

【技术与方法】

# 基于无人机多光谱影像的海滨景区浒苔 信息提取研究

李冬雪<sup>1,2</sup>, 高志强<sup>1,2</sup>, 尚伟涛<sup>1</sup>, 姜晓鹏<sup>1</sup>, 宋德彬<sup>1,2</sup>, 张媛媛<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 2007 年以来, 黄海绿潮(浒苔)灾害连年大规模暴发, 对山东半岛近岸海域生态环境造成严重影响, 大量靠岸浒苔若处置不及时会腐烂发臭, 严重影响海滨景区旅游业及附近居民健康。为了提高绿潮灾害重点区域遥感监测的精度、提升靠岸浒苔预警的准确性和浒苔清理的工作效率, 本研究利用无人机航拍的高精度影像对乳山市银滩海滨景区绿潮灾害进行监测, 结合地物光谱仪实地测量浒苔和岸边植被的光谱特征, 通过四种植被指数对浒苔和岸边植被进行光谱分析和识别对比, 验证不同植被指数下浒苔和岸边植被的提取情况, 并基于提取方法对靠岸浒苔生物量进行估算。研究表明: 在红边波段, 浒苔和岸边植被具有明显的可区分性, 使其可以利用  $MTCI$  (MERIS terrestrial chlorophyll index)、 $NDVI_{redge}$ 、 $SR_{redge}$ 、 $MSR_{redge}$  四种植被指数与岸边植被进行区分,  $MTCI$  区分提取效果最好, 精度可达 91.3%, 其次是  $SR_{redge}$ 、 $NDVI_{redge}$ 、 $MSR_{redge}$ , 提取精度分别为 85.3%、83.8%、81.2%; 利用  $MTCI$  指数建立的生物量估算模型, 估算的 300 m 研究区内靠岸浒苔约 600 t, 为海滨景区绿潮灾害动态监测及清理工作提供有效方法。

**关键词:** 浒苔; 海滨景区; 无人机; 植被指数; 生物量

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2020)03-0438-09

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2020.03.018

## Information extraction of *Ulva Prolifera* from coastal landscape using UAV m ultispectral remote sensing images

LI Dong-xue<sup>1,2</sup>, GAO Zhi-qiang<sup>1,2</sup>, SHANG Wei-tao<sup>1</sup>, JIANG Xiao-peng<sup>1</sup>,  
SONG De-bin<sup>1,2</sup>, ZHANG Yuan-yuan<sup>1,2</sup>

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Since 2007, green tides (also called *Ulva prolifera*) occurred every summer in the Yellow Sea, causing ecological problems in the coastal environment of Shandong Peninsula. A large number of *Ulva prolifera* on shore will rot and stink if not handled in time, which seriously affects the tourism and the health of residents in coastal landscape. In order to improve the accuracy of monitoring green tide disasters and to improve the efficiency of the cleaning up and disposal of *Ulva prolifera* at key prevention and control area, In this study, the high-precision image of UAV is used to monitor the green tide disaster in Yintan landscape of Rushan City. With the spectral characteristics of *Ulva prolifera* and coastal vegetation measured by spectroradiometer, four vegetation indices were used to analyze and identify the *Ulva prolifera* and coastal vegetation, and to verify the extraction of *Ulva prolifera* and coastal vegetation under different vegetation indices, and based on this extraction method, the biomass of coastal green tide algae was estimated. The re-

收稿日期: 2018-11-26, 修订日期: 2019-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41876107); 山东省联合基金项目(U1706219); 科技部基础支撑项目(2014FY210600); 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目(2016ASKJ02)

作者简介: 李冬雪(1987-), 女, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋灾害监测, E-mail: dxli@yic.ac.cn

通讯作者: 高志强(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为近海灾害、海岸带信息及海岸带遥感应用等领域, E-mail: zqgao@yic.ac.cn

sults show that in the red-edge band *Ulva prolifera* and coastal vegetation can be distinguished. *MTCI* (MERIS terrestrial chlorophyll index) is more suitable with the accuracy of 91.3%, followed by  $SR_{redge}$ ,  $NDVI_{redge}$  and  $MSR_{redge}$ , with the accuracy of 85.3%, 83.8% and 81.2%, respectively; Estimation model of biomass based on *MTCI* index showed that about 600 tons of *Ulva prolifera* were estimated in 300 m study area. An effective method for dynamic monitoring and cleaning up of green tide disaster is provided.

**Key words:** *Ulva prolifera*; coastal landscape; UAV; vegetation index; biomass

我国黄海海域绿潮灾害已经连续暴发 12 a, 漂浮型的浒苔 (*Ulva prolifera*) 是该绿潮藻的优势种<sup>[1-2]</sup>。6月下旬到8月份,大规模的浒苔在风及潮汐作用下在山东半岛南部靠岸,如果处置不及时,会严重影响沿海地区的生态环境,尤其是对青岛、烟台、威海等地的海滨景区,引起了社会各界的关注,甚至造成巨大经济损失<sup>[3]</sup>。

卫星遥感观测时间跨度大,观测范围广,数据易获取,是从宏观上监测绿潮灾害的主要数据来源<sup>[4]</sup>。已有学者利用卫星遥感获取的 Landsat TM、MODIS、GF-1 WFV、小卫星等数据对黄海绿潮生消过程的时空变化分布特征及近海绿潮灾害监测等方面进行研究工作<sup>[5-9]</sup>。卫星遥感在绿潮监测方面发挥了重要作用,但其精度有限,易受天气状况影响,尤其是对于小范围绿潮重点防控区域,卫星遥感的时间和空间分辨率无法为实时监测和具体打捞及清理工作提供有力的支撑。

