

黄海典型漂浮大型藻类光谱特征分析*

安德玉^{1,2} 邢前国^{1,2①} 魏振宁^{1,2} 李琳¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所海岸带环境过程与生态修复重点实验室 烟台 264003;

2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 利用实测高光谱和多光谱相机数据对在黄海海域采集的浒苔和马尾藻样本进行光谱特征分析。结果显示: 漂浮大型藻类的高光谱反射率均值(R_{mean_H})与多光谱反射率均值(R_{mean_M})、高光谱藻类指数(VB-FAH_H)与多光谱藻类指数(VB-FAH_M)之间的相对误差小于 15.6%, 说明这两种数据具有较好的一致性; 基于光谱特征波长的反射率建立比值光谱指数, 其中浒苔和马尾藻的差异最为明显的是 R_{640}/R_{554} 指数; 基于多光谱相机计算反射谷深度指数(T-depth), 采用阈值法来区分浒苔和马尾藻, T-depth 阈值的区分精度分别为 $69.6\% \pm 30.0\%$ 和 $69.6\% \pm 24.3\%$, 稍优于虚拟基线漂浮藻类指数(VB-FAH)阈值的区分精度。

关键词 浒苔; 马尾藻; 光谱特征; 高光谱; 多光谱

中图分类号 TP79; X43 doi: 10.11693/hyhz20171200331

漂浮大型藻类是海洋生态系统中重要的组成部分之一, 具有较高的营养价值、药用价值和生态价值(Ambrosio *et al.*, 2003; Sukatar *et al.*, 2006; Cho *et al.*, 2010; Jiao *et al.*, 2010)。在沿海地区, 漂浮藻类(如马尾藻)可以成为沙丘植物的天然肥料, 有助于防止海岸侵蚀(Tsoar, 2005; Anthony *et al.*, 2006)。但漂浮大型藻类的过度繁殖, 不仅会对海洋生态环境造成危害, 而且会在清理上耗费大量的人力、物力、财力。近年来, 绿潮、金潮等生态灾害的频发(de Széchy *et al.*, 2012; Gower *et al.*, 2013; Maurer *et al.*, 2015; Oyesiku *et al.*, 2015), 对海洋生态环境、经济和人类生活产生了很大影响。马尾藻是引起金潮灾害的主要藻种, 美国德克萨斯州每年清理海滩上的马尾藻都要花费至少 290 万美元(Webster *et al.*, 2013)。浒苔是引起绿潮灾害的主要藻种, 2008 年中国的黄海绿潮严重威胁了青岛奥帆比赛的顺利进行, 造成巨大的经济损失和严重的社会影响。及时获取漂浮大型藻类的分布信息, 对于藻类灾害的预测、防控及其清理等具有重要意义。

遥感具有范围广、信息多、更新快、多角度的优点, 能够迅速判断漂浮藻类分布情况, 是漂浮藻类分

布监测与估算的主要手段之一。利用遥感技术提取漂浮大型藻类信息的主要方法有监督分类法(Casal *et al.*, 2011, 2012)、最大叶绿素指数法(MCI)(Gower *et al.*, 2006)、海表面藻类爆发指数法(SABI)(Alawadi, 2010)、漂浮藻类指数法(FAI)(Hu, 2009)、虚拟基线漂浮藻类指数法(VB-FAH)(Xing *et al.*, 2016)、水色指数算法(Hu *et al.*, 2012)等, 均具有较好的提取结果。

近年, 绿潮、金潮在黄海、东海出现(Xing *et al.*, 2017)。尤其是 2017 年, 黄海“三潮”齐发, 增加了防治的难度。及时识别藻种信息, 可为藻类灾害的防控提供决策支持。漂浮大型藻类光谱特征是遥感识别藻类的重要基础, 本研究将基于实测高光谱和多光谱成像数据分析漂浮大型藻类光谱特征, 尝试利用光谱特征区分浒苔和马尾藻, 为高光谱和多光谱数据结合进行漂浮大型藻类的识别监测研究提供参考。

1 数据与方法

1.1 漂浮大型藻类样品采集

本研究于 2017 年 6 月 9 日—6 月 19 日进行了野外

* 国家自然科学基金项目, 41676171 号; 青岛国家海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ02 号; 中国科学院战略性先导科技专项项目, XDA11020305 号。安德玉, 博士研究生, E-mail: dyan@yic.ac.cn

