

郑翔宇,高志强,许宁,等.不同大气校正方法对浒苔遥感监测效果影响研究[J].环境科学与技术,2017,40(12):284-291. Zheng Xiangyu, Gao Zhiqiang, Xu Ning, et al. Effects of different atmospheric correction methods on remote sensing monitoring results of *Ulva prolifera* [J]. Environmental Science & Technology 2017, 40(12): 284-291.

不同大气校正方法对浒苔遥感监测效果影响研究

郑翔宇^{1,2}, 高志强^{1*}, 许宁^{1,2}, 徐福祥^{1,2}, 艾金泉³

(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; 3. 华东师范大学, 上海 200062)

摘要 HJ-1 CCD数据具有较高的时间分辨率和空间分辨率,可以实现大范围的浒苔灾害动态监测,大气校正是实现浒苔信息提取的基础,但是不同大气校正方法对同一影像的处理结果会有差异。基于黄海中南部浒苔暴发时期的环境卫星影像,采用FLAASH、6S、COST 3种方法分别对其进行大气校正处理以消除大气影响,并运用NDVI阈值法提取浒苔,通过划分多个研究区以及对光谱特征、NDVI、类间距、混合像元、阈值敏感性、提取结果等多个变化量的统计与分析,比较了3种大气校正方法在浒苔提取中的效果,为后续浒苔定量化监测提供了帮助。结果表明:在采用NDVI阈值法提取浒苔信息时,使用COST大气校正会取得良好的提取效果,其次是FLAASH大气校正方法和6S大气校正方法。

关键词 环境卫星; 大气校正; 浒苔; NDVI; FLAASH; 6S; COST

中图分类号:X55 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2017.12.043 文章编号:1003-6504(2017)12-0284-08

Effects of Different Atmospheric Correction Methods on Remote Sensing Monitoring Results of *Ulva prolifera*

ZHENG Xiangyu^{1,2}, GAO Zhiqiang^{1*}, XU Ning^{1,2}, XU Fuxiang^{1,2}, AI Jinquan³

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. East China Normal University, Shanghai 200062, China)

Abstract: With high temporal and spatial resolutions, HJ-1 CCD data can be used to dynamically monitor *Ulva prolifera* disaster on a large scale. Atmospheric correction is a basis for *Ulva prolifera* information extraction, but there is a difference between different atmospheric correction methods when they are used to process the same image. Based on the HJ-1 satellite images generated during the explosive growth period of *Ulva prolifera* in the central and southern Yellow Sea, the research carries out atmospheric correction by three methods including FLAASH, 6S and COST in a bid to eliminate atmospheric effects, and then extracts *Ulva prolifera* using NDVI threshold method. By marking off multiple study areas and calculating or analyzing a number of statistics such as spectrum, NDVI, class space, mixed pixel, threshold sensitivity and extraction results, the research compares the effect of three atmospheric correction methods on *Ulva prolifera* monitoring and provides assistance for the subsequent quantitative monitoring of *Ulva prolifera*. According to the result, when NDVI threshold method is used for *Ulva prolifera* information extraction, COST achieves a good monitoring effect, followed by FLAASH and 6S.

Key words: HJ-1 CCD; atmospheric correction; *Ulva prolifera*; NDVI; FLAASH; 6S; COST

浒苔(*Ulva prolifera*)是在一定环境下,海洋中的大型藻类暴发性生长和聚集达到某一水平,形成的生态异常现象^[1,2],其暴发给环境和经济带来巨大的灾难。遥感技术已经成为监测绿潮灾害的一种主流方

法,大气校正在定量遥感的研究中尤为重要,不同大气校正模型具有不同的针对性,在处理同一景遥感影像时会显现出不同的特点^[3,4],大气校正模型可大致分为3类:基于大气辐射传输模型、基于影像本身的统

《环境科学与技术》编辑部(网址)http://tjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期 2017-02-09;修回 2017-03-27

基金项目: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);中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA1102 0000)科技部基础支撑项目(2014FY210600);中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14)

作者简介:郑翔宇(1992-),男,硕士,主要研究近海生态灾害遥感监测(电子信箱)xiangyuzheng@yic.ac.cn;516863135@qq.com;*通讯作者(电子信箱)zqgao@yic.ac.cn。