无人机航拍具有高清晰、高效灵活、成本低、实时传输等特点,已经在生态环境监测、自然灾害监测和精准农业等方面得到了很好的应用<sup>[10-12]</sup>。在绿潮灾害监测方面也发挥了重要作用,已经实现利用无人机监测小范围绿潮的分布情况<sup>[13]</sup>,并结合卫星遥感以及现场调查数据估算了黄海绿潮初始生物量<sup>[14]</sup>,实现了利用无人机航拍数据辅助船只进行漂浮绿潮的打捞工作<sup>[15]</sup>。目前,基于无人机多光谱数据对海滨景区浒苔与岸边植被进行区分提取方法的研究很少。

本文通过无人机获取的多光谱影像,分析浒苔和岸边植被的光谱特征,并进一步分析 *MTCI*,  $NDVI_{redge}$ ,  $SR_{redge}$ ,  $MSR_{redge}$  四种植被指数对浒苔与岸边植被的区分提取情况,检验不同指数提取的可靠性,并基于浒苔的提取方法建立生物量估算模型,为海滨景区绿潮灾害的预警和绿潮藻的清理工作提供有力的指导方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于威海市乳山银滩(图1),地理坐标为:121°47′05″E, 36°53′27″N。该区域为乳山市重要的旅游度假的胜地。自2007年绿潮灾害以来,每年都有大量绿潮堆积在景区海滩<sup>[16-18]</sup>,景区景观遭到严重破坏,需投入大量人力、物力进行收集、打捞和处理。据威海市海洋与渔业局2018年数据显示,2016年处置的浒苔达到峰值,达47万t。如此大规模的浒苔若处置不及时,堆积的浒苔易腐烂发出恶臭,对景区旅游造成显著影响。

### 1.2 数据获取及处理

2018年7月7日13点至15点之间,对研究区实施了正射图像采集,大疆M600(图1c)为本研究所用成像系统的搭载平台,其搭载的微型多光谱成像仪ADC Micro拍摄的影像空间分辨率通过同步高清照相机数据融合可达10cm,主要参数及波段信息详见表1。数据通过影像自带的GPS定位信息在Pix4Dmapper软件上进行空间坐标校正并生成正射影像。利用PixelWrench2软件转换为TIF格式,利用ENVI 5.3软件将正射影像投影为WGS1984\_UTM51N坐标系统并进行辐射定标。

同一时间段内,利用USB4000微型光纤光谱仪,其探测范围是200~1100nm,测得靠岸浒苔和岸边植被的光谱信息。测量时选取无人干扰区域的浒苔以及大面积分布具有代表性的岸边植被作为测量目标,尽量减少其他地物对测量的影响。测量探头距离地面1.3m,测量人员穿黑色工作服,每种地物每个测量点测量5次,数据导入MATLAB中取5次测量均值并绘制光谱曲线。每次测量前均对准标准参考板进行定标校准。