通讯作者: 邢前国, 博士生导师, 研究员, E-mail: qgxing@yic.ac.cn

收稿日期: 2017-12-29, 收修改稿日期: 2018-07-04

调查与采样, 此次调查区域为黄海 120°0'26"—123°30'7"E, 33°37'29"—36°30'1"N 的海区内。航次中对不同规模的漂浮大型藻类分别进行采集, 样本需沥干、遮光冷藏,

共采集样本 10 份, 同时记录样点的海温、透明度、经纬度等信息; 本航段的主要漂浮大型藻类为浒苔(*Ulva prolifera*)、马尾藻(*Sargassum horneri*)(图 1, 表 1)。

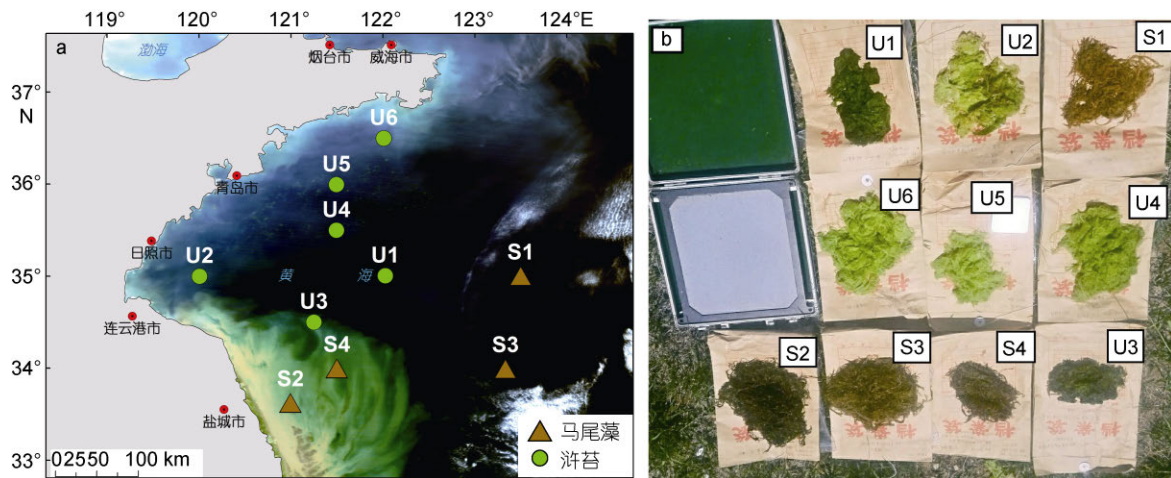


图 1 a: 采样位置; b: 马尾藻和浒苔样本照片

Fig.1 a: The sampling location; b: The photos of *Sargassum horneri* and *Ulva prolifera*

表 1 采样点详细信息
Tab.1 Sampling records

样本编号	时间(hh:mm dd/mm/yyyy)	海温(°C)	气温(°C)	透明度(m)	水深(m)	样本
S1	10:47 09/6/2017	21.1	22.0	14.00	77	马尾藻
S2	15:28 12/6/2017	23.4	21.9	0.70	15	马尾藻
S3	20:30 13/6/2017	18.6	19.5	×	68	马尾藻
S4	09:10 14/6/2017	×	20.2	0.85	18	马尾藻
U1	20:22 09/6/2017	20.8	21.8	×	50	浒苔
U2	09:53 10/6/2017	20.8	20.5	5.50	29	浒苔
U3	13:40 15/6/2017	23.4	23.3	1.50	21	浒苔
U4	05:34 17/6/2017	21.0	22.0	6.00	45	浒苔
U5	14:11 18/6/2017	22.3	22.8	12.50	39	浒苔
U6	16:29 19/6/2017	24.7	23.2	10.00	24	浒苔

1.2 浒苔和马尾藻样本光谱数据采集及处理

1.2.1 高光谱数据采集及处理 选择晴朗的天气进行浒苔和马尾藻样本高光谱测量, 采用的光谱仪为 USB4000(Ocean Optics Inc.), 波长范围为 345.30—1046.12nm, 光谱分辨率为 0.2nm; 样本平铺到牛皮纸上, 先测参考板的辐射亮度值, 再测样本的辐射亮度值, 重复三次取平均值, 反射率计算公式为

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

式中: $R(\lambda)$ 代表被测物体的反射率, $L(\lambda)$ 代表地物辐射亮度值, $L_p(\lambda)$ 代表参考板辐射亮度值, $\rho(\lambda)$ 是参考板的反射率。

