

海面漂浮绿潮生物量光谱特征及估算模型

肖艳芳¹, 张 杰¹, 崔廷伟¹, 巩加龙², 夏深圳³, 刘荣杰¹, 秦 平², 牟 冰²

¹国家海洋局第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; ²中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;

³南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023

摘要 海上漂浮绿潮生物量的估算对实现绿潮处置资源高效配置、提高应急处置效率具有重要意义。利用现场实验获取的漂浮绿潮单位面积生物量及其地物反射光谱数据, 分析了漂浮绿潮光谱特征和多种光谱指数与单位面积生物量之间的响应关系, 基于此构建并验证了漂浮绿潮生物量估算模型。结果显示漂浮绿潮近红外波段反射率与单位面积生物量之间存在强相关关系(相关系数 $R \approx 0.8$); 光谱指数以及 960 nm 反射峰和 1060 nm 吸收峰峰值与漂浮绿潮单位面积生物量显著相关($R > 0.7$); 基于 R_{960}/R_{670} 和 R_{1060}/R_{670} ($R_{670}, R_{960}, R_{1060}$ 分别为 670, 960, 1060 nm 处的反射率) 构建的漂浮绿潮生物量指数估算模型具有较高的精度($R^2 \approx 0.9$, 相对误差 $R_{PE} \approx 27\%$)。研究结果为利用遥感技术实现海面漂浮绿潮生物量估算提供了参考。

关键词 光谱学; 遥感; 生物量; 光谱特征; 绿潮

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0430001

Spectral Characteristics and Estimation Models of Floating Green Tide Biomass on Sea Surface

Xiao Yanfang¹, Zhang Jie¹, Cui Tingwei¹, Gong Jialong²,
Xia Shenzhen³, Liu Rongjie¹, Qin Ping², Mou Bing²

¹ The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong 266061, China;

² College of Information Science & Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;

³ College of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract Accurate estimation of the floating green tide biomass has great significance to make the emergency response plan and realize the highly efficient allocation of resources. Relationships among the biomass per unit area of the floating green tide, spectral characteristics and the most frequently used indices for the green tide detection are analyzed with the *in-situ* data of floating green tide biomass and reflectance. Based on the analysis the estimation models are established and verified. Results show that the near infrared reflectance is strongly correlated with the biomass per unit area of green tide (correlation coefficient $R \approx 0.8$); strong correlation exists between the biomass per unit area and the frequently used indices, the reflectance peak value is located at 960 nm and 1060 nm ($R > 0.7$); estimation models of the floating green tide with exponent form based on R_{960}/R_{670} and R_{1060}/R_{670} ($R_{670}, R_{960}, R_{1060}$ are the reflectance at 670, 960, 1060 nm, respectively) have the highest accuracy ($R^2 \approx 0.9$, relative error $R_{PE} \approx 27\%$). Research results can provide references for the floating green tide estimation on the sea surface by the remote sensing technology.

Key words spectroscopy; remote sensing; biomass; spectral characteristics; green tide

OCIS codes 300.6320; 010.0280; 280.4991

1 引 言

绿潮是大型藻类在特定环境条件下爆发性增殖、聚集的生态异常现象^[1]。从 1980 年开始, 美国、加拿大、日本等国家均持续爆发了由石莼科(Ulvaceae)藻类引发的绿潮^[2-6]。2008 年 5 月青岛奥帆赛即将举行之

收稿日期: 2016-09-27; 收到修改稿日期: 2016-11-29

基金项目: 国家自然科学基金(41506203, 41476159)、中韩国际合作项目(GY2014T03)

作者简介: 肖艳芳(1985—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事海洋光学遥感方面的研究。E-mail: xiaoyanfang@fio.org.cn

际,黄海海域爆发了特大浒苔绿潮灾害,对奥帆赛的顺利举行造成严重威胁,此次绿潮灾害持续时间之长、覆盖范围之大,在全球范围内都属罕见^[7-8]。此后,黄海海域连年发生绿潮灾害,已呈常态化之势。准确估算海上漂浮绿潮的生物量对于制定应急处置方案、实现绿潮处置资源高效配置、提高应急处置效率等具有重要意义。目前绿潮生物量的估算主要是通过水平拖网方法获取的单位面积生物量乘以遥感图像中的绿潮覆盖面积得到^[9-10],对于大规模的绿潮灾害来说,该方法取样范围非常有限,获得的单位面积生物量没有考虑漂浮绿潮聚集程度不同而导致的差异,同时,由于船舶取样的局限性,不能进行长时间的连续观测,无法满足灾害应急处置的需求。

遥感技术具有大尺度、多空间分辨率、多/高光谱、快速和可进行周期性观测的优势,是大范围绿潮监测的重要手段,在绿潮溯源、时空分布、演变过程和漂移路径监测等方面已经发挥了重要作用^[11-18]。张娟等^[12-21]分析了浒苔的反射光谱特征。Hu等^[11,18,22-23]分别提出了FAI(floating algal index)、IGAG[index of floating green algae for GOCI(geostationary ocean color imager)]、NDAI(normalized difference algae index)、MGTI(multi-spectral green tide index)等绿潮遥感探测新算法。王婷等^[24-25]分析了黄海浒苔的时空分布特征。目前,绿潮遥感探测的相关研究主要集中在利用多源遥感数据进行绿潮面积信息的提取,但基于遥感技术的绿潮生物量估算研究在国内外尚不多见。

