DOI: 10.5846/stxb201309232339
邱亚会, 卢剑波.浒苔遥感监测研究进展.生态学报,2015,35(15):4977-4985.
Qiu Y H, Lu J B.Advances in the monitoring of *Enteromorpha prolifera* using remote sensing.Acta Ecologica Sinica,2015,35(15):4977-4985.

浒苔遥感监测研究进展

邱亚会[1], 卢剑波[1,2,*]
1 杭州师范大学生命与环境科学学院, 杭州 310036
2 杭州师范大学钱江学院, 杭州 310036

摘要:浒苔大规模集聚形成的绿潮灾害是海洋生态系统主要生态环境问题之一,基于卫星遥感影像监测浒苔及其扩展动态已成为一种及时有效的手段。对国内外浒苔遥感监测方面文献进行归纳整理,认为光学遥感数据、多波段比值法是最常用的遥感数据和监测方法。对遥感监测浒苔机理进行了阐述,并对分类方法进行评价认为监督分类法解译精度不高。目前单波段阈值法和多波段比值法应用广泛,但在监测漂浮浒苔和混合象元解译存在不足。辐射传输模型法能有效提高信息解译的精度,但还处于起步阶段。遥感监测浒苔灾害的未来发展需要提高影像空间分辨率,深入研究监测方法,进行多种平台和多源遥感数据相结合,并由定性走向定量,从而建立健全遥感监测预警系统。

关键词:浒苔; 遥感监测; 解译方法

Advances in the monitoring of *Enteromorpha prolifera* using remote sensing

QIU Yahui[1], LU Jianbo[1,2,*]
1 *College of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou* 310036, *China*
2 *Qianjiang College, Hangzhou Normal University, Hangzhou* 310036, *China*

Abstract: Eutrophication of sea water has been regard as one of the major problems that are harmful to our environment and society. Green tide, which is caused by the proliferation of *Enteromorpha prolifera*, has a major impact on marine ecosystems. Proliferation of *Enteromorpha prolifera* is the main cause of the green tide. Monitoring the populations of *E. prolifera* and their dynamic are crucial in the prevention of green tide. Satellite remote sensing image is widely used in the monitoring of *E. prolifera* because of its timeliness and effectiveness. In this review, we discussed the current research on monitoring of *E. prolifera* using remote sensing. We considered the optical remote sensing data to be the most popular data used by recent rearchs, and the multi-band ratio method as the most commonly adopted monitoring method. We also discussed the mechanism of monitoring of *E. prolifera* using remote sensing found that the precision in the interpretation of remote sensing data was relatively low when using the supervision classification method. The single-band threshold method and multi-band ratio method have been widely used despite their shortage in monitoring of the floats of *E. prolifera* and interpretation of mixed pixels. The radiative transfer model method can improve the accuracy of information interpretation; however, being a newly developed method, it needs further improvements. For better monitoring of *E. prolifera*, the spatial resolution of images need to be improved in future research. Combining multiple platforms and multi-source remote sensing data are important aspects that could provide more accurate data from *E. prolifera* monitoring. Further studies on monitoring methods are required to achieve a timely and effective monitoring. Most importantly, we should replace the current qualitative analysis with a quantitative one in order to perfect the remote sensing monitoring and finally establish the early

基金项目:国家科技支撑计划专题资助项目(2012BAC13B02)
收稿日期:2013-09-23; **网络出版日期**:2014-10-16
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jianbo.lu@hznu.edu.cn

warning system.

Key Words: *Enteromorpha prolifera*; remote sensing monitoring; method of interpretation

浒苔(*Enteromorpha prolifera*),石莼科绿藻,生活于海水与半咸水中,以其较高的营养价值[1-10]、药用价值[11-16]等受到各国学者的广泛关注。但近年来,由于全球气候变化、水体富营养化等原因,导致了浒苔灾害在我国海域频频暴发,不仅破坏了海洋生态系统平衡[17-21],还对沿海渔业、旅游业等行业的发展产生严重威胁,不得不提的是 2008 年青岛近海海域浒苔绿潮规模性聚集直接影响了奥运会帆船比赛的正常进行。目前浒苔灾害监控已逐渐成为我国政府和学者关注的焦点问题之一。

浒苔灾害传统地面调查能够比较全面地了解浒苔灾害暴发的原因、过程、浒苔在海水中的状态及其生物量的变化,但需大量人力物力长期持续的投入,特别是时空局限性限制了其应用。遥感技术具有大范围、全天候、全天时、多频次、多角度的优点[22-28]。利用遥感手段监测浒苔的动态变化,可迅速确定浒苔的暴发区域、时间和聚集度,绘制浒苔分布示意图,提高大范围灾情分析的准确度,使海上打捞工作变得有针对性,在最短时间内控制住浒苔灾害的发展态势[29];同时对其进行跟踪监测分析可对浒苔灾害做出预警。遥感技术已成为浒苔灾害监测的主要技术之一。

目前研究者尝试利用不同遥感手段监测浒苔,但研究中使用的遥感卫星类型多样,解译浒苔信息所使用的方法也根据不同的研究者而异。本文在对国内外遥感监测浒苔文献分析的基础上就有关研究进行了归纳整理,首先介绍浒苔遥感监测的发展历程和现状,并进一步阐述遥感监测浒苔机理,而后重点就遥感监测浒苔的各解译方法及优缺点进行综述。在此基础上,对遥感监测浒苔灾害的未来发展方向提出了几点建议,希望为后续的浒苔遥感监测研究提供一些思路。

