$), MCI 指数提取效果最差 ($Kappa = 0.67$); 2019 年青海湖刚毛藻水华最大面积为 4.10 km^2 , 最小面积为 1.79 km^2 ; 刚毛藻水华分布最多的区域是布哈河口北侧, 其次是布哈河口南侧, 其他区域刚毛藻水华面积相对较小。在空间上, 刚毛藻水华受风力作用随青海湖面积的扩张而向外迁移, 呈条带状或斑块状分布在湖岸附近。研究表明, VB-FAH 指数作为刚毛藻水华提取的最优方法, 可为长时序刚毛藻水华分布信息提取提供参考依据。

关键词: 刚毛藻水华; Sentinel-2 MSI; 光谱指数; 青海湖

中图分类号: X524; TP751 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2026)03-0750-13

1 引言

刚毛藻是一种底栖丝状绿藻(赵志娟等, 2021; Zhang 等, 2025), 当其过度生长形成藻华时, 不仅会带来视觉和嗅觉上的不适, 影响旅游业和水上活动, 还会降低生物多样性, 对水生态环境造成不利影响(杨桂山等, 2010)。青海湖是中国最大的内陆

咸水湖(王淑宁等, 2024), 其西部和北部近岸区域分布有刚毛藻。与太湖、巢湖和乌梁素海的藻类不同, 青海湖的刚毛藻分布相对较少, 主要集中在北岸的泉吉河口和沙柳河口, 以及西岸的布哈河口南北两侧、泉湾和黑马河口区域。自 2005 年以来, 随着青海湖水位的持续上升和水域范围的快速扩张(周丹等, 2021; 马凯丽等, 2022), 湖周被淹没的草

收稿日期: 2024-09-02; 修订日期: 2025-06-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(42571163), 西北师范大学绿洲科学科研成果突破行动计划(NWNU-LZKX-202301)。

作者简介: 张娟(1998—), 女, 甘肃会宁人, 博士研究生, 主要从事环境遥感与 GIS 应用研究。E-mail: 2021120207@nwnu.edu.cn

通信作者: 姚晓军(1980—), 男, 山西夏县人, 教授, 主要从事地理信息技术与冰冻圈变化研究。E-mail: yaoxj_nwnu@163.com

场为刚毛藻的生长提供了理想的着生基质,导致刚毛藻水华暴发规模日益加剧,引发了社会各界的广泛关注。

我国的太湖(Jia等,2019;Cao等,2021)、巢湖(李晟铭等,2019;Ma等,2021)和滇池(李颖等,2014;李莉杰等,2020),以及北方的乌梁素海(郑伟等,2010;王艳等,2012)、于桥水库(岳昂等,2019)和呼伦湖(张亚,2011),在湖泊藻类水华研究方面已有大量成果,但针对青海湖的相关研究相对较少。近年来,青海湖刚毛藻水华的监测主要依靠人工采样、卫星遥感和船舶监测技术。相比成本较高且覆盖范围有限的原位测量,卫星遥感因其观测范围广、时间分辨率高等优势,成为刚毛藻水华监测的重要数据来源(温新龙,2014)。郝美玉等(2020)通过现场调查、资料收集和 Landsat TM/ETM+/OLI影像解译,分析了青海湖水质及刚毛藻分布变化。段红玉(2022)利用多源卫星遥感影像和浮游藻类指数法(Floating Algal Index, FAI),研究了1986—2021年青海湖刚毛藻水华的变化特征及影响因素。Xu等(2024)基于多源遥感数据和决策树模型,成功区分了3种形态的刚毛藻,并分析其变化特征和影响因素。Zhang等(2024)结合 Sentinel-2 MSI影像与深度学习模型,自动提取了青海湖刚毛藻水华并评估了治理效果。综上,遥感技术在青海湖刚毛藻水华信息提取中展现了显著的优势,但由于青海湖刚毛藻水华分布面积较小且大多呈斑块状,表现出较强的空间异质性。因此,Landsat MSS、MODIS、MERIS和SAR等遥感影像因空间分辨率较低无法在湖泊近岸使用(Zhang等,2024)。

基于光谱指数的藻华提取方法已被证明具有时间序列强、效率高和应用尺度广等优势(刘凯等,2024)。目前开展湖泊藻华识别的指数有基于近红外波段高反射率的单波段法(Single Band, SB)以及不同波段反射率差异的多波段法(Multiple Band, MB)、近红外和可见光波段差异的差值法(Band Difference, BD)、比值法(Band Ratio, BR)、归一化植被指数法(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、最大叶绿素指数法(Maximum Chlorophyll Index, MCI)、浮游藻类指数法(Floating Algal Index, FAI)、表面藻华指数法(Surface Algal Bloom Index, SABI)和大型漂浮藻类虚拟基线高度(Virtual Baseline Floating Macroalgae Height, VB-FAH)等方法(段洪涛等,2008;马荣华等,2008;徐京萍

等,2008;Hu,2009;郭望成,2011;Matthews和Odermatt,2015;李旭文等,2019),然而,当前研究较少系统地比较和分析多种藻类光谱指数在青海湖刚毛藻水华提取的适用性。

本研究基于2019年 Sentinel-2 MSI影像和多种藻类光谱指数提取青海湖刚毛藻水华空间分布,并基于无人机影像比较不同指数的提取效果及适用性,选取提取效果最好的指数应用于青海湖刚毛藻水华的遥感反演,分析其分布现状和年内变化特征,以期为长时序刚毛藻水华的快速准确提取提供理论依据。

2 研究区与数据

2.1 研究区概况

青海湖位于青藏高原东北部($36^{\circ}32' \sim 37^{\circ}14' \text{ E}$, $99^{\circ}36' \sim 100^{\circ}46' \text{ N}$),是中国最大的咸水湖,东西长约105 km,南北宽约63 km(图1)(祁苗苗等,2020)。湖中有海心山、三块石和两个湖心岛,湖水水量主要来源于地表径流和大气降水,其中径流量占入湖总水量的80%以上,入湖河流主要包括布哈河、泉吉河、沙柳河、哈尔盖河和黑马河。近年来,青海湖整体水质状况持续保持良好。然而,在鸟岛西岸水深1.5~2 m的区域,由于光照充足、营养盐丰富以及适宜的基质条件,刚毛藻水华的暴发较为严重(图1(b)和图1(c))(Duan等,2022)。

2.2 Sentinel-2 MSI影像

从欧洲空间局(ESA)网站(<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>)下载45景青海湖上空无云或少云的 Sentinel-2 MSI影像作为数据源,4景拼接域(NA、NB、PA和PB)不同的影像可完整覆盖青海湖(表1、图2)。Sentinel-2 MSI遥感影像包含13个波段,覆盖从可见光到短波红外的光谱范围。研究选取了空间分辨率较高的10 m和20 m共10个波段,包括蓝光(482~560 nm)、绿光(560~640 nm)、红光(640~670 nm)、红边(680~790 nm)、近红外(832~865 nm)以及短波红外波段(1 610~2 200 nm),用于刚毛藻水华的提取分析。所使用的影像均为经过大气底层反射率校正和卷云修正后的L2A级产品,能够满足影像栅格光谱指数的计算需求。

