

基于无人机遥感的黄海绿潮搁浅生物量估算

尚伟涛^{1,2,3}, 高志强^{1,2}, 姜晓鹏^{1,2,3}, 田信鹏^{1,2}, 郭少方⁴

(1. 中国科学院 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院 烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 烟台市科技情报研究所, 山东 烟台 264003)

摘要: 浒苔在近岸搁浅后会破坏海岸景观, 干扰水上运动, 给滨海旅游业造成严重影响。本文使用无人机搭载的多光谱和可见光传感器对山东半岛的海阳、乳山和文登的三个海滩搁浅的浒苔进行航拍监测, 并结合地物光谱测量数据, 分别选择归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)和虚拟基线高度浮藻指数(VB-FAH)对海滩搁浅浒苔与岸边植被及非植被(海水、沙滩)进行识别评估, 并分别估算了三个研究区搁浅浒苔的生物量。研究结果表明: NDVI 可以识别植被和非植被, 但无法区分潮间带上部和潮间带下部分布的浒苔; DVI 和 VB-FAH 对植被和非植被的区分度不高, 但对不同分布的搁浅浒苔具有一定的区分度, 其中, DVI 对潮间带上部和潮间带下部分布浒苔的识别能力优于 VB-FAH。因此, 通过对岸边植被进行掩膜, 利用 DVI 构建海滩搁浅浒苔生物量估算模型, 实现了海滩搁浅浒苔生物量的估算。海阳、乳山和文登三个海滩搁浅浒苔的生物量分别为 1 468 t、745 t 和 5 034 t, 本文提出的方法可以为搁浅浒苔的清理和资源合理分配提供技术支持。

关键词: 无人机遥感; 绿潮; 搁浅生物量; 多光谱

中图分类号: P76 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2021)10-0011-09

DOI: 10.11759/hyhx20200708001

自 2007 年以来, 我国黄海海域每年都会暴发以浒苔为优势种的绿潮灾害, 已经持续了 13 a^[1]。浒苔本身是一种无毒无害的大型绿藻, 但是大量绿藻在近岸堆积、腐烂后会沿海的自然景观造成严重影响, 尤其是对青岛、烟台、威海的滨海旅游业产生重大影响, 当地政府每年都要花费大量的人力财力来清理堆积在海滩上的浒苔, 据估算, 2008 年用于治理绿潮灾害的总费约为 20 亿元^[2]。

卫星遥感技术由于观测尺度大、时间分辨率高、覆盖范围广等特点, 在绿潮灾害的监测中发挥了重要作用^[3-4]。已有学者通过使用 MODIS、GOCI、Landsat、GF-1 WFV、HJ-1A/1B 卫星遥感数据对绿潮的起源、时空变化过程进行了监测研究^[5-8]。但对于滨海景区这样的小范围绿潮重点防控区域, 卫星遥感数据的时间和空间分辨率已经不能满足实时监测和打捞的需求。

无人机遥感技术因其体积小、灵活机动、运行成本低、实时传输等特点, 在精准农业、森林资源调查、湿地植被监测等方面得到了广泛的应用^[9-11]。在绿潮研究方面, 已有学者使用无人机航拍辅助船只

进行漂浮绿潮的打捞^[12], 使用无人机结合卫星遥感数据估算了黄海绿潮初始生物量^[13], 也有学者使用不同的植被指数算法对岸滩浒苔和岸边植被进行了区分研究, 在此基础之上估算了岸滩浒苔的生物量^[14], 但仅研究了一个岸滩的实例, 并未对多个海滩的浒苔分布和生物量情况进行对比研究。

本文通过无人机获取的多光谱和可见光数据对

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-08-19

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); 中国科学院海洋大科学研究中心重点部署项目(COMS2019J02); 中国科学院前沿科学重点研究计划(ZDBS-LY-7010); 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室(中国科学院海洋研究所)开放基金资助(KLMEE202005); 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”项目(2019YFD0900705)

[Foundation: NSFC fund project, No. 41876107; NSFC-Shandong joint fund project, No. U1706219; Key Deployment Project of Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, No. COMS2019J02; Key Research Program of Frontier Science, Chinese Academy of Sciences, No. ZDBS-LY-7010; CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences No. KLMEE202005; The National Key R&D Program of China, No. 2019YFD0900705]

作者简介: 尚伟涛(1987—), 男, 甘肃庆阳人, 博士研究生, 主要从事无人机遥感海岸带灾害监测及应对研究, E-mail: wtshang@yic.ac.cn; 高志强(1966—), 通信作者, 研究员, 博士生导师, E-mail: zqgao@yic.ac.cn

山东半岛的海阳、乳山、文登的三个海滩的搁浅浒苔进行了航拍监测,并结合现场获取的地物光谱数据,选择了归一化植被指数(NDVI)、差值植被指数(DVI)和虚拟基线高度浮藻指数(VB-FAH)三种指数算法对海滩搁浅浒苔与岸边植被、海水、沙滩的区分能力进行了对比研究,在此基础上,结合现场采样数据,对三个海滩的浒苔的生物量进行了估算,为更好地清理搁浅浒苔和合理分配资源提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取了山东半岛三个典型的海滩,分别位于海阳市爱琴海海滩(121°9'48"E, 36°40'12"N)、乳山市银滩海滩(121°46'40"E, 36°53'47"N)和文登市南海公园海滩(121°53'47"E, 36°55'48"N)(图 1),这三个海滩都是重要的滨海旅游景区,自 2007 年绿潮灾害暴发以来,这三个滨海旅游景区的海滩每年都会有大量的浒苔搁浅,如果不及时清理,堆积的浒苔会腐烂发臭,污染周边环境,对滨海景区的旅游业造成影响。当地政府每年都要花费大量的人力和物理来清理堆积在海滩上的浒苔。