本文基于现场实验所测量的绿潮单位面积生物量和地物反射光谱数据,分析绿潮单位面积生物量与各波段反射率和多种地物光谱特征的光谱响应关系,在此基础上构建海面漂浮绿潮单位面积生物量的地物光谱估算模型并进行验证,为基于遥感技术实现海面漂浮绿潮的生物量估算提供参考。与传统的多光谱卫星数据相比,地物光谱仪获取的光谱数据具有更高的光谱分辨率(小于10 nm),更容易识别出绿潮生物量的诊断性光谱特征。此外,利用地物光谱数据构建生物量估算模型也是卫星遥感应用的基础。

2 实验数据

与赤潮不同,绿潮是由大型藻类引发的生态灾害,无法通过水样采集的方式获取藻体并进行相关测量。由于绿潮通常漂浮于海面上,随着海面风场和流场不断漂移,基于船舶的现场光谱和生物量测量存在很大困难,因此,结合绿潮的漂浮特性,将绿潮打捞上岸,利用岸边的固定装置开展了绿潮生物量和地物光谱的观测实验,避免了因船舶晃动和绿潮起伏、漂移引起的测量误差。实验于2015年7月10日在青岛近岸进行,获取了漂浮绿潮的单位面积生物量和地物反射率光谱数据,实验期间天气晴朗。实验利用一个底部和四周均为黑色的固定容器(长×宽×高:100 cm×50 cm×50 cm),内部盛满海水,在其表面顺序放置不同质量的浒苔(浒苔为黄海绿潮的主要藻种,浒苔的质量为用滤纸吸干藻体表面水分后的重量,利用电子天平称取。单位面积生物量即为浒苔质量/容器上表面面积),尽量使浒苔在海水表面均匀分布,然后测量其反射率。分别于10:00—12:00和14:00—15:00进行了两组实验,第一组实验设置了32个浒苔样本,质量为100~4050 g(100~1050 g之间质量间隔为50 g,1050~2050 g之间质量间隔为100 g,2050~3050 g之间质量间隔为200 g,3050~4050 g之间质量间隔为500 g);第二组实验设置了16个浒苔样本,质量为100~1050 g(质量间隔为50 g)。计算得到实验样本的单位面积生物量范围为0.22~17.89 kg/m²。范士亮等^[9]和刘湘庆^[10]利用平行拖网获取了不同生长时期黄海漂浮绿潮的单位面积生物量,其最大值不超过2 kg/m²,该实验样本生物量的设置范围涵盖了真实海洋环境条件下漂浮绿潮单位面积生物量的可能值。考虑到绿潮到达近岸后,在风浪的作用下会发生堆积现象,实验将样本的单位面积生物量范围进行了适当扩充。

光谱测量采用美国ASD公司的FieldSpec Pro FR2500便携式光谱仪,波段值范围为350~2500 nm,最快采集速度为100 ms,其中,350~1000 nm的光谱采样间隔为1.4 nm,光谱分辨率为3 nm,1000~2500 nm的光谱采样间隔为2 nm,光谱分辨率为10 nm。观测时,光谱仪探头垂直向下,距离浒苔表面约20 cm。在容器内选取2个观测点,每个观测点记录10条光谱,剔除异常值后2个观测点的反射率平均值作为该浒苔样本的光谱反射值,每个浒苔样本测量过程中均进行标准白板的测量。

实验共获取了48组单位面积生物量-反射率观测数据,其中24组数据用于模型构建,剩余24组数据用于模型验证。实验过程中还测量了未放置浒苔时容器内海水,以及控干水分后浒苔的反射光谱[图1(a)]。图1(b)给出了不同绿潮生物量在800 nm波段处的反射率值,可以看出当布放的绿潮不超过1500 g

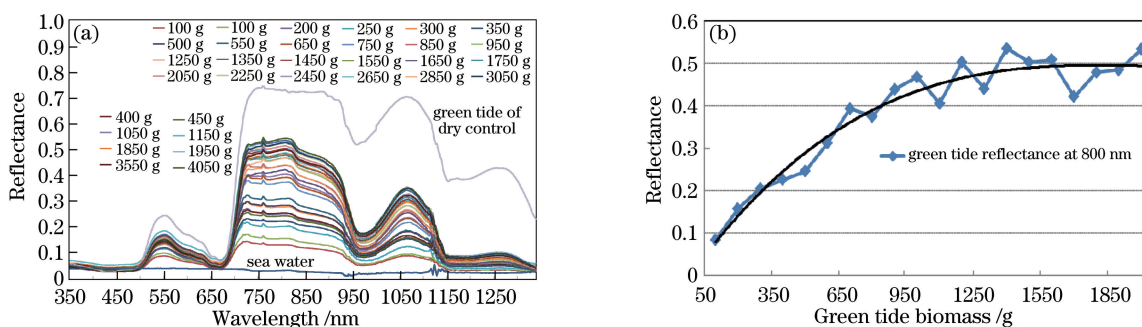


图 1 (a) 不同生物量漂浮绿潮的反射光谱(350~1300 nm); (b) 不同绿潮生物量在 800 nm 处的反射率值
 Fig. 1 (a) Reflectance spectra of the floating green tide for different biomass (350~1300 nm);
 (b) reflectance of the green tide at 800 nm for different biomass

