

doi: 10.6046/zrzyyg.2022048

引用格式: 许青云,李莹,谭靖,等. 基于高分六号卫星数据的红树林提取方法[J]. 自然资源遥感,2023,35(1):41-48. (Xu Q Y, Li Y, Tan J, et al. Information extraction method of mangrove forests based on GF-6 data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 41-48.)

基于高分六号卫星数据的红树林提取方法

许青云, 李 莹, 谭 靖, 张 哲

(北京航天泰坦科技股份有限公司, 北京 100070)

摘要: 红树林具有定期被潮水淹没的特点, 这个特点对于利用遥感技术手段提取红树林来说既是机遇也是挑战。为探究在任意潮汐条件下, 高分六号(GF-6)卫星数据的红边波段在红树林提取上的贡献度, 以海南省最大的红树林区域东寨港东南区为研究区域, 利用高分二号(GF-2)卫星数据获取标准样本点。以研究区的标准样本点和高分六号数据为基础, 构建典型地物反射光谱曲线图, 由植被强吸收的波段建立基线, 基线之上反射率的平均值定义了适用于高分六号卫星数据的潮间红树林指数(intertidal mangrove forest index, IMFI), 同时建立了红边归一化植被指数(red-edge normalized difference vegetation index, RENDVI), 这 2 种指数与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)等常用指数通过箱线图进行对比分析, 并基于 IMFI 和 RENDVI 构建决策树模型对研究区的典型红树林进行提取, 提取结果与高分二号遥感数据目视解译提取的样本进行精度验证。结果表明: ①红树林周期性被潮水淹没的特点, 使得潮间红树林的反射光谱曲线在水体与红树林的标准光谱曲线之间分布, 且相对分散; ②IMFI 和 RENDVI 可反映红边波段与近红外波段反射光谱的差异性, 能够更好地对潮间红树林、红树林和水体进行分离; ③基于 IMFI 和 RENDVI 构建的决策树模型可有效提取红树林分布信息, 其总体精度为 0.95, Kappa 系数为 0.90。红边波段的引入在红树林提取上发挥了重要作用, 具有很大的应用潜力, 为国产红边卫星数据在生态方面的应用提供参考。

关键词: 高分六号; 红边波段; 红树林指数; 反射光谱; 东寨港

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-035X(2023)01-0041-08

0 引言

红树林是生长在热带、亚热带低能海岸潮间带上部, 受周期性潮水浸淹, 以红树植物为主体的常绿灌木或乔木组成的潮滩湿地木本生物群落^[1], 红树林生态系统是由陆地向海洋过渡的特殊生态系统, 它对海岸带的环境保护、生态平衡以及生物多样性保护等具有重要的意义^[2]。然而, 自 20 世纪 50 年代以来, 在自然因素和人为干扰的双重驱动下, 红树林遭受了较大的破坏, 中国红树林湿地面临的主要威胁有污染、围垦、过度捕捞、采挖、基建、城市建设以及外来物种入侵^[3]。准确获取红树林的分布范围和面积一直是为红树林的有效管理、养护和生态修复工程建设提供理论依据和数据支撑的重要研究内容。

很多生长在浅滩和淤泥中的红树林常常无法进

行野外调查, 难以准确定位其边界。近年来, 随着卫星遥感技术的发展, 遥感数据凭借着宽覆盖、高时效、周期可比性等优势, 以及同时具有时间、空间和纹理等特征, 被广泛应用于提取红树林, 且逐步成为红树林监测的主要技术手段^[4-7]。近年来, 最大似然、随机森林和支持向量机等机器学习算法在红树林提取的过程中发挥了重要的作用^[2,8-9], 但是不确定的潮汐条件很难找到有代表性的训练样本, 利用植被定量遥感技术获取各种植被指数提取红树林的研究, 已被证实波谱信息在红树林提取中具有很高的贡献度^[10-14]。

在植被定量遥感中, 红边位置是绿色植被在波长 680~780 nm 之间反射光谱中最大斜率的点, 也是一阶导数光谱最大值所对应的波长。已有研究表明, 红边波段有利于植被叶绿素含量、生物量和相对含水量等的研究^[15], 能有效反映植被特有的光谱特性^[16-19]。目前除了高光谱传感器带有红边波段, 越