2.3 无人机影像

2019年9月6—7日,利用大疆“精灵4”四旋翼无人机搭载可见光相机A7R2,对青海湖典型区域

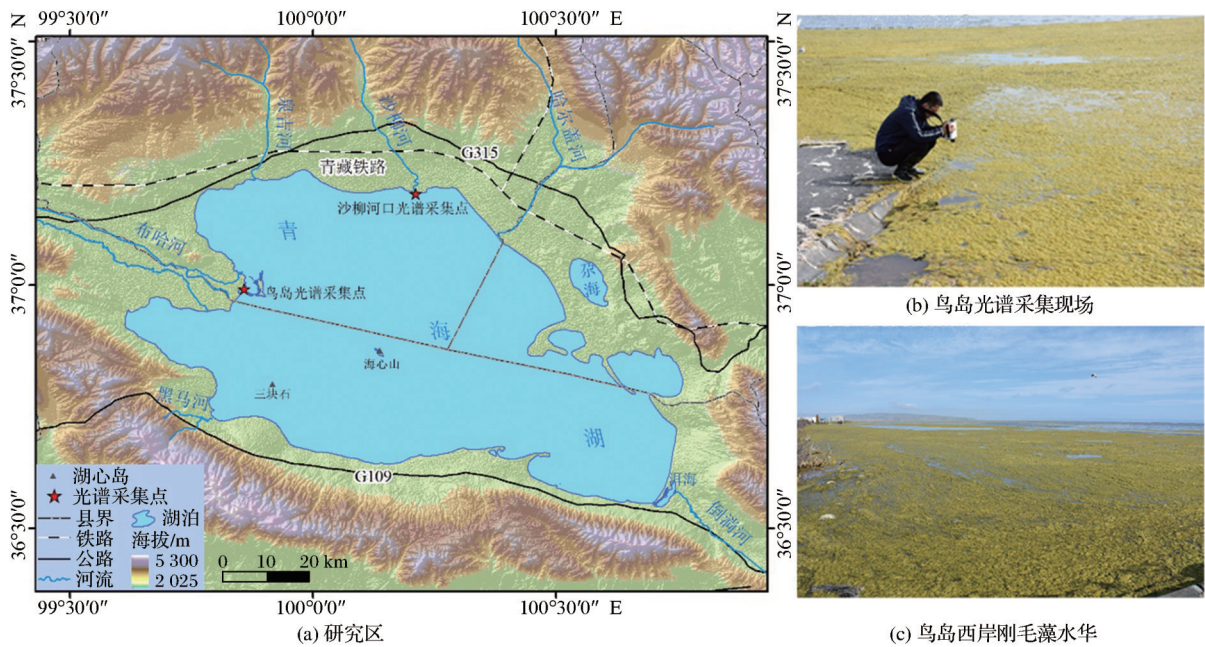


图 1 研究区概况及水华采集

审图号:GS(2024)0650

Fig.1 Overview of the study area and cladophora blooms collection

表 1 影像源

Table 1 The image source

日期	拼接域	日期	拼接域
20190705	NA-NB-PA-PB	20190928	NA-NB-PA-PB
20190725	NA-NB-PA-PB	20191018	NA-NB-PA-PB
20190730	NA-NB-PA-PB	20191028	NA-NB-PA-PB
20190814	NA-NB-PA-PB	20191102	NA-NB-PA-PB
20190903	NB		

的刚毛藻水华进行了航拍数据采集。无人机飞行高度为 185 m,速度为 9.5 m/s,拍照时间间隔为 5 s,航向重叠度和旁向重叠度分别为 74% 和 70%。航

拍照片经过预处理,生成了空间分辨率为 5 cm 的无人机正射影像(图 2),总数据量为 14.2 GB,影像的地理坐标系采用 WGS1984,投影坐标系为通用横轴墨卡托投影(Universal Transverse Mercator, UTM)。正射影像的处理步骤包括质量检测、特征匹配与优化、噪声滤波与表面平滑以及贴图合成(段红玉,2020)。与卫星影像同步或日期相近的正射影像被用于验证各光谱指数的提取效果及适用性。

2.4 GF-1 PMS 影像

为评价最优光谱指数的准确性和普适性,本研

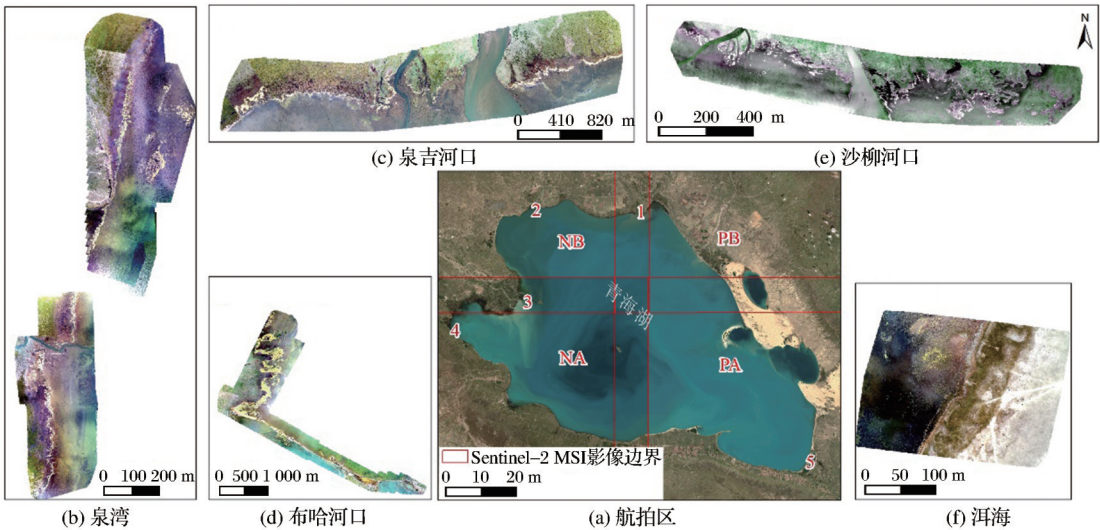


图 2 青海湖无人机航拍区域及正射影像

Fig.2 UAV photography regions and orthophotos of Qinghai Lake

究选取 2019 年 8 月 14 日的 GF-1 PMS 影像 (<https://data.cresda.cn/#/home>) 进行应用和精度检验。多光谱波段由蓝光、红光、绿光和近红外波段组成,空间分辨率为 8 m,全色波段为 2 m。数据源为 GF1C_PMS_E100.1_N36.9_20190814_L1A10_21457559 影像,由于部分区域影像被云覆盖,但其仍可覆盖大部分刚毛藻水华分布区。通过人工目视解译获取实验区刚毛藻水华的真实分布,进而对最优指数提取结果进行验证。

2.5 高光谱数据

为明确青海湖刚毛藻水华的反射光谱特性,

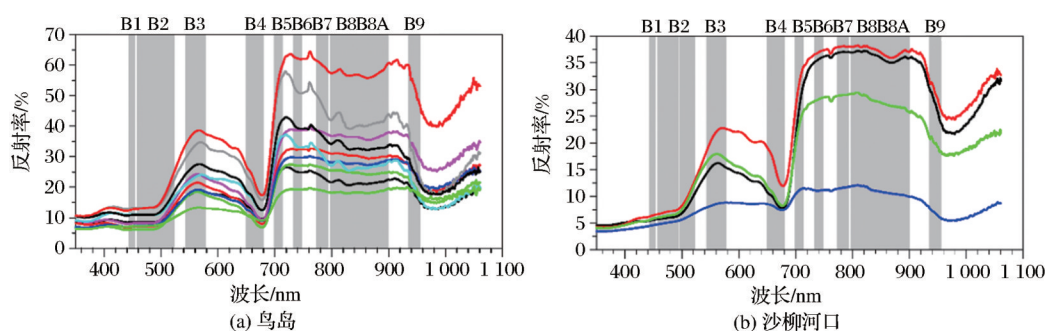


图3 鸟岛区域和沙柳河口刚毛藻水华实测光谱曲线

Fig. 3 Measured spectral curves of *Cladophora* blooms in the Bird Island region and the Shaliu estuary

3 研究方法

3.1 基于光谱指数的刚毛藻水华提取方法

基于青海湖刚毛藻水华的实测高光谱数据和 Sentinel-2 MSI 影像,计算浮游藻类指数等 9 种光谱指数影像,并以步长为 0.01 进行自动迭代提取阈值。通过目视分析,选择刚毛藻水华像元数与真实像元数误差最小的阈值作为最佳阈值。此外,结合采集的无人机航拍影像与 Sentinel-2 MSI 影像,对地面真实刚毛藻水华分布进行目视解译,以验证各光谱指数的提取效果和适应性。最终,选取提取效果最优的光谱指数反演青海湖刚毛藻水华分布,并进一步分析其变化特征。最后,讨论最优指数在 GF-1 PMS 影像中的适用性和准确性。

3.1.1 单波段阈值法

已有学者研究(Stumpf 和 Tomlinson, 2005)表明藻华在可见光和近红外波段的光谱特征与水体明显不同,因此可从可见光或近红外波段的单一波段中提取藻华。刚毛藻水华实测光谱曲线显示,其在近红外波段的反射率远大于可见光波段,因此本研究选择近红外波段提取刚毛藻水华,公式如下:

$$\rho_{NIR} > T \quad (1)$$

2019 年 9 月 7—8 日 12:00~14:00,在天气晴朗且风速较低情况下,分别在鸟岛区域和沙柳河口两个地点采集光谱,选择不同覆盖度的刚毛藻水华进行测量。