1 浒苔遥感监测发展历程及现状

通过谷歌学术论文搜索,截止 2014 年 2 月国内外浒苔遥感监测研究文献总计约 54 篇,以 2009,2010 年最多(图 1)。研究者在监测中所使用的卫星数据类型多样,但美国地球观测卫星数据 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer),以其数据波段范围广、数据更新频率快及免费获得等优势,成为浒苔遥感监测中最为常用的数据,接近所有使用数据的一半(图 1)。浒苔遥感监测所使用的卫星数据有光学遥感数据和微波遥感数据,从目前来看,光学遥感数据更多的被用于研究中(图 2)。浒苔遥感监测方法的研究是学

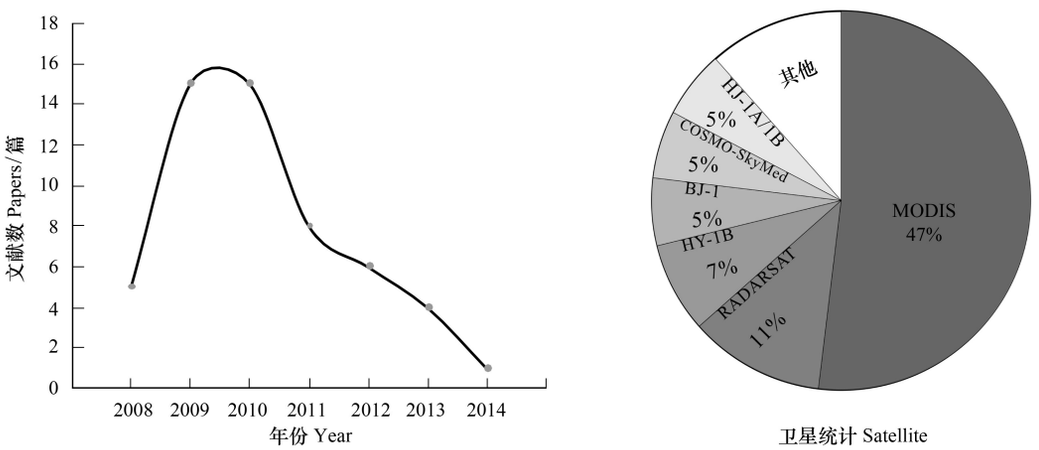

图 1 浒苔遥感监测研究文献统计和浒苔遥感监测所使用卫星统计

Fig.1 Statistics of *Entermorpha prolifera* monitoring research papers basing on remote sensing and Statistics the satellite for monitoring *Entermorpha prolifera*

者都较为关注的内容,通过整理研究者使用方法(图 2),发现多波段比值法被最多的用于遥感浒苔监测中。进一步选取其中代表性文献,将研究者及年份、数据来源、研究区域、提取方法和研究目的等五个方面内容列于表 1,发现研究者多使用单一数据及监测方法;研究区域集中于我国黄海、东海海域;研究者开始尝试多源遥感数据,利用新方法,提高遥感监测浒苔精度。遥感浒苔监测从 2008 年开始兴起并不断发展,MODIS 数据和多波段比值法已成熟使用,目前发展受高时空分辨率数据源及定量浒苔信息解译方法制约。

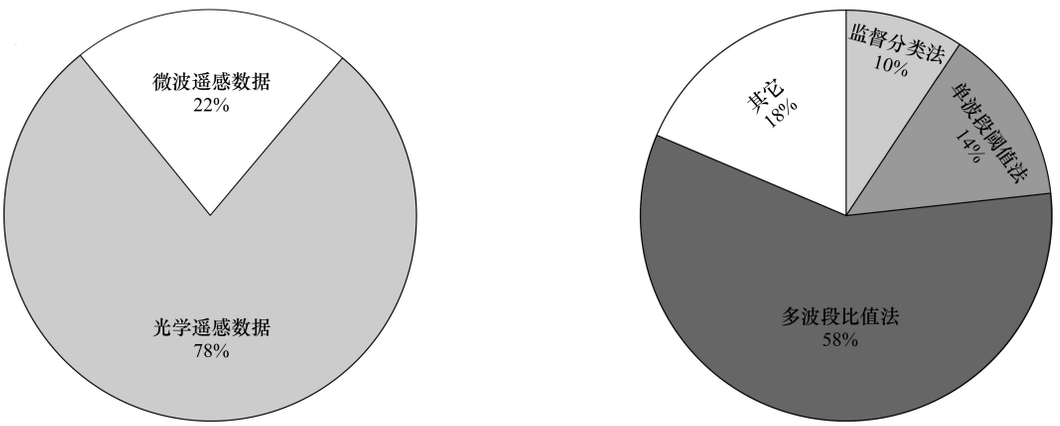

图 2　浒苔遥感监测卫星数据类型和浒苔遥感监测使用方法

Fig.2　The type of Satellite Data for monitoring *Entermorpha prolifera* The method of monitoring *Entermorpha prolifera*

表 1　浒苔信息解译所使用的卫星及方法

Table 1　The method and satellite for extraction the information of Enteromorpha prolifera