为消除噪声影响, 采用移动平均的方法进行平滑

处理。考虑到潜在的实际高光谱图像应用, 如 HICO、HypSIIRI 等(姜明静等, 2013), 原始光谱分辨率经重采样处理成 5nm, 对重采样后的数据进行分析研究。

1.2.2 多光谱数据采集及处理 将 10 份样本与参考板分别放到牛皮纸上, 采用 ADC Snap 多光谱相机进行拍摄。该相机的光谱范围为 520—920nm, 其红、绿、蓝三通道分别对应近红外、红光、绿光波段, 相当于 Landsat TM 数据的 4、3、2 波段; 基于公式(1)计算多光谱相机图像各波段的反射率。

1.3 高光谱数据及多光谱数据的一致性分析

采用均值法和指数法进行漂浮大型藻类高光谱与多光谱反射率之间的一致性分析。鉴于前人研究提出并使用的几个藻类指数中, FAI 和 VB-FAH(式 2)相

对于其他指数受外界环境的影响较小,有利于检测漂浮大型藻类(Hu, 2009; Xing *et al*, 2016)。但 FAI 计算需要短波红外波段,而本研究多光谱相机缺乏该波段,因此选择 VB-FAH 指数作为指标。

$$VB-FAH = (R_3 - R_1) + (R_1 - R_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1) / (2\lambda_3 - \lambda_2 - \lambda_1), \quad (2)$$

式中, R_i 代表 i 波段的反射率, λ_i 代表 i 波段的波长。

具体方法是:利用 ENVI 软件的 ROI 模块及统计功能得到 10 个样本在每个波段上的反射率平均值及 VB-FAH, 记为 R_{mean_M} 、VB-FAH_M; 基于多光谱相机三个波段的范围计算 10 个样本的高光谱反射率平均值, 记为 R_{mean_H} , 并用其计算 VB-FAH, 记为 VB-FAH_H。通过 R_{mean_M} 与 R_{mean_H} 、VB-FAH_M 与 VB-FAH_H 之间的相对误差来判断两者是否具有有一致性。相对误差小, 说明一致性较好; 反之, 一致性较差。

1.4 光谱指数的建立

由于比值法能够较好地减少背景因素的影响, 扩大光谱差异, 因此通过分析浒苔和马尾藻的光谱特征, 建立比值光谱指数 RI(Ratio Index, 公式 3), 以更好地区分浒苔和马尾藻。

$$RI = R_i / R_j, \quad (3)$$

式中, R_i 和 R_j 分别代表 i 波段和 j 波段的反射率。

鉴于多光谱相机的波段与光谱仪不同, 比值光谱指数可能不适用。因此本研究尝试利用多光谱相机的三个波段设计多光谱指数, 采用阈值法进行浒苔和马尾藻的区分, 并进行精度评价。精度评价的主要方法如下:

采用 VB-FAH 指数提取藻类信息, 在此基础上, 利用多光谱指数设置阈值区分马尾藻和浒苔。通过公式(4)计算区分精度。阈值选取以能够较大程度地区分马尾藻和浒苔为原则(即马尾藻区分精度与浒苔区分精度交叉点), 并与 VB-FAH 的区分结果作对比。

$$A = \frac{N_{\text{distinguish}_i}}{N_{\text{total}_i}}, \quad (4)$$

式中, A 代表区分精度; $N_{\text{distinguish}_i}$ 代表区分结果中每个样本的浒苔或马尾藻像元数之和; N_{total_i} 代表每个样本中提取的浒苔或马尾藻总像元数; i 代表样本编号。

2 结果和讨论

2.1 浒苔和马尾藻光谱特征分析

浒苔和马尾藻的光谱特征表现为可见光反射率低, 近红外反射率高, 具有明显的“红边”现象, 但差

异明显(图 2)。其差异主要体现在:

(1) 可见光波段范围内反射率的峰值位置和数量不同(图 2a)。浒苔光谱反射率峰值多位于 554nm(绿峰); 马尾藻光谱反射率峰值位于 600nm、640nm, 两个反射率峰值的大小相近, 两者之间存在一较浅的反射谷(628nm), 是由于马尾藻中叶绿素 c 的吸收而形成的, 而浒苔中不含叶绿素 c (Rodríguez *et al*, 2017)。

(2) 反射率随波长的变化不同(图 2b)。体现在:

①480—550nm, 浒苔光谱反射率的一阶导数为正值, 反射率增加; 而马尾藻光谱反射率的一阶导数接近于 0, 反射率变化不大。

②550—600nm, 浒苔光谱反射率的一阶导数为负值, 反射率减小; 而马尾藻为正值, 反射率增加。

③625—650nm, 浒苔光谱反射率的一阶导数小于马尾藻。

上述差异的主要原因是两者所含的主要色素不同, 浒苔含有叶绿素 a 、 b 和叶黄素; 马尾藻含有叶绿素 a 、 c 和岩藻素。受藻类色素吸收的影响, 光谱响应不同(Rodríguez *et al*, 2017)。

综上所述, 500—650nm 波段范围内浒苔和马尾藻的光谱特征差异最为明显, 可尝试利用浒苔绿峰(R_{554})和马尾藻可见光反射峰(R_{600} 、 R_{640})及 600—640nm 之间的反射率最小值(R_{628})区分浒苔和马尾藻, 与前人的研究结果较为一致。Hu 等(2015)的研究提到利用 632nm 和 580nm、650nm 的反射率特征可以区分马尾藻与其他海面漂浮物质; Rodríguez 等(2017)通过藻类的吸收光谱特征结合藻类色素含量对藻类进行分类, 结果表明区分绿藻和褐藻的特征波段范围为 510—528nm、596—601nm 以及 645nm。

2.2 漂浮藻类多光谱反射率与高光谱反射率之间的一致性分析

从光谱反射率图像看多光谱相机的三波段对应于高光谱反射率的三个特征区域, 即可见光峰值、红谷及近红外反射率高峰区; 绿、红波段对应浒苔和马尾藻高光谱反射率一阶导数差异明显的区域(图 2)。从光谱反射率平均值看, R_{mean_M} 和 R_{mean_H} 之间的相对误差在红波段和近红外波段均小于 8%, 在绿波段小于 15.6%, 两者较为一致(图 3b)。从藻类指数看, VB-FAH_M 与 VB-FAH_H 的数值区间相近, 相对误差为 10.12%, 较为一致(图 3d)。综上所述, 多光谱反射率与高光谱反射率之间具有一致性, 说明单点测量的窄波段高光谱反射率与整体测量的宽波段多光谱反

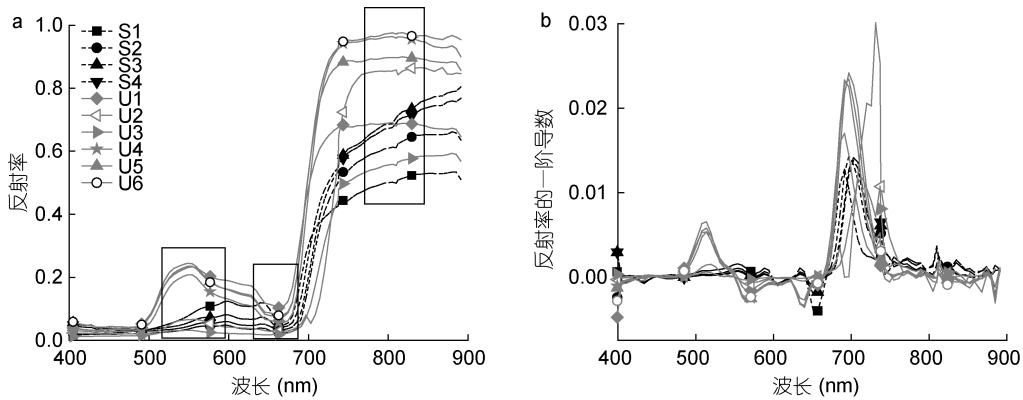


图 2 a: 漂浮藻类高光谱反射率曲线; b: 漂浮藻类反射率的一阶导数

Fig.2 a: Hyperspectral reflectance curve of the floating macroalgae; b: The first derivative of spectral reflectance
注: 图 a 中黑色框代表多光谱图像的三个波段的范围; 图中实线和虚线分别代表浒苔和马尾藻