1.2 无人机数据获取与处理

2019 年 7 月 4 日—6 日使用大疆 M600 Pro 无人机分别对海阳市爱琴海海滩、乳山市银滩海滩和文登市南海公园海滩进行正射航拍,无人机飞行高度

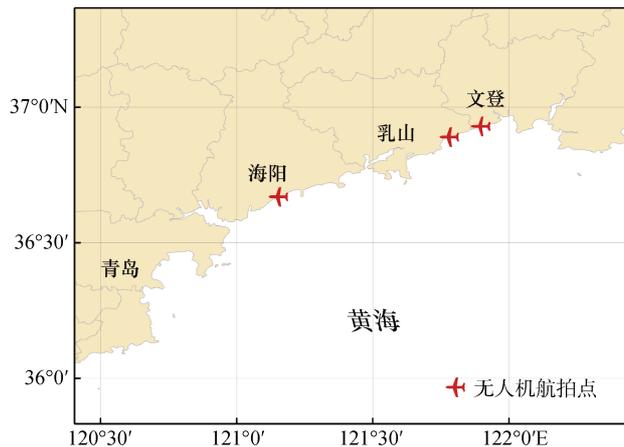


图 1 研究区概况

Fig. 1 Map of the study area

为 200 m,选择晴朗或少云的天气进行飞行作业。无人机平台搭载一个 Parrot Sequoia 多光谱相机,它由两个传感器组成:多光谱传感器,包括五个同步波段-四个多光谱波段(Green、Red、Red edge、NIR)和一个 RGB 相机,还有一个安装在无人机顶部的光照传感器。在飞行过程中,光照传感器获取和记录当前的光照环境数据,用于后续的数据处理,多光谱相机的详细参数见表 1。多光谱相机拍摄获取的多光谱数据和 RGB 数据带有 GPS 模块获取的定位信息,可以直接使用 Pix4Dmapper 软件对数据进行处理,生成正射影像(包括多光谱影像和 RGB 影像),然后使用 ENVI 5.3 软件和 ArcMap 10.1 软件对数据进行分析 and 制图。

表 1 Parrot Sequoia 多光谱相机主要参数

Tab. 1 Main parameters of the Parrot Sequoia Multispectral Camera

参数	数值	波段名称	波长/nm	波宽/nm	
多光谱传感器	尺寸	59 mm×41 mm×28 mm	绿波段	550	40
	重量	72 g	红波段	660	40
	帧频	1 s ⁻¹	红边波段	735	10
	功率	5 W	近红外波段	790	40
光照传感器	尺寸	47 mm×39 mm×18.5 mm	—	—	—
	重量	35 g	—	—	—

“—”: 表格内容为空

1.3 光谱测量

为了研究浒苔和周边地物的光谱特征,使用 USB4000(Ocean Optics Inc.)地物光谱仪对海滩搁浅的浒苔、岸边植被、海水、沙滩的光谱进行测量,地物光谱仪波长范围为 345.30~1 024.12 nm,光谱分辨

率为 0.2 nm。测量时,选择晴朗的天气,测量人员穿黑色衣服,地物光谱仪探头距离被测量物体 50 cm,首先测量标准参考板的辐射亮度值,然后再测量地物的辐射亮度值,每种地物重复测量 3 次取平均值,反射率计算公式为:

$$R(\lambda) = \frac{L(\lambda)}{L_p(\lambda)} \times \rho(\lambda), \quad (1)$$

式中, $R(\lambda)$ 表示被测量地物的反射率, $L(\lambda)$ 表示被测量地物的辐射亮度值, $L_p(\lambda)$ 表示标准参考板的辐射亮度值, $\rho(\lambda)$ 表示标准参考板的反射率, 本次测量中使用的标准参考板的反射率是 0.25。

1.4 海滩搁浅浒苔提取方法

为了研究不同的指数方法对海滩搁浅浒苔的提取精度, 本文选取了归一化植被指数(NDVI)^[15]、差值植被指数(DVI)^[16]和虚拟基线高度浮藻指数(VB-FAH)^[7]三个指数对海滩搁浅浒苔进行了提取研究, 计算公式如下:

$$NDVI = (R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + R_R), \quad (2)$$

$$DVI = R_{NIR} - R_R, \quad (3)$$

$$VB-FAH = \frac{(R_{NIR} - R_G) + (R_G - R_R) \times (\lambda_{NIR} - \lambda_G)}{(2\lambda_{NIR} - \lambda_R - \lambda_G)} \quad (4)$$