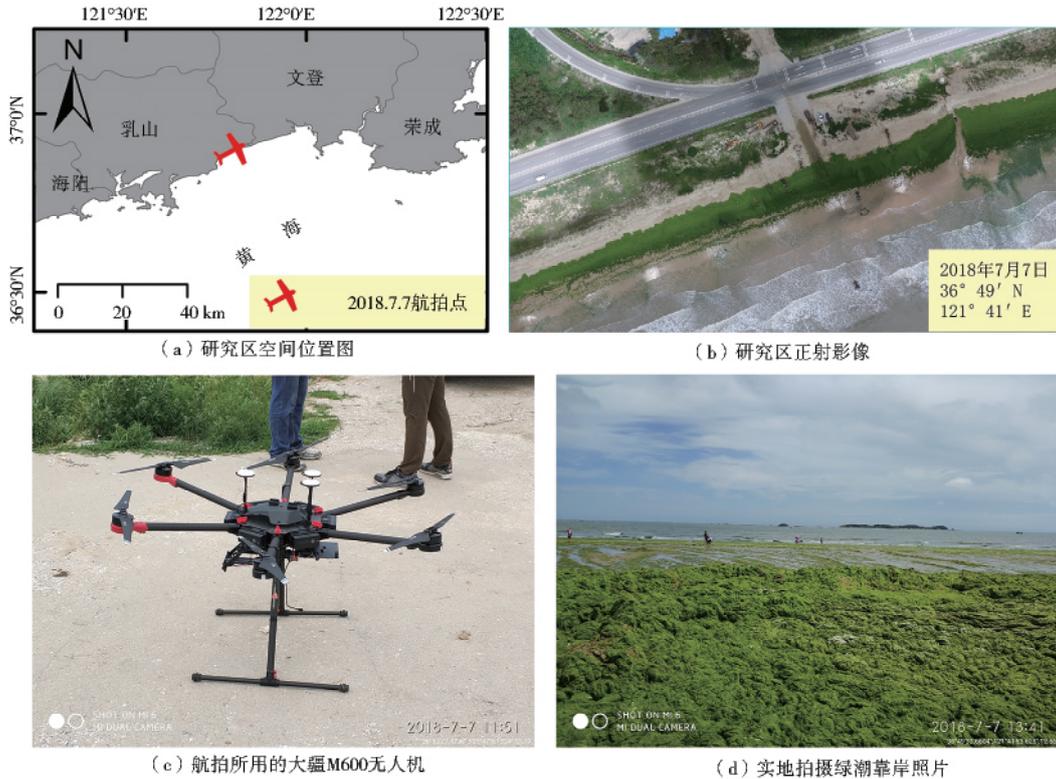


图 1 研究区概况

Fig. 1 Map of study area

表 1 ADC Micro 微型多光谱成像仪主要参数

Tab. 1 Main specifications of ADC Micro miniature multispectral camera

项目	数值	波段名称	波长/nm
传感器尺寸	6.55 × 4.92 mm	绿波段	550
重量	90 g	红波段	660
镜头焦距/光圈	8.43 m/ f/3.2	红边波段	735
采集时间	0.5 ~ 6 s	近红外波段	790

同时考察并测量靠岸浒苔的分布范围、厚度以及单位体积内浒苔的重量。具体的数据处理及分析流程见图 2。

### 1.3 植被指数计算公式选取

为确定区分浒苔与岸边植被的优选波段,利用 ENVI 5.3 在研究区多光谱数正射影像上分别均匀选取一定数量的浒苔和岸边植被样本点,并统计两种地物四个波段(绿、红、红边、近红外)地表反射率曲线(图 3a)和地表反射率均值曲线(图 3b)。

发现在红边波段浒苔和岸边植被具有较强的可区分性,其次是近红外波段。红边能非常敏感地响应植被营养、长势和水分<sup>[19]</sup>,是描述植物色素状态和健康状况的重要指示波段。结合以上对光谱曲线及植被指数特征的分析,利用浒苔和岸边植被的叶绿素在红边波段响应敏感的特点<sup>[11-20]</sup>,从而选取  $MTCI$  (MERIS terrestrial chlorophyll index)<sup>[21]</sup>、 $NDVI_{redge}$ 、 $SR_{redge}$ 、 $MSR_{redge}$  四种指数来做区分提取浒苔和岸边植被的对比研究,与常用的植被指数  $NDVI$  提取的植被范围作对比分

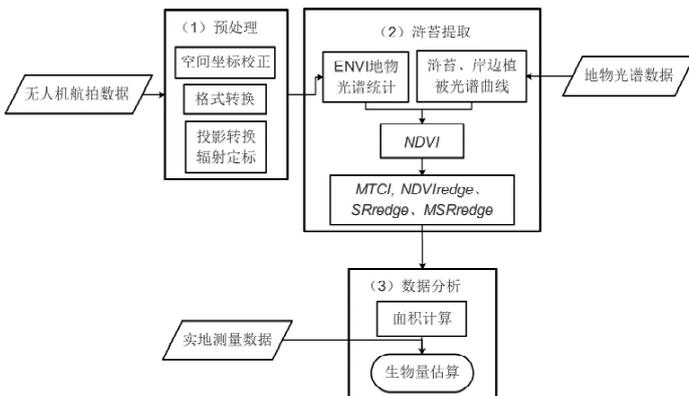


图 2 流程图

Fig. 2 Flow-process diagram

析,并以人工目视解译为基准做精度的验证。植被指数计算公式如下:

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

$$MTCI = (\rho_{NIR} - \rho_{Redge}) / (\rho_{Redge} - \rho_R) \quad (2)$$

$$NDVI_{redge} = (\rho_{NIR} - \rho_{Redge}) / (\rho_{NIR} + \rho_{Redge}) \quad (3)$$

$$SR_{redge} = \rho_{NIR} / \rho_{Redge} \quad (4)$$

$$MSR_{redge} = (\rho_{NIR} / \rho_{Redge} - 1) / (\rho_{NIR} / \rho_{Redge} + 1)^{1/2} \quad (5)$$

式中:  $NDVI$  表示归一化植被指数,  $MTCI$  表示中分辨率成像光谱仪陆地叶绿素指数,  $NDVI_{redge}$  表示红边归一化植被指数,  $SR_{redge}$  表示红边比值植被指数,  $MSR_{redge}$  表示改进红边比值植被指数;  $\rho_{NIR}$ ,  $\rho_{Redge}$ ,  $\rho_R$  分别表示近红外、红边、和红光波段的地表反射率。

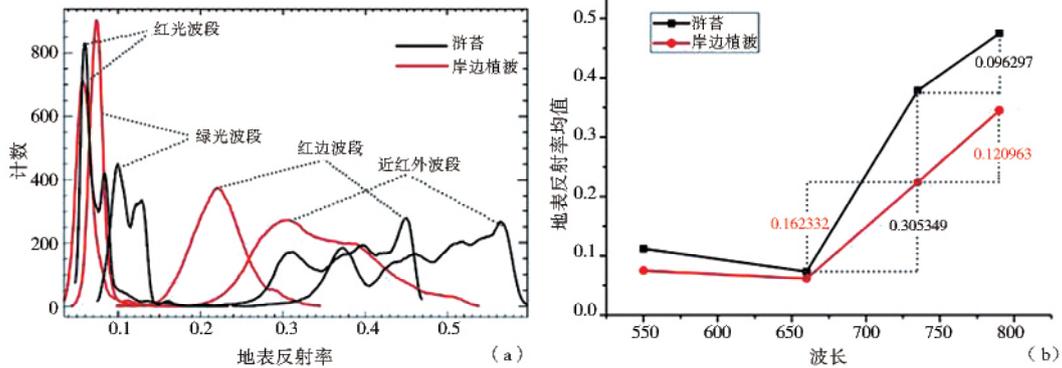


图3 浒苔和岸边植被地表反射率统计情况 (a) 地表反射率曲线, (b) 地表反射率均值曲线  
Fig. 3 Statistics surface reflectance of *Ulva prolifera* and shore vegetation (a) surface reflectance curves, (b) mean curves of surface