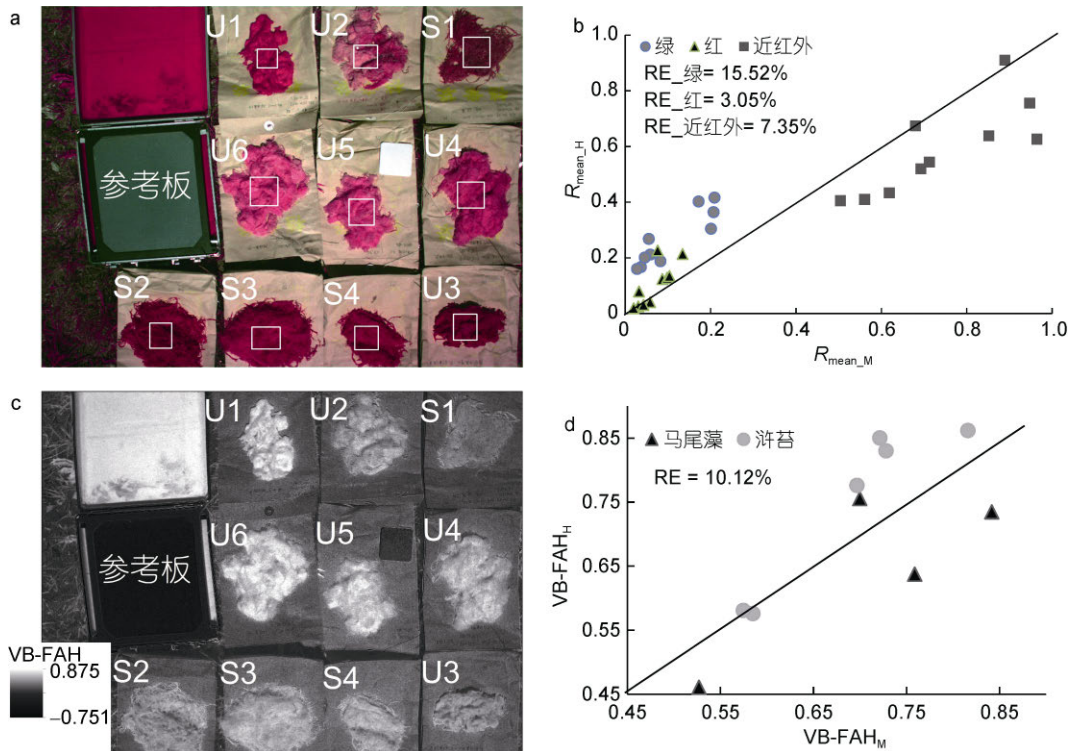


图 3 a: ADC Snap 多光谱反射率图像; b: 多光谱反射率均值(R_{mean_M})与高光谱反射率均值(R_{mean_H})对比; c: 基于多光谱反射率计算的指数 VB-FAH; d: VB-FAH_M 和 VB-FAH_H 对比

Fig.3 a: The multispectral reflectance image from ADC Snap; b: Comparison between R_{mean_M} and R_{mean_H} ; c: The calculation results of the index (VB-FAH) based on the multispectral reflectance; d: Comparison between VB-FAH_M and VB-FAH_H
注: 图 a 中白色框代表每个样本选择的 ROI 范围, 图 c、d 中的 RE 代表相对误差

射率结合研究的方法具有可行性。已有学者根据海藻高光谱特征, 通过卫星影像数据, 进行绿藻和马尾藻区分试验(Casal *et al*, 2012; 蔡晓晴等, 2014)。

2.3 浒苔和马尾藻的光谱指数对比

2.3.1 高光谱指数对比 为更好地体现浒苔和马尾藻的光谱差异, 本研究基于上述特征, 选择 R_{554} 、

R_{600} 、 R_{628} 和 R_{640} , 计算两两之间比值。结果显示, 漂浮大型藻类的比值光谱指数 R_{600}/R_{554} 、 R_{640}/R_{554} 和 R_{640}/R_{628} 差异较大: 浒苔的光谱指数小于 1, 马尾藻的光谱指数大于 1(表 2)。尤其是 R_{628}/R_{554} 指数, 浒苔均小于 0.59, 仅是马尾藻的 1/3—1/2, 差异最大, 可尝试利用该指数区分浒苔和马尾藻。

表 2 马尾藻和浒苔比值光谱指数对比
Tab.2 Comparison of the ratio index between the *Sargassum horneri* and *Ulva prolifera*