卫星数据 Satellite data	参考文献 References	研究区域 Study region	解译方法 Interpretation	研究目的 Objective
RADARSAT-2	[23]	黄海	后向散射系数法,灰度值分割法	建立有效的阈值自动识别绿藻信息
MODIS	[24]	黄海	FAI 浮游藻类指数	与海面风向数据相结合,监测黄海浒苔的位置和扩展状况
MODIS	[30]	黄海	SAI 大型藻类指数	对 2008—2009 年的黄海浒苔进行监测,并与其他将提取浒苔信息方法进行对比,证明其监测精度高
MODIS-TERRA,HJ-1B	[31]	灵山岛南部海域浒苔密集区	归一化植被指数法	以 HJ-1B 作为真实值,对 MODIS 浒苔监测误差进行分析
GOCI	[22]	黄海、东海	IGAG 藻类指数	监测黄海与东海的浒苔状况,与 NDVI 及 EVI 法对比
HJ-1A/1B	[32]	黄海、东海	归一化植被指数法	证明 HJ-1A/1B 可以提供比 MODIS 更多的精细信息
ENVISAT,HJ-1A/1B	[33]	黄海	归一化植被指数法,后向散射系数法	对比 3 种不同的卫星数据监测浒苔的能力,得出光学遥感数据和微波遥感数据测得的平均百分比差异不超过 15%
EOS-MODIS	[34]	黄海	FAI 浮游藻类指数	研究了 2007—2009 年间黄海浒苔绿潮的年际变化
EOS-MODIS,LANDSAT-TM	[35]	黄海、东海	归一化植被指数	对 2007—2010 年间黄、东海发生的浒苔灾害进行监测与评估
ENVISAT-ASAR,ALOS-PALSAR,RADARSAT	[36]	青岛海域	灰度值分割法	对比 3 种不同的卫星数据所提取出的浒苔信息
EOS-MODIS,LANDSAT+ETM	[37]	黄海、东海	FAI 浮游藻类指数法	对黄海和东海的绿潮灾害进行监测

续表

卫星数据 Satellite data	参考文献 References	研究区域 Study region	解译方法 Interpretation	研究目的 Objective
MODIS-TERRA, HY- 1B, BJ- 1, RADARSAT, COSMO-SKYMED, 福卫 2	[38]	黄海、东海海域	归一化植被指数法, 后向散射系数法	构建对浒苔遥感监测的立体监测系统
MODIS-TERRA, ENVISAT-ASAR	[17]	青岛近海	单波段阈值法, 多波段比值法, 海洋水色反演法, 监督分类法	对比几种不同的提取浒苔信息的方法, 构建大型藻类遥感监测系统
EOS/MODIS, RADARSAT	[39]	黄海及邻近海域	归一化植被指数法	研究 MODIS 监测浒苔的可行性
FY-3A MERSI	[40]	青岛及临近海	归一化植被指数法	基于 NDVI 法对青岛及邻近海域发生的浒苔灾害进行监测跟踪分析
EOS-MODIS, FY-3A-MERSI	[20]	黄海	归一化植被指数法	监测 2008 年 5—7 月黄海海域浒苔的出现、范围及移动路径
EOS-MODIS, LANDSAT	[41]	黄海、东海	FAI 浮游藻类指数	与归一化植被指数作对比, 比其更准确
EOS-MODIS	[42]	黄海	归一化藻类指数法	对浒苔的开始出现、发展演化、覆盖范围以及聚集密度等进行监测
MODIS-TERRA/AQUA	[18]	青岛奥帆赛场周围海域	单波段阈值法, 多波段比值法, 微分光谱算法	不同提取方法的比较, 提高浒苔信息获取的合理可信度
EOS-MODIS	[43]	青岛近海	FAI 浮游藻类指数	与归一化植被指数及增强植被指数作对比, 发现其效果较好
EOS-MODIS, HY-1B, BJ-1, CBERS-02B, COSMO1/2, RADARSAT1/2, ENVISAT, FY, NOAA, QUICKSCAT	蒋兴伟等[44]	黄海、东海	多波段比值法, 归一化植被指数法	建立浒苔灾害卫星遥感应急监视监测系统, 连续 3 个月对黄海、东海进行监测, 对浒苔出现、暴发、消失过程进行了全面的追踪
COSMO-SKYMED	蒋兴伟等[21]	青岛近海	灰度值分割法	实现了浒苔信息的快速提取
MODIS-TERRA	刘振宇等[45]	日照-青岛-威海一带海域	比值及归一化植被指数法、监督分类法	探讨浒苔信息提取方法并作对比

2 遥感监测浒苔机理

遥感监测浒苔因不同遥感数据类型(光学遥感和微波遥感)和浒苔在海水中不同存在状态(漂浮和悬浮)而异。

2.1 遥感监测漂浮浒苔

利用光学遥感监测漂浮在海水表面的浒苔的方法是基于海水表面覆盖浒苔而体现出的光谱特征差异。浒苔作为水生植物,含有大量叶绿素,当其漂浮在海面上时,叶绿素对阳光的反射作用与海水对阳光的反射作用显著不同,使浒苔覆盖海面光谱曲线在近红外波段出现高反射峰,类似于植被的光谱曲线[46]。据海面实测漂浮浒苔的光谱信息[17-21,32],浒苔在蓝光和红光波段的吸收谷出现在 400—500 nm 和 670 nm 附近,在近红外波段的反射高峰出现在 675—800 nm 左右;而海水对可见光波段具有吸收作用,在可见光波段的反射率低,至近红外波段反射率几乎为零。利用浒苔覆盖海面的海水与正常海水光谱特性的差异,可以在卫星影像上快速有效的解译浒苔信息,这是光学遥感监测漂浮浒苔信息的基础。