计模型、基于地面定标的线性回归经验模型^[5-6]。研究表明,基于大气辐射传输模型通过输入多种大气环境参数,校正精度高^[7];基于影像本身的统计模型可直接从遥感影像的特征出发反演反射率,经济实用、可操作性强,但受人为主观因素的影响比较大^[8-9];基于地面定标的线性回归经验模型需要实测光谱数据,若是大范围或在地形地貌复杂的区域进行操作,此方法受限制比较大^[6,10]。在绿潮监测中的大气校正方面,国内外学者进行了很多相关研究,吴传庆等基于 6S 大气校正对 2013 年黄海浒苔暴发过程进行了连续监测^[11];蔡晓晴等基于瑞利散射校正研究了 GOCI 数据的绿潮监测方法^[1];Hu 等基于瑞利散射校正监测了黄、东海的浒苔灾害^[12];Cui 等基于 6S 大气校正对 HJ-1 CCD、ENVISAT SAR、TERRA MODIS 数据的绿潮监测能力做了比较^[13]。目前的研究大多是只采用一种大气校正方法进行浒苔遥感监测,因此文中基于不同的大气校正模型展开研究。

试验以黄海海域的浒苔灾害监测为例,采用浒苔暴发期间的高空间和高时间分辨率的环境卫星数据,利用常用的基于辐射传输模型的 FLAASH 算法和 6S 算法以及基于影像本身统计模型的 COST 算法对浒苔暴发期间环境卫星影像分别进行大气校正处理,消除大气影响,反演浒苔的地面反射率,并采用归一化植被指数方法提取浒苔,最终总结几种模型的特点,分析不同大气校正方法对浒苔信息提取效果的影响,确定最适合 HJ-1 CCD 数据浒苔提取的校正方法,为后续浒苔定量化监测做准备。

1 研究方法

1.1 数据准备

研究区主要为黄海中南部海域,近年来这一海域每到夏季都会有大规模的浒苔灾害暴发,给当地的旅游业、养殖业、交通运输业等产业造成巨大的损失。试验采用 2013 年 6 月 29 日具有 30 m 分辨率的 HJ-1 CCD 数据,该数据具有 4 个波段,其中归一化植被指数所需要的红光波段和近红外波段分别为第三和第四波段,影像成像时间分别是格林尼治时间 1:50,浒苔正处于大规模暴发的时期,影像天气晴朗,能见度高,符合此次研究需求。

1.2 辐射定标

辐射定标是将遥感传感器的数字量化值(DN)转换为表观辐射亮度值或表观反射率等物理量的过程,是定量化的基础,因此大气校正前首先要进行辐射定标,定标参数从影像对应的 KML 文件中获取,表观辐射亮度的计算关系式如下所示:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{DN_{\lambda}}{gain} \right) + bias \quad (1)$$

表观反射率是指大气层顶的反射率,包括地表反射率和大气反射率两部分,其计算公式如下:

$$\rho_{TOA} = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times D^2}{ESUN_{\lambda} \times \cos \theta} \quad (2)$$

$$D = 1 + 0.0167 \sin [2\pi (J - 93.5) / 360] \quad (3)$$

以式(1)~(3)中 DN_{λ} 是指不同波段中地物的灰度值, $gain$ 和 $bias$ 分别为绝对定标系数增益 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$) 和偏移量 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$), 为表观辐射亮度; ρ_{TOA} 为表观反射率, D 为日地间的天文单位距离, $ESUN_{\lambda}$ 是各波段大气层顶的光谱辐照度, θ 为太阳天顶角, J 为年积日。

1.3 大气校正

文中使用 3 种大气校正方法,包括 FLAASH、6S 和 COST 3 种模型大气校正方法。FLAASH 是由美国空军研究实验室和光谱科学研究所共同研发的一种基于 MODTRAN4 的大气纠正模块^[14],已经集成在 ENVI 软件中,具有了可视化的操作界面,操作简单快捷且具有高精度的校正效果,是目前常用的基于辐射传输模型的大气校正方法^[15,16]。

6S 模型是在原有 5S 模型基础上通过改进和发展建立的辐射传输模型,能够准确模拟光线在从太阳至地物目标至传感器之间的传输过程中所受大气的影晌^[17]。试验基于 6S 模型对经过辐射定标后的 HJ-1 CCD 数据的 4 个波段进行大气校正模拟计算,得到校正参数 x_a 、 x_b 、 x_c ,如表 1 所示。

表 1 6S 大气校正输出参数

波段	x_a	x_b	x_c
Band 1	0.002 48	0.102 47	0.166 50
Band 2	0.002 51	0.059 19	0.112 58
Band 3	0.002 75	0.034 81	0.080 58
Band 4	0.004 18	0.022 10	0.057 38

然后,利用 6S 模型的计算公式,得出校正后各波段的地表反射率,计算公式如下:

$$y = x_a L - x_b \quad (4)$$

$$\rho = y / (1 + x_c y) \quad (5)$$

其中 L 为经过辐射定标后的大气层顶表观辐射亮度, ρ 为校正后的反射率。

COST 模型^[18]以两方面理论假设为前提,一是大气性质是均一的,每一波段的最小辐射亮度值不但受黑体辐射的影响,也受大气分子和气溶胶散射和反射作用的影响;二是传感器每一波段都存在反射率为 1% 的黑体辐射^[15],试验通过 ENVI、ArcMap 软件进行波段运算完成 COST 大气校正,原理见式(16)^[19]:

$$\rho = \pi \times D^2 \times \frac{(L_\lambda - L_{haze\lambda})}{ESUN_\lambda \times \cos^2 \theta} \quad (6)$$