样本	指数	R_{600}/R_{554}	R_{628}/R_{554}	R_{640}/R_{554}	R_{628}/R_{600}	R_{640}/R_{600}	R_{640}/R_{628}
S1		1.462	1.261	1.406	0.863	0.962	1.115
S2		1.221	0.908	1.008	0.744	0.826	1.111
S3		1.343	1.098	1.211	0.818	0.902	1.102
S4		1.242	0.987	1.084	0.795	0.873	1.099
U1		0.811	0.741	0.588	0.913	0.725	0.794
U2		0.999	0.566	0.517	0.567	0.517	0.913
U3		0.703	0.635	0.572	0.903	0.813	0.900
U4		0.629	0.526	0.386	0.837	0.614	0.734
U5		0.657	0.569	0.416	0.866	0.633	0.731
U6		0.687	0.607	0.450	0.883	0.655	0.742

2.3.2 多光谱指数对比 鉴于浒苔和马尾藻的光谱差异主要是由两者所含色素含量的不同而造成的,因此根据浒苔和马尾藻反射光谱曲线在红波段的反射谷特征以及反射率随波长的变化不同的特征,采用邢前国等(2013)提出的反射谷深度指数(Trough-depth, T-depth)来区分浒苔和马尾藻(式 5, 图 4)。该指数能够很好地表征潮滩表层沉积物叶绿素含量(邢前国等, 2013)。

$T\text{-depth} = (R_1 - R_2) + (R_3 - R_1) \times (\lambda_2 - \lambda_1) / (\lambda_3 - \lambda_2)$, (5)
式中, R_i 、 λ_i 分别代表多光谱相机的第 i 波段的平均反射率和中心波长。

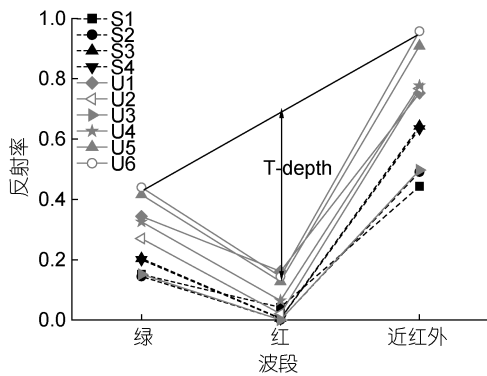


图 4 每个样本的多光谱反射率均值

Fig.4 The average of multispectral reflectance of each sample

对于浒苔和马尾藻的区分, T-depth 阈值确定为 0.30, 区分精度分别为 $69.6\% \pm 30.0\%$, $69.6\% \pm 24.3\%$ (图 5a); VB-FAH 阈值确定为 0.44, 区分精度分别为 $68.5\% \pm 31.5\%$, $68.5\% \pm 24.7\%$ (图 5c)。从区分精度看, T-depth 指数区分精度高于 VB-FAH。从错分像元数看, T-depth 的错分像元数小于 VB-FAH(表 3)。从单个

样本区分精度看, 60%的样本 T-depth 区分精度高于 VB-FAH(表 3)。综合来看, T-depth 指数区分结果稍优于 VB-FAH 的区分结果。

表 3 样本区分精度(%)
Tab.3 The accuracy of each sample(%)

		T-depth	VB-FAH
马尾藻	S1	99.82	99.46
	S2	84.02	85.55
	S3	50.79	48.67
	S4	52.06	53.35
	U1	22.58	29.23
	U2	82.02	85.82
浒苔	U3	13.87	9.15
	U4	79.64	70.27
	U5	84.81	83.15
	U6	88.32	87.66
错分像元数	马尾藻	62839	63128
	浒苔	93926	97512

3 结论

(1) 浒苔和马尾藻的 R_{mean_M} 与 R_{mean_H} 、 $VB\text{-}FAH_M$ 和 $VB\text{-}FAH_H$ 之间具有较好的一致性, 说明高光谱数据和多光谱数据结合研究海藻区分及其分布监测具有可行性, 为区域海藻灾害监测研究提供参考。

(2) 浒苔和马尾藻因其生理状态、色素含量等不同, 其光谱特征在可见光和近红外波段会显示差异。由光谱特征波长反射率 R_{554} 、 R_{600} 、 R_{628} 和 R_{640} 计算的比值光谱指数中, R_{640}/R_{554} 指数差异最明显, 能够较好地区分浒苔和马尾藻。T-depth 指数在浒苔和马尾藻的区分上, 精度分别为 $69.6\% \pm 30.0\%$ 、 $69.6\% \pm$