微波遥感监测漂浮状态下浒苔是通过研究人员在微波遥感影像上,综合纹理、光谱形状、大小、位置等识

别特征,分析剖面区域的影像灰度值,并按照统计学原理统计浒苔灰度值主要动态范围和水体灰度值主要动态范围值,据不同灰度值判读出影像中浒苔分布的典型区域[21,36]。该方法具有全天时、全天候的对地观测能力,受天气影响小,同时在反应目标物结构信息方面具有比较明显的优势,比较适合海洋监测方面的应用。但存在着微波遥感数据中的噪声对浒苔信息的解译影响较大的问题,使用微波遥感监测浒苔必须进行去噪前处理,故目前国内单独使用微波遥感数据对浒苔进行监测的并不多,常与光学遥感数据结合使用[21,33,36,38]。

2.2　遥感监测悬浮浒苔

监测悬浮于海水中浒苔比较困难。主要因其信息的提取受到水中悬浮泥沙及黄色物质等的影响。针对这个问题,赵文静等[47]利用辐射传输模拟方法, 开展了水下悬浮浒苔海面光谱响应研究。通过与无浒苔悬浮情形的对比, 分析了海面光谱随水下浒苔悬浮深度、厚度和水体浑浊度以及环境条件的变化规律,结果发现上述几个因子都对浒苔的海面光谱特性产生影响。利用辐射传输模型反演,可以提取悬浮于海水中的浒苔信息,但是此方法目前还处于研究探索阶段,并未真正应用到监测大面积的浒苔灾害中[46-47]。

3　遥感监测浒苔方法及应用

遥感监测浒苔方法主要有四大类型,即监督分类法、单波段阈值法、多波段比值法和辐射传输模型法。

3.1　监督分类法

监督分类法是遥感影像计算机分类中最基本的方法之一,是指在进行分类之前需选择代表性象元作为训练样本,对遥感图像进行分类。在对浒苔灾害遥感影像解译时,首先要选取大量浒苔藻类特征较为明显的象元,建立训练样本,对遥感影像进行分类,分类结果仍需进行人工目视解译,以剔除分类错误的象元,确保浒苔信息解译的精确度[17,25-26,45,48-49]。梁刚于 2011 年采用此法对青岛近海浒苔灾害进行了监测,对比其它方法,此法在提取精度上仍有待提高[17]。监督分类法只适用于光学遥感数据提取浒苔信息。

3.2　单波段阈值法

自然界中的任何地物都具有其自身的光谱反射特性,利用地物光谱反射特性的差异来提取地物的信息是遥感影像分类最常用的方法之一[50-52]。浒苔覆盖海水与正常海水在近红外波段光谱反射特性的较大差异,使该波段成为单波段阈值法提取浒苔信息的最佳波段。基于光学遥感数据监测浒苔主要是通过分析所使用卫星影像的波段信息,找出浒苔覆盖海水与正常海水之间波谱反射率差异最大的波段,然后经过设定不同的提取阈值进行解译浒苔信息的实验,最终确定解译浒苔信息的阈值[17]。张娟在利用此法对青岛奥帆赛场周围海域的浒苔进行监测时发现其在解译浒苔信息时存在水体阴影被错分为浒苔的问题,在单波段处理时无法避免,存在较大误差[18],故目前此法应用较少。

微波遥感用于浒苔监测还处于起步阶段,目前的解译浒苔信息的工作以单波段阈值方法为主,通过确定浒苔在图像上的灰度值、纹理、形状和后向散射系数来提取有效信息[21,33, 36,46]。

3.3　多波段比值法

多波段比值法相较单波段阈值法能扩大浒苔覆盖海水在可见光波段的吸收谷与近红外波段的反射峰之间的差异,提高正常海水与浒苔覆盖海水区分度,从而在卫星影像上快速解译浒苔信息[53-55]。在遥感监测浒苔领域,多波段比值法是最常用的方法,此方法直观判读效果好、误分率较低,能够比较精确的解译藻类信息。下面就不同多波段比值法逐一介绍。

3.3.1　双波段比值法

双波段比值法是指利用两个不同波段进行比值运算,通过反演浒苔叶绿素浓度达到解译浒苔信息的目的[22,46]。该方法解译浒苔信息的关键在于所选用波段。部分学者研究表明近红外波段与红光波段的反射率可以用来估算叶绿素的浓度[18,56-58];然而也有学者认为红光波段和蓝光波段的反射率比值可以更准确估算叶绿素 a 的浓度[18,56,59-60]。实际应用中波段选择需根据研究者所观测地物的特定光谱特征反射峰位置而定。

3.3.2　归一化植被指数法

归一化植被指数法(NDVI)是目前应用最多的多波段比值法,其监测原理与双波段比值法相似,即通过反

演浒苔叶绿素浓度达到解译浒苔信息的目的[22,46]，其表达式为：

$$NDVI=(R_{nir}-R_{red})/(R_{nir}+R_{red}) \quad (1)$$

式中，R_{nir}为近红外波段的反射率，R_{red}为红光波段的反射率。大部分研究者使用 NDVI 法解译浒苔信息时都基于 MODIS 卫星影像，只是解译浒苔信息的阈值各不相同，甚至相差甚远，这可能与不同大气状况、浒苔密集程度及悬浮状态等因素有关，从而导致提取阈值的差异[20,22,31-33,35, 38-40,44-45]。