不同覆盖度的刚毛藻水华光谱曲线(不同颜色表示不同覆盖度)如图 3 所示。由图 3 可见,光谱曲线在蓝光波段(440 nm)和红光波段(665 nm)表现出明显的吸收峰,在绿光波段(550~570 nm)和近红外波段(842 nm)表现出强烈的反射峰。刚毛藻水华光谱曲线的波峰、波谷或反射率上升波段均可对应 Sentinel-2 MSI 相应的中心波长上,从而达到基于光谱指数阈值法提取刚毛藻水华的目的。

其中: ρ_{NIR} 为 Sentinel-2 MSI 影像的近红外波段(B8)的反射率; T 为分割藻华与非藻华的阈值。

3.1.2 三波段法

Dall'olmo 等(2003)提出一种用于反演内陆水体叶绿素 a 浓度的三波段(Three Bands, TB)概念模型,该模型基于生物光学模型和高光谱数据三波段特征组合,可有效提取藻华,公式如下:

$$TB = [\rho^{-1}(\lambda_1) - \rho^{-1}(\lambda_2)] \times \rho(\lambda_3) \quad (2)$$

其中: $\rho^{-1}(\lambda_i)$ 是 λ_i 波段光谱反射率的倒数; λ_1 、 λ_2 和 λ_3 的范围分别为 650~680 nm、680~710 nm 和 750~760 nm,对应 Sentinel-2 MSI 影像的波段 4、波段 5 和波段 6 的中心波长。

3.1.3 波段差值法

波段差值法(Band Difference, BD)通过对两个波段的反射率进行相减来提取藻类信息(段洪涛等, 2008)。利用刚毛藻水华在近红外波段反射率较高,而在红光波段反射率较低的光谱特性,该方法能够有效突出水华区域的光谱差异,从而实现对接刚毛藻水华的准确提取。公式如下:

$$BD = \rho_{NIR} - \rho_{RED} \quad (3)$$

其中: ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别为 Sentinel-2 MSI 影像近红外波段(B8)和红光波段(B4)的反射率。

3.1.4 波段比值法

波段比值法(Band Ratio, BR)通过将两个波段的反射率相除来提取藻类信息(Son等, 2012)。利用刚毛藻水华在近红外波段反射率较高,而在红光波段反射率较低的光谱特性,该方法能够有效突出水华区域的光谱差异,从而实现刚毛藻水华的准确提取。公式如下:

$$BR = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{RED}} \quad (4)$$

其中: ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别为 Sentinel-2 MSI 影像近红外波段(B8)和红光波段(B4)的反射率。

3.1.5 归一化植被指数

根据刚毛藻水华与植被在光谱特征上的相似性,可以对近红外波段和红光波段的反射率进行归一化处理(Gower, 1994)。这种处理方法有助于减小光谱特征中不相关因素的影响,从而增强刚毛藻水华的特征信号,提高其识别精度。公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (5)$$

其中: ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别为 Sentinel-2 MSI 影像近红外波段(B8)和红光波段(B4)的反射率。

3.1.6 最大叶绿素指数

ESA 的 SNAP 软件在水处理模块最大叶绿素指数(The Maximum Chlorophyll Index, MCI)中设计了一种适用于 Sentinel-2 MSI 影像的红潮及其他水生植物识别算法。该算法在参考荧光高度算法的基础上,加入了 k 参数,用于校正薄云的影响(Gower等, 1999)。本研究将该算法应用于刚毛藻提取,以提高复杂水体条件下的识别精度。公式如下:

$$MCI = L_2 - k \times \left(L_1 + (L_3 - L_1) \times \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1} \right) \quad (6)$$

其中: L_1 和 L_3 为基线波段; L_2 为峰值波段; λ_1 (681.25 nm)、 λ_2 (708.75 nm)和 λ_3 (753.75 nm)分别为 L_1 、 L_2 和 L_3 波段的中心波长。MCI处理模块中提供的 Sentinel-2 MSI 影像最佳波段组合是B4(低基线)、B5(峰值)和B6(高基线)。当使用L2A级数据时,Gower等(1999)建议 k 值为0.17。

3.1.7 浮游藻类指数

Hu (2009) 提出使用浮游藻类指数(Floating Algae Index, FAI)监测海洋藻华信息,该方法具有较好的稳定性,并且可以通过增加短波红外波段进行大气校正。在多个湖泊藻华提取任务中表现出色,因此被应用于刚毛藻水华提取。公式如下:

$$FAI = \rho_{NIR} - \rho'_{NIR} \quad (7)$$

$$\rho'_{NIR} = \rho_{NIR} + (\rho_{SWIR} - \rho_{RED}) \times \frac{(\lambda_{NIR} - \lambda_{RED})}{(\lambda_{SWIR} - \lambda_{RED})} \quad (8)$$

其中: ρ_{NIR} 、 ρ_{RED} 和 ρ_{SWIR} 分别为 Sentinel-2 MSI 影像的近红外波段(B8A)、红光波段(B4)和短波红外波段(B11)的反射率; λ_{NIR} 、 λ_{RED} 和 λ_{SWIR} 分别为近红外波段、红光波段和短波红外波段的中心波长。

3.1.8 表面藻华指数

为检测潮间带浮游藻类或裸露植被,Alawadi (2010) 提出一种名为表面藻华指数(Surface Algal Bloom Index, SABI)的新指数,该指数主要是对水面漂浮藻类光谱敏感的四波段比值运算,在各种环境条件下都表现出很强的稳定性。公式如下:

$$SABI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{BLUE} + \rho_{GREEN}} \quad (9)$$

其中: ρ_{BLUE} 、 ρ_{GREEN} 、 ρ_{RED} 和 ρ_{NIR} 分别为 Sentinel-2 MSI 影像的蓝光(B2)、绿光(B3)、红光(B4)和近红外波段(B8)的反射率。

3.1.9 基于虚拟基线高度的浮游藻类指数

Xing和Hu(2016)提出一种利用HJ-1数据研究黄海和东海水华的新型藻类识别算法——基于虚拟基线高度的浮游藻类指数(Virtual-Baseline Floating Macroalgae Height, VB-FAH)。该方法证明,即使在缺少短波红外波段的情况下,其效果可与FAI方法相当。公式如下:

$$VB-FAH = (\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}) + (\rho_{GREEN} - \rho_{RED}) \times \frac{(\lambda_{NIR} - \lambda_{GREEN})}{(2\lambda_{NIR} - \lambda_{RED} - \lambda_{GREEN})} \quad (10)$$

其中: ρ_{GREEN} 、 ρ_{RED} 和 ρ_{NIR} 分别为 Sentinel-2 MSI 影像的绿光波段(B3)、红色波段(B4)和近红外波段(B8)的反射率; λ_{GREEN} 、 λ_{RED} 和 λ_{NIR} 分别为绿光波段、红光波段和近红外波段的中心波长。

3.2 精度评估

本研究通过Kappa系数、错分误差、漏分误差和总体分类精度来评估青海湖不同藻类光谱指数提取方法的准确性(Cohen, 1968)。Kappa系数用于评价遥感影像分类结果的一致性,基于地面真实刚毛藻水华分布和指数影像分类结果,Kappa系数通过计算 P_0 和 P_e 得出,公式如下:

$$Kappa = \frac{P_0 - P_e}{1 - P_e} = \frac{(\sum_{i=1}^n P_{ii}/N - \sum_{i=1}^n (P_{i+} \times P_{+i})/N^2)}{1 - (\sum_{i=1}^n P_{i+} \times P_{+i})/N^2} \quad (11)$$

其中: P_0 为总体分类精度; P_e 为分类结果与地面真实

刚毛藻水华数据吻合的概率; P_{ii} 为第*i*类被正确分类的像元总数; P_{i+} 是类型*i*列像元总和; P_{+i} 是类型*i*行像元总和; n 为类型个数; N 是总像元数。

错分误差指的是本不应归属于某一类别的像元被错误地分类为该类别的误差;而漏分误差则是指应归属于某一类别的像元未被正确分类为该类别的误差,计算公式如下:

$$P_{Ci} = 1 - \frac{P_{ii}}{P_{i+}} \quad (12)$$

$$P_{Oi} = 1 - \frac{P_{ii}}{P_{+i}} \quad (13)$$

其中: P_{Ci} 是第*i*类的错分误差; P_{Oi} 是第*i*类的漏分误差; P_{i+} 是第*i*类所在列的像元数目之和; P_{+i} 是第*i*类所在行的像元数目之和。

5 cm 甚高空间分辨率的无人机影像能够清晰反映刚毛藻水华的分布情况。基于实地采集的青海湖无人机影像和获取的卫星遥感影像,通过对比日期相近的2019年9月3日 Sentinel-2 真彩色影像与2019年9月7日无人机航拍影像(图4),对刚毛藻水华分布较多的典型区域的光谱指数提取效果进行评估。尽管两者成像时间相差4 d,但鉴于刚毛藻水华主要分布在青海湖沿岸区域,其变化通常具有一定的稳定性,尤其是在短时间内(如几天内)的空间分布和水体状况变化(青海湖是一个闭塞湖泊)较为缓慢,因此这一时间差异对各光谱指数精

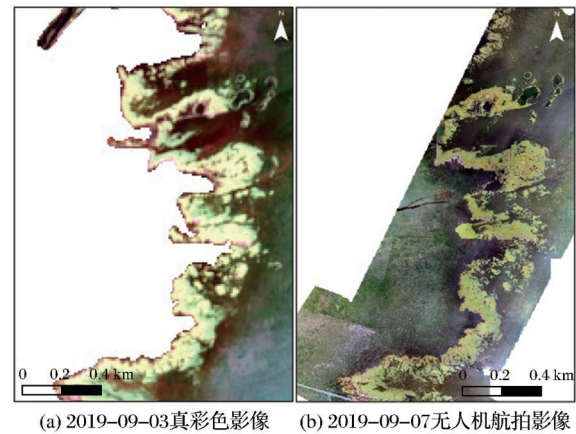


图4 刚毛藻水华分布比较

Fig. 4 Comparison of the distribution of *Cladophora* blooms

度评估结果的影响较小。

4 结果与分析

4.1 典型区域不同指数提取结果比较

青海湖刚毛藻水华分布最集中的区域为布哈河口及其周边湖岸。选取该区域作为不同方法提取刚毛藻水华的验证区域(图5)。通过基于Python程序的阈值迭代法和目视解译,确定刚毛藻水华提取的最佳阈值 T 。图5(a)显示了典型区域的 Sentinel-2 MSI 真彩色合成图像,反映了刚毛藻水华在遥感影像上的实际分布情况。经无人机航拍影像

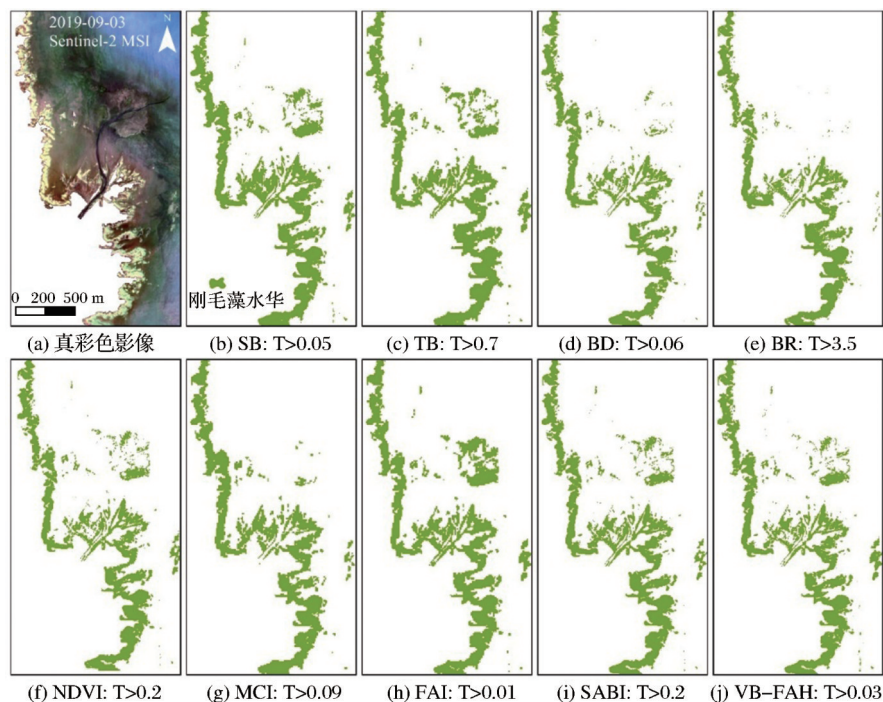


图5 不同影像中刚毛藻水华的空间分布情况

Fig. 5 Spatial distribution of *Cladophora* blooms in different images

验证, MCI指数在典型区域的提取效果最佳, 总体精度为 98.29%, Kappa 系数为 0.92, 错分率为 7.13%, 漏分率为 7.53%, 两者接近。其次是 BD 指数, 其总体分类精度达到 98.51%, Kappa 系数为 0.91。然而, 由于未能提取覆盖度较低的刚毛藻水华, 其漏分率相对较高, 为 12.99%。

SB、NDVI、SABI 和 VB-FAH 指数的提取效果较为接近, Kappa 系数均为 0.90。其中, VB-FAH 指数的总体精度最高 (98.23%), 而 SABI 指数的总体精度最低 (97.95%)。主要原因在于青海湖浅水湖岸附近的湿地被误识别为刚毛藻水华。相比之下, BR、TB 和 FAI 指数的提取效果较差, Kappa 系数均低于 0.9, 且错分率和漏分率较高 (图 5、表 2)。

4.2 全湖区刚毛藻水华监测的最优指数

选择典型区域刚毛藻水华提取结果中 Kappa 系数大于 0.9 的 6 种指数, 依次对青海湖刚毛藻水华主要分布区 (沙柳河口、布哈河口南北两侧区域) 进行提取。总体来看, VB-FAH 指数在沙柳河口和布哈河口南北两侧区域的提取效果最佳, NDVI 指数提取效果较为突出, 这本质上反映了刚毛藻水华与

表 2 典型区域不同指数提取效果比较

Table 2 Comparison of extraction effects of different indices in typical region

刚毛藻水华 提取方法	组合波段	错分率 /%	漏分率 /%	总体精度 /%	Kappa 系数
SB	B8	13.38	3.87	98.10	0.90
TB	B4-B5-B6	18.22	5.10	96.92	0.86
BD	B8-B4	1.88	12.99	98.51	0.91
BR	B8-B4	4.70	18.49	97.71	0.87
NDVI	B8-B4	9.59	9.75	98.04	0.90
MCI	B4-B5-B6	7.13	7.53	98.29	0.92
FAI	B4-B8A-B11	20.62	4.93	96.53	0.85
SABI	B2-B3-B4-B8	12.00	7.59	97.95	0.90
VB-FAH	B3-B4-B8	10.45	6.54	98.23	0.90

陆地植被在光谱特征上的高度相似性。SB 和 BD 指数提取的刚毛藻水华面积明显偏小, 存在漏分现象; SABI 方法提取的刚毛藻水华面积则明显偏大, 存在较多错分; MCI 指数在局部区域表现较好, 但整体漏分较为严重, 无法识别大部分刚毛藻水华 (图 6)。

对不同刚毛藻水华分布区的各指数提取效果

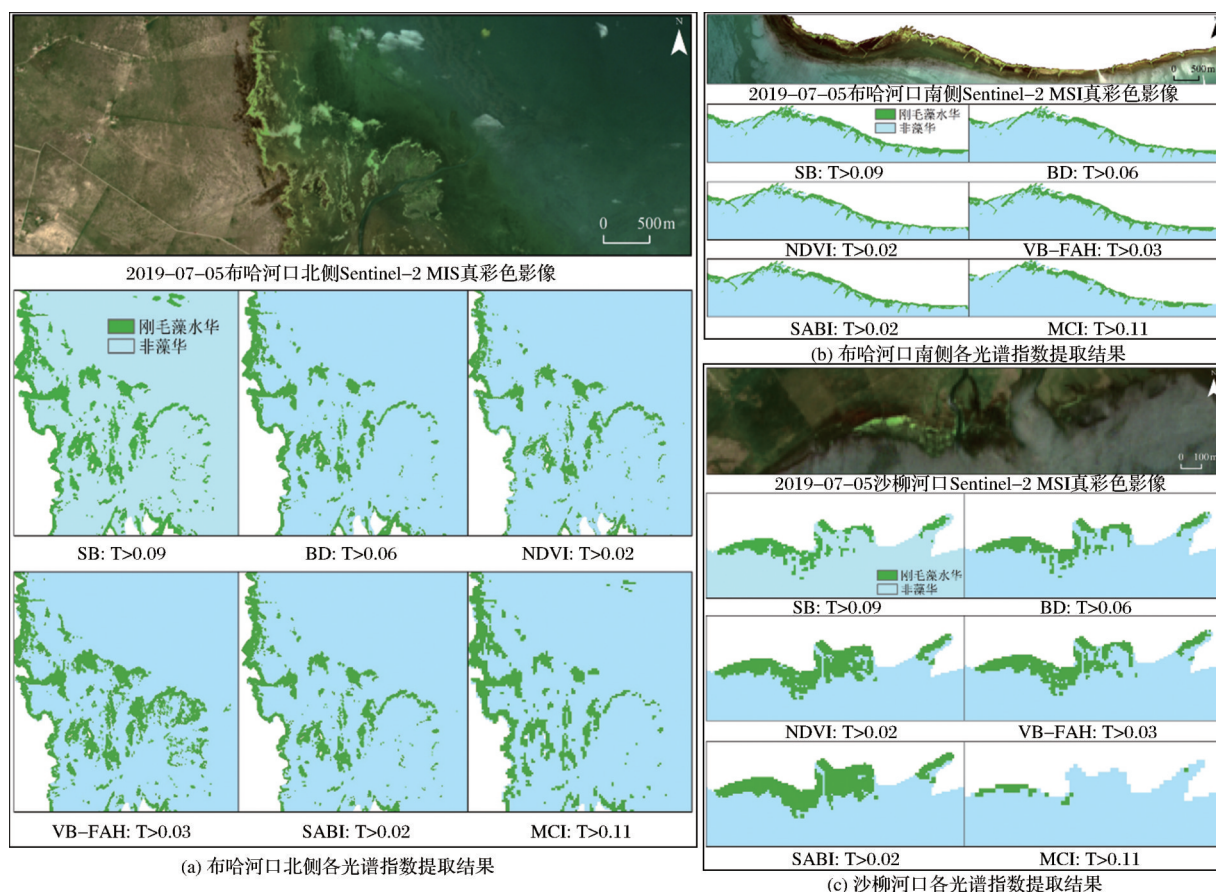


图 6 主要区域各光谱指数提取结果空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of spectral index extraction results in main regions

进行精度评估,由于2019年7月5日的 Sentinel-2 MSI影像与无人机影像时间不同步,因此将卫星影像上刚毛藻水华目视解译的结果作为地面真值。如图7所示,各指数在刚毛藻水华分布较少的区域(泉湾和黑马河口)提取效果较差,除 VB-FAH 指数的 Kappa 系数较高(0.73)外,其余指数的 Kappa 系数均小于0.55。尽管 NDVI 在部分区域提取效果较好,但不适用于黑马河口和泉湾区域的刚毛藻水华提取。因此,本研究将全湖不同区域刚毛藻水华覆盖面积和各指数提取精度(Kappa 系数)的加权均值作为全湖区各指数最终的提取效果。结果表明,VB-FAH 指数在全湖区提取效果最优(0.88),其次是 NDVI 指数(0.86),SABI 和 BD 指数提取效果相当(0.79),MCI 指数提取效果最差(0.67)。

4.3 2019年青海湖刚毛藻水华时空变化特征

基于全湖区精度最好的指数 VB-FAH 提取2019年青海湖刚毛藻水华,不同时间序列面积变化如表3所示,全湖区刚毛藻水华空间变化如图8所示。2019年青海湖刚毛藻水华在布哈河口北侧区域分布最多,7月5日最大水华面积为2.85 km² (69.47%),11月2日最小水华面积为1.44 km² (80.45%)。刚毛藻水华在布哈河口南侧区域分布面积次之,最大和最小水华面积发生在7月25日和11月2日,分别为0.89 km² (25.87%)和0.21 km²

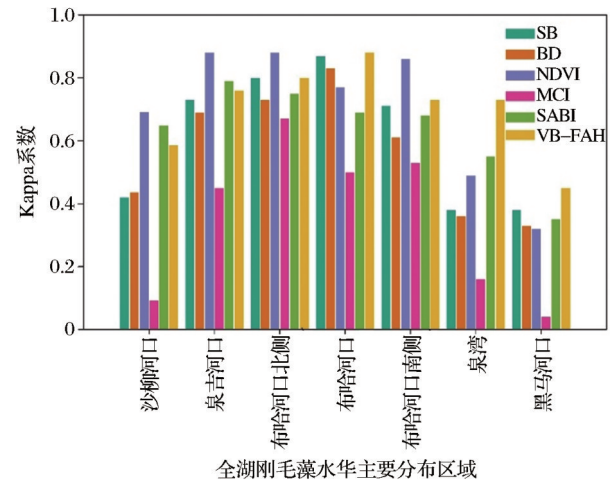


图7 全湖区不同区域刚毛藻水华各指数提取精度
Fig.7 Extraction accuracy of various indices of *Cladophora* blooms in the whole lake region

(11.73%)。其他区域的刚毛藻水华面积相对较小,其中沙柳河口区域的水华面积最小(表3)。在空间分布上,受风力作用影响,刚毛藻水华随着青海湖面积的扩张逐渐向外迁移,主要呈条带状或斑块状分布于湖岸附近。水华面积较大的区域以条带状分布为主,而水华面积较小的区域大多以斑块状分布。在不同时间序列中,刚毛藻水华的密度和面积存在显著差异,这可能与水温、光照等气候和热力条件密切相关。

表3 2019年青海湖刚毛藻水华面积变化

Table 3 Changes in the area of *Cladophora* blooms in Qinghai Lake in 2019

分布区域	刚毛藻水华最大面积			刚毛藻水华最小面积		
	面积/km ²	占比/%	日期	面积/km ²	占比/%	日期
泉吉河口	0.28	6.88	07-25	0.07	3.91	11-02
沙柳河口	0.09	2.11	07-05	0.005	0.28	11-02
布哈河口北侧	2.85	69.47	07-05	1.44	80.45	11-02
布哈河口	0.17	5.84	07-30	0.04	2.23	11-02
布哈河口南侧	0.89	25.87	07-25	0.21	11.73	11-02
泉湾	0.11	2.70	08-14	0.01	1.70	11-02
黑马河口	0.14	3.44	08-14	0.01	1.70	11-02
各区域总面积	4.10	100	07-05	1.79	100	11-02

5 讨论

5.1 VB-FAH 指数的准确性和普适性评价

基于9种藻类光谱指数提取青海湖刚毛藻水华提取结果表明,VB-FAH方法具有较高的提取精度。为进一步验证 VB-FAH 指数的准确性和普适性。本研究结合 GF-1 PMS 影像,通过目视解译获得黑马河口、泉吉河口和布哈河口及南北两侧区域

刚毛藻水华面积。分别将各区域面积值作为真值,评价 VB-FAH 方法提取刚毛藻水华面积的适用性和准确性。

由表4可知,基于 VB-FAH 指数得到的各实验区面积和目视解译的总体效果基本一致,各区域面积相差不大。黑马河口、泉吉河口和布哈河口及南北两侧目视解译的面积分别为0.141 km²、0.036 km²、0.141 km²和1.437 km²;VB-FAH 指数提取的面积

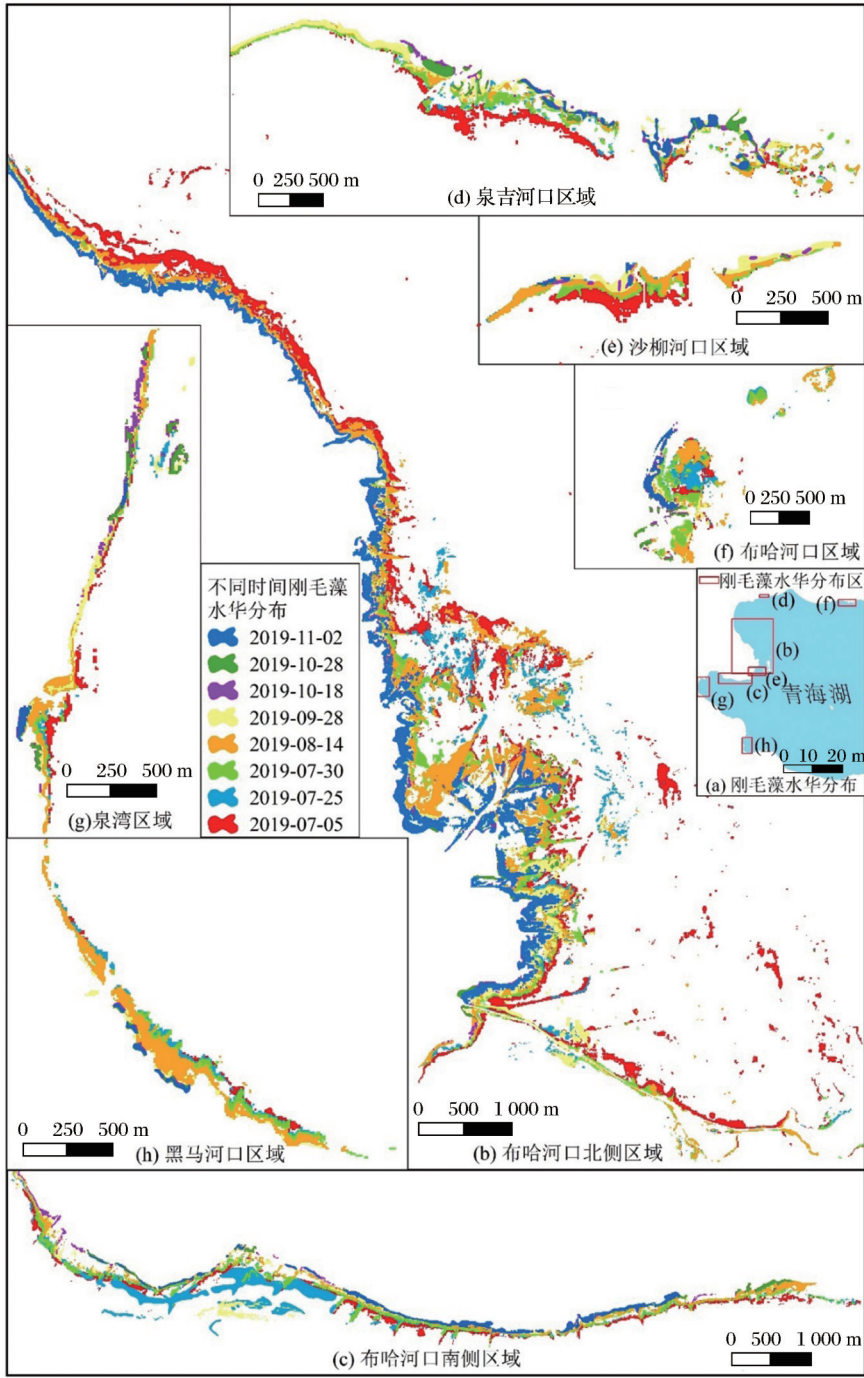


图 8 2019 年全湖区刚毛藻水华空间演变格局

Fig.8 Spatial evolutionary pattern of lake-wide *Cladophora* blooms in 2019

表 4 黑马河口、泉吉河口和布哈河口及南北两侧区域提取面积 (km²)

Table 4 Extracted area in the Heima, Quanji and Buha estuaries and regions north and south of them (km²)

不同方法	黑马河口	布哈河口 南侧	泉吉河口	布哈河口 北侧
目视解译	0.141	0.140	0.036	1.437
VB-FAH	0.144	0.148	0.038	1.522

分别为 0.144 km²、0.038 km²、0.148 km²和 1.522 km²，平均相对误差分别 2.13%、5.56%、5.71% 和 5.92%。如图 9 所示，空间上以布哈河口北侧为例，基于 VB-FAH 指数提取的刚毛藻水华与人工目视解译的空间范围分布较为一致，VB-FAH 提取面积略大于真实面积，存在将其他地物错分为水华的现象。

5.2 青海湖刚毛藻暴发成因

在准确获取青海湖刚毛藻水华空间分布的情

况下,未来需进一步明晰其形成原因和扩张趋势。青海湖刚毛藻的发育经历了从20世纪50—60年代、90年代再到21世纪初至今的发展过程,与青海湖水位变化过程一致(李燕等,2014;Stevenson和Stoermer,1982),表明两者之间存在联系。刚毛藻在青海湖的过度繁殖可能首先归因于其能很好地适应了青海湖的环境,具有较强的种群竞争力(Mantai, 1987;Higgins等,2008)。其次,青海湖水位上涨形成了许多新的淹没带,为刚毛藻提供了良好的着生基质。青海湖新淹没区大多为牧区草场,遗留的刚毛藻老化碎屑、植被碎屑和畜禽粪便可释放大量的营养物质,加剧刚毛藻的生长。近年来,由于栖息地保护措施的实施使得青海湖鸟岛地区鸟类种群数量有所增加(<http://qhh.qinghai.gov.cn/>),因此鸟类排泄物也相应增加,这也为刚毛藻发育提供了丰富的氮、磷等营养物质。此外,随着青藏高原气候暖湿化,青海湖地区夏季温度持续升高,湖冰消融期明显提前,为刚毛藻生长提供了适宜的水温和光照条件,这可能是刚毛藻过度生长的原因之一。最后,青海湖属于一个闭塞咸水湖,水动力条件相对较弱,水流垂直运动可能对刚毛藻的影响较小,不会干扰刚毛藻的生存环境。

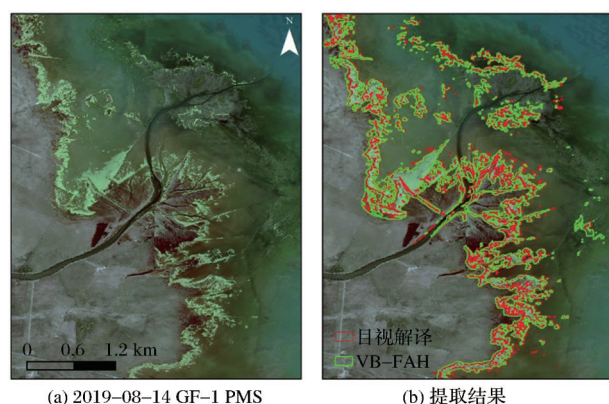


图9 基于GF-1 PMS影像和VB-FAH指数的提取结果

Fig. 9 Extraction results based on GF-1 PMS image and VB-FAH indice

5.3 改善青海湖水生态环境的必要性

青海湖的重要战略地位和功能决定了加强生态水环境保护的必要性和意义。开展青海湖刚毛藻水华治理工作,既是践行“绿水青山就是金山银山”生态文明信念的需要,也符合当前国家生态环境建设的重点领域。目前,控制刚毛藻暴发的措施只在急需处理的试验区实施。然而,刚毛藻水华主要分布在青海湖西部的主要河流入湖口和近岸附

近,应考虑、规划和实施整个青海湖地区的刚毛藻管理措施,还应加强对青海湖刚毛藻暴发成因的研究和验证。基于刚毛藻水华的空间分布和范围,应摸清其暴发背后的机理。此外,有关部门需加强青海湖刚毛藻的现场观测和刚毛藻水华的提前预报,同时构建空—天—地一体化监测体系,充分发挥遥感技术的重要作用 and 观测潜力。

6 结 论

本研究基于2019年Sentinel-2 MSI遥感影像、无人机正射影像及GF-1 PMS遥感影像,以布哈河口北侧的典型区域为样本区,结合9种藻类光谱指数提取刚毛藻水华的分布信息并对比提取效果及适用性。在此基础上,利用表现优异的光谱指数对青海湖全湖区的刚毛藻水华进行提取,选取最优指数反演2019年青海湖刚毛藻水华的分布特征并分析其变化规律。最后,探讨最优指数在GF-1 PMS影像中的适用性。主要结论如下:

(1) 在青海湖布哈河口北侧典型区域,SB、BD、NDVI、MCI、SABI和VB-FAH 6种光谱指数提取刚毛藻水华的效果较好($Kappa > 0.9$),错分率和漏分率较低。

(2) 由全湖不同区域刚毛藻水华覆盖面积和各指数提取精度($Kappa$ 系数)的加权均值得出,VB-FAH指数在全湖区提取效果最优($Kappa = 0.88$),NDVI指数次之($Kappa = 0.86$),SABI和BD指数提取效果相当($Kappa = 0.79$),MCI指数提取效果最差($Kappa = 0.67$)。

(3) 2019年青海湖刚毛藻水华最大面积为 4.10 km^2 ,最小面积为 1.79 km^2 ;刚毛藻水华分布最多的区域是布哈河口北侧,其次是布哈河口南侧,其他区域刚毛藻水华面积相对较小。在空间上,刚毛藻水华受风力作用随青海湖面积的扩张而向外迁移,呈条带状或斑块状分布在湖岸附近。

(4) VB-FAH指数在GF-1 PMS影像上提取的刚毛藻水华面积与目视解译结果一致性较好,指数提取结果略大于目视解译的结果,平均相对误差在 $2.13\% \sim 5.92\%$ 之间。

参考文献(References):

- Alawadi F, 2010. Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm Surface Algal Bloom Index(SABI)[C]// Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions 2010. Toulouse, France. SPIE, 782506. DOI: 10.1117/

- 12.862096
- Cao M M, Qing S, Jin E, et al, 2021. A spectral index for the detection of algal blooms using Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) imagery: A case study of Hulun Lake, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 42(12): 4514-4535. DOI:10.1080/01431161.2021.1897186
- Chen J Q, Wang J, Wang Q W, et al, 2021. Common fate of sister lakes in Hulunbuir Grassland: Long-term harmful algal bloom crisis from multi-source remote sensing insights[J]. *Journal of Hydrology*, 594:125970. DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.125970
- Cohen J, 1968. Weighted Kappa: Nominal scale agreement provision for scaled disagreement or partial credit[J]. *Psychological Bulletin*, 70(4): 213-220. DOI:10.1037/h0026256
- Dall'Olmo G, Gitelson A A, Rundquist D C, 2003. Towards a unified approach for remote estimation of chlorophyll-a in both terrestrial vegetation and turbid productive waters [J]. *Geophysical Research Letters*, 30(18): 2003GL018065. DOI: 10.1029/2003GL018065
- Duan H T, Zhang S X, Zhang Y Z, 2008. Cyanobacteria bloom monitoring with remote sensing in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 20(2):145-152.[段洪涛,张寿选,张渊智,2008.太湖蓝藻水华遥感监测方法[J]. *湖泊科学*, 20(2):145-152.]
- Duan H Y, Yao X J, Zhang D H, et al, 2022. Long-term temporal and spatial monitoring of *Cladophora* blooms in Qinghai Lake based on multi-source remote sensing images [J]. *Remote Sensing*, 14(4): 853. DOI:10.3390/rs14040853
- Duan H Y, 2020. Remote sensing monitoring and improvement evaluation of algae in Qinghai Lake[D]. Lanzhou: Northwest Normal University.[段红玉, 2020. 青海湖藻类遥感监测与治理评价[D]. 兰州: 西北师范大学.]
- Gower J F R, Doerffer R, Borstad G A, 1999. Interpretation of the 685 nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 20(9): 1771-1786. DOI:10.1080/014311699212470
- Gower J F R, 1994. Red tide monitoring using AVHRR HRPT imagery from a local receiver[J]. *Remote Sensing of Environment*, 48(3): 309-318. DOI:10.1016/0034-4257(94)90005-1
- Guo W C, 2011. Study on extraction methods of cyanophytes bloom based on HJ-1[D]. Nanjing: Nanjing Normal University.[郭望成, 2011. 基于环境1号卫星的蓝藻水华提取方法研究[D]. 南京: 南京师范大学.]
- Hao M Y, Zhu H, Xiong X, et al, 2020. Analysis on the distribution and origin of *Cladophora* in the nearshore water of Qinghai Lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 44(5): 1152-1158.[郝美玉, 朱欢, 熊雄, 等, 2020. 青海湖刚毛藻分布特征变化及成因分析[J]. *水生生物学报*, 44(5): 1152-1158.]
- Higgins S N, Malkin S Y, Todd Howell E, et al, 2008. An ecological review of *Cladophora* glomerata (chlorophyta) in the Laurentian great lakes [J]. *Journal of Phycology*, 44(4): 839-854. DOI:10.1111/j.1529-8817.2008.00538.x
- Hu C M, 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2118-2129. DOI:10.1016/j.rse.2009.05.012
- Jia T X, Zhang X Q, Dong R C, 2019. Long-term spatial and temporal monitoring of *Cyanobacteria* blooms using MODIS on Google Earth Engine: A case study in Taihu Lake[J]. *Remote Sensing*, 11(19): 2269. DOI:10.3390/rs11192269
- Li L J, Li G H, Li G B, 2020. Winter and spring succession of the phytoplankton community in Dianchi Lake under the influences of environment change [J]. *Journal of Hydroecology*, 41(3): 57-68.[李莉杰, 李国辉, 李根保, 2020. 环境条件变化下滇池冬春季节浮游植物的演替特征[J]. *水生生态学杂志*, 41(3): 57-68.]
- Li S M, Liu J P, Song K S, et al, 2019. Analysis on spatial and temporal character of algae bloom in Lake Chaohu and its driving factors based on Landsat imagery[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 28(5): 1205-1213.[李晟铭, 刘吉平, 宋开山, 等, 2019. 基于Landsat影像巢湖蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 28(5): 1205-1213.]
- Li X W, Zhang Y, Shi H, et al, 2019. Application of maximum chlorophyll index derived from Sentinel-3A satellite OLCI data for monitoring *Cyanobacteria* blooms in Lake Taihu[J]. *Environmental Monitoring in China*, 35(3): 146-155.[李旭文, 张悦, 侍昊, 等, 2019. 基于哨兵-3A卫星OLCI数据的最大叶绿素指数在太湖蓝藻水华监测中的应用[J]. *中国环境监测*, 35(3): 146-155.]
- Li Y, Duan S Q, Jin Y M, 2014. Analysis of features and causes of Qinghai Lake during the period of 1956-2011[J]. *Yellow River*, 36(6): 87-89, 112.[李燕, 段水强, 金永明, 2014. 1956-2011年青海湖变化特征及原因分析[J]. *人民黄河*, 36(6): 87-89, 112.]
- Li Y, Shi Z, Zhang Y X, et al, 2014. Evaluation method and application on *Cyanobacteria* bloom degree classification with algal density [J]. *Environment and Sustainable Development*, 39(2): 67-68.[李颖, 施择, 张榆霞, 等, 2014. 关于用藻密度对蓝藻水华程度进行分级评价的方法和运用[J]. *环境与可持续发展*, 39(2): 67-68.]
- Liu K, Wang Z Y, Cao J J, 2024. A comparative study of mangrove distribution extraction based on Landsat-8 OLI images and spectral index methods[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 39(1): 55-66.[刘凯, 王子予, 曹晶晶, 2024. 基于Landsat-8 OLI影像和指数法的红树林提取对比研究[J]. *遥感技术与应用*, 39(1): 55-66.]
- Ma J Y, Jin S G, Li J, et al, 2021. Spatio-temporal variations and driving forces of harmful algal blooms in Chaohu Lake: A multi-source remote sensing approach [J]. *Remote Sensing*, 13(3): 427. DOI:10.3390/rs13030427
- Ma K L, Xiong X, Ao H Y, et al, 2022. Differences in water environment characteristics between the newly lakeshore zone and the main lake area of Qinghai Lake[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 46(12): 1788-1796.[马凯丽, 熊雄, 敖鸿毅, 等, 2022. 青海湖新生湖滨带与主湖区水环境特征差异研究[J]. *水生*

- 生物学报, 46(12): 1788-1796.]
- Ma R H, Kong F X, Duan H T, et al, 2008. Spatio-temporal distribution of *Cyanobacteria* blooms based on satellite imageries in Lake Taihu, China[J]. Journal of Lake Sciences, 20(6): 687-694. [马荣华, 孔繁翔, 段洪涛, 等, 2008. 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, 20(6): 687-694.]
- Mantai K E, 1987. Energy relations in *Cladophora glomerata* from Lake Erie[J]. Journal of Great Lakes Research, 13(3): 279-284. DOI:10.1016/S0380-1330(87)71651-7
- Matthews M W, Odermatt D, 2015. Improved algorithm for routine monitoring of cyanobacteria and eutrophication in inland and near-coastal waters [J]. Remote Sensing of Environment, 156: 374-382. DOI:10.1016/j.rse.2014.10.010
- Qi M M, Yao X J, Liu S Y, et al, 2020. Dynamic change of Lake Qinghai shoreline from 1973 to 2018[J]. Journal of Lake Sciences, 32(2): 573-586. [祁苗苗, 姚晓军, 刘时银, 等, 2020. 1973—2018年青海湖岸线动态变化[J]. 湖泊科学, 32(2): 573-586.]
- Son Y B, Min J E, Ryu J H, 2012. Detecting massive green algae (*Ulva prolifera*) blooms in the Yellow Sea and East China Sea using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data [J]. Ocean Science Journal, 47(3): 359-375. DOI: 10.1007/s12601-012-0034-2
- Stevenson R J, Stoermer E F, 1982. Seasonal abundance patterns of diatoms on *Cladophora* in Lake Huron [J]. Journal of Great Lakes Research, 8(1): 169-183. DOI:10.1016/S0380-1330(82)71955-0
- Stumpf R P, Tomlinson M C, 2007. Remote sensing of harmful algal blooms [M] // Remote Sensing of Coastal Aquatic Environments. Dordrecht: Springer Netherlands: 277-296. DOI: 10.1007/978-1-4020-3100-7_12.
- Wang S N, Liu P, Li B, et al, 2024. Qinghai lake is the largest lake in China [J]. Forest & Humankind, (10): 94-99. [王淑宁, 刘鹏, 李斌, 等, 2024. 青海湖 中国第一大湖 [J]. 森林与人类, (10): 94-99.]
- Wang Y, Huang Y M, Yu C S, et al, 2012. Detection of temporal and spatial variation of Huangtai *algae* bloom using MODIS satellite data in Lake Ulansuhai from 2000 to 2010 [J]. Journal of Lake Sciences, 24(4): 519-527. [王艳, 黄永梅, 于长水, 等, 2012. 基于 MODIS 数据的 2000—2010 年乌梁素海“黄苔”时空变化 [J]. 湖泊科学, 24(4): 519-527.]
- Wen X L, Jing Y S, Zhang D, 2014. Review on application of common satellite sensors in monitoring *algal* blooms [J]. Environmental Science & Technology, 37(1): 81-87. [温新龙, 景元书, 张娣, 2014. 常见卫星传感器在蓝藻水华监测中的应用进展 [J]. 环境科学与技术, 37(1): 81-87.]
- Xing Q G, Hu C M, 2016. Mapping macroalgal blooms in the Yellow Sea and East China Sea using HJ-1 and Landsat data: Application of a virtual baseline reflectance height technique [J]. Remote Sensing of Environment, 178: 113-126. DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.065
- Xu J P, Zhang B, Li F, et al, 2008. Detecting modes of *Cyanobacteria* bloom using MODIS data in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 20(2): 191-195. [徐京萍, 张柏, 李方, 等, 2008. 基于 MODIS 数据的太湖藻华水体识别模式 [J]. 湖泊科学, 20(2): 191-195.]
- Xu W T, Shen Q, Zhang B, et al, 2024. Remote sensing identification and spatiotemporal change analysis of *Cladophora* with different morphologies [J]. Remote Sensing, 16(3): 602. DOI:10.3390/rs16030602
- Yang G S, Ma R H, Zhang L, et al, 2010. Lake status, major problems and protection strategy in China [J]. Journal of Lake Sciences, 22(6): 799-810. [杨桂山, 马荣华, 张路, 等, 2010. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略 [J]. 湖泊科学, 22(6): 799-810.]
- Yue A, Ji Y F, Liu H L, et al, 2019. Historical regional distribution specialties of algal bloom extraction from Yuqiao Reservoir via Landsat 8 and its driving factors [J]. Journal of Safety and Environment, 19(4): 1448-1455. [岳昂, 戢运峰, 刘红磊, 等, 2019. 基于 Landsat 8 影像的于桥水库藻华分布反演及其影响因素分析 [J]. 安全与环境学报, 19(4): 1448-1455.]
- Zhang J, Yao X J, Chu X D, et al, 2025. A novel method for monitoring *Cladophora* blooms in Qinghai Lake based on UAV imagery [J]. Ecological Informatics, 89: 103210. DOI:10.1016/j.ecoinf.2025.103210
- Zhang J, Yao X J, Duan H Y, et al, 2024. Extraction of *Cladophora* blooms in Qinghai Lake through the integration of Sentinel-2 MSI imagery and deep learning techniques [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 17: 19115-19129. DOI: 10.1109/JSTARS. 2024. 3447886
- Zhang Y, 2011. Eutrophication study for Yuqiao Reservoir [D]. Tianjin: Tianjin University. [张亚, 2011. 于桥水库富营养化研究 [D]. 天津: 天津大学.]
- Zhao Z J, Zhu H, Xiong X, et al, 2021. The identification of *Cladophora qinghaiensis* sp. nov., within the genus *Cladophora* collected from Qinghai Lake, China [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 45(3): 663-669. [赵志娟, 朱欢, 熊雄, 等, 2021. 采自青海湖的刚毛藻属一新种——青海刚毛藻 [J]. 水生生物学报, 45(3): 663-669.]
- Zheng W, Han X Z, Liu C, et al, 2010. Satellite remote sensing data monitoring “Huang Tai” *algae* bloom in Lake Ulansuhai, Inner Mongolia [J]. Journal of Lake Sciences, 22(3): 321-326. [郑伟, 韩秀珍, 刘诚, 等, 2010. 内蒙古乌梁素海“黄苔”暴发卫星遥感动态监测 [J]. 湖泊科学, 22(3): 321-326.]
- Zhou D, Zhang J, Luo J, et al, 2021. Analysis on the causes of Qinghai Lake water level changes and prediction of its future trends [J]. Ecology and Environmental Sciences, 30(7): 1482-1491. [周丹, 张娟, 罗静, 等, 2021. 青海湖水位变化成因分析及其未来趋势预估研究 [J]. 生态环境学报, 30(7): 1482-1491.]

Evaluation and Analysis of the Extraction Effect of *Cladophora* Blooms in Qinghai Lake based on the Spectral Indices of Sentinel-2 MSI Imagery

Zhang Juan¹, Duan Hongyu¹, Yao Xiaojun^{1,3}, Zhang Dahong¹, Jin Huian²

(1.College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University,

Lanzhou 730070, China;

2.College of Forestry Engineering, Gansu Forestry Technological College, Tianshui 741020, China;

3.Qinghai Lake Comprehensive Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Gangcha 812300, China)

Abstract: Qinghai Lake is the largest brackish lake in China and an important water resource for maintaining ecological security in the northeastern part of the Qinghai-Tibetan Plateau. In recent years, under the influence of climate warming and humidification, *Cladophora* blooms have appeared in some regions near the shore in the western and northern of the lake. Timely and accurate acquisition of the spatial distribution range of *Cladophora* blooms is crucial for the effective protection of the water environment of Qinghai Lake and the scientific management of the ecological problems caused by *Cladophora* blooms. Based on Sentinel-2 MSI remote sensing images and UAV orthophotos, the distribution information of *Cladophora* bloom was extracted by combining nine algal spectral indices with the typical region on the north side of the Buha River estuary as the sample area and comparing the extraction effect and applicability. On this basis, the outstanding spectral indices are used to extract the *Cladophora* blooms in the whole Qinghai Lake, and the optimal indices are selected to invert the distribution characteristics of the *Cladophora* blooms in Qinghai Lake in 2019 and analyze the change rule. The results show that: the six spectral indices, including SB, BD, NDVI, MCI, SABI and VB-FAH, have better extraction effects in typical regions ($Kappa > 0.9$), with lower misclassification and omission rates; the VB-FAH index has the optimal extraction effect in the whole lake ($Kappa = 0.88$), followed by the NDVI index ($Kappa = 0.86$), and the SABI and BD index had comparable extraction effects ($Kappa = 0.79$), and MCI index had the worst extraction effect ($Kappa = 0.67$). The maximum area of the *Cladophora* blooms in Qinghai Lake in 2019 was 4.10 km², and the minimum area was 1.79 km²; the area with the largest distribution of *Cladophora* blooms was the north side of the mouth of the Buha River, followed by the south side of the mouth of the Buha River, and the area of *Cladophora* blooms in the other regions was relatively small. Spatially, the *Cladophora* blooms migrated outward with the expansion of the Qinghai Lake area by wind force, and was distributed near the lake shore in the form of strips or patches. The results identified the VB-FAH index as the optimal method for extracting *Cladophora* blooms, providing a reference for long-term monitoring and extraction of *Cladophora* bloom distribution information.

Key words: *Cladophora* blooms; Sentinel-2 MSI; Spectral indices; Qinghai Lake