公式中, R_G 、 R_R 和 R_{NIR} 分别表示无人机多光谱影像的绿波段、红波段和近红外波段。 λ_G 、 λ_R 、 λ_{NIR} 是这三个波段对应的中心波长, 分别为 550 nm、660 nm 和 790 nm。

为了比较 NDVI、DVI 和 VB-FAH 这三种指数算法对海滩搁浅浒苔的识别能力, 借鉴模式识别领域用来区分两类样本的“类间距”概念^[17]来判断不同算法对浒苔和三种地物(岸边植被、海水和沙滩)的区分能力:

$$D_{gx} = \frac{|\bar{G} - \bar{X}|}{\sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_x^2}}, \quad (5)$$

其中, \bar{G} 表示选取的搁浅浒苔样本的指数均值, \bar{X} 表示选取的岸边植被、海水和沙滩样本的指数均值, σ_g^2 表示选取的搁浅浒苔样本指数的方差, σ_x^2 表示选取的岸边植被、海水和沙滩样本指数的方差。 D_{gx} 分别表示浒苔和岸边植被、海水以及沙滩这三种地物样本之间的距离, 分别使用 D_{gv} 、 D_{gw} 和 D_{gs} 表示, 该值越大, 表示该指数算法对浒苔和其他地物的区分能力越好, 浒苔信息提取效果越好; 反之, 则说明该指数算法的浒苔信息提取能力较差。

1.5 海滩搁浅浒苔生物量估算方法

1.5.1 海滩搁浅浒苔厚度和生物量数据采集

由于潮汐作用的影响, 海滩搁浅浒苔在潮间带上部和潮间带下部的分布有所差异, 为了更好地研

究搁浅浒苔的分布情况, 将研究区分为潮间带上部采样区和潮间带下部采样区, 每个采样区平行间隔 100 m 左右设置一个采样点, 海阳、乳山和文登三个研究区分别设置了 16 个、10 个和 18 个采样点(由于乳山研究区海滩搁浅浒苔分布不均匀, 所以根据实际情况只设置了 10 个采样点)。对于每个采样点选取 1 m×1 m 范围进行采样, 首先使用精度为 0.1 cm 的量尺测量正方形样点的四个角和中心的浒苔的厚度, 取平均值作为该采样点的平均厚度。然后使用精度为 0.01 kg 的电子秤对样点范围内的浒苔重量进行测量, 测量 3 次取平均值, 再计算单位体积浒苔的重量(单位为 kg/m³)作为该采样点浒苔的密度。

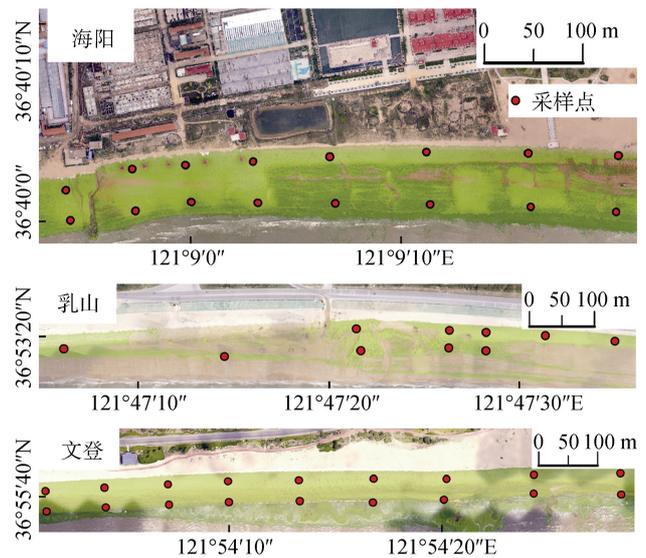


图 2 研究区采样点
Fig. 2 Sampling points in the study area

1.5.2 海滩搁浅浒苔生物量计算方法

为了计算海滩搁浅浒苔的生物量, 首先使用 DVI 指数算法提取每个研究区搁浅浒苔在潮间带上部和潮间带下部的分布范围, 然后按照搁浅浒苔在无人机 RGB 影像上的分布纹理和采样点的分布位置将潮间带上部和潮间带下部提取的搁浅浒苔的分布范围划分为若干个子研究区, 尽量使每个子研究区都有采样点分布, 然后使用每个采样点的浒苔分布密度和厚度数据作为采样点所在子研究区的浒苔平均密度和平均厚度。使用公式(6)分别计算每个子研究区的搁浅浒苔生物量, 然后统计计算研究区浒苔的总生物量。

$$B = \sum_i A_i \times D_i \times T_i, \quad (6)$$

其中, B 表示研究区浒苔的总生物量, A_i 表示子研究区海滩搁浅浒苔的分布面积, D_i 表示子研究区海滩搁浅浒苔的密度, T_i 表示子研究区海滩搁浅浒苔的厚度。

2 结果

2.1 海滩不同地物光谱特征

使用地物光谱仪对海滩浒苔、岸边植被、海水和沙滩进行地物光谱测量并绘制了不同地物的光谱曲线, 如图 3a 所示。海滩浒苔和岸边植被的光谱曲线很相似, 在可见光波段, 有一个小的反射峰, 位置在 550 nm 处