3.3.3 增强型植被指数法

增强型植被指数法(EVI)其原理类似于 NDVI 法，计算公式如下：

$$EVI=G\times(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+C_1\times R_{RED}-C_2\times R_{BLUE}+C_3) \quad (2)$$

式中，R_{NIR}、R_{RED}、R_{BLUE}分别表示近红外波段、红光波段及蓝光波段的反射率，G 是增益因子，C_1、C_2、C_3为像素独立系数，是为消除气溶胶等影响。此方法适用于遥感浒苔监测，但目前此法应用不多[22]。

3.3.4 浮游藻类指数法

Hu 在 2008 年的研究中提出 NDVI 法和 EVI 对卫星观测时外在条件的变化比较敏感，故在大型藻类的监测中存在很大不确定性[46,61]。2009 年，他通过数据的比较及模型的模拟发现了一种对观测条件以及周围环境的变化要求低，能够克服传统方法不确定性的海洋水色指数，即浮游藻类指数(FAI)[43]。FAI 指数的计算公式为：

$$FAI=R_{rc.NIR}-R'_{rc.NIR} \quad (3)$$

$$R_{rc}=\Pi L_t^*/(F_0\cos\theta_0)-R_r \quad (4)$$

$$R'_{rc.NIR}=R_{rc.RED}+(R_{rc.SWIR}-R_{rc.RED})\times(\lambda_{NIR}-\lambda_{RED})/(\lambda_{SWIR}-\lambda_{RED}) \quad (5)$$

式中，R_{rc}是瑞利散射校正后的反射率，L_t^* 是传感器的辐射定标值，F_0是太阳辐照度，θ_0为太阳天顶角，R_r是经过 6S 模型估算后的瑞利反射率，$R_{rc.NIR}$，$R_{rc.RED}$，$R_{rc.SWIR}$分别是经过瑞利散射校正过的近红外波段、红光波段及短波红外波段的海洋表面的反射率，λ_{NIR}，λ_{RED}，λ_{SWIR}指的是近红外波段、红光波段及短波红外波段的波长[43]。Hu 使用 FAI 指数对 2009 年我国青岛海域爆发的浒苔灾害进行了监测和分析，并与归一化植被指数及增强植被指数所监测结果作对比，发现其解译浒苔信息精度高于另两种方法，效果较好。

3.3.5 归一化藻类指数法

Shi 等于 2009 年提出了归一化藻类指数法(NDAI)，他们基于 MODIS 数据，利用 NDAI 的方法计算出我国青岛海域在 2008 年 5—7 月间的浒苔覆盖面积[42]。NDAI 的计算公式为：

$$NDAI=[(R_{t.NIR}-R_{r.NIR})-(R_{t.RED}-R_{r.RED})]/[(R_{t.NIR}-R_{r.NIR})+(R_{t.RED}-R_{r.RED})] \quad (6)$$

式中，$R_{t.NIR}$，$R_{t.RED}$是近红外波段和红光波段的天顶反射率，$R_{r.NIR}$，$R_{r.RED}$是近红外波段和红光波段的瑞利散射反射率。相比 NDVI 法，该方法去除了大气对解译结果的影响，能更好的反应浒苔从红光波段到近红外波段的光谱变化。

3.3.6 基于对地静止海洋水色成像仪的浮游藻类指数法

基于对地静止海洋水色成像仪的浮游藻类指数法(IGAG)是一种基于对地静止海洋水色成像仪的解译浒苔信息方法，韩国学者于 2012 年使用此法对中国黄海、东海及韩国西部海岸的浒苔灾害进行的监测，其结果表明 IGAG 指数在监测大范围的海面漂浮藻类方面比 NDVI 和 EVI 指数更加准确[22]。

上述 6 种方法原理相似，不同的是所使用波段、参数及计算方法。相比传统的双波段比值法、NDVI 及 EVI 法，FAI、NDAI 和 IGAG 法更适合于藻类信息的解译，其精确度也更高。总的来说，多波段比值法虽然应用广泛，但和单波段阈值法一样，都较适用于监测漂浮状态浒苔。

3.4 辐射传输模型法

光学遥感基本有效实现对海面漂浮浒苔的监测，但针对水中悬浮浒苔情况，目前只有辐射传输模型方法。辐射传输模型法主要是通过分析目标地物与它的光谱辐射特征之间的相关性，建立模型，来提取地物的信息。此模型能综合气溶胶光学厚度、叶绿素、总悬浮物、黄色物质以及水体组分的浓度值等因素，来计算含有浒苔