(6.62 kg/m²)时,该波段处的反射率对绿潮生物量的变化均具有较好的响应,此时绿潮的单位面积生物量已远远超过开阔海面中绿潮单位面积生物量的范围;超过 1500 g 后,800 nm 波段处的反射率基本达到饱和。

图 2 所示为实验过程中不同单位面积生物量绿潮的分布状态,装置中布放 200 g 绿潮(0.88 kg/m²)时,绿潮已经将水面全覆盖;布放 500 g 绿潮(2.21 kg/m²)时,绿潮开始呈现聚集状态;布放的绿潮超过 1000 g (4.41 kg/m²)时,绿潮在水面的分布呈现明显的聚集状态。

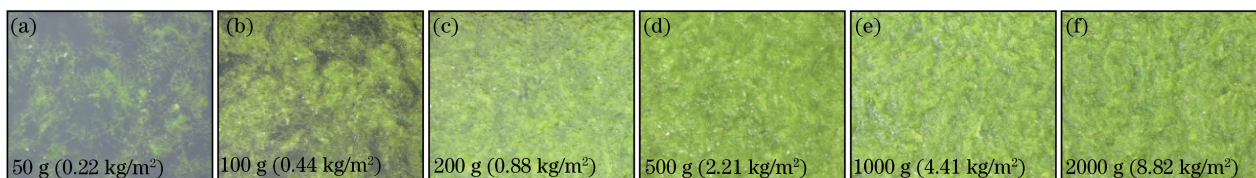


图 2 不同单位面积生物量绿潮的分布状态
 Fig. 2 Distribution conditions of the green tide for different biomass per unit area

3 结果与分析

3.1 漂浮绿潮生物量光谱特征分析

绿潮属于大型藻类,通常漂浮于海面上,光在其中的传输过程与陆地植被类似,区别在于两者所处的背景环境(绿潮的背景环境为海水,陆地植被的背景环境为土壤)不同。入射电磁波到达漂浮绿潮后,辐射能量在藻体内部与色素、水分等组分和细胞间隙相互作用,并在藻体间及藻体与水体间经过多次散射,最终被传感器接收。由图 1 可以看出,漂浮绿潮的反射光谱特征与绿色植被的反射光谱类似,在 555 nm 附近的绿光波段有明显的反射峰,在 680 nm 附近的红光波段处有明显的吸收峰,近红外波段的反射率急剧上升,形成“红边”现象,960 nm 和 1100 nm 处存在由水吸收引起的吸收峰。与典型绿色植被反射光谱不同的是,由于漂浮绿潮处于海水这一背景环境中,水分对红外波段信号的强烈吸收导致漂浮绿潮在近红外和中红外波段的反射率偏低。总体来看,随着绿潮单位面积生物量的增加,近红外波段和短波红外波段的反射率呈现上升的趋势。这是因为植被可见光波段反射率的变化主要受叶绿素等色素的影响,而近红外和短波红外波段反射率的变化则主要是由干物质和含水量引起的^[26-27],测量的绿潮生物量为湿重,包含藻体干重和藻体内水分,因此单位面积生物量的增加或减少会引起近红外和短波红外波段反射率的显著变化。为了定量分析漂浮绿潮反射光谱对其单位面积生物量的响应关系,基于现场观测数据,计算了各波段反射率及其一阶导数与单位面积生物量的相关性(图 3 和图 4)。

由图 3 可以看出,漂浮绿潮反射率与单位面积生物量在可见光波段主要呈负相关,相关系数峰值为 -0.59,位于 412 nm,这是由于单位面积生物量的增加导致单位面积上绿潮的叶绿素浓度增大,研究表明对于健康植被来说,随着叶绿素浓度的升高,可见光区的反射率会降低,两者呈负相关关系^[28]。617 nm 以后,反射率与绿潮单位面积生物量之间的相关系数急剧上升,在 730~1300 nm 波段形成一个高相关系数平台

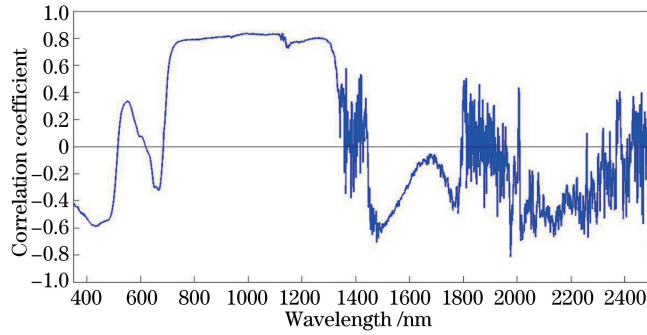


图 3 漂浮绿潮反射率与单位面积生物量的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficient of the reflectance of floating green tide and the biomass per unit area