## 2 结果与讨论

### 2.1 浒苔与岸边植被的光谱特性

通过地物光谱仪分别测得并绘制靠岸浒苔与岸边植被的光谱曲线,如图4所示。发现靠岸浒苔与岸边植被具有相似的光谱曲线,在可见光范围内,出现两个强烈的吸收峰和一个强烈的反射峰,吸收峰位置在400~500 nm的蓝波段和640~680 nm的红波段处;反射峰位置在550 nm左右的绿光波段处;在680~750 nm的红边波段,反射光谱曲线斜率迅速增大;在750 nm以后,反射率达到最大值,此时叶绿素对电磁波的吸收特征微弱。

由于浒苔和岸边植被的种属与生长环境的差异,其所含的叶绿素,营养物质和水分不同,二者在各个波段的反射与吸收情况存在数值差异。在绿波段的反射峰处,岸边植被的地表反射率在0.2以下,而浒苔的地表反射率已超过0.2,浒苔的地表反射率数值略大于岸边植被,差别并不明显;在红波段处,岸边植被的地表反射率均值在0.08附近,浒苔的地表反射率均值在0.09附近,差别不明显;在红边波段,浒苔的地表反射率随波

长变化斜率大于岸边植被;在近红外波段,浒苔的地表反射率达0.9,而岸边植被的地表反射率为0.6,两者差异较大。

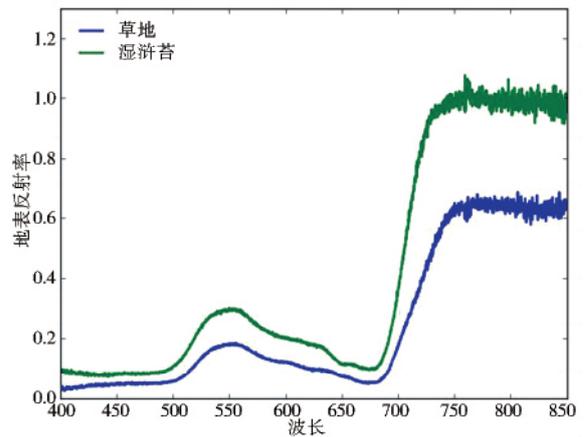


图4 岸边植被和湿浒苔的光谱曲线  
Fig. 4 Spectral curves of *Ulva prolifera* and shore vegetation

靠岸浒苔是成面状覆盖在沙滩上,测量选取的浒苔样本点厚度约20 cm,选取的岸边草地长势较好,具有代表性大片的生长,但与覆盖在岸滩上的浒苔略有不同,岸边草地的生长略有空隙,陆地的影响使得反射率偏低,但这种影响较小,可忽

略。通过以上实际测量的浒苔和岸边植被的光谱曲线特性,发现虽然浒苔和岸边植被光谱曲线趋势相近,但在不同波段对应的地表反射率数值上存在差异,说明可以利用光谱特性将二者进行区分。

### 2.2 不同指数对比研究及阈值的设定

根据植被指数计算公式,对研究区多光谱数

据进行植被指数计算,不同指数处理后显示影像对比效果见图 5,发现在 *NDVI* 影像上,植被与其他地物亮度明显不同,但浒苔与岸边植被差别不明显,另外 4 个涉及红边的指数对于浒苔和岸边植被具有一定的区分效果,但与其他地物的区分不明显。

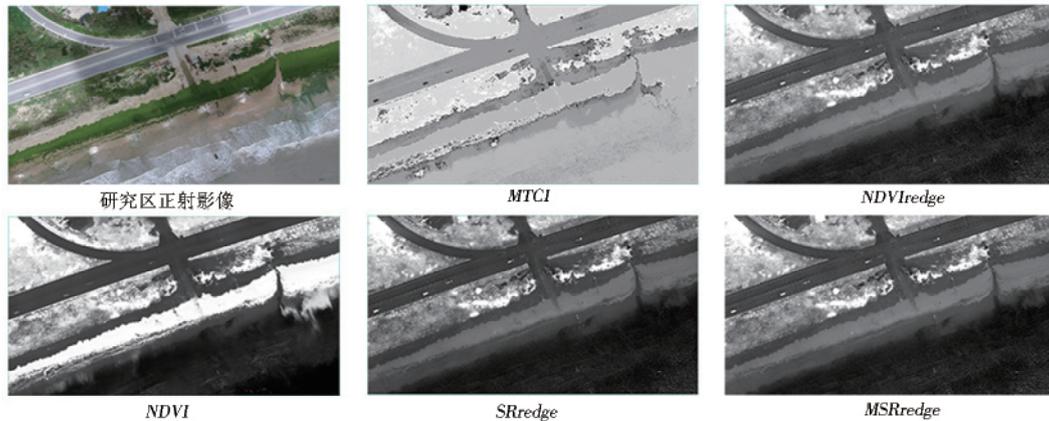


图 5 不同植被指数计算后效果图

Fig. 5 Graphs calculated by different vegetation indices

在指数运算后的影像上,分别选取一定数量的植被、道路、沙滩、海水的样本,进行统计,见图 6。*NDVI* 中植被的分布曲线与其他地物没有相交,因其利用了植被对近红外强反射及红光强吸收的特点可以明显的将植被与其他地物进行区分,*MTCI*、*NDVI<sub>redge</sub>*、*SR<sub>redge</sub>*、*MSR<sub>redge</sub>* 指数并没有明