(绿波段), 而在 450 nm(蓝波段)和 670 nm(红波段)附近则是两个吸收带, 这是由于叶绿素对蓝光和红光有较强的吸收作用, 对绿光有较强的反射作用引起的。在近红外波段(700~800 nm), 由于反射率快速增长, 形成了植被特有的红边特征, 这是植被区别于其他地物的主要特征。海水在蓝波段有较强的反射率, 而在其他波段则有很强的吸收率, 尤其是近红外波段, 吸收率更强, 使得近红外遥感图上的海水呈现黑色。沙滩的光谱曲线从蓝波段到近红外波段反射率呈现逐渐增高的趋势, 没有出现明显的反射峰特征。

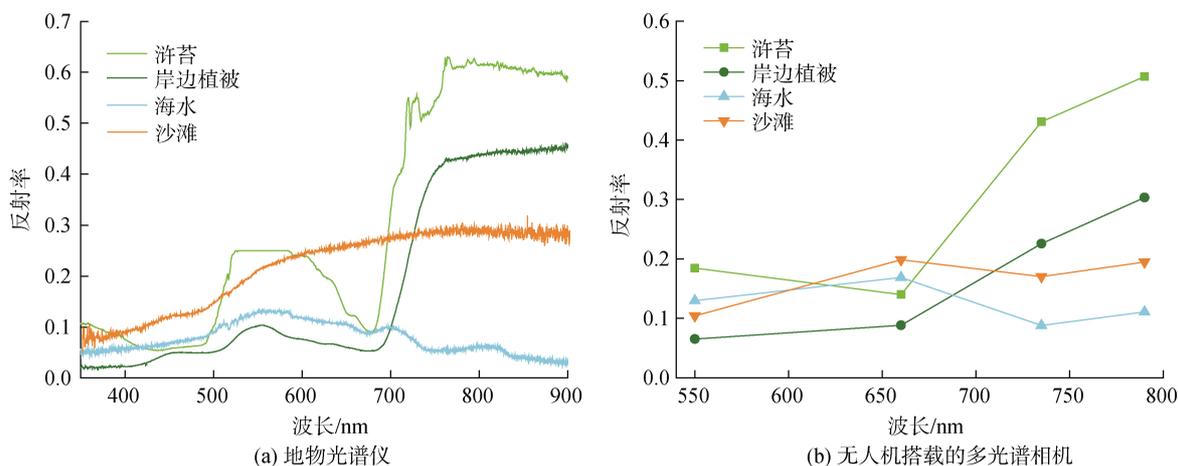


图 3 不同地物光谱曲线

Fig. 3 Spectral curves of different objects

通过对无人机搭载的多光谱相机获取的影像中不同地物的反射率进行统计, 如图 3b 所示, 该多光谱相机包括了绿波段(550 nm)、红波段(660 nm)、红边波段(735 nm)和近红外波段(790 nm)四个波段, 浒苔由于所含水分的不同, 在这四个波段上的反射率都比岸边植被的高, 在红波段, 浒苔的反射率为 0.14, 岸边植被的反射率为 0.08, 在近红外波段, 浒苔的反射率为 0.5, 岸边植被的反射率为 0.3。海水在红边波段和近红外波段的反射率都比浒苔的低, 而在红波段的反射率高于浒苔的反射率。沙滩在四个波段的反射率差异不大, 都在 0.2 以下, 在红波段, 沙滩的反射率高于浒苔, 而在红边波段和近红外波段, 浒苔的反射率则高于沙滩。

通过对以上四种地物的光谱曲线的分析, 浒苔和植被的光谱特征比较明显, 有一个反射峰和红边特征, 而海水和沙滩则没有这样的光谱特征, 利用这一光谱特征的差异, 通过波段之间的差值运算, 选择差值比较大的植被指数(如 NDVI、DVI、VB-FAH)

就可以将这四种地物进行区分, 以提高这四种地物的提取精度, 为后续的研究提供精确的数据。

2.2 不同指数对比研究

图 4 显示了海阳、乳山、文登三个研究区的 RGB、NDVI、DVI 和 VB-FAH 四种图像的对比图。其中 NDVI 指数的取值范围分别是 -0.62 至 0.85、-0.54 至 0.88、-0.81 至 0.93, 乳山研究区 NDVI 的取值范围大于海阳和乳山研究区, DVI 指数的取值范围分别是 -0.33 至 0.50、-0.45 至 0.70、-1.04 至 1.31, 文登研究区 DVI 的取值范围大于海阳和乳山研究区, VB-FAH 指数的取值范围分别是 -0.25 至 0.47、-0.19 至 0.73、-0.59 至 1.31, 文登研究区 VB-FAH 的取值范围大于海阳和乳山研究区。浒苔在三种指数图像上都有很高的值, 在 NDVI 指数图像上, 岸边植被也有很高的值, 和浒苔的区分度不高, 而在 DVI 和 VB-FAH 图像上, 只有很小一部分植被和浒苔的值接近。