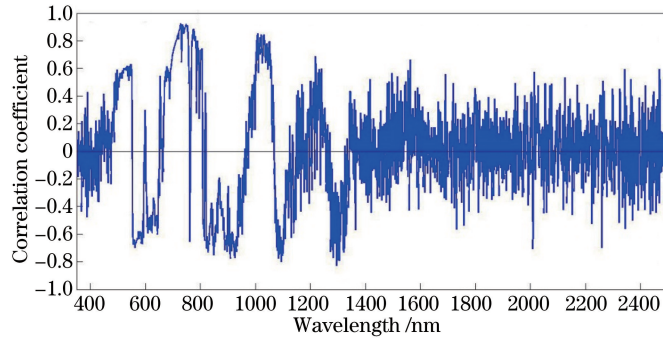


图 4 漂浮绿潮反射率一阶导数与单位面积生物量的相关系数

Fig. 4 Correlation coefficient of the first-order derivative of the floating green tide reflectance and the biomass per unit area, 相关系数约为 0.8。图 4 为绿潮反射率一阶导数与单位面积生物量的相关系数,可以看出在 488~550 nm、670~800 nm、1000~1066 nm 波段呈正相关,最大相关系数分别位于 545,728,1008 nm,分别为 0.63,0.92 和 0.85;552~645 nm、808~950 nm 和 1070~1115 nm 波段主要呈负相关,最大相关系数分别位于 563,925,1094 nm,为-0.7,-0.77 和-0.80。

分析漂浮绿潮反射率曲线光谱特征与单位面积生物量的响应关系。光谱特征主要分为三类:1)基于波段位置的变量;2)基于光谱面积的变量;3)基于波段组合(植被指数)的变量。选取绿光波段反射峰位置(GP)和峰值(GV)、红光波段吸收峰位置(RP)和峰值(RV)、“红边”位置(REP,“红边”定义为反射光谱的一阶微分最大值所对应的光谱位置,通常位于 0.68~0.75 μm 之间)、“红边”位置一阶导数值(REV)、960 nm 附近吸收峰位置(SWP₉₆₀)和峰值(SWV₉₆₀)、1060 nm 附近反射峰位置(SWP₁₀₆₀)和峰值(SWV₁₀₆₀),以及 NDVI(normalized difference vegetation index)^[29]、EVI(enhanced vegetation index)^[30]、RVI(ratio vegetation index)^[31]、FAI^[22]、KOSC(Korea ocean satellite center)、IGAG^[18]、OSABI(ocean surface algal blooms index)^[32]等绿潮探测常用指数,作为漂浮绿潮的诊断性光谱特征,分析其由于单位面积生物量变化所导致的差异。绿潮探测常用植被指数的表达式为

$$RVI: R_{VI} = R_{NIR} / R_R, \quad (1)$$

$$NDVI: N_{DVI} = \frac{R_{NIR} - R_R}{R_{NIR} + R_R}, \quad (2)$$

$$EVI: E_{VI} = G \times (R_{NIR} - R_R) / (R_{NIR} + c_1 \times R_R - c_2 \times R_B + c_3), \quad (3)$$

$$FAI: F_{AI} = R_{NIR} - \left[R_R + (R_{SWIR} - R_R) \times \left(\frac{\lambda_{NIR} - \lambda_R}{\lambda_{SWIR} - \lambda_R} \right) \right], \quad (4)$$

$$KOSC: K_{OSC} = \frac{\text{Max}[(R_G - R_R), R_{NIR}]}{R_R}, \quad (5)$$

$$IGAG: I_{GAG} = \frac{R_G + R_R}{R_{NIR} - R_R} + \frac{R_{NIR}}{R_R}, \quad (6)$$

$$OSABI: O_{SABI} = 10 \times [R_{NIR} - (R_R - R_{NIR})], \quad (7)$$

式中 R_{SWIR} 、 R_{NIR} 、 R_R 、 R_G 、 R_B 分别为短波红外、近红外、红光、绿光和蓝光波段反射率, λ_{SWIR} 、 λ_{NIR} 、 λ_R 分别为短波红外、近红外和红光波长, 蓝光、绿光、红光和近红外波长分别取 443, 550, 670, 720 nm, EVI 算法中 $G = 2.5$, $c_1 = 6$, $c_2 = 7.5$, $c_3 = 1$ ^[24], $\text{Max}[(R_G - R_R), R_{NIR}]$ 代表取 $R_G - R_R$ 和 R_{NIR} 中较大的值。