式中 ρ 为地面相对反射率 $L_{haze\lambda}$ 为大气层辐射值 L_λ 、 D 、 $ESUN_\lambda$ 、 θ 均与式(2)和式(3)意义相同 输入参数见表 2。

表 2 COST 大气校正参数

Table 2 The input parameters of COST atmospheric correction		$EXUN_\lambda$			
θ	D	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
		29.571	1.016 6	1 922.897	1 823.985

1.4 样本区选择

基于环境卫星标准假彩色图像 (Red:Band 4 ; Green: Band 3 ;Blue :Band 2) 从影像中分别选择多种样本区用来计算几个不同的统计量 如图 1 所示。

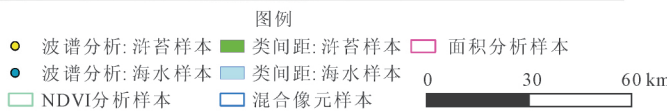
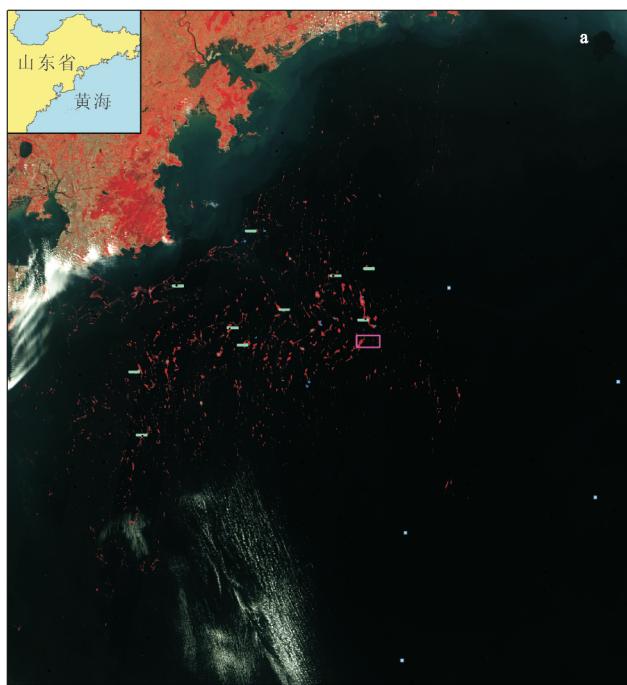


图1 2013年6月29日黄海海域浒苔暴发标准假彩色影像及样本区选择示例图

Fig.1 The standard false color image of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea on June 29, 2013 and the sketch map of sampling areas

试验将高覆盖度浒苔斑块中间选取的特征明显、亮度值高的像元作为纯浒苔样本 选取开阔、均匀海域的海水像元(暗像元)作为纯海水样本。在选取样本的同时 确保浒苔和海水样本均来自清澈、不受云雾及岛屿船只影响的海域 且在空间上分布均匀 使样本更具有代表性。

1.5 NDVI、类间距计算及面积统计

利用遥感手段监测浒苔灾害 采用归一化植被指数(NDVI)方法能够很好地消除大气程辐射的影响 它根据海水中叶绿素的浓度来反演浒苔信息 成为目

图 1(a)是 2013 年 6 月 29 日浒苔暴发期间黄海 中南部海域的标准假彩色影像 图 1(b~g)是各个统计 量所选样本的部分示例 具体如下 (1) 随机选取 70 个纯浒苔样本点和 70 个纯海水样本点 统计这 2 种 地物的光谱特征 如图 1(b)所示 (2)随机选取 10 个 浒苔与海水混合的样本区 统计不同大气校正方法的 前后的 NDVI 值 如图 1(c)所示 (3)随机选取 20 个 纯浒苔样本区以及 5 个纯海水样本区 总像元数皆为 4 500 个 计算浒苔与海水的类间距 如图 1(d~e)所 示 ;从浒苔斑块边缘部分随机选择 10 个样本区 计算 从纯浒苔向混合像元、纯海水过渡时的斜率 如图 1 (f)所示 ;随机选取 1 个包含高覆盖度浒苔斑块和低 覆盖度浒苔斑块的样本区 通过人工目视解译计算其 面积 如图 1(g)所示。