收稿日期: 2022-02-11; 修订日期: 2022-05-29

基金项目: 海南省重大科技计划项目“海量遥感数据库模块与生态监管集成模块代码开发”(编号: ZDKJ2019006)资助。

第一作者: 许青云(1989-), 女, 硕士, 高级工程师, 注册测绘师, 主要从事定量遥感、图像分析处理、3S 软件产品设计和应用研究。

Email: nishang_dale@126.com。

来越多的多光谱遥感卫星也设计了红边波段,德国 Rapid Eye、美国 WorldView-2/3 和欧空局 Sentinel-2,2018 年 6 月 2 日中国发射的高分六号(GF-6)卫星成为国内首个提供红边波段(710 nm 和 750 nm)用于植被观测的低轨光学遥感卫星^[17]。自高分六号卫星发射以来,对它的应用研究也逐步开展,但基于高分六号卫星数据的红边波段在红树林提取上的贡献度和应用价值方面鲜少有人研究。

大量研究指出,由于生长在潮间带的红树林具有受潮水周期性浸淹的特性,潮汐会严重影响红树林的遥感监测结果,其解决方案多是通过高潮和低潮间的影像进行综合分析^[20-22]。但针对中国南部多雨的气候无法准确获得多潮的数据,此种情况最好使用低潮期间采集的遥感影像,然而,由于卫星过境的预定时间内局部瞬时潮汐条件的不确定性,也很难获得低潮数据^[23-24],因此,如何通过任意潮汐条件的遥感数据识别红树林显得尤为重要。

鉴于此,为探究高分六号卫星数据的红边波段在红树林提取上的贡献度,通过研究典型地物反射光谱曲线,由植被强吸收的波段建立基线,基线之上反射率的平均值定义了适用于高分六号卫星数据的潮间红树林指数(intertidal mangrove forest index, IMFI),同时建立了融合红边波段的红边归一化植被指数(red-edge normalized difference vegetation index, RENDVI),这 2 种指数与归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和归一化水体指数(normalized difference water index, NDWI)等常用指数通过箱线图进行对比分析,并基于 IMFI 和 RENDVI 构建决策树模型对海南省最大的红树林区域东寨港东南部的典型红树林进行提取,最后通过总体精度和 Kappa 系数对提取结果进行分析验证,为国产红边卫星数据在生态方面的应用提供参考。

1 研究区及数据源

1.1 研究区概况

研究区选取了海南省东寨港东南部的一个典型区域,东寨港位于海南岛的东北部(E110°32'0"~110°37'0",N19°51'0"~20°1'0")(如图 1 所示),地处热带北缘,属于热带季风气候,年平均气温为 23.8℃,年降水量为 1 700~1 933 mm,5—9 月为雨季。东寨港于 1986 年升级为国家级红树林自然保护区,是中国第一个国家级红树林自然保护区,1992 年被列入国际重要湿地名录,是拉姆萨尔公约规定的国际重

要湿地,总面积为 3 338 hm²,2019 年红树林面积约 1 771 hm²。



图 1 研究区位置
Fig.1 Location of study area

1.2 数据选取

高分六号卫星是一颗三轴稳定的对地观测卫星,于 2018 年 6 月 2 日成功发射,是我国第一颗设置红边波段的多光谱遥感卫星,它配置了 2 m 全色/8 m 多光谱高分辨率传感器(PMS)和 16 m 多光谱中分辨率宽幅传感器(WFV),其中 WFV 传感器观测幅宽为 800 km。高分六号卫星可以获取从海岸波段到近红外波段的多光谱遥感数据,具有多传感器在光谱-空间-时间等多维综合观测信息方面的优势,具有高空间分辨率、宽覆盖、高质量成像、高效能成像、高国产化率等特点,已成为我国农业生产监测、自然资源调查、农村人居环境改善、防灾减灾和公共安全等遥感业务领域的主要数据源之一^[25]。

为了准确提取红树林的遥感信息,选择高分六号卫星数据时考虑:在春夏季,生长在潮间带上以互花米草等为主的植物生长旺盛,叶片叶绿素含量较高,其光谱反射率和红树林的比较接近,在光谱曲线中难以找到区分的波段,因此容易引起两者的混淆;而在秋冬季,以互花米草等为主的植物叶片枯黄,其光谱反射率和红树林有着较大的差异,能够较准确地将两者区分开来^[26]。因此,本研究选取冬季(2021 年 1 月 14 日)在研究区域无云量覆盖的高分六号卫星数据。为了准确获取验证样本点,通过中国海事服务网(www.cnss.com.cn)查询与东寨港距离最近且具有潮汐表数据的铺前港作为潮汐信息获取的依据,最终选择低潮时、云量覆盖率低的(2020 年 8 月 10 日)高分二号(GF-2)卫星数据。综上,本研究选取的研究数据为空间分辨率 16 m 的 GF-6 WFV 卫星数据;实验和验证样本数据为空间分辨率 1 m 的 GF-2 PMS 卫星数据,选取数据的主要参数信息详见表 1。