漂浮绿潮反射光谱特征与单位面积生物量之间的关系如表 1 所示, 相关系数用 R 表示。其中 GP 和 RP 与单位面积生物量的相关系数较低, 说明当绿潮单位面积生物量发生变化时, 没有引起上述两个光谱特征变量的显著变化; REP 与生物量呈正相关关系, 相关系数为 0.812; 红光 960 nm 附近和 1060 nm 附近短波红外反射峰或吸收峰峰值均与生物量呈现较强的正相关关系, 相关系数均高于 0.7, 但值域变化范围较小; 常用于绿潮探测的植被指数也都表现出与漂浮绿潮生物量较强的正相关关系, 其中 RVI、KOSC 和 IGAG 的相关性均高于 0.85, 而且值域变化范围较大。

表 1 漂浮绿潮反射光谱特征值域范围及其与单位面积生物量之间的相关系数

Table 1 Reflective spectral characteristics of the floating green tide and the correlation coefficient between the characteristics and the biomass per unit area

Spectral characteristic	Maximum	Minimum	R	Spectral characteristic	Maximum	Minimum	R
GP	553 nm	550 nm	0.308	SWV ₁₀₆₀	0.356	0.092	0.824
GV	0.188	0.091	0.333	NDVI	0.811	0.556	0.796
RP	670 nm	668 nm	-0.279	EVI	0.694	0.226	0.740
RV	0.075	0.042	-0.318	RVI	9.565	3.504	0.854
REP	707 nm	699 nm	0.812	FAI	0.423	0.105	0.750
REV	0.015	0.004	0.736	KOSC	2.104	1.178	0.851
SWP ₉₆₀	970 nm	964 nm	-0.179	IGAG	10.607	4.209	0.850
SWV ₉₆₀	0.177	0.055	0.824	OSABI	9.111	2.506	0.740
SWP ₁₀₆₀	1070 nm	1062 nm	0.317				

3.2 漂浮绿潮生物量估算模型建立

将实验获取的观测数据随机分为两组: 一组为训练样本(样本数量 n 为 24), 用于漂浮绿潮生物量估算模型的建立; 另一组为测试样本(n 为 24), 用于模型的精度检验。从表 1 中选取与单位面积生物量相关性较高的 NDVI、RVI、EVI、KOSC、FAI、IGAG、OSABI 等光谱指数, 以及 R_{960}/R_{670} 和 R_{1060}/R_{670} 作为变量, 利用随机选取的 24 组实验数据, 建立漂浮绿潮生物量的估算模型(表 2), 其中 R_{670} 、 R_{960} 、 R_{1060} 分别表示 670, 960, 1060 nm 波段处的反射率。图 5 为上述漂浮绿潮光谱特征参量与单位面积生物量的散点图。可以看

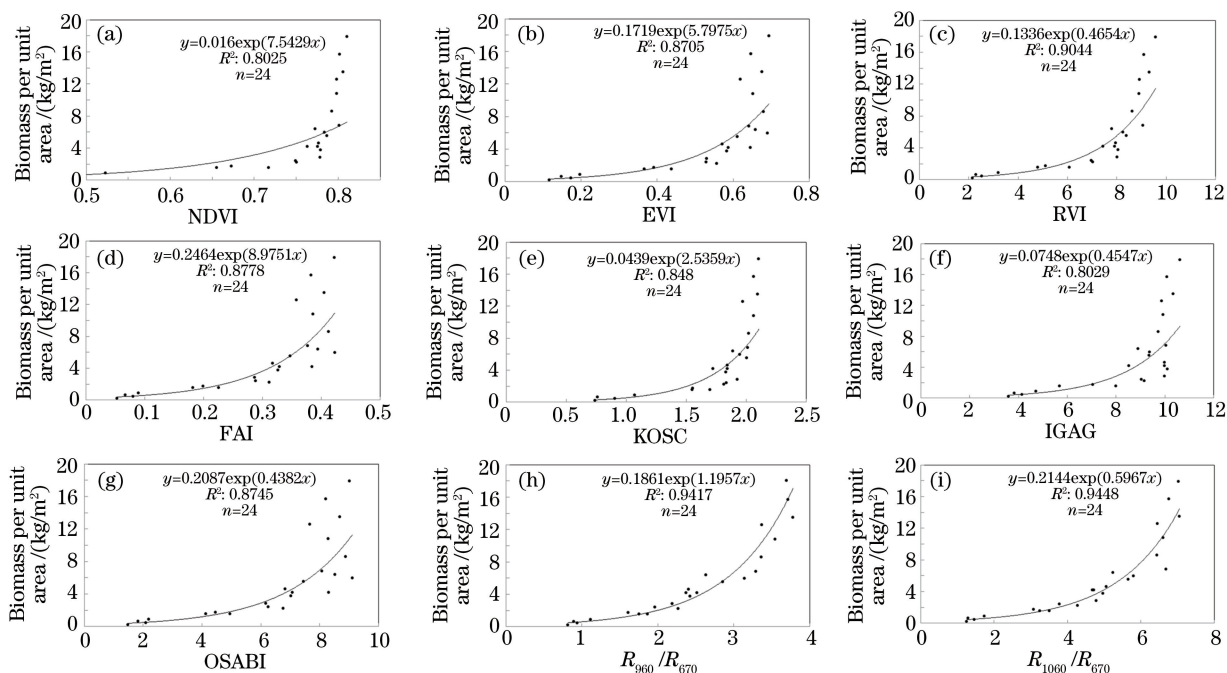


图 5 漂浮绿潮单位面积生物量与光谱特征参数的拟合关系

Fig. 5 Fitted relationship between the spectral characteristic parameters and the biomass per unit area of the floating green tide