前应用最广泛的浒苔提取方法。大气校正前后 NDVI 的计算公式如下：

$$NDVI_{TOA} = \frac{TOA_{NIR} - TOA_{RED}}{TOA_{NIR} + TOA_{RED}} \quad (7)$$

$$NDVI_\lambda = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (8)$$

式中 TOA_{NIR} 和 TOA_{RED} 分别表示大气校正前近 红外波段和红光波段的表观反射率 ; ρ_{NIR} 和 ρ_{RED} 分别 表示不同方法大气校正之后的近红外波段和红光波 段的地表反射率。

利用遥感进行浒苔监测的本质是将浒苔与海水区分开来,因此借鉴模式识别领域区分两类样本所采用的“类间距”概念^[20-21]来评判不同大气校正方法对浒苔和海水的区分能力,计算公式如下。

$$D_{gw} = \frac{|\mu_g - \mu_w|}{\sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_w^2}} \quad (9)$$

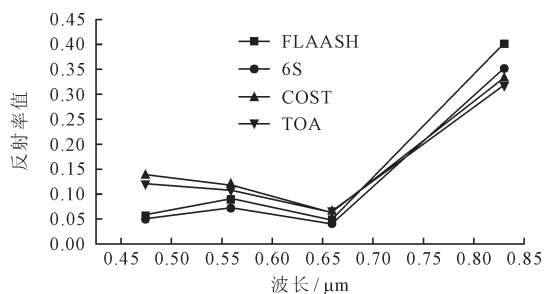
式中 μ_g 和 μ_w 分别表示所选取的浒苔和海水样本在不同大气校正方法下归一化植被指数的均值, σ_g^2 和 σ_w^2 分别为浒苔和海水样本在不同大气校正方法下归一化植被指数的方差, D_{gw} 即浒苔和海水样本之间的距离,在某一大气校正方法下,距离越大,则说明浒苔和海水的区分程度越大,该大气校正方法更有利于浒苔信息的提取;反之,则说明经过该方法大气校正后,其提取浒苔信息的效果相比其它大气校正方法而言较差。

通过从影像中提取浒苔栅格的数目进而根据以下公式求出每一个阈值点所对应的浒苔面积 $S(\text{km}^2)$,其中代表不同的大气校正方法, N_{imax} 代表在某种大气校正方法中研究区内最大的 NDVI 值, M_{n_i} 代表在某种大气校正方法中阈值点对应的研究区内的像元个数。

$$S_i = \frac{\sum_{n=N_i}^{N_{\text{imax}}} M_{n_i} \times 30 \times 30}{10\ 000} \quad (10)$$

2 结果与讨论

试验基于环境卫星数据,通过对多个统计量的计算,分析了 FLAASH、6S、COST 3 种大气校正模型对



(a) 表观反射率和地表反射率图像浒苔的光谱曲线

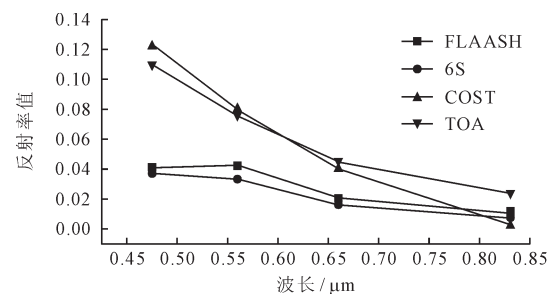
浒苔提取效果的影响。

2.1 地物光谱曲线分析

图 2 是浒苔与海水的表观反射率图像 (TOA,下同) 和在不同大气校正方法下的地表反射率图像的光谱曲线对比图。可以看出,经过 FLAASH 模型和 6S 模型校正之后,浒苔的光谱曲线具有明显的植被特征,在 $0.55 \mu\text{m}$ 附近存在明显的绿反射峰,在 $0.45 \mu\text{m}$ 附近存在明显的“蓝谷”, $0.67 \mu\text{m}$ 附近存在明显的“红谷”,在近红外波段出现了明显的反射陡坡,因此校正之后地物的反射率较为理想。与表观反射率图像相比较,浒苔与海水在可见光波段的反射率均减小,其中蓝波段降低最为明显,绿波段和红波段依次次之,这是因为大气校正降低了在可见光波段由程辐射引起的增加效应;而在近红外波段,由于大气对近红外波段的影响主要以水汽和臭氧的吸收作用为主而散射作用减弱,因此经过大气校正之后的近红外波段的反射率上升。经过 COST 模型校正之后的光谱反射曲线,浒苔在可见光波段地表反射率的植被特征并不明显,该模型不能有效降低可见光波段尤其在蓝、绿波段大气的散射作用,浒苔与海水在蓝、绿波段的地表反射率均高于校正之前的表观反射率。