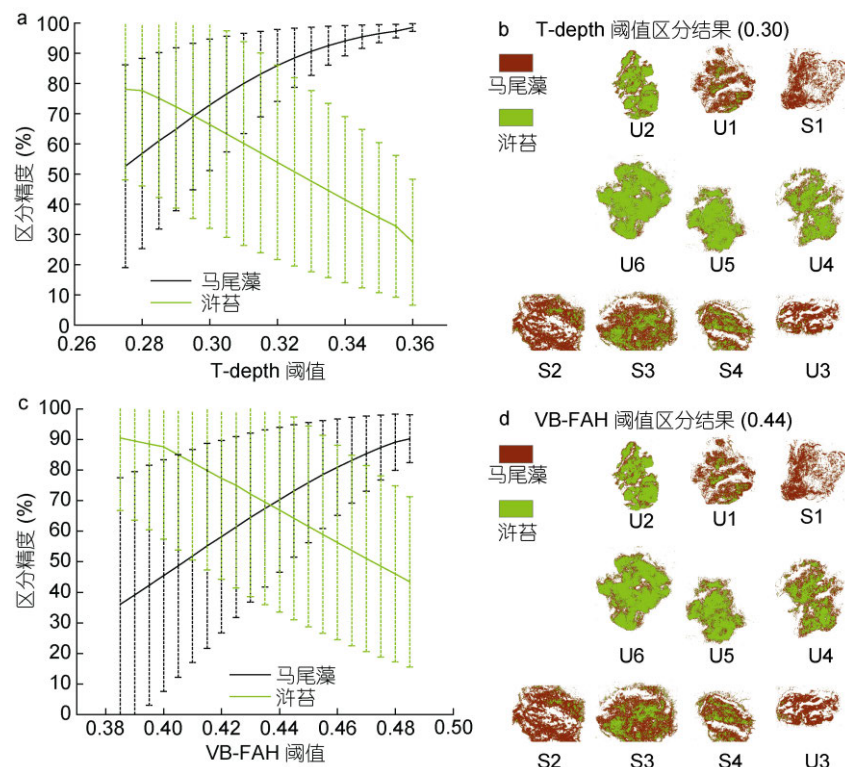


图 5 T-depth 和 VB-FAH 阈值区分精度

Fig.5 The accuracy of the results obtained by using the threshold value of the T-depth and VB-FAH
注:虚线是误差线,代表以该阈值区分浒苔或马尾藻的每个样本的区分精度的标准差

24.3%, 区分精度较好, 说明从光谱特征上识别海藻种类具有可行性。

本研究光谱分析是基于现场采集的浒苔和马尾藻端元光谱, 对于不同生长季节与环境状态的光谱特征及在卫星影像上的实际应用还需进一步研究。

致谢 本研究的海藻样品数据来源于中国科学院烟台海岸带研究所 2017 年 6 月科学三号浒苔联合调查航次, 作者对参与本航次的成员深表感谢!

参 考 文 献

- 邢前国, 禹定峰, 娄明静等, 2013. 基于现场光谱的潮滩表层沉积物叶绿素-a 含量遥感模式. 光谱学与光谱分析, 33(8): 2188—2191
- 娄明静, 邢前国, 施平, 2013. 海岸带高光谱遥感与近海高光谱成像仪(HICO). 遥感技术与应用, 28(4): 627—632
- 蔡晓晴, 崔廷伟, 秦平等, 2014. 基于 GOCI 的浒苔、马尾藻绿潮光谱特征与可分性研究. 见: 中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会. 北京: 中国灾害防御协会风险分析专业委员会, 774—779
- Alawadi F, 2010. Detection of surface algal blooms using the newly developed algorithm surface algal bloom index (SABI). In: Proceedings Volume 7825, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions. Toulouse,

France: SPIE, 782506

- Ambrosio A L, Sanz L, Sánchez E I *et al*, 2003. Isolation of two novel mannan-and L-fucose-binding lectins from the green alga *Enteromorpha prolifera*: biochemical characterization of EPL-2. Archives of Biochemistry and Biophysics, 415(2): 245—250
- Anthony E J, Vanhee S, Ruz M H, 2006. Short-term beach-dune sand budgets on the North Sea coast of France: sand supply from shoreface to dunes, and the role of wind and fetch. Geomorphology, 81(3—4): 316—329
- Casal G, Kutser T, Domínguez-Gómez J A *et al*, 2011. Mapping benthic macroalgal communities in the coastal zone using CHRIS-PROBA mode 2 images. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 94(3): 281—290
- Casal G, Sánchez-Carnero N, Domínguez-Gómez J A *et al*, 2012. Assessment of AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) sensor to map macroalgal communities on the Ría de vigo and Ría de Aldán coast (NW Spain). Marine Biology, 159(9): 1997—2013
- Cho M, Yang C, Kim S M *et al*, 2010. Molecular characterization and biological activities of watersoluble sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera*. Food Science and Biotechnology, 19(2): 525—533
- de Széchy M T M, Guedes P M, Baeta-Neves M H *et al*, 2012. Verification of *Sargassum natans* (Linnaeus) Gaillon (Heterokontophyta: Phaeophyceae) from the Sargasso Sea