出,上述光谱特征参数与漂浮绿潮单位面积生物量之间存在指数或幂指数关系,随着单位面积生物量的增加,各光谱特征参数值逐渐增大,但增大的速率逐渐降低,并最终趋于饱和。表 2 显示,利用上述光谱特征构建的漂浮绿潮生物量估算模型均具有较强的相关性,其中利用 R_{960}/R_{670} 与 R_{1060}/R_{670} 构建的模型与单位面积生物量之间的相关性最强,绝对系数 $R^2 > 0.9$ 。

表 2 漂浮绿潮生物量与光谱特征之间的拟合关系与绝对系数

Table 2 Fitted relationship and absolute coefficient between the reflective characteristics of the floating green tide and the biomass per unit area

Spectral characteristic	Fitted relationship	R^2
NDVI	$y = 0.016 \exp(7.5429 N_{\text{NDVI}})$	0.803
	$y = 16.102 N_{\text{NDVI}}^{4.2506}$	0.765
EVI	$y = 0.1719 \exp(5.7975 E_{\text{VI}})$	0.871
	$y = 15.394 E_{\text{VI}}^{0.9618}$	0.820
RVI	$y = 0.1336 \exp(0.4654 R_{\text{VI}})$	0.904
	$y = 0.0486 R_{\text{VI}}^{2.2903}$	0.853
FAI	$y = 0.2464 \exp(8.9751 F_{\text{AI}})$	0.878
	$y = 33.911 F_{\text{AI}}^{1.6752}$	0.837
KOSC	$y = 0.0439 \exp(2.5359 K_{\text{OSC}})$	0.848
	$y = 0.6668 K_{\text{OSC}}^{3.2672}$	0.795
IGAG	$y = 0.0748 \exp(0.4547 I_{\text{GAG}})$	0.803
	$y = 0.0069 I_{\text{GAG}}^{2.9854}$	0.788
OSABI	$y = 0.2087 \exp(0.4382 O_{\text{SABI}})$	0.875
	$y = 0.122 O_{\text{SABI}}^{1.9174}$	0.845
R_{960}/R_{670}	$y = 0.1861 \exp[1.1957(R_{960}/R_{670})]$	0.942
	$y = 0.4991 (R_{960}/R_{670})^{2.4089}$	0.949
R_{1060}/R_{670}	$y = 0.2144 \exp[0.5967(R_{1060}/R_{670})]$	0.945
	$y = 0.1935 (R_{1060}/R_{670})^{2.0234}$	0.912

3.3 漂浮绿潮生物量模型验证

利用剩余的 24 组实验观测数据,选取绝对系数 R^2 、均方根误差 R_{MSE} 和相对误差 R_{PE} 作为评价指标,对上述生物量估算模型进行精度验证。其中 R_{MSE} 和 R_{PE} 的计算公式为

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - y_i)^2}{n}}, \quad (8)$$

$$R_{\text{PE}} = 100\% \times |(y_i - Y_i)/y_i|, \quad (9)$$

式中 Y_i, y_i 分别为估算值和实测值。

漂浮绿潮生物量估算模型的验证结果如表 3 所示。一个好的估算模型应该具有较高的绝对系数和较小的误差。综合考虑上述三个评价指标可以看出,利用 RVI 指数、 R_{960}/R_{670} 和 R_{1060}/R_{670} 构建的指数估算模型对漂浮绿潮生物量具有较高的预测精度, R^2 分别为 0.85、0.91 和 0.89, R_{MSE} 分别为 1.27, 1.15, 1.31; R_{PE} 分别为 30.0%, 28.2%, 26.9%。

4 结 论

基于现场实验数据,在分析漂浮绿潮单位面积生物量与反射光谱响应关系的基础上,建立了海面漂浮绿潮的生物量估算模型,漂浮绿潮近红外波段的反射率与单位面积生物量存在较强的相关关系,相关系数约为 0.8;反射率一阶导数与单位面积生物量的最大相关系数($R = 0.92$)也位于近红外波段。NDVI、EVI、RVI、FAI、KOSC、IGAG、OSABI 等常用于绿潮探测的光谱指数,以及 960 nm 吸收峰和 1060 nm 反射峰的峰值与漂浮绿潮单位面积生物量均具有较强的正相关关系,相关系数高于 0.7。经实测数据检验,基于 RVI、 $R_{960}/$

表 3 漂浮绿潮生物量估算模型检验结果($n=24$)

Table 3 Test results of the floating green tide biomass estimation model ($n=24$)