由此可见,FLAASH 模型和 6S 模型对浒苔与海水 2 种地物真实反射率的校正更能反映目标区域的光谱反射特性。但由于研究采用 NDVI 阈值法提取浒苔,避开了蓝、绿波段,因此提取效果仍需后续分析。

2.2 NDVI 分析



(b) 表观反射率和地表反射率图像海水的光谱曲线

图 2 表观反射率与地表反射率图像地物的光谱曲线

Fig.2 The object spectrum from the apparent reflectance and the surface reflectance image

通过对大气校正前后图像叠加显示,可以发现经过大气校正之后,影像的对比度及亮度明显增强,但是不同方法大气校正的视觉效果变化并不明显,采用目视判读的方法不能准确评价 3 种校正模型的效果及其对浒苔提取效果的影响,因此试验对校正前后的 NDVI 各项统计量(包括直方图、值域、标准差、四分位距)变化进行了比较和分析。

图 3 是不同方法大气校正前后所选样本区 NDVI 变化的直方图,可以明显看出,与校正之前的 TOA 图

像相比,样本区域大气校正后 NDVI 直方图的区间范围展宽,这说明浒苔与海水的 NDVI 值的动态范围变大,更有利于浒苔信息的提取。不同的大气校正方法,NDVI 值变化幅度不同,研究表明,标准差可以显示图像中像元的灰度值与平均值的离散程度,四分位距可以反映 NDVI 值域范围内 50%数据的离散和变异程度,标准差和四分位距越大,灰度级分布越分散,影像的目视效果就越好,所含信息量就越丰富^[22-23],结合表 3 可知,FLAASH 大气校正之后 NDVI 的值域展宽幅

度最大,但是 COST 大气校正之后,样本区 NDVI 值的标准差和四分位距更大,分别为 0.634 7 和 1.350 8,由此可见,COST 校正模型更能增加 NDVI 图像像元值的离散程度,使浒苔峰与海水峰间隔更大,增强了浒苔与海水之间的距离,达到了增强信息的目的。

2.3 不同方法大气校正对浒苔探测能力影响的评价

基于所选的纯浒苔样本和纯海水样本,利用 3 种大气校正方法对影像分别进行大气校正后,计算浒苔

表 3 不同方法大气校正前后的 NDVI 统计量
Table 3 NDVI statistics before and after atmospheric correction by different methods

	FLAASH	6S	COST	TOA
最小值	-0.870 9	-0.567 4	-0.936 1	-0.337 2
最大值	0.832 5	0.847 1	0.739 6	0.718 7
值域宽度	1.703 5	1.414 5	1.675 7	1.055 8
标准差	0.475 9	0.463 9	0.634 7	0.396 3
四分位距	0.982 8	0.961 7	1.350 8	0.830 5

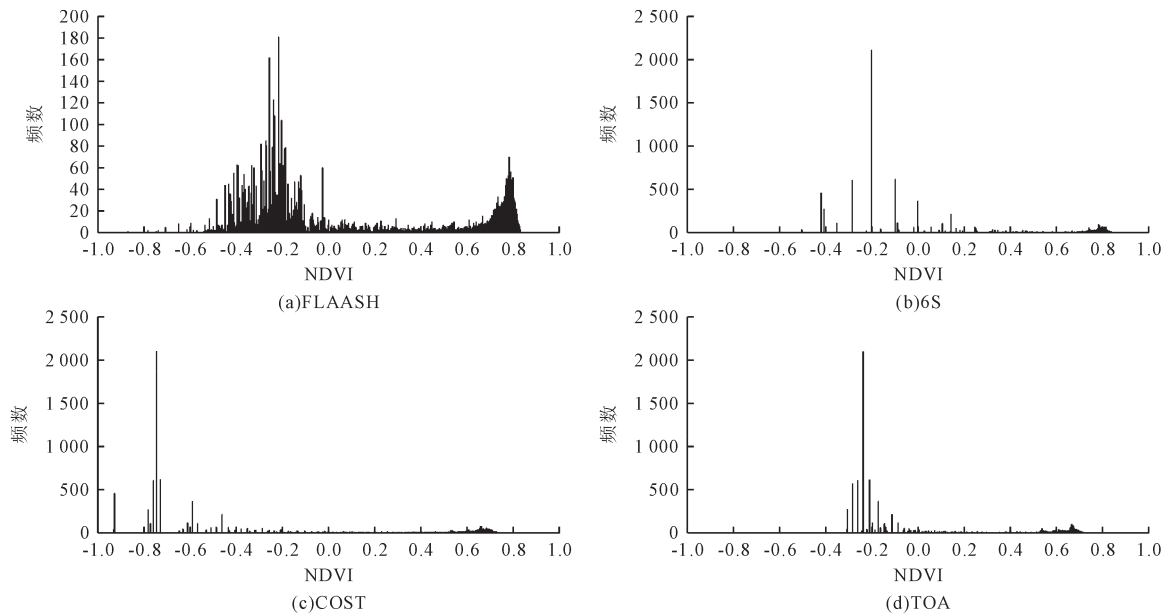


图3 不同方法大气校正前后样本区NDVI直方图

Fig.3 NDVI histogram of the sample areas before and after atmospheric correction by different methods