显的将植被与其他地物进行区分。为了减少在浒苔与岸边植被区分提取时,其他地物的干扰,本文首先利用 *NDVI* 指数将植被提取出来,然后利用 *MTCI*、*NDVI<sub>redge</sub>*、*SR<sub>redge</sub>*、*MSR<sub>redge</sub>* 指数在 *NDVI* 提取的影像基础上将浒苔与岸边植被做区分。

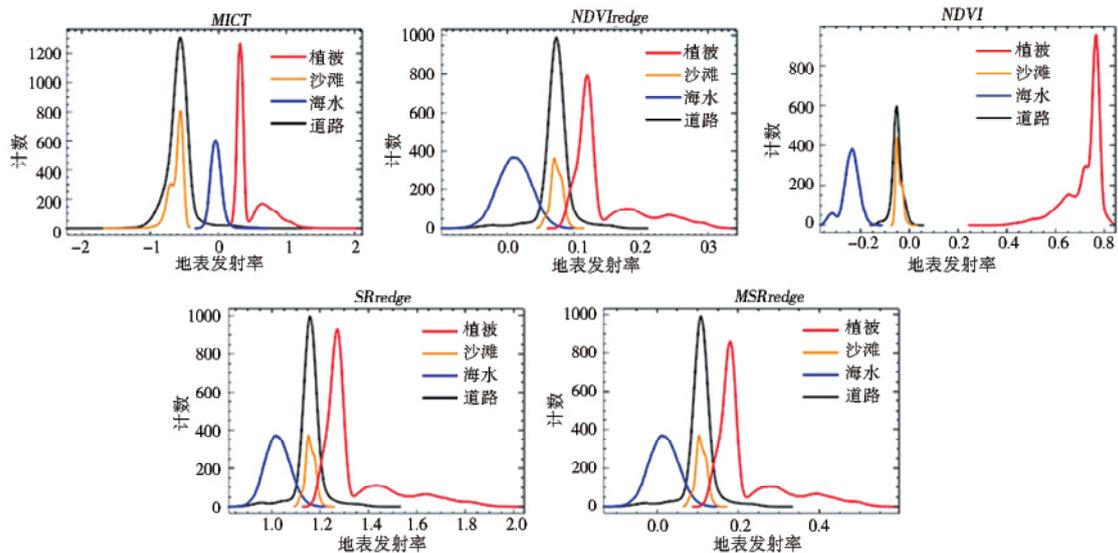


图 6 植被与其他地物不同植被指数分布统计图

Fig. 6 Statistical map of vegetation indices of vegetation and other objects

在 *MTCI*、*NDVI<sub>redge</sub>*、*SR<sub>redge</sub>*、*MSR<sub>redge</sub>* 四种植被指数运算后的图像基础上,分别对浒苔和岸边植

被选取一定量样本点进行统计(图 7),发现 *NDVI* 指数下两者峰值区域基本重叠,这也说明利用

NDVI 指数,通过灰度分割无法将两者明显区分开,而  $MTCI$ 、 $NDVI_{redge}$ 、 $SR_{redge}$ 、 $MSR_{redge}$  四种植被指数对浒苔和岸边植被统计的峰值位置明显不同,即浒苔与岸边植被指数分布曲线的均值差异大,且变异系数小,说明存在这样的值可以将两者很

好的区分开。浒苔的四种植被指数在数值上均小于岸边植被,这是因为浒苔在红边区域地表反射率更大。两条曲线交点处的不同指数数值为灰度分割法区分浒苔和岸边植被的主要参考分割点。