Fitted relationship	R^2	R_{MSE}	$R_{PE}/\%$
$y=0.016\exp(7.5429N_{DVI})$	0.76	1.82	57.7
$y=16.102N_{DVI}^{4.2506}$	0.72	2.06	74.6
$y=0.1719\exp(5.7975E_{VI})$	0.73	1.71	40.2
$y=15.394E_{VI}^{1.9618}$	0.68	2.02	67.8
$y=0.1336\exp(0.4654R_{VI})$	0.85	1.27	30.0
$y=0.0486R_{VI}^{2.2903}$	0.82	1.51	41.4
$y=0.2464\exp(8.9751F_{AI})$	0.72	1.72	34.5
$y=33.911F_{AI}^{1.6752}$	0.69	1.93	61.4
$y=0.0439\exp(2.5359K_{OSC})$	0.62	2.03	56.2
$y=0.6668K_{OSC}^{3.2672}$	0.61	2.12	68.1
$y=0.0748\exp(0.4547I_{GAG})$	0.72	1.86	41.3
$y=0.0069I_{GAG}^{2.9854}$	0.69	1.92	43.4
$y=0.2087\exp(0.4382O_{SABI})$	0.69	1.82	35.8
$y=0.122O_{SABI}^{1.9174}$	0.69	1.93	58.7
$y=0.1861\exp[1.1957(R_{960}/R_{670})]$	0.91	1.15	28.2
$y=0.4991(R_{960}/R_{670})^{2.4089}$	0.94	0.86	34.9
$y=0.2144\exp[0.5967(R_{1060}/R_{670})]$	0.89	1.31	26.9
$y=0.1935(R_{1060}/R_{670})^{2.0234}$	0.91	1.01	32.4

R_{670} 和 R_{1060}/R_{670} 构建的漂浮绿潮生物量指数估算模型具有较高的精度,绝对系数约为 0.9,相对误差约为 27%。

受风、浪等海况条件以及其他观测条件的限制,难以开展海上现场实验并获取足够建模的数据量,因此利用打捞的浒苔进行准现场实验,消除了诸多自然和人为因素的影响,模型的效果比较明显。另外该模型是基于地物光谱构建的,由于遥感与地面测量之间存在大气校正、混合像元等诸多不同,因此将模型推广到遥感影像上还需要做更多的工作。

参 考 文 献

[1] Liang Zongying, Lin Xiangzhi, Ma Mu, *et al.* A preliminary study of the *Enteromorpha prolifera* drift gathering causing the green tide phenomenon[J]. Periodical of Ocean University of China, 2008, 38(4): 601-604.
梁宗英, 林祥志, 马 牧, 等. 浒苔漂流聚集绿潮现象的初步分析[J]. 中国海洋大学学报, 2008, 38(4): 601-604.

[2] Blomster J, Bäck S, Fewer D P, *et al.* Novel morphology in *Enteromorpha* (Ulvophyceae) forming green tides[J]. American Journal of Botany, 2002, 89(11): 1756-1763.

[3] Nelson T A, Nelson A V, Tjoelker M. Seasonal and spatial patterns of "green tides" (Ulvoid algal blooms) and related water quality parameters in the coastal waters of Washington state, USA[J]. Botanica Marina, 2003, 46(3): 263-275.

[4] Hiraoka M, Ohno M, Kawaguchi S, *et al.* Crossing test among floating *Ulva thalli* forming 'greed tide' in Japan[J]. Hydrobiologia, 2004, 512(1-3): 239-245.

[5] Merceron M, Antoine V, Auby I, *et al.* *In situ* growth potential of the subtidal part of green tide forming *Ulva spp.* stocks[J]. Science of the Total Environment, 2007, 384(1-3): 293-305.

[6] Wang Chao. Primary studies on the harmful effects and mechanisms of *Ulva prolifera* green tide[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2010.
王 超. 浒 苔(*Ulva prolifera*)绿潮危害效应与机制的基础研究[D]. 北京: 中国科学院, 2010.

[7] Li Sanmei, Li Yajun, Dong Haiying, *et al.* Satellite remote sensing application to enteromorpha prolifera monitoring in the Yellow Sea[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(1): 76-82.
李三妹, 李亚君, 董海鹰, 等. 浅析卫星遥感在黄海浒苔监测中的应用[J]. 应用气象学报, 2010, 21(1): 76-82.

[8] Jiang Xingwei, Zou Yarong, Wang Hua, *et al.* Application study on quick extraction of *Enteromorpha prolifera* information using SAR data[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(2): 63-68.
蒋兴伟, 邹亚荣, 王 华, 等. 基于 SAR 快速提取浒苔信息应用研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(2): 63-68.