和海水样本的距离 D_{gw} ,并与表观反射率影像计算出的结果进行比较,结果如图 4 所示。

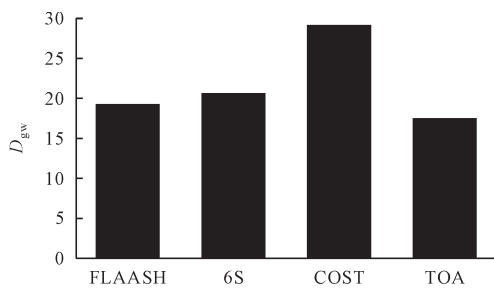


图4 不同大气校正方法下纯浒苔与纯海水的类间距比较
Fig.4 A comparison of class space between pure *Ulva prolifera* and pure seawater under different atmospheric correction methods

由图 4 的对比结果可见,经过 FLAASH、6S、COST 大气校正处理的图像以及 TOA 图像所选样本的类间距分别为 19.09、20.48、28.98、17.39,TOA 图像的类间距最低,说明大气校正对环境卫星关于浒苔信息反演的应用中具有重要的作用,它扩大了纯海水与纯浒苔之间的距离,有利于 NDVI 阈值法对浒苔信息的提取,经过 COST 大气校正后,NDVI 算法的类间距最大,说明 COST 模型对浒苔与海水的区分能力最

好,探测浒苔的效果要明显优于其它 2 种大气校正方法。

在使用环境卫星监测浒苔的过程中,高覆盖度浒苔斑块边缘部分和低覆盖度浒苔斑块会出现混有浒苔与海水的混合像元,它会使浒苔与海水的界线变模糊,提取出来的浒苔面积偏大,产生一定的误差。如图 1(f)所示,所选样本区从左至右分别包含纯浒苔、混合像元、纯海水 3 种像元,通过计算浒苔像元至海水像元 NDVI 值变化的斜率即可评价 3 种大气校正方法对浒苔提取精度的影响,斜率的绝对值越大,则浒苔斑块边界与海水边界区分越明显,浒苔提取效果就会越好。根据计算(表 4),10 个样本区 NDVI 变化的斜率均呈现出了 $COST > FLAASH > 6S > TOA$ 的现象,所以可以得出结论,大气校正会对浒苔斑块边缘部分的混合像元有较好的处理,相比未经过大气校正的表观反射率图像,大气校正降低了影像中浒苔与海水边界的模糊程度,使浒苔的提取结果更加精确,COST 大气校正对混合像元的处理效果最为显著,这与前文中对 NDVI 分析的研究结果相一致。

2.4 浒苔提取面积对 NDVI 阈值的敏感性及提取结

表 4 样本曲线斜率绝对值
Table 4 Absolute slope of sample curve

	FLAASH	6S	COST	TOA
1	0.141 2	0.135 4	0.159 5	0.099 7
2	0.132 6	0.131 0	0.162 3	0.097 5
3	0.147 9	0.112 0	0.171 2	0.107 2
4	0.125 3	0.118 7	0.141 9	0.075 3
5	0.154 1	0.133 5	0.185 2	0.109 2
6	0.056 6	0.039 3	0.061 2	0.029 9
7	0.181 0	0.117 1	0.166 9	0.098 1
8	0.161 0	0.098 0	0.150 6	0.083 4
9	0.141 6	0.135 8	0.181 8	0.112 1
10	0.168 5	0.109 4	0.168 6	0.102 8
平均	0.141 0	0.113 0	0.154 9	0.091 5

果对比

2.4.1 浒苔提取面积对 NDVI 阈值的敏感性分析

在第 2.2 节部分对 NDVI 的分析中,我们发现经过 3 种方法大气校正之后的 NDVI 值域范围各不相同,阈值的变化会导致浒苔提取面积发生很大的变化,若 NDVI 的阈值取值过高,会遗漏部分低覆盖度浒苔,若 NDVI 的阈值取值过低,高覆盖度浒苔斑块的面积会被严重扩大,产生很大的误差,因此试验进行了浒苔面积对 NDVI 阈值的敏感性分析。根据所选研究区的 NDVI 统计直方图,将海水峰和浒苔峰近似看为正态分布,结合孙立娥^[2]的阈值设定方法以及目