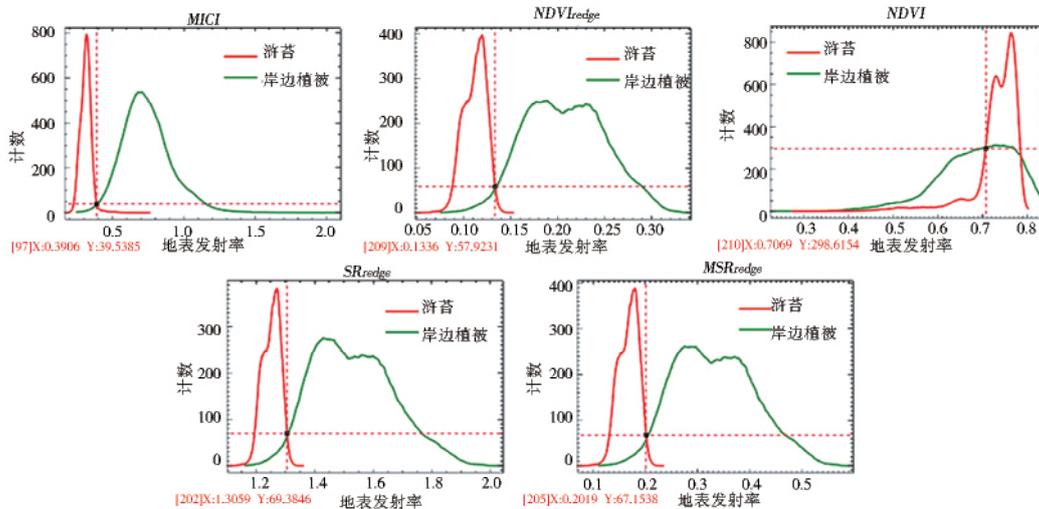


图 7 浒苔与岸边植被不同植被指数分布统计图

Fig. 7 Statistical map of spectral indices of green tide and shore vegetation

### 2.3 四种植被指数提取结果分析

采用灰度分割法提取的浒苔与岸边植被如图 8 所示,从图中可以看出 4 种指数都可以将浒苔与岸边植被区分开,且由表 2 可知  $MTCI$  的精度最高为 91.3%,这是因为  $MTCI$  在近红外和红边的基础上,增加了红波段。通过地表反射率均值曲线(图 3b),发现浒苔红边波段与红波段的差大于岸边植被红边波段与红波段的差,而浒苔近红外波段与红边波段的差小于岸边植被近红外波段与红边波段的差,这使得在  $MTCI$  数值上浒苔将明显小于岸边植被,使二者得以区分。其次是

$SR_{redge}$ 、 $NDVI_{redge}$ 、 $MSR_{redge}$  精度分别为 85.3%、83.8%、81.2%。 $SR_{redge}$ 、 $NDVI_{redge}$ 、 $MSR_{redge}$  是将  $SR$ 、 $NDVI$ 、 $MSR$  中的红波段替换为红边波段,从而具有区分浒苔和岸边植被的能力。由方程(3)、(4)、(5)可知,这三种指数只用到了近红外和红边波段,由图 3 可知,近红外波段和红边波段的差异小于近红外与红波段的差异, $SR_{redge}$ 、 $NDVI_{redge}$ 、 $MSR_{redge}$  虽然可以将浒苔和岸边植被进行区分,但精度较  $MTCI$  效果差,且在提取的面积中,分别有 15.0%、17.0%、16.8% 是岸边植被部分被误判为浒苔,而  $MTCI$  只有 0.5% 的错提率。

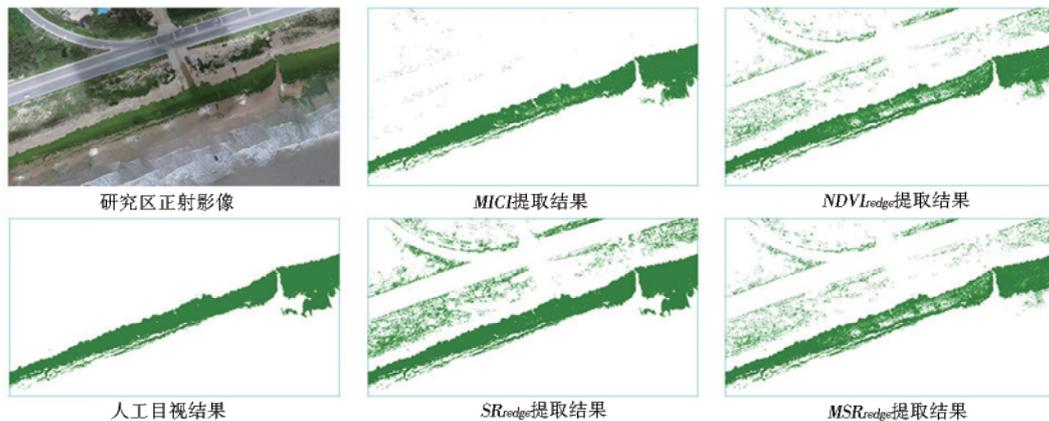


图 8 不同植被指数浒苔提取结果

Fig. 8 Extraction results of *Ulva prolifera* by different vegetation indices

表2 不同植被指数浒苔提取阈值与提取精度  
Tab.2 The threshold and accuracy of green tide with different algorithms

植被指数	阈值	提取面积/m <sup>2</sup>	浒苔面积/m <sup>2</sup>	岸边植被面积/m <sup>2</sup>	精度/(%)	错提率/(%)
<i>MTCI</i>	0.1~0.4	4000.61	3979.12	21.49	91.3	0.5
<i>SR<sub>redge</sub></i>	1~1.3052	4376.16	3720.46	655.7	85.3	15.0
<i>NDVI<sub>redge</sub></i>	0.06~0.1342	4402.91	3654.3	748.61	83.8	17.0
<i>MSR<sub>redge</sub></i>	0.1~0.203	4256.95	3541.13	715.82	81.2	16.8

注:人工目视提取浒苔面积为4359.54 m<sup>2</sup>;精度 =  $\frac{\text{绿湖面积}}{\text{人工目视提取绿湖面积}} \times 100\%$ ;错提率 =  $\frac{\text{岸边植被面积}}{\text{提取面积}} \times 100\%$

2.4 靠岸浒苔生物量估算

大规模浒苔在潮水的作用下冲到岸边,形成沿海岸线分布的长条状,经实地调研乳山银滩2 km的海岸线,靠岸浒苔条带状分布区的宽度最大可达30 m,最小处约9 m,且易在条带区域的中间带堆积形成30~50 cm厚度的条带峰状(见图9b);从条带峰向两边厚度渐薄,厚度可达10~30 cm;在靠近海水和陆地的边缘,浒苔分布稀疏,在靠近海水区域会有零星的小斑块分布,厚度一般为1~10 cm。