表 1 卫星数据描述

Tab.1 Description of satellite data

卫星	传感器	采集时间	产品序列号	11:00 对应潮高/cm	12:00 对应潮高/cm
GF-2	PMS1	2020-08-10 11:29:34	4982331	113	130
		2020-08-10 11:29:37	4982332		
		2020-08-10 11:29:34	4982394		
	PMS2	2020-08-10 11:29:37	4982395		
GF-6	WV	2021-01-14 11:44:49	1120071535	181	164

1.3 样本点构建

1.3.1 标准样本点

为了便于比较研究区内典型地物的反射光谱曲线特征,基于高空间分辨率的高分二号卫星数据,通过目视解译在研究区内针对典型地物选取了纯像元标准样本点,其中水体 31 个样本点,陆生植被 59 个样本点,裸地 17 个样本点,草地 25 个样本点,潮间红树林 56 个样本点,红树林 50 个样本点。

1.3.2 验证样本点

为了更好地验证红树林提取的准确性,一共采取了 2 种验证方式:一种是通过制图的方式进行典型区域的空间分布对比分析;一种是基于定量的方式通过混淆矩阵选取应用较广泛的总体精度、Kappa 系数、生产者精度和用户精度进行验证。针对第二种定量的验证手段,利用目视解译在高分二号高分辨率遥感数据中随机均匀地选择红树林 93 个、水体 97 个样本点作为检验样本点进行精度评价。

2 研究方法

2.1 总体技术路线

本研究的总体技术路线主要是高分卫星数据预处理、样本点构建、指数构建、精度验证以及制图分析,具体如图 2 所示。

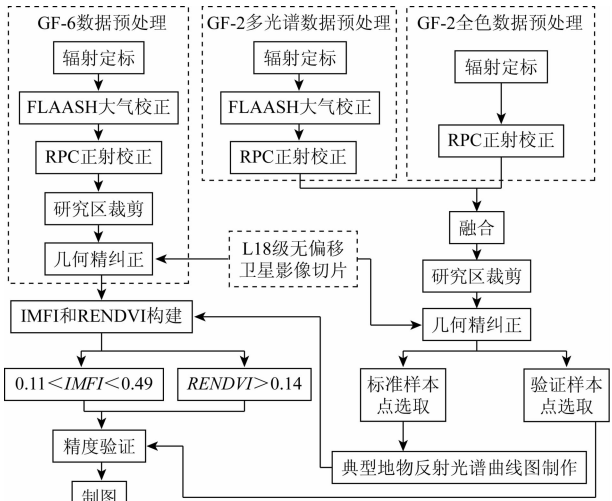


图 2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

2.2 高分卫星数据预处理

高分六号卫星数据的预处理包括辐射定标、FLAASH 大气校正、RPC 正射校正、研究区裁剪和几何精纠正。高分二号卫星数据多光谱影像的预处理包括辐射定标、FLAASH 大气校正和 RPC 正射校正; 全色影像的预处理包括辐射定标和 RPC 正射校正,预处理后的全色和多光谱影像进行融合、研究区裁剪和几何精纠正。其中,几何精纠正的辅助数据基于 L18 级无偏移的卫星影像切片数据。

2.3 红树林提取指数构建

2.3.1 典型地物反射光谱曲线构建

为了便于比较研究区内典型地物的反射光谱特征,基于标准样本点构建典型地物反射光谱曲线,如图 3 所示。图 3 为研究区内潮间红树林、红树林、陆生植被、裸地、水体和滩涂典型地物平均反射光谱曲线。红树林与陆生植被光谱曲线具有典型的植被反射率特征,红树林由于处于湿地环境,其红光波段和红边波段 1 的反射率明显低于陆生植被; 潮间红树林由于具有周期性被潮水淹没的特点,所有样本点在高潮时其反射光谱曲线并未能够很好拟合,分布在红树林与水体反射光谱曲线之间(图 3 中的潮间