视判读,分别设定不同大气校正方法下的 NDVI 阈值范围,经统计,3 种大气校正方法设定的 NDVI 阈值区间及阈值宽度如表 5 所示。

表 5 3 种大气校正方法对应的 NDVI 阈值区间
Table 5 The NDVI threshold range corresponding to the three atmospheric correction methods

大气校正方法	FLAASH	6S	COST
阈值范围	-0.05~0.75	0~0.8	-0.6~0.6
阈值宽度	0.8	0.8	1.2

通过在阈值区间上均匀选取 21 个阈值点,最后做出浒苔面积随阈值变化的散点图并进行趋势线拟合,如图 5 所示,根据拟合的结果进行分析,可以看出浒苔的提取面积随 NDVI 阈值的变化都基本成线性关系,但是不同的大气校正方法,其趋势线的拟合公式也不同,浒苔面积的变化对 NDVI 阈值的敏感程度也不同。斜率的绝对值代表趋势线的倾斜程度,FLAASH、6S、COST 3 种大气校正方法的趋势线拟合公式斜率的绝对值分别是 7.207 3、9.299 5、4.683 4,斜率越大,提取浒苔的面积随 NDVI 阈值的变化程度越剧烈,由此可见,经过 6S 模型校正之后的浒苔面积对阈值变化最敏感,FLAASH 模型次之,而经过 COST 模型校正之后的浒苔面积对阈值变化的敏感度最低,因此,在提取浒苔时,由于阈值设置的误差而带来的浒苔提取面积的波动也就最小,提取值与真实值之间的误差也就最低。

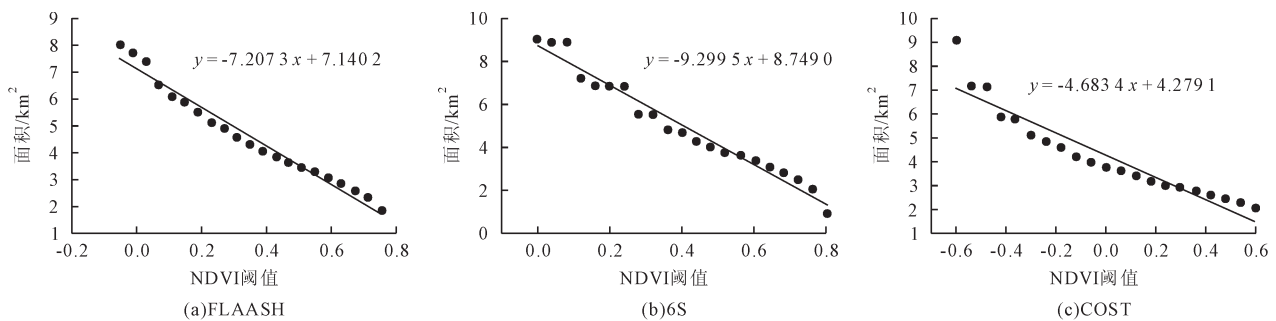


图5 浒苔面积对NDVI阈值敏感性

Fig.5 The sensitivity of *Ulva prolifera* area to NDVI threshold

2.4.2 浒苔提取结果对比

为了更加直观反应浒苔提取效果,试验对整幅影像的浒苔提取结果进行对比分析。

首先确定浒苔提取阈值。通过对影像进行分波段加权处理并重新合成新波段,然后线性拉伸 10%使影像达到植被增强的效果,以突出浒苔特征。采用 ENVI 软件人工目视解译的方法提取试验区(图 1(g)所示)内浒苔斑块,并将其面积作为标准值,经计算,试验区内浒苔面积为 3.596 4 km²。由于阈值的变化会导致提取面积的误差,试验采用密度分割法和梯度法相结合的方式,对 2 种方法得出的阈值进行综合判断,并不断进行试验,调整阈值大小使提取的面积与标准值最

接近,确定最终阈值,结果如表 6 所示。

表 6 浒苔提取设定的阈值
Table 6 The threshold of *Ulva prolifera* extraction under three different atmospheric correction methods

大气校正方法	FLAASH	6S	COST
设定阈值	0.48	0.56	0.06
提取面积/km ²	3.618 9	3.590 1	3.620 7

由表 6 可见,对试验区内经过 FLAASH、6S、COST 大气校正后的影像提取浒苔,当阈值分别设置为 0.48、0.56、0.06 时,提取面积和标准值最为接近,因此试验采用此阈值对整幅影像内的浒苔进行提取,并对结果进行对比,如图 6 所示。