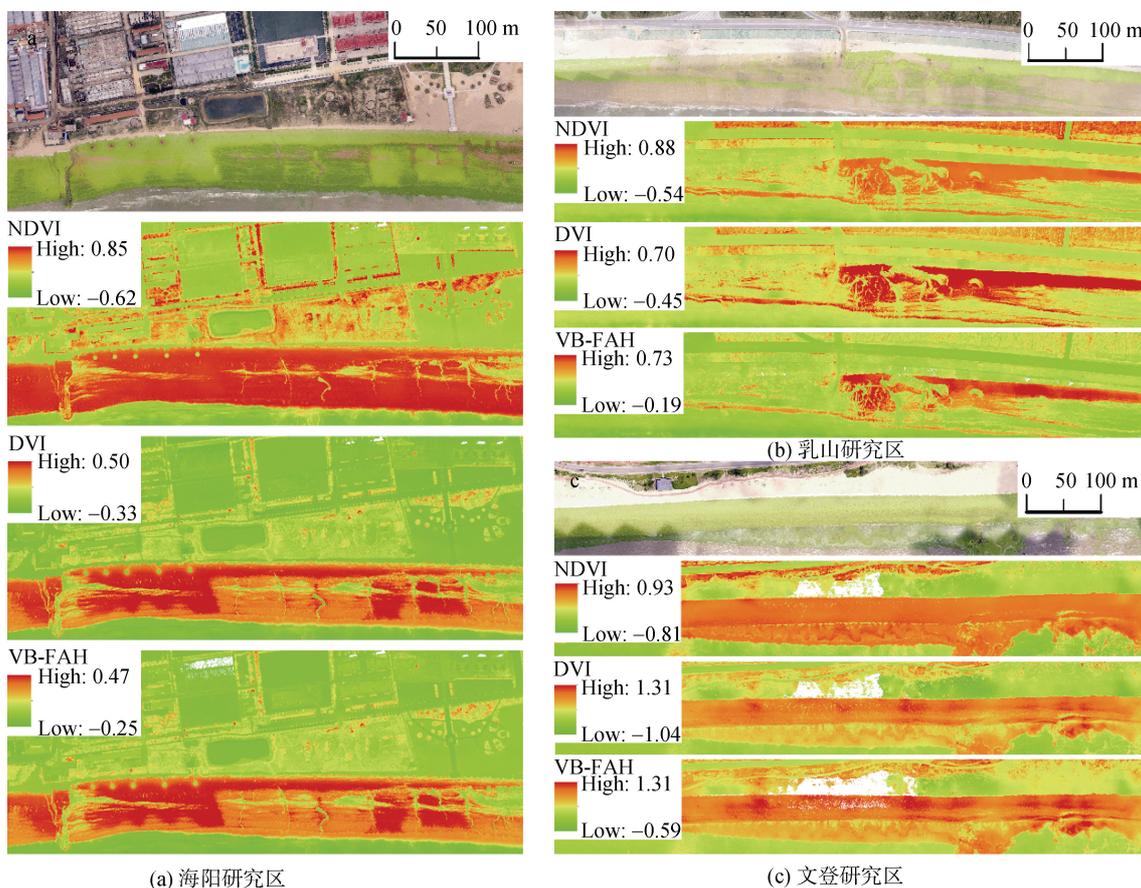


图 4 海阳、乳山和文登三个研究区的 RGB、NDVI、DVI 和 VB-FAH 四种图像的对比如图
 Fig. 4 Comparison of RGB, NDVI, DVI, and VB-FAH images in Haiyang, Rushan, and Wendeng

为了进一步研究这三种指数的差异性，从 NDVI、DVI、VB-FAH 三种指数图像上分别选取 100 个四种地物(岸边植被、海水、浒苔、沙滩)的样本，统计四种地物的直方图分布情况，结果如图 5 所示。从图中可以看到，NDVI 指数对浒苔和岸边植被的区分度不高，但是浒苔与海水和沙滩有明显的区分界限。DVI 和 VB-FAH 指数对浒苔和岸边植被有一定的区分度，但是有一小部分浒苔和岸边植被的取值相同，很难通过单一阈值将二者进行区分。岸边植被和沙滩在 DVI 图像上的区分度很高，而 VB-FAH 图像上岸边植被和沙滩有一部分的取值相同，也很难通过单一阈值将二者进行区分。

浒苔在海滩搁浅后，浒苔所含的水分会随着时间推移而逐渐减少，先搁浅的浒苔比后搁浅的浒苔所含的水分少，由于所含水分的不同，在不同的指数图像上，不同时间段搁浅的浒苔会有所差异，在 DVI 和 VB-FAH 指数图像上，先搁浅的浒苔比后搁浅的浒苔具有更高的值，而在 NDVI 指数图像上，这

一差异并不明显。

从图 4 和图 5 三种指数的比较中可以看到，NDVI 可以识别植被和非植被，但无法区分潮间带上部 and 潮间带下部分布的浒苔；DVI 和 VB-FAH 对植被和非植被的区分度不高，但对不同分布的搁浅浒苔具有一定的区分度。

2.3 浒苔与岸边植被、海水、沙滩样本之间的距离比较

为了进一步研究 NDVI、DVI、VB-FAH 这三个指数中浒苔与岸边植被、海水、沙滩样本之间的区分度，分别计算了浒苔与岸边植被、浒苔与海水、浒苔与沙滩样本之间的距离，计算结果如表 2 所示。在三个指数中，浒苔和岸边植被样本之间的距离最大的是 DVI 指数，为 0.46，NDVI 指数的距离值最小，为 0.06。浒苔和海水样本之间的距离最大的是 NDVI 指数，为 2.42；最小的是 VB-FAH 指数，为 1.56。浒苔和沙滩样本之间的距离最大的是 NDVI 指数，为 2.26，最小的是 VB-FAH 指数，为 1.29。