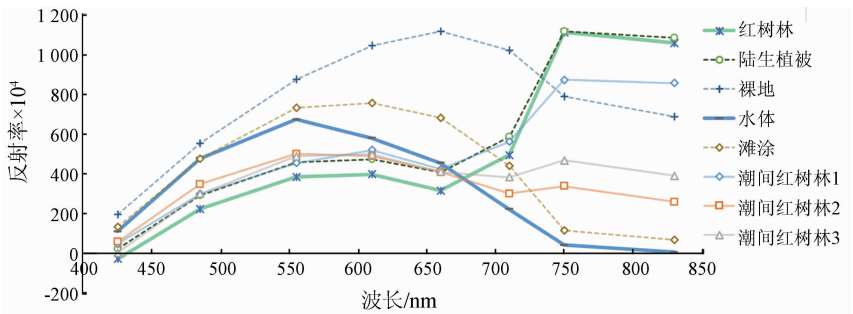


图 3 研究区典型地物反射光谱曲线

Fig. 3 Reflectance spectral curves of typical land cover types in study area

红树林 1—3 分别为选取的典型潮间红树林样本),虽然反射光谱总体上表现出了植被的特征,但因为水体的影响,弱化了其植被特征趋势,当潮高达到一定值,NDVI 将接近于 0,红光波段和近红外波段之间的差异显著降低,但经观察高分六号卫星数据增加的 2 个红边波段仍然出现了反射峰;滩涂和水体的可见光区域反射率高于植被,而红边波段和近红外波段区域反射率则明显低于植被。

2.3.2 常用植被和水体指数

常用于分离植被和水体的指数有 NDVI^[27]、NDWI^[28]和绿色归一化植被指数 (green normalized difference vegetation index, GNDVI)^[29],公式分别为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R}, \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{\rho_G - \rho_{NIR}}{\rho_G + \rho_{NIR}}, \quad (2)$$

$$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_G}{\rho_{NIR} + \rho_G}, \quad (3)$$

式中: ρ_G 为绿光波段的反射率; ρ_R 为红光波段的反射率; ρ_{NIR} 为近红外波段的反射率。

2.3.3 IMFI 构建

由于红树林具有周期性被潮水淹没的特点,在高潮时,其反射光谱曲线分布在红树林与水体反射

光谱曲线之间,无法很好拟合,且极大损失了植被光谱特性。通过典型地物反射光谱曲线的研究,发现高分六号卫星数据增加的 2 个红边波段,使得被潮水淹没的红树林能够在红光波段与近红外波段之间形成波峰,但其波峰并不十分明显到具备通过某种植被指数能够区分潮间红树林和水体的能力。

经研究,随着波段的增加,利用基线理论建立各种指数的研究也逐步增加,例如最大叶绿素指数^[30]、浮藻指数^[31]和浮游植物指数^[32]等。但是,大多是从水面上提取浮游植物,而不是从被水淹没的植被中进行植被提取,且用于建立这些指数的波段在高分六号卫星数据中不存在,综合来看这些指数并不适用于高分六号卫星数据,但是基线理论却是很有价值的理论基础。

针对本研究的数据源及应用场景,基于基线理论提出了一种适用于高分六号卫星数据的 IMFI。水体和红树林 2 条反射波谱曲线在红光波段和红边波段 1 之间有交点,通过计算该交点的波长和反射率作为基线的起点,水体在近红外波段的反射率作为基线的终点,确定基线后分别计算红边波段 1 和红边波段 2 在基线上的反射率 (如图 4 所示)。最后利用红边波段 1、红边波段 2 和近红外波段与基线之间反射率距离的均值定义为 IMFI,其具体计算公式为:

$$IMFI = [(\rho_{RE1} - \rho_{BRE1}) + (\rho_{RE2} - \rho_{BRE2}) + (\rho_{NIR} - \rho_{BNIR})] / 3, \quad (4)$$

$$\rho_{BRE1} = \rho_{BS} + (\rho_{NIR} - \rho_{BS})(710 - W_{BS}) / (830 - W_{BS}), \quad (5)$$

$$\rho_{BRE2} = \rho_{BS} + (\rho_{NIR} - \rho_{BS})(750 - W_{BS}) / (830 - W_{BS}), \quad (6)$$

$$\rho_{BNIR} = \rho_{NIR(W均)}, \quad (7)$$

式中: ρ_{BS} 为基线起点的反射率,经计算其对应数值为 375.704 314 1; W_{BS} 为基线起点的中心波长,经计算其对应波长为 676.815 617 7 nm; $\rho_{NIR(W均)}$ 为水

体样本在近红外波段反射率的均值; ρ_{BNIR} 为基线终点的反射率; ρ_{BRE1} 为红边波段 1 在基线上的反射率; ρ_{BRE2} 为红边波段 2 在基线上的反射率; ρ_{RE1} 为红边波段 1 的反射率; ρ_{RE2} 为红边波段 2 的反射率。