水体的光谱反射值,使得悬浮于海水中的浒苔得以监测且误差较小。2002 年 Roelfsema 等利用 LANDSAT-TM 影像,结合了野外实测数据及沉积物的叶绿素浓度和反射率,对底栖藻类信息进行了解译,得出底栖藻类的叶绿素含量占珊瑚礁区总叶绿素含量的 20%,为珊瑚礁区总初级生产力做出很大贡献[62]。Hu 等于 2008 年使用了海洋水色卫星数据 SEAWIFS,综合叶绿素 a 浓度、叶绿素异质、光谱反射特性等对西佛罗里达湾的腰鞭毛藻进行了监测,并提出再加上时间序列分析以及海洋表面的气象数据等,会大大提高遥感监测的精确度[63]。虽然叶绿素浓度的定量遥感方法较多,但浒苔的遥感监测近几年才得到广泛重视,因此直接用于浒苔监测的实例较少[46]。只有赵文静等曾于 2009 年针对悬浮浒苔开展了海面光谱响应的辐射模拟研究,分析了海面光谱随着浒苔厚度、悬浮深度、水体浑浊度以及环境条件的变化规律。结果发现,随着浒苔悬浮深度、水体浑浊度的增加和浒苔厚度的减小,海面光谱所包含的浒苔信息就会减弱[47],但对于浒苔叶绿素 a 浓度量的变化文中尚未提及。

4　讨论与展望

遥感技术已经成为监测浒苔灾害的主要方法和手段,对浒苔灾害清理工作更有针对性,能在最短时间内预报浒苔灾害的发展态势[29]。目前从遥感监测浒苔的应用中看出,监督分类法因浒苔信息解译精度不高在监测浒苔领域使用较少。单波段阈值法和多波段比值法应用的比较广泛,尤其是在监测海洋表面的漂浮浒苔,但也有不足之处:首先这两种方法都是基于地物的光谱特性的差异来解译目标信息,但浒苔的光谱信息常受浮藻层厚度、悬浮状况、海水底部反射率和大气纠正误差的影响[64];其次,对混合象元的详细分析在精确解译浒苔信息时也是必要的,因在浒苔监测中常使用中等分辨率的遥感卫星数据,其一个象元所包括面积较大,这就增加了单个象元的复杂程度。建模反演算法能够准确的检测复杂水域中叶绿素的浓度,极大提高信息解译的精度。辐射传输模型法目前应用于海水中悬浮浒苔信息的解译,处于起步阶段,只停留在对叶绿素浓度的反演上,对浒苔叶绿素 a 浓度的定量研究基本没有。综上所述,未来浒苔灾害遥感监测的发展应注重以下几个方面:

(1)多种平台和多源遥感数据相结合　现阶段对浒苔的监测大部分仅应用卫星遥感手段,未来对浒苔监测过程中,应该结合航空遥感和地面遥感的平台,做到真正的全天时、全天候监测。此外,单一卫星数据具有一定局限性,要更全面、准确的获取浒苔灾害的信息需多卫星联合监测,这样才能相互弥补不足,减少分类和监测误差。

(2)遥感数据的空间分辨率有待提高　正如图 1B 所示,大部分研究者所使用数据为美国 MODIS 卫星影像,空间分辨率从 250 m 到 1000 m 不等,属于中低分辨率卫星遥感数据,数据信息存在大量的混合像元。中低分辨率的遥感影像在对浒苔的监测上存在了很大的不准确性,今后的研究中所使用遥感数据的空间分辨率还需要提高。

(3)浒苔监测特别是悬浮状态下浒苔的监测方法有待深入　目前对悬浮于海水中的浒苔信息的解译方法只有辐射传输模型法,且此法现阶段还停留在对叶绿素 a 浓度的反演上,并没有关于浒苔叶绿素 a 浓度的定量研究。不仅如此,悬浮浒苔厚度、密度、悬浮深度以及水体中泥沙含量,都会影响悬浮浒苔光谱特性的变化,这些都是以后研究的重点领域。

(4)遥感监测浒苔灾害由定性走向定量　迄今为止,所有的遥感监测浒苔灾害研究还都停留在定性阶段,即对浒苔分布的区域、面积和漂移路径等进行监测,而对于浒苔生物量的监测还没展开,这对于浒苔灾害的等级划分和灾害预警是极为不利的。未来遥感监测浒苔灾害的研究中,应尽快找到针对浒苔精确定量监测方法,提高监测精度。

(5)建立遥感监测预警系统　对浒苔灾害卫星监测目前仅仅停留在监测方面,但要想最大程度的减轻浒苔灾害暴发带来的社会、经济、生态影响,必须在遥感监测基础上综合浒苔的生物学、生态学研究,并结合海洋水色遥感、海面气象因素等,建立起浒苔监测的预警系统。

参考文献(References):

[1] 林文庭. 浅论浒苔的开发与利用. 中国食物与营养, 2007, (9): 23-25.

[2] 徐大伦, 黄晓春, 杨文鸽, 吴丹, 曹卫庆. 浒苔营养成分分析. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2003, 22(4): 318-320.

[3] 孙伟红, 冷凯良, 王志杰, 宁劲松, 王瑜, 刘艳萍, 翟毓秀. 浒苔的氨基酸和脂肪酸组成研究. 渔业科学进展, 2009, 30(2): 106-109.

[4] Fleurence J, Gutbier G, Mabeau S, Leray C. Fatty acids from 11 marine macroalgae of the French Brittany coast. Journal of Applied Phycology, 1994, 6(5/6): 527-532.

[5] 陶平, 许庆陵, 姚俊刚, 高旭. 大连沿海 13 种食用海藻的营养组成分析. 辽宁师范大学学报: 自然科学版, 2001, 24(4): 406-410.

[6] 宋玉娟, 崔铁军, 李丹彤, 焦春艳. 肠浒苔凝集素的分离纯化及性质研究. 中国海洋药物杂志, 2005, 24(1): 1-5.

[7] 张金荣, 唐旭利, 李国强. 浒苔化学成分研究. 中国海洋大学学报, 2010, 40(5): 93-95.