- [9] Fan Shiliang, Fu Mingzhu, Li Yan, *et al.* Origin and development of Huanghai (Yellow) Sea green-tides in 2009 and 2010[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(6): 187-194.
范士亮, 傅明珠, 李 艳, 等. 2009-2010 年黄海绿潮起源于发生过程调查研究[J]. *海洋学报*, 2012, 34(6): 187-194.
- [10] Liu Xiangqing. Distributions of floating green algae and developing processes in the Yellow Sea[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2014.
刘湘庆. 黄海绿潮形成过程中漂浮绿藻及微观繁殖体时空分布研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2014.
- [11] Shi W, Wang M. Green macroalgae blooms in the Yellow Sea during the spring and summer of 2008[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C12): C12010.
- [12] Zhang Juan. The method and the software implementation of monitoring macroalgae by remote sensing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
张 娟. 浒苔遥感监测方法研究及软件实现—以青岛奥帆赛场及周边海域为例[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [13] Hu C M, Li D Q, Chen C S, *et al.* On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(C5): C05017.
- [14] Sun Ling, Guo Maohua, Li Sanmei, *et al.* *Enteromorpha prolifera* monitoring with FY-3A MERSI around the sea area of Qingdao[J]. *Remote Sensing Information*, 2010(1): 64-68.
孙 凌, 郭茂华, 李三妹, 等. 用 FY-3A MERSI 进行青岛海域浒苔监测[J]. *遥感信息*, 2010(1): 64-68.
- [15] Xing Qianguo, Zheng Xiangyang, Shi Ping, *et al.* Monitoring "green tide" in the Yellow Sea and the East China Sea using multi-temporal and multi-source remote sensing images[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1644-1647.
邢前国, 郑向阳, 施 平, 等. 基于多源、多时相遥感影像的黄、东海绿潮影响区检测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(6): 1644-1647.
- [16] Gu Xingfa, Chen Xingfeng, Yin Qiu, *et al.* Stereoscopic remote sensing used in monitoring *Enteromorpha prolifera* disaster in Chinese Yellow Sea[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(6): 1627-1632.
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.
- [17] Cui T W, Zhang J, Sun L E, *et al.* Satellite monitoring of massive green macroalgae bloom (GMB): imaging ability comparison of multi-source data and drifting velocity estimation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(17): 5513-5527.
- [18] 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.
- [19] Lu Xia, Xie Hongquan, Zhou Li, *et al.* Curve estimation based on time series reflectance spectra of *Enteromorpha prolifera* [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2012(3): 96-102.
卢 霞, 谢宏全, 周 立, 等. 浒苔藻体时间序列光谱特征的曲线估计[J]. *海洋湖沼通报*, 2012(3): 96-102.
- [20] Lu Xia, Zhou Li, Xie Hongquan, *et al.* Spectra characteristics analysis of *Enteromorpha prolifera* in Lianyungang sea area[J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30(6): 814-818.
卢 霞, 周 立, 谢宏全, 等. 连云港海域浒苔藻体的光谱特征分析[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30(6): 814-818.
- [21] Elijah R, Amina R, Mads S T, *et al.* Spectral definition of the macro-algae *Ulva curvata* in the back-barrier bays of the eastern shore of Virginia, USA[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(2): 586-603.
- [22] 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.
- [23] Zhang Hailong, Sun Deyong, Li Junsheng, *et al.* Remote sensing algorithm for detecting green tide in China coastal waters based on GF1-WFV and HJ-CCD data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601004.
张海龙, 孙德勇, 李俊生, 等. 基于 GF1-WFV 和 HJ-CCD 数据的我国近海绿潮遥感监测算法研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601004.
- [24] Wang Ting, Shi Xiaoyong, Zhang Chuansong, *et al.* Variations in nutrient concentration and distribution for green tide of *Enteromorpha prolifera* occurrence areas of the Yellow Sea in 2008[J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(5): 578-582.
王 婷, 石晓勇, 张传松, 等. 2008 年黄海浒苔绿潮爆发区营养盐浓度变化及分布特征[J]. *海洋通报*, 2011, 30(5): 578-582.
- [25] Wu Mengquan, Guo Hao, Zhang Anding, *et al.* Research on the characteristics of *Ulva prolifera* in Shandong peninsula during 2008-2012 based on MODIS data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(5): 1312-1318.
吴孟泉, 郭 浩, 张安定, 等. 2008-2012 年山东半岛海域浒苔时空分布特征研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34

- (5): 1312-1318.
- [26] Xiao Yanfang. The scale effect and sensitivity analysis for vegetation biochemical information retrieval by remote sensing[D]. Beijing: Capital Normal University, 2013: 76-82.
肖艳芳. 植被理化参数反演的尺度效应与敏感性分析[D]. 北京: 首都师范大学, 2013: 76-82.
- [27] Xiao Y F, Zhao W J, Zhou D M, *et al.* Sensitivity analysis of vegetation reflectance to biochemical and biophysical variables at leaf, canopy and regional scales[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(7): 4014-4024.
- [28] Yan Chunyan. Study on methods and models for vegetation biochemical information retrieval by remote sensing[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2003.
颜春燕. 遥感提取植被生化组分信息方法与模型研究[D]. 北京: 中国科学院, 2003.
- [29] 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 Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 1974: 309-317.
- [30] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 1991, 35(2-3): 161-173.
- [31] Huete A, Diadan K, Miura T, *et al.* Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 195-213.
- [32] Schlerf M, Atzberger C, Hill J. Remote sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(2): 177-194.
- [33] Shanmugam P, Suresh M, Sundarabalan B. OSABT: an innovative algorithm to detect and characterize ocean surface algal blooms[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(4): 1879-1892.