图 6 为对经过不同大气校正方法校正后的影像,

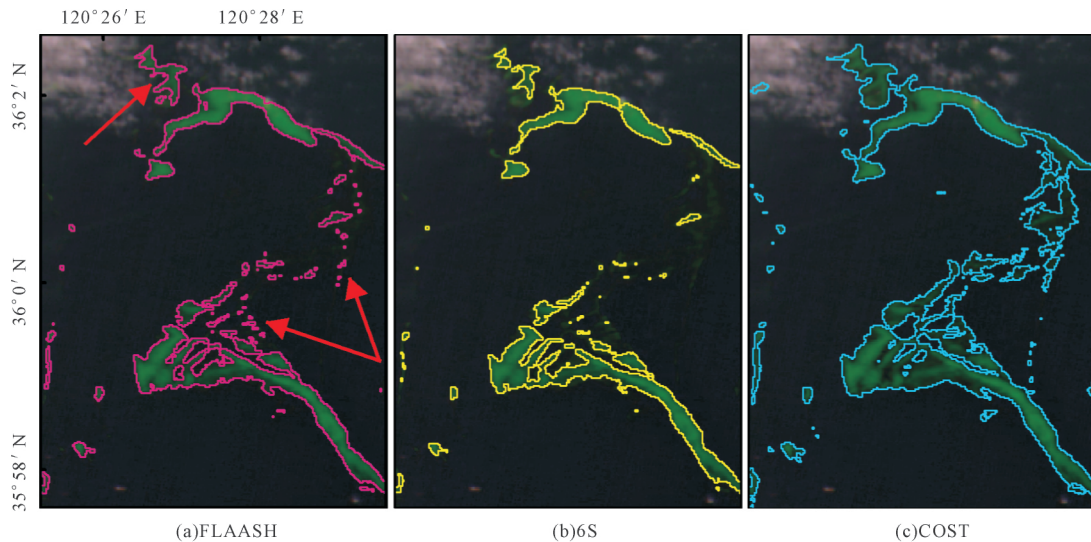


图6 不同大气校正方法浒苔提取结果对比
Fig.6 A comparison of extraction results under different atmospheric correction methods

由 NDVI 阈值法提取的浒苔边界与实际的浒苔漂浮情况的对比图,可以看出,采用 3 种不同大气校正方法校正后的影像,都能准确的提取出高密度漂浮的浒苔,三者提取的边界线基本重合,且与实际漂浮的浒苔的边界基本一致。但由图中剪头所指的位置可见,在低密度漂浮的浒苔及薄云下的浒苔处,浒苔在影像中的颜色较为暗淡,三者的提取情况产生了差异,经过对比可以明显看出,经过 COST 大气校正后的影像,可以较为完整的提取出“暗淡”浒苔的边界,对于提高浒苔的精细化提取有很好的作用,而经过其它 2 种方法大气校正之后的影像,提取时产生了不同程度的误差,很多“暗淡”浒苔斑块被忽略掉,致使提取面积相对偏小,其中 6S 大气校正后的影像浒苔的提取效果最差,精度最低。

3 结论

试验基于 HJ-1 CCD 影像数据进行了不同大气校正方法对浒苔信息提取效果的研究,通过 FLAASH、6S、COST 3 种模型对浒苔暴发期间的影像进行大气校正,采用归一化植被指数(NDVI)方法提取浒苔信息并分析提取效果,得出了以下结论。

(1)不同大气校正方法对地物光谱曲线的校正结果不同。FLAASH 和 6S 模型对影像 4 个波段的校正精度最高,校正结果符合浒苔和海水的光谱特征,经过 COST 模型校正之后的图像存在不同程度的噪声,蓝、绿波段出现了纠正偏差,建议反演地物时尽量避免这 2 个波段。

(2)通过分析不同方法大气校正之后的 NDVI、类间距、混合像元的处理能力来评价对浒苔提取的效果,可以看出在浒苔监测中大气校正必不可少的一步。3 种大气校正模型具有不同的针对性,总体来说,

在采用 NDVI 阈值法提取浒苔的基础上,COST 大气校正取得的效果最好,其准确性是值得肯定的,但需要注意的是,由于该大气校正方法是从图像本身特征入手,舍弃了复杂的大气环境参数的计算,其稳定性还需进一步考证。

(3)浒苔灾害监测的关键是浒苔面积的提取,通过上述研究可以看出,3 种大气校正方法对 NDVI 阈值变化的敏感性由低到高依次为 COST 模型、FLAASH 模型、6S 模型,因此 COST 模型可以较好的减少因设定阈值的波动带来的面积提取的误差,3 种大气校正方法都能够较好的提取高密度漂浮浒苔,且差别不大,但对于低密度浒苔及薄云下浒苔,采用 COST 大气校正方法,提取效果最好。

[参考文献]

- [1] 蔡晓晴. 基于静止轨道海洋水色卫星数据的绿潮遥感探测方法和逐时变化特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014