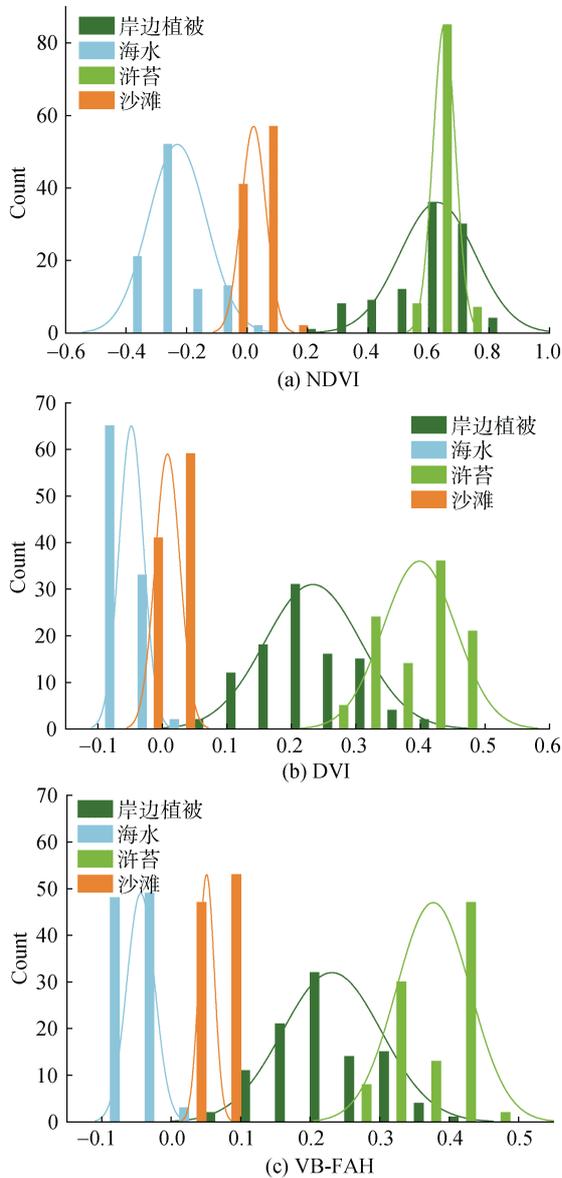


图 5 四种地物(岸边植被、海水、浒苔和沙滩)在不同植被指数中的分布统计图

Fig. 5 Statistical charts of the distribution of four objects (coastal vegetation, seawater, *Ulva prolifera* and sand beach) in different vegetation indexes

表 2 浒苔与岸边植被、海水、沙滩样本之间的距离比较结果

Tab. 2 Comparison results of distance between *Ulva prolifera* and coastal vegetation, sea water, and sand beach

指数	D_{gv}	D_{gw}	D_{gs}
NDVI	0.06	2.42	2.26
DVI	0.46	1.63	1.42
VB-FAH	0.41	1.56	1.29

注: D_{gv} : 浒苔与岸边植被样本之间的距离; D_{gw} : 浒苔与海水样本之间的距离; D_{gs} : 浒苔与沙滩样本之间的距离

从以上的结果中可以看出, NDVI 指数可以很好地把浒苔与海水和沙滩区分开来, 但是由于岸边植被和浒苔有很相似的光谱曲线, 很难将浒苔和岸边植被区分开来。在区分潮间带上部和潮间带下部分布的浒苔时, DVI 优于 VB-FAH。

由于这三个指数都不能很好的将浒苔和岸边植被区分开来, 在实际的浒苔提取过程中, 为了减少岸边植被对浒苔提取精度的影响, 在浒苔和岸边植被区分明显的海滩过度地带对岸边植被做一个掩膜, 以消除岸边植被对浒苔提取精度的影响。

为了区分潮间带上部和潮间带下部浒苔的分布范围, 综合考虑这三个指数的特点, 选择 DVI 指数作为浒苔提取的指数算法来分别提取潮间带上部和潮间带下部浒苔的分布面积。

2.4 海滩搁浅生物量估算

使用 DVI 指数按照不同的阈值分别提取了海阳、乳山、文登三个研究区的潮间带上部和潮间带下部的浒苔的分布面积, 结果如表 3 所示。海阳潮间带上部和潮间带下部的浒苔的分布面积分别为 41 785.27 m² 和 26 643.97 m²。乳山潮间带上部和潮间带下部浒苔的分布面积分别为 48 148.76 m² 和 5 529.75 m²。文登潮间带上部和潮间带下部浒苔的分布面积分别为 46 732.13 m² 和 40 492.97 m²。在三个研究区, 潮间带上部浒苔的厚度都高于潮间带下部浒苔的厚度。浒苔在三个研究区的密度分布也有所不同, 整体表现为潮间带上部的浒苔密度大于潮间带下部的浒苔密度, 浒苔密度最大的是乳山潮间带上部, 而浒苔密度最小的是文登潮间带下部。