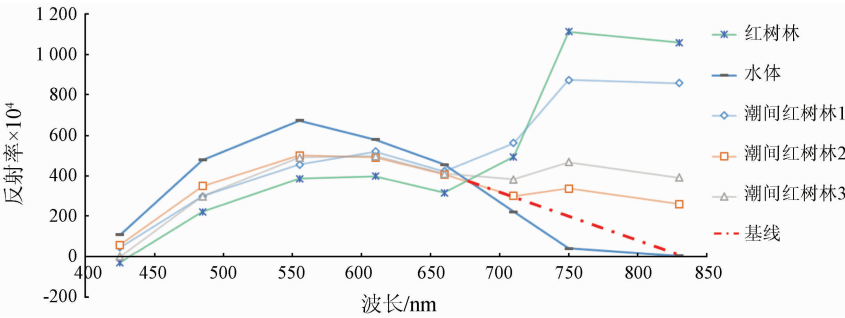


图 4 构建 IMFI 的基线理论图

Fig. 4 Baseline theoretical diagram of building IMFI

2.3.4 RENDVI 构建

由研究区典型地物反射光谱曲线可以看到潮间红树林和红树林在红边波段 1 和近红外波段呈现下

降趋势,被潮水覆盖的红树林潮高越高,红树林的反射率受水体的影响越大,其反射光谱曲线的变化趋势越接近于水体。NDVI 是通过近红外和红光波段

反射光谱之间的变化来体现植被特征的,因此 NDVI 不适用于具有湿地环境特征的红树林的准确提取。经研究典型地物反射光谱曲线发现,在高潮时红边波段 1 和红光波段之间呈明显变化趋势,因此通过红边波段 1 和红光波段构建 $RENDVI$,其具体计算公式为:

$$RENDVI = \frac{\rho_{RE1} - \rho_R}{\rho_{RE1} + \rho_R} \quad (8)$$

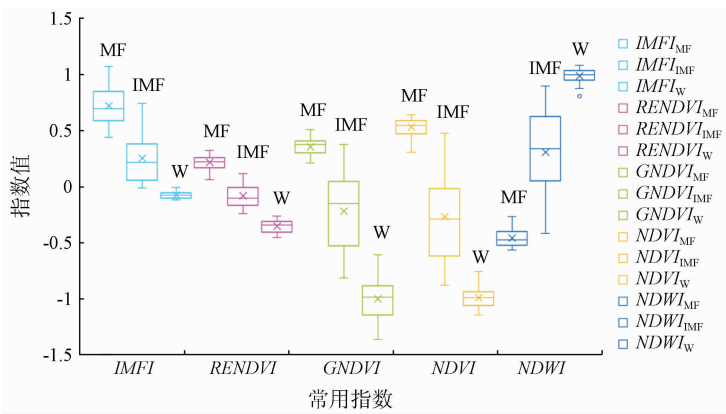


图 5 红树林、潮间红树林和水体各指数值的箱线图
Fig.5 Boxplot of different index values of mangrove forest, intertidal mangrove forest and water

从图 5 中可知,所有潮间红树林样本点的 $IMFI$ 值均高于水体的 $IMFI$ 值,且潮间红树林的最小值基本等于水体最大值,红树林和潮间红树林样本点的 $IMFI$ 值混在一起的较多,由此可见, $IMFI$ 是潮间红树林和水体分离的优选指标,但并不适用于红树林和潮间红树林分离,但 $RENDVI$ 却能够较好地对红树林和潮间红树林进行分离。同时,可以看到红树林、潮间红树林和水体样本点在 $GNDVI$, $NDVI$ 和 $NDWI$ 中的值都很明显混在一起,这足以显示出 $IMFI$ 和 $RENDVI$ 在潮间红树林与水体分离、红树林和潮间红树林分离中对比其他常用指数具有比较好的优势。

2.5 决策树模型构建

首先通过 $0.11 < IMFI < 0.49$ 条件将水体剔除,保留潮间红树林区域;再通过 $RENDVI > 0.14$ 条件

2.4 $IMFI$ 和 $RENDVI$ 与常用指数定量比较

为了更好地通过定量的方式比较 $IMFI$ 和 $RENDVI$ 与常用指数区分红树林、潮间红树林和水体的能力,对研究区高分六号卫星数据构建 $IMFI$, $RENDVI$, $GNDVI$, $NDVI$ 和 $NDWI$ 指数,通过红树林、潮间红树林和水体类型的所有样本点对这 5 种指数值进行提取,并构建各指数箱线图,如图 5 所示,图 5 中: MF 为红树林; IMF 为潮间红树林; W 为水体。

提取红树林区域,2 个区域取并集即为最终的红树林区域。其中, $IMFI$ 和 $RENDVI$ 的阈值是基于样本数据经过反复试验确定。

3 结果与分析

为了更好地分析研究区域红树林提取的精度,从空间定性和定量 2 个方面对提取结果进行精度分析与评价。

3.1 空间定性精度分析

利用高分二号数据与红树林提取结果通过制图的手段进行红树林空间分布分析,并选取了 2 个典型区域(a 区域和 b 区域)通过局部放大对结果进行定性分析,提取结果如图 6 所示。