通过 Arcgis 分析提取的靠岸浒苔区域 *MTCI* 指数分布特点(见图9a),调整指数分布的区间,发现其分布特点与实际测量的靠岸浒苔厚度分布趋势基本一致,在浒苔分布的条带状区域中间位

置 *MTCI* 指数集中在0.33~0.4之间,分布的宽度与实地测量的30~50 cm厚的条带峰状宽度基本吻合,从峰状向两边 *MTCI* 指数范围在0.28~0.33之间与实地测量的10~30 cm厚的过渡区域宽度基本吻合,在浒苔分布区的两侧边缘 *MTCI* 指数范围在0.1~0.28之间,分布宽度与实地测量的1~10 cm厚的区域基本吻合。图9a与9b为同一地理位置同一时间的航拍影像提取的浒苔区域 *MTCI* 指数分布情况和实地照片浒苔分布情况,图9c为实地测量的与图9a对应的同一位置浒苔分布区域纵向厚度分布剖面示意图,经多处实地测量与 *MTCI* 指数分布区域对比分析不同厚度的宽度误差不超过20%。



图9 靠岸浒苔厚度分布情况  
Fig.9 Distribution of *Ulva prolifera* thickness on shore

靠岸浒苔总重量的计算公式如下:

$$m = \rho_0 \times \sum_i S_i \times d_i \quad (6)$$

式中:  $m$  为该区域浒苔总重量;  $\rho_0$  为1立方米浒苔的重量,将现场收集的浒苔放置于1 L容器中,不同位置多次取样测量取平均值,  $\rho_0$  值为0.55 kg/dm<sup>3</sup>;  $i$  为不同厚度的划分,取值分别为1~10 cm, 10~30 cm, 30~50 cm;  $S_i$  为对应不同厚

度 *MTCI* 提取的面积;  $d_i$  为不同厚度范围对应的均值,分别取0.075 m, 0.2 m, 0.4 m。

根据公式(6)及表3的各厚度统计值,估算出研究区内300 m海岸线总浒苔质量约为600 t,银滩海岸航拍得到的有浒苔分布的2 km海岸线总浒苔质量约1600 t,该区域同一时期实际处理的浒苔约有1000余吨。

表3 不同厚度分布浒苔参数统计表  
Tab.3 Statistical table of parameters of *Ulva prolifera* with different thickness distribution

	1 ~ 10 cm 厚度	10 ~ 30 cm 厚度	30 ~ 50 cm 厚度	总计
面积/m <sup>2</sup>	1135.16	742.62	2101.342	3979.12
体积/m <sup>3</sup>	85.137	148.524	840.536	1074.197
质量/t				590.8084

## 2.5 讨论

*MTCI* 指数与植物叶绿素含量密切相关<sup>[22]</sup>, 利用该指数靠岸浒苔与岸边植被得以区分, 由于是在 *NDVI* 影像基础上做浒苔与岸边植被的区分, 所以提取浒苔的精度既受到 *NDVI* 提取植被精度的制约, 也受到四种植被指数本身区分能力的约束, 但最终区分效果仍较为满意, 最高的 *MT-CI* 精度 91.3%, 最低的 *MSR<sub>redge</sub>* 精度可达 81.2%。

有学者利用 *MTCI* 指数对油菜和小麦进行总初级生产力的反演<sup>[22]</sup>, 但对于 *MTCI* 应用与植被密度, 尤其是与浒苔分布密度的相关性尚未有分析报道, 本文初步探索了 *MTCI* 指数与靠岸浒苔厚度的相关性, 并基于此建立了靠岸浒苔质量估算模型, 但对于 *MTCI* 指数与单位面积内靠岸浒苔实际光谱特征及浒苔质量的对应关系, 由于缺乏现场试验及测量数据, 并未进行深入探讨, 这也将是下一步的工作重点。

本文利用不同浒苔厚度所对应的 *MTCI* 指数范围的不同来建立靠岸浒苔生物量估算模型, 同时给出了靠岸浒苔的体积, 估算值与实际清理的浒苔质量差异在 1 个数量级以下。浒苔干湿比一般在 11% 左右<sup>[5]</sup>, 湿重与干重约有 10 倍以上的关系, 随着上岸时间的不同, 浒苔的质量会有明显的差异, 这也是造成误差的主要来源, 但此误差可以根据浒苔上岸时间建立湿重、干重关系模型, 并将测量值统一换算为干重来得以避免。

建模时, 浒苔厚度的划分是阶梯式的, 实际的浒苔厚度多是连续的, 且不同厚度的分界有时也并不明显, 但就整体分布情况而言, 呈中间厚两边薄的分布趋势, 这使得在计算厚度时取其均值是可行的, 另外, 这一由阶梯式划分产生的误差, 通过后续利用 *MTCI* 指数提取不同厚度浒苔分布的面积得以进一步减小。