通过对每个研究区划分的子研究区搁浅浒苔生物量的统计得到三个研究区搁浅浒苔的总生物量。海阳、乳山和文登这三个研究区的浒苔总生物量分别是 1 468 t、745 t 和 5 034 t, 其中文登海滩的浒苔生物量最大, 而乳山海滩的浒苔生物量最小。

3 讨论

3.1 三种指数提取海滩搁浅浒苔结果比较

NDVI、DVI、VB-FAH 这三个指数都是提取漂浮浒苔常用的指数算法, 在提取海滩搁浅浒苔方面的研究还未有报道。在过去的研究中, 这三个指数主要用于卫星遥感数据, 而在搭载多光谱传感器的无人机遥感方面的应用较少。已有的研究结果表明^[7], VB-FAH 提取漂浮浒苔的效果优于 NDVI, 而与 DVI

表 3 三个研究区海滩搁浅浒苔生物量估算结果

Tab. 3 Estimated results of the beach stranding *Ulva prolifera* biomass in the three study areas

统计项	位置	海阳	乳山	文登
阈值	潮间带上部	0.36~0.50	0.29~0.61	0.27~0.63
	潮间带下部	0.16~0.36	0.12~0.29	0.15~0.27
浒苔提取面积/m ²	潮间带上部	41 785.27	48 148.76	46 732.13
	潮间带下部	26 643.97	5 529.75	40 492.97
浒苔平均厚度/cm	潮间带上部	8.03	4.24	21.08
	潮间带下部	5.44	2.58	18.12
浒苔平均密度/(kg·m ⁻³)	潮间带上部	329.62	348.18	343.47
	潮间带下部	249.9	237.21	224.78
浒苔生物量/t	潮间带上部	1 106	711	3 384
	潮间带下部	362	34	1 650
浒苔总生物量/t	—	1 468	745	5 034

的提取效果相当，而本文通过对这三个指数的比较发现，DVI在区分潮间带上部和潮间带下部海滩搁浅浒苔方面优于NDVI和VB-FAH，但在区分植被和非植被方面，NDVI则优于DVI和VB-FAH，这可能是由于漂浮浒苔的背景环境是海水而搁浅浒苔的背景环境是海滩造成的。

3.2 海滩搁浅生物量结果分析

通过对海阳、乳山、文登三个典型的海滩的搁浅浒苔生物量进行计算，浒苔总生物量分别为 1 468 t、745 t 和 5 034 t。这三个海滩搁浅浒苔的生物量差距比较明显，文登海滩的搁浅浒苔生物量最多，分别是海阳和乳山搁浅浒苔生物量的 3.4 倍和 6.8 倍，如果不及时清理，在很短的时间之内大量浒苔就会腐烂，发出恶臭的气味，严重影响滨海景观，给当地的旅游业造成冲击。当地政府每年都会组织大量的人力和机械设备来清除海滩上的搁浅浒苔，如果以载重为 10 t 的卡车来运输这些浒苔，清理完海阳、乳山、文登这三个研究区的海滩搁浅浒苔需要的车次分别为 147、75 和 504。为了更高效地清理海滩上的搁浅浒苔，需要根据浒苔的总生物量合理分配人力和机械设备。本文提出的海滩搁浅生物量估算方法，可以为浒苔的清理工作提供数据支持，方便决策部门合理配置资源。

4 结论

本文通过无人机获取的多光谱和可见光数据对

山东半岛海阳、乳山、文登的三个海滩的搁浅浒苔进行了航拍监测，并结合现场获取的地物光谱数据，选择了NDVI、DVI和VB-FAH三种指数算法对海滩搁浅浒苔与岸边植被、海水、沙滩的区分能力进行了对比研究，在此基础上，结合现场采样数据，对三个海滩的浒苔的生物量进行了估算，主要结论如下：

(1) 海滩搁浅浒苔和植被的光谱特征比较相似，在可见光波段有一个反射峰，在近红外波段有红边特征，使用这一特性，选择差值植被指数(如NDVI、DVI、VB-FAH)就可以将海滩搁浅浒苔和非植被地物进行区分。

(2) NDVI可以识别植被和非植被，但无法区分潮间带上部和潮间带下部分布的浒苔；DVI和VB-FAH对植被和非植被的区分度不高，但对不同分布的搁浅浒苔具有一定的区分度，其中，DVI对潮间带上部和潮间带下部分布浒苔的识别能力优于VB-FAH。

(3) 海阳、乳山、文登三个研究区海滩搁浅浒苔的分布特征主要是潮间带上部搁浅浒苔的厚度大于潮下带搁浅浒苔的厚度，潮间带上部搁浅浒苔的密度大于潮下带搁浅浒苔的密度，浒苔密度最大的是乳山潮间带上部，而浒苔密度最小的是文登潮间带下部。

(4) 海阳、乳山和文登这三个研究区的浒苔总生物量分别是 1 468 t、745 t 和 5 034 t，其中文登海滩搁浅浒苔生物量最大，而乳山海滩搁浅浒苔的生物量最小。

使用无人机遥感技术结合实地采样数据, 可以快速地估算海滩搁浅浒苔的生物量, 为搁浅浒苔的清理和资源合理分配提供技术支持。

参考文献:

- [1] 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.
YU Rencheng, SUN Song, YAN Tian, et al. Progresses and perspectives on green tide studies in the Yellow Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(5): 942-949.
- [2] YE Naihao, ZHANG Xiaowen, MAO Yuze, et al. 'Green tides' are overwhelming the coastline of our blue planet: taking the world's largest example[J]. Ecological Research, 2011, 26(3): 477-485.
- [3] HU Chuanmin, HE Mingxia. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area[J]. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2008, 89(33): 302-303.
- [4] 蒋兴伟, 刘建强, 邹斌, 等. 浒苔灾害卫星遥感应急监测监测系统及其应用[J]. 海洋学报, 2009, 31(1): 52-64.
JIANG Xingwei, LIU Jianqiang, ZOU Bin, et al. The satellite remote sensing system used in emergency response monitoring for *Enteromorpha prolifera* disaster and its application[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(1): 52-64.
- [5] HU Chuanmin, LI Daqiu, CHEN Changsheng, et al. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Journal of Geophysical Research-Oceans, 2010, 115: C05017.
- [6] SON Y B, MIN J-E, RYU J-H. 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, 2012, 47(3): 359-375.
- [7] XING Qianguo, HU Chuanmin. 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, 2016, 178: 113-126.
- [8] ZHANG Jianheng, SHI Jinting, GAO Song, et al. Annual patterns of macroalgal blooms in the Yellow Sea during 2007-2017[J]. Plos One, 2019, 14(1): e0210460.
- [9] DENG Lei, MAO Zhihui, LI Xiaojuan, et al. UAV-based multispectral remote sensing for precision agriculture: A comparison between different cameras[J]. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2018, 146: 124-136.
- [10] LIN Jiayuan, WANG Meimei, MA Mingguo, et al. Aboveground tree biomass estimation of sparse subalpine coniferous forest with UAV oblique photography[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1849.
- [11] ZHOU Zaiming, YANG Yanming, CHEN Benqing. Estimating *spartina alterniflora* fractional vegetation cover and aboveground biomass in a coastal wetland using SPOT6 satellite and UAV data[J]. Aquatic Botany, 2018, 144: 38-45.
- [12] XU Fuxiang, GAO Zhiqiang, SHANG Weitao, 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.
- [13] XU Fuxiang, GAO Zhiqiang, JIANG Xiaopeng, 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.
- [14] 李冬雪, 高志强, 尚伟涛, 等. 基于无人机多光谱影像的海滨景区浒苔信息提取研究[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(3): 438-446.
LI Dongxue, GAO Zhiqiang, SHANG Weitao, et al. Information extraction of *Ulva Prolifera* from coastal landscape using UAV multispectral remote sensing images[J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(3): 438-446.
- [15] ROUSE J W, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS[C]//Proceedings of the Third ERTS Symposium, Washington DC, 10-14 December 1973, 309-317.
- [16] RICHARDSON A J, EVERITT J H. Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity[J]. Geocarto International, 1992, 7(1): 63-69.
- [17] WEBB A. 统计模式识别(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
WEBB A. Statistical pattern recognition (Second edition)[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.

Estimation of green tide stranded biomass in the Yellow Sea based on unmanned aerial vehicle remote sensing

SHANG Wei-tao^{1, 2, 3}, GAO Zhi-qiang^{1, 2}, JIANG Xiao-peng^{1, 2, 3}, TIAN Xin-peng^{1, 2}, GUO Shao-fang⁴

(1. CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Yantai Institute of S&T Information, Yantai 264003, China)

Received: Jul. 8, 2020

Key words: UAV remote sensing; green tide; stranded biomass; multispectral

Abstract: *Ulva prolifera* stranded near a shore damages the coastal landscape, interferes with water sports, and seriously affects coastal tourism. In this study, the multispectral and visible light sensors carried using an unmanned aerial vehicle (UAV) were used to monitor the stranded *Ulva prolifera* on the beaches of Haiyang, Rushan, and Wendeng in the Shandong Peninsula. The normalized difference vegetation index (NDVI), difference vegetation index (DVI), and virtual baseline height floating algae index (VB-FAH) were selected to identify and evaluate the beach-stranded *Ulva prolifera* and shore vegetation and nonvegetation (sea water and sand), respectively, and the biomass of the stranded *Ulva prolifera* in three research areas was estimated. The results showed that the NDVI can identify vegetation and nonvegetation but it cannot identify the *Ulva prolifera* distributed in the upper and lower tidal zones. DVI and VB-FAH cannot distinguish between vegetation and nonvegetation but they can identify *Ulva prolifera* distributed in the upper and lower tidal zones. In these zones, DVI was superior to the VB-FAH in identifying the distribution of *Ulva prolifera*. Therefore, the biomass estimation model of the beach-stranded *Ulva prolifera* was established by masking shore vegetation; and using DVI, the biomass of the beach-stranded *Ulva prolifera* was estimated. The biomass of the stranded *Ulva prolifera* was 1468, 745, and 5034 t in the beaches of Haiyang, Rushan, and Wendeng. The method proposed in this study can provide technical support for the cleaning up of the stranded *Ulva prolifera* and rational use of resources.

(本文编辑: 康亦兼)