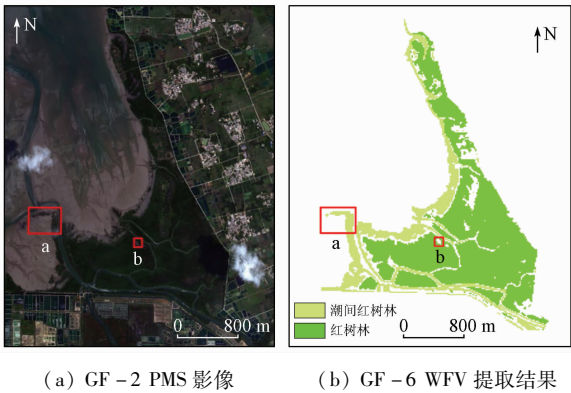


图 6-1 红树林提取结果
Fig.6-1 Mangrove extraction results

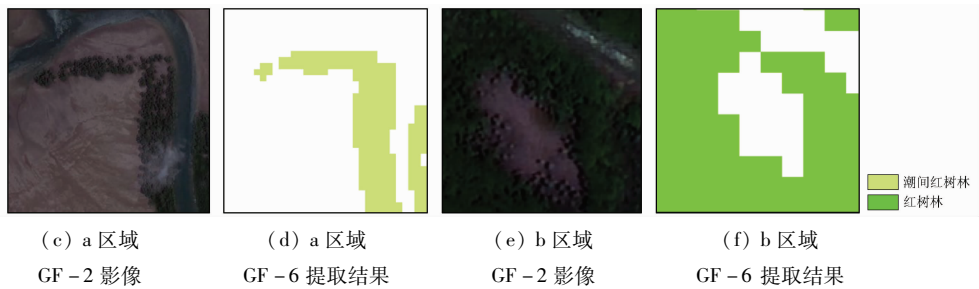


图 6-2 红树林提取结果

Fig. 6-2 Mangrove extraction results

对比 a 区域提取结果可以看出通过本文的提取方法可以很好地将潮间红树林识别出来,其边界轮廓得到很好的贴合;对比 b 区域提取结果可以看出对于红树林区域内的空洞也能够很好地识别,如果是人工勾画的方式,这种空洞经常性被忽略。空间定性分析结果表明本文的研究方法能够很好地提取红树林区域,且极大地凸显了利用遥感技术手段充分保留数据客观性的优势。

3.2 定量精度分析

基于验证样本点对研究区红树林提取结果进行定量精度分析,利用混淆矩阵评价红树林提取结果,评价结果如表 2 所示。通过本文方法对红树林提取的总体精度达到 95% ,Kappa 系数为 0. 90。

表 2 红树林提取精度统计

Tab.2 Mangrove extraction accuracy statistics

覆盖类型	分类结果			
	红树林	其他	总计	生产者精度/%
红树林	89	4	93	96
其他	5	91	96	95
总计	94	95	189	—
用户精度/%	95	96	—	—

4 结论与讨论

以高分六号卫星数据为数据源,充分利用高分二号数据高空间分辨率的特点,以定量遥感理论为基础并辅以基线理论,构建适合高分六号卫星数据的研究区红树林提取指数,结合决策树模型最终实现对研究区的潮间红树林和红树林的准确提取。主要结论如下:

1)红树林周期性被潮水淹没的特点使得潮间红树林的光谱曲线在水体与红树林的标准光谱曲线之间分布,且相对分散。

2)IMFI 和 RENDVI 可反映红边波段与近红外波段反射光谱的差异性,能够更好地对潮间红树林、红树林和水体进行分离。其中 IMFI 能够有效分离潮间红树林和水体,有利于解决高潮时红树林被水

淹没无法准确识别的问题;RENDVI 利用红边波段的加入,解决红树林在提取时由于湿地特性其近红外和红光波段之间差异性降低无法准确识别的问题。

3)基于 IMFI 和 RENDVI 构建的决策树模型可有效提取红树林分布信息,其总体精度为 95% ,Kappa 系数为 0. 90。

本研究的误差主要受数据源光谱波段信息量和空间分辨率信息贡献的限制,事实证明,该方法可有效从高潮卫星遥感数据中提取红树林。但是,算法的普适性一直是定量遥感界的难题,尽管该红树林提取方法的特征阈值在时空拓展性方面有待进一步研究,后续需要进一步通过选取多时空的数据进行混合验证。但针对本文的研究区域,足以表明高分六号卫星数据因红边波段的引入在红树林提取上发挥了重要作用,具有很大的应用潜力,本文的研究思路及方法可以为国产红边卫星数据在生态方面的应用提供参考。

参考文献 (References) :

[1] 张乔民,隋淑珍. 中国红树林湿地资源及其保护[J]. 自然资源学报,2001,16(1):28-36.