[8] Ambrosio A L, Sanz L, Sánchez E I, Wolfenstein-Todel C, Calvete J J. 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, 2003, 415(2): 245-250.

[9] Raman B V, Rao D N, Radhakrishnan T M. *Enteromorpha compressa* (L.) *Greville* an edible green alga as a source of antiallergic principle (S). Indian Journal of Clinical Biochemistry, 2004, 19(1): 105-109.

[10] Burtin P. Nutritional value of seaweeds. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry, 2003, 2(4): 498-503.

[11] Sukatar A, Karabay-Yavaşsoglu N U, Ozdemir G, Horzum Z. Antimicrobial activity of volatile component and various extracts of *Enteromorpha linza* (Linnaeus) J. Agardh from the coast of Izmir, Turkey. Annals of Microbiology, 2006, 56(3): 275-279.

[12] Ibtissam C, Hassane R, José M L, Francisco D S J, Antonio G V J, Hassan B, Mohamed K. Screening of antibacterial activity in marine green and brown macroalgae from the coast of Morocco. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(7): 1258-1262.

[13] Hudson J B, Kim J H, Lee M K, DeWreede R E, Hong Y K. Antiviral compounds in extracts of Korean seaweeds: evidence for multiple activities. Journal of Applied Phycology, 1998, 10(5): 427-434.

[14] Jiao L L, Jiang P, Zhang L P, Wu M J. Antitumor and immunomodulating activity of polysaccharides from *Enteromorpha intestinalis*. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2010, 15(3): 421-428.

[15] Cho M, Yang C, Kim S M, You S G. Molecular characterization and biological activities of watersoluble sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera*. Food Science and Biotechnology, 2010, 19(2): 525-533.

[16] Castro R, Zarra I, Lamas J. Water-soluble seaweed extracts modulate the respiratory burst activity of turbot phagocytes. Aquaculture, 2004, 229(1): 67-78.

[17] 梁刚. 大型藻类遥感监测方法研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2011.

[18] 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.

[19] Ramsey III E, Rangoonwala A, Thomsen M S, Schwarzschild A. Spectral definition of the macro-algae *Ulva curvata* in the back--barrier bays of the eastern shore of Virginia, USA. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(2): 586-603.

[20] 李三妹, 李亚君, 董海鹰, 孙凌, 刘诚, 刘征, 赁青, 闫华, 赵长海. 浅析卫星遥感在黄海浒苔监测中的应用. 应用气象学报, 2010, 21(1): 76-82.

[21] 蒋兴伟, 邹亚荣, 王华, 朱海天. 基于 SAR 快速提取浒苔信息应用研究. 海洋学报, 2009, 31(2): 63-68.

[22] 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. Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 359-375.

[23] Shen H, Perrie W, Liu Q R, He Y J. Detection of macroalgae blooms by complex SAR imagery. Marine Pollution Bulletin, 2014, 78(1/2): 190-195.

[24] Zhang H Y, Xu Q, Cheng Y C, Chen M X, Zuo J C. Monitoring of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea with MODIS//Proceedings of the 2013 the International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering.Nanjing. Atlantis Press. 2013:902-905.

[25] Casal G, Sánchez-Carnero N, Sánchez-Rodríguez E, Freire J. Remote sensing with SPOT-4 for mapping kelp forests in turbid waters on the south European Atlantic shelf. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 91(3): 371-378.

[26] Lyons M, Phinn S, Roelfsema C. Integrating quickbird multi-spectral satellite and field data: mapping bathymetry, seagrass cover, seagrass species and change in Moreton Bay, Australia in 2004 and 2007. Remote Sensing, 2011, 3(1): 42-64.

[27] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 科学出版社, 2003: 1-6.

[28] 梅新安, 彭望琭, 秦其明, 刘慧平. 遥感导论. 北京: 北京高等教育出版社, 2001: 1-4.

[29] 姚东瑞. 浒苔. 北京: 海洋出版社, 2011: 4-100.

[30] Garcia R A, Fearns P, Keesing J K, Liu D Y. Quantification of floating macroalgae blooms using the scaled algae index (SAI). Journal of Geophysical Research, Oceans, 2013, 118(1): 26-42.

[31] 钟山, 丁一, 李振, 刘爱超, 仝兆远, 王强. MODIS 浒苔遥感监测误差分析研究. 遥感信息, 2013, 28(1): 38-42.

[32] 施英妮, 石立坚, 夏明, 杨楠, 丁静. HJ-1A/1B 星 CCD 传感器数据在黄东海浒苔监测中的应用. 遥感信息, 2012, (2): 47-50.

[33] Cui T W, Zhang J, Sun L E, Jia Y J, Zhao W J, Wang Z L, Meng J M. Satellite monitoring of massive green macroalgae bloom(GMB): imaging ability comparison of multi-source data and drifting velocity estimation. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(17): 5513-5527.

[34] Keesing J K, Liu D Y, Fearns P, Garcia R. Inter-and intra-annual patterns of *Ulva prolifera* green tides in the Yellow Sea during 2007-2009, their origin and relationship to the expansion of coastal seaweed aquaculture in China. Marine Pollution Bulletin, 2011, 62(6): 1169-1182.