- off the coast of Brazil, western Atlantic Ocean. Check List, 8(4): 638—641
- Gower J, Hu C M, Borstad G *et al*, 2006. Ocean color satellites show extensive lines of floating *Sargassum* in the Gulf of Mexico. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 44(12): 3619—3625
- Gower J, Young E, King S, 2013. Satellite images suggest a new *Sargassum* source region in 2011. Remote Sensing Letters, 4(8): 764—773
- Hu C M, 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. Remote Sensing of Environment, 113(10): 2118—2129
- Hu C M, Feng L, Hardy R F *et al*, 2015. Spectral and spatial requirements of remote measurements of pelagic *Sargassum* macroalgae. Remote Sensing of Environment, 167: 229—246
- Hu C M, Lee Z P, Franz B A, 2012. Chlorophyll *a* algorithms for oligotrophic oceans: a novel approach based on three-band reflectance difference. Journal of Geophysical Research: Oceans, 117(C1): C01011
- Jiao L L, Jiang P, Zhang L P *et al*, 2010. Antitumor and immunomodulating activity of polysaccharides from *Enteromorpha intestinalis*. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 15(3): 421—428
- Maurer A S, De Neef E, Stapleton S, 2015. *Sargassum* accumulation may spell trouble for nesting sea turtles. Frontiers in Ecology and the Environment, 13(7): 394—395
- Oyesiku O O, Egunyomi A, 2015. Identification and chemical studies of pelagic masses of *Sargassum natans* (Linnaeus) gaillon and *S. fluitans* (Borgesen) borgesien (brown algae), found offshore in Ondo State, Nigeria. African Journal of Biotechnology, 13(10): 1188—1193
- Rodríguez Y C, Gómez J A D, Sánchez-Carnero N *et al*, 2017. A comparison of spectral macroalgae taxa separability methods using an extensive spectral library. Algal Research, 26: 463—473
- Sukatar A, Karabay-Yavaşoglu N U, Ozdemir C *et al*, 2006. Antimicrobial activity of volatile component and various extracts of *Enteromorpha linza* (Linnaeus) J. Agardh from the coast of Izmir, Turkey. Annals of Microbiology, 56(3): 275—279
- Tsoar H, 2005. Sand dunes mobility and stability in relation to climate. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 357(1): 50—56
- Webster R K, Linton T D, 2013. Development and implementation of *Sargassum* early advisory system (SEAS). Shore & Beach, 81(3): 1—6
- Xing Q G, Guo R H, Wu L L *et al*, 2017. High-Resolution satellite observations of a new hazard of golden tides caused by floating *Sargassum* in Winter in the Yellow Sea. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14(10): 1815—1819
- 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. Remote Sensing of Environment, 178: 113—126

SPECTRAL FEATURES AND ANALYSIS OF TYPICAL FLOATING MACROALGAE IN THE YELLOW SEA

AN De-Yu^{1,2}, XING Qian-Guo^{1,2}, WEI Zhen-Ning^{1,2}, LI Lin¹

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The spectral features of the floating macroalgae in the Yellow Sea were analyzed using the data measured with hyperspectral-spectroradiometer and multispectral-camera. The results show that the hyperspectral reflectance of *Ulva prolifera* and *Sargassum horneri* are consistent with those measured by the multispectral camera. The ratio spectrum indexes of those two macroalgae, especially R_{640}/R_{554} , are obviously different. The classification accuracy of *Ulva prolifera* and *Sargassum horneri* using the trough depth (T-depth) threshold method is $69.6\% \pm 30.0\%$ and $69.6\% \pm 24.3\%$, respectively, which is slightly better than the accuracy of Virtual-Baseline Floating macroAlgae Height (VB-FAH). This work shows the potential of identifying floating green macroalgae and brown macroalgae using optical indexes.

Key words *Ulva prolifera*; *Sargassum horneri*; spectral features; hyperspectrum; multispectrum