对于靠岸浒苔与岸边植被的区分提取及生物量估算的方法, 可以推广使用到其他区域的海岸线, 对于沙滩狭窄的区域, 浒苔会分布到岸边草地

或灌木等区域, 这使得浒苔与岸边植被的区分提取显得尤为重要。

## 3 结语

本文利用无人机搭载的多光谱成像仪, 获取了 2018 年 7 月 7 日乳山银滩高分辨率多光谱正射影像; 利用地物光谱仪获取了浒苔与岸边草地的光谱曲线; 通过实地测量得到了浒苔厚度的分布情况。利用 ENVI 5.3 软件在正射多光谱影像上对浒苔和岸边植被选取一定数量的样本点统计了四个波段两者的地表反射率情况。发现在红边波段, 浒苔与岸边植被存在明显数值差异, 基于这一特点, 可以将两者进行区分。但因 *MTCI*、*SR<sub>redge</sub>*、*NDVI<sub>redge</sub>*、*MSR<sub>redge</sub>* 四种植被指数对植被与其他地物的区分不明显, 在做浒苔与岸边植被区分提取时, 会受到其他地物的干扰, 影响精度, 所以本文在 *NDVI* 提取的植被图像基础上, 利用带有红边波段的 *MTCI*、*SR<sub>redge</sub>*、*NDVI<sub>redge</sub>*、*MSR<sub>redge</sub>* 四种植被指数对浒苔和岸边植被提取对比分析, 并利用 *MTCI* 指数对研究区内靠岸浒苔的体积和质量进行了粗略估算。

经研究发现, *MTCI*、*SR<sub>redge</sub>*、*NDVI<sub>redge</sub>*、*MSR<sub>redge</sub>* 四种植被指数均可以将浒苔与岸边植被进行区分提取, 最高的 *MTCI* 精度 91.3%, 最低的 *MSR<sub>redge</sub>* 精度可达 81.2%。利用 *MTCI* 指数建模估算的研究区 300 m 内浒苔的总体积约为 1074 m<sup>3</sup>, 质量约为 600 t, 为基于无人机高精度影像海滨景区绿潮灾害动态监测及清理工作提供有效方法。

## 参考文献:

- [1] ZHOU M J, LIU D Y, ANDERSON D M, et al. Introduction to the special issue on green tides in the Yellow Sea [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2015, 163: 3-8.
- [2] 颜天, 于仁成, 周名江, 等. 黄海海域大规模绿潮成因与应对策略——“鳌山计划”研究进展 [J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(5): 950-958.
- [3] 于仁成, 孙松, 颜天, 等. 黄海绿潮研究: 回顾与展望 [J]. *海洋与湖沼* 2018, 49(5): 942-949.

- [4] 顾行发, 陈兴峰, 尹球, 等. 黄海浒苔灾害遥感立体监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1627-1632.
- [5] HU L B, HU C M, HE M X. Remote estimation of biomass of *Ulva prolifera* macroalgae in the Yellow Sea [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 192: 217-227.
- [6] QI L, HU C M, XING Q G, et al. Long-term trend of *Ulva prolifera* blooms in the western Yellow Sea [J]. Harmful Algae, 2016, 58: 35-44.
- [7] ZHENG X Y, GAO Z Q, NING J C, et al. Remote sensing monitoring of green tide in the Yellow Sea in 2015 Based on GF-1 WFV Data [C]//Proceedings of SPIE 9975, Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XIII. San Diego, California, United States: SPIE, 2016: 99750L.
- [8] 曾韬, 刘建强. “北京一号”小卫星在青岛近海浒苔灾害监测中的应用[J]. 遥感信息, 2009(3): 34-37.
- [9] 邢前国, 郝向阳, 施平, 等. 基于多源、多时相遥感影像的黄海、东海绿潮影响区检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1644-1647.
- [10] 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 1-12.
- [11] 毛智慧, 邓磊, 孙杰, 等. 无人机多光谱遥感在玉米冠层叶绿素预测中的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(9): 2931-29223.
- [12] BARRERO O, PERDOMO S A. RGB and multispectral UAV image fusion for Gramineae weed detection in rice fields [J]. Precision Agriculture, 2018, 19(5): 809-822.
- [13] GAO Z Q, XU F X, SONG D B, et al. Multi-resource data-based research on remote sensing monitoring over the green tide in the Yellow Sea [C]//Proceedings of SPIE 10405, Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XIV. San Diego, California, United States: SPIE, 2017: 104050N.
- [14] XU F X, GAO Z Q, JIANG X P, et al. A UAV and S2A data-based estimation of the initial biomass of green algae in the South Yellow Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 128: 408-414.
- [15] XU F X, GAO Z Q, SHANG W T, et al. Validation of MODIS-based monitoring for a green tide in the Yellow Sea with the aid of unmanned aerial vehicle [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2017, 11(1): 012007.
- [16] LIU X Q, LI Y, WANG Z L, et al. Cruise observation of *Ulva prolifera* bloom in the southern Yellow Sea, China [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 163: 17-22.
- [17] 吴孟泉, 郭浩, 张安定, 等. 2008年-2012年山东半岛海域浒苔时空分布特征研[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1312-1318.
- [18] LIU X Q, WANG Z L, ZHANG X L. A review of the green tides in the Yellow Sea, China [J]. Marine Environmental Research, 2016, 119: 189-196.
- [19] KANKE Y, TUBAÑA B, DALEN M, et al. Evaluation of red and red-edge reflectance-based vegetation indices for rice biomass and grain yield prediction models in paddy fields [J]. Precision Agriculture, 2016, 17(5): 507-530.
- [20] 李苑溪, 陈锡云, 罗达, 等. 铜胁迫下玉米叶片反射光谱的红边位置变化及其与叶绿素的关系[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 546-551.
- [21] DASH J, CURRAN P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(23): 5403-5413.
- [22] DASH J, CURRAN P J, TALLIS M J, et al. Validating the MERIS terrestrial chlorophyll Index (MTCI) with ground chlorophyll content data at MERIS spatial resolution [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(20): 5513-5532.