[35] 邢前国, 郑向阳, 施平, 郝佳佳, 禹定峰, 梁守真, 刘东艳, 张渊智. 基于多源、多时相遥感影像的黄、东海绿潮影响区检测. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1644-1647.
[36] 李颖, 梁刚, 于水明, 陈澎. 监测浒苔灾害的微波遥感数据选取. 海洋环境科学, 2011, 30(5): 739-742.
[37] He M X, Liu J P, Yu F, Li D Q, Hu C M. Monitoring green tides in Chinese marginal seas//Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Marine Applications. 2011: 111-124.
[38] 顾行发, 陈兴峰, 尹球, 李正强, 许华, 邵芸, 李紫薇. 黄海浒苔灾害遥感立体监测. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1627-1632.
[39] 王国伟, 李继龙, 杨文波, 李小恕, 李慧琴, 王继隆. 利用 MODIS 和 RADARSAT 数据对浒苔的监测研究. 海洋湖沼通报, 2010, (4): 1-8.
[40] 孙凌, 郭茂华, 李三妹, 赵文静. 用 FY-3A MERSI 进行青岛海域浒苔监测. 遥感信息, 2010, (1): 64-68.
[41] Hu C M, Li D Q, Chen C S, Ge J Z, Muller-karger F E, Liu J P, Yu F, He M X. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(C5): C05017, doi: 10.1029/2009JC005561.
[42] Shi W, Wang M H. Green macroalgae blooms in the Yellow Sea during the spring and summer of 2008. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(C12): C120010, dio: 10.1029/2009JC005513.
[43] Hu C M. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2118-2129.
[44] 蒋兴伟, 刘建强, 邹斌, 王其茂, 曾韬, 郭茂华, 朱海天, 邹亚荣, 唐军武. 浒苔灾害卫星遥感应急监视监测系统及其应用. 海洋学报, 2009, 31(1): 52-64.
[45] 刘振宇, 江涛. 基于 MODIS 数据的浒苔信息提取方法研究. 测绘科学, 2008, 33(增刊): 113-114.
[46] 叶娜, 贾建军, 田静, 苏洪波, 雒伟民, 张峰, 肖康. 浒苔遥感监测方法的研究进展. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 7-12.
[47] 赵文静, 张杰, 崔廷伟, 郝艳玲, 孙凌. 水下悬浮浒苔海面光谱响应的辐射传输模拟. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1656-1660.
[48] Casal G, Kutser T, Domínguez-Gómez J A, Sánchez-Carnero N, Freire J. Mapping benthic macroalgal communities in the coastal zone using CHRIS-PROBA mode 2 images. Estuarine Coastal and Shelf Science, 2011, 94: 281-290.
[49] Casal G, Sánchez-Carnero N, Domínguez-Gómez J A, Kutser T, Freire J. 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, 2012, 159: 1997-2013.
[50] Nielsen E S. The Annual Amount of Organic Matter Produced by the Phytoplankton in the Sound off Helsingor//Meddelelser fra Kommissionen for Danmarks Fiskeriog Havundersogelser. Ser. Plankton, 1937: 1-37.
[51] Steemann N E. Productivity, definition and measurement//Hill M N. The Sea. London: Wiley, 1963.
[52] Nielsen E S, Jensen E A. Primary ocean production. The autotrophic production of organic matter in the oceans. Galathea Report, 1957: 49-136.
[53] Arai K, Terayama Y. Satellite-and ground-based red tide detection method and system by means of peak shift of remote sensing reflectance. International Journal of Applied Science, 2011, 2(3): 53-61.
[54] Barillé L, Robin M, Harin N, Bargain A, Launeau P. Increase in seagrass distribution at Bourgneuf Bay (France) detected by spatial remote sensing. Aquatic Botany, 2010, 92(3): 185-194.
[55] Wang M H, Shi W, Tang J W. Water property monitoring and assessment for China's inland Lake Taihu from MODIS-Aqua measurements. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(3): 841-854.
[56] Dekker A G, Peters S W M. The use of the Thematic Mapper for the analysis of entropic lakes: a case study in the Netherlands. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(5): 799-821.
[57] Phys K H, Gitel'Son A A, Lopatchenko A A, Sukhorukov B L, Voigt T. In-situ monitoring of water quality on the basis of spectral reflectance. Ship-borne Experiments for the development of remote sensing algorithms especially for the estimation of algae content in natural waters. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 1988, 73(1): 61-72.
[58] 周艺, 周伟奇, 王世新, 张蓓. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用. 水科学进展, 2004, 15(3): 312-317.
[59] Baban S M J. Detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U. K., using Landsat imagery. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(7): 1247-1267.
[60] Kloiber S M, Brezonik P L, Olmanson L G, Bauer M E. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data. Remote sensing of Environment, 2002, 82(1): 38-47.
[61] Hu C M, He M X. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area. Eos, Transactions American Geophysical Union, 2008, 89(33): 302-303.
[62] Roelfsema C M, Phinn S R, Dennison W C. Spatial distribution of benthic microalgae on coral reefs determined by remote sensing. Coral Reefs, 2002, 21(3): 264-274.
[63] Hu C M, Luerssen R, Muller-Karger F E, Carder K L, Heil C A. On the remote monitoring of *Karenia brevis* blooms of the west Florida shelf. Continental Shelf Research, 2008, 28(1): 159-176.
[64] Blondeau-Patissier D, Gower J F R, Dekker A G, Phinn S R, Brando V E. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. Progress in Oceanography, 2014, 123: 123-144.