Zhang Q M, Sui S Z. The mangrove wetland resources and their conservation in China[J]. Journal of Natural Resources,2001,16(1):28-36.

[2] 章 恒,王世新,周 艺,等. 多源遥感影像红树林信息提取方法比较[J]. 湿地科学,2015,13(2):145-152.

Zhang H, Wang S X, Zhou Y, et al. Comparison of different methods of mangrove extraction from multi-source remote sensing images[J]. Wetland Science,2015,13(2):145-152.

[3] 但新球,廖宝文,吴照柏,等. 中国红树林湿地资源、保护现状和主要威胁[J]. 生态环境学报,2016,25(7):1237-1243.

Dan X Q, Liao B W, Wu Z B, et al. Resources, conservation status and main threats of mangrove wetlands in China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2016,25(7):1237-1243.

[4] Heumann B W. An object-based classification of mangroves using a hybrid decision tree-support vector machine approach[J]. Remote Sensing,2011,3(11):2440-2460.

[5] Cardenas N Y, Joyce K E, Maier S W. Monitoring mangrove forests: Are we taking full advantage of technology? [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2017,

63(7):1-14.

[6] Heumann B W. Satellite remote sensing of mangrove forests: Recent advances and future opportunities [J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 2011, 35(1): 87-108.

[7] Wang T, Zhang H S, Lin H, et al. Textural - spectral feature - based species classification of mangroves in Mai Po Nature Reserve from Worldview - 3 imagery [J]. Remote Sensing, 2016, 8(1): 24.

[8] Mondal P, Liu X, Fatoyinbo T E, et al. Evaluating combinations of Sentinel - 2 data and machine - learning algorithms for mangrove mapping in West Africa [J]. Remote Sensing, 2019, 11(24): 2928.

[9] 蒙良莉. 基于哨兵多源遥感数据的红树林信息提取算法研究 [D]. 南宁: 南宁师范大学, 2020.

Meng L L. Mangrove information extraction algorithm based on multi - source remote sensing data of sentinel [D]. Nanning: Nanning Normal University, 2020.

[10] Jia M M, Wang Z M, Wang C, et al. A new vegetation index to detect periodically submerged mangrove forest using single - tide Sentinel - 2 imagery [J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 2043.

[11] Farid M F. Comparison of different vegetation indices for assessing mangrove density using Sentinel - 2 imagery [J]. International Journal of GEOMATE, 2018, 14(45): 42-51.

[12] Baloloy A B, Blanco A C, Ana R R C S, et al. Development and application of a new mangrove vegetation index (MVI) for rapid and accurate mangrove mapping [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 166: 95-117.

[13] Manna S, Raychaudhuri B. Retrieval of leaf area index and stress conditions for Sundarban mangroves using Sentinel - 2 data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(3): 1019-1039.

[14] 徐芳, 张英, 翟亮, 等. 基于 Sentinel - 2 的潮间红树林提取方法 [J]. 测绘通报, 2020(2): 49-54.

Xu F, Zhang Y, Zhai L, et al. Extraction method of intertidal mangrove by using Sentinel - 2 images [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(2): 49-54.

[15] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status [J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(7): 1459-1470.

[16] 王利军, 郭燕, 王来刚, 等. GF6 卫星红边波段对春季作物分类精度的影响 [J]. 河南农业科学, 2020, 49(6): 165-173.

Wang L J, Guo Y, Wang L G, et al. Impact of red - edge waveband of GF6 satellite on classification accuracy of spring crops [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(6): 165-173.

[17] 梁继, 郑镇炜, 夏诗婷, 等. 高分六号红边特征的农作物识别与评估 [J]. 遥感学报, 2020, 24(10): 1168-1179.

Liang J, Zheng Z W, Xia S T, et al. Crop recognition and evaluation using red edge features of GF - 6 satellite [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(10): 1168-1179.

[18] 姚保民, 王利民, 王铎, 等. 高分六号卫星 WFV 新增波段对农作物识别精度的改善 [J]. 卫星应用, 2020(12): 31-34.

Yao B M, Wang L M, Wang D, et al. Improvement of the accuracy of crop recognition by the newly added spectrum of the GF - 6 satellite WFV [J]. Satellite Application, 2020(12): 31-34.

[19] 张沁雨, 李哲, 夏朝宗, 等. 高分六号遥感卫星新增波段下的树种分类精度分析 [J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(10): 1619-1628.

Zhang Q Y, Li Z, Xia C Z, et al. Tree species classification based on the new bands of GF - 6 remote sensing satellite [J]. Journal of Geo - Information Science, 2019, 21(10): 1619-1628.

[20] Xia Q, Qin C Z, Li H, et al. Mapping mangrove forests based on multi - tidal high - resolution satellite imagery [J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1343.

[21] Zhang X H, Treitz P M, Chen D M, et al. Mapping mangrove forests using multi - tidal remotely - sensed data and a decision - tree - based procedure [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2017, 62: 201-214.

[22] Rogers K, Lymburner L, Salum R, et al. Mapping of mangrove extent and zonation using high and low tide composites of Landsat data [J]. Hydrobiologia, 2017, 803(1): 49-68.

[23] Jia M M, Wang Z M, Zhang Y Z, et al. Landsat - based estimation of mangrove forest loss and restoration in Guangxi Province, China, influenced by human and natural factors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(1): 311-323.

[24] Jia M M, Wang Z M, Zhang Y Z, et al. Monitoring loss and recovery of mangrove forests during 42 years: The achievements of mangrove conservation in China [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 73: 535-545.

[25] 陆春玲, 白照广, 李永昌, 等. 高分六号卫星技术特点与新模式应用 [J]. 航天器工程, 2021, 30(1): 7-14.

Lu C L, Bai Z G, Li Y C, et al. Technical characteristic and new mode applications of GF - 6 satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(1): 7-14.

[26] 张威, 陈正华, 王纪坤. 广西北部湾海岸带红树林变化的遥感监测 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2015, 40(6): 1570-1576.

Zhang W, Chen Z H, Wang J K. Monitoring the areal variation of mangrove in Beibu Gulf coast of Guangxi China with remote sensing data [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2015, 40(6): 1570-1576.

[27] Pettorelli N, Ryan S, Mueller T, et al. The normalized difference vegetation index (NDVI): Unforeseen successes in animal ecology [J]. Climate Research, 2011, 46(1): 15-27.

[28] 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.

[29] Gitelson A A, Merzlyak M N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves [J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(12): 2691-2697.

[30] Gower J, Hu C M, Borstad G, et al. Ocean color satellites show extensive lines of floating sargassum in the Gulf of Mexico [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(12): 3619-3625.

[31] 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.

[32] Gao B C, Li R R. FVI - A floating vegetation index formed with three near - IR channels in the 1.0 ~ 1.24 μm spectral range for the detection of vegetation floating over water surfaces [J]. Remote Sensing, 2018, 10(9): 1421.

Information extraction method of mangrove forests based on GF-6 data

XU Qingyun, LI Ying, TAN Jing, ZHANG Zhe
(Beijing Aerospace TITAN Technology Co. Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Mangrove forests are periodically inundated by tidal water. This characteristic opens up an opportunity but also poses a challenge for the information extraction of mangrove forests using remote sensing technology. To explore the contribution of the red-edge band of GF-6 satellite data in information extraction of mangrove forests under the condition of random tides, this study investigated the southeastern Dongzhaigang area – the largest mangrove forest area in Hainan Province and obtained standard samples using the GF-2 satellite data. The reflectance spectral curves of typical surface features were constructed based on the standard samples and the GF-6 satellite data. Then, a baseline was established based on the bands strongly absorbed by vegetation, and the intertidal mangrove forest index (IMFI) applicable to the GF-6 satellite data was defined using the average reflectance of bands above the baseline. Meanwhile, the red-edge normalized difference vegetation index (RENDVI) was also established. The two indices were compared with commonly used indices, such as the normalized difference vegetation index (NDVI) and the normalized difference water index (NDWI), using box-whisker plots. Then, using the decision tree model constructed based on IMFI and RENDVI, information on typical mangrove forest in the study area were extracted. The precision of the extraction results was verified through comparison with visual interpretation results of the samples extracted from the GF-2 satellite data. The results show that: ① Because mangrove forests are periodically inundated by tidal water, the reflectance spectral curves of intertidal mangrove forests were relatively scattered between the standard spectral curves of water bodies and mangrove forests; ② IMFI and RENDVI can reflect the differences in the reflectance spectra of the red-edge and near-infrared bands and thus effectively separated the intertidal mangrove forests, mangrove forests, and water bodies; ③ The decision tree model constructed based on IMFI and RENDVI can effectively extract the distribution information of the mangrove forests, with an overall accuracy of 0.95 and a Kappa coefficient of 0.90. The introduction of the red-edge band plays an important role in the information extraction of mangrove forests and has great potential for application. This study can be used as a reference for the ecological applications of red-edge data from domestic satellites.

Keywords: GF-6 satellite; red-edge band; mangrove forest index; reflectance spectrum; Dongzhaigang
(责任编辑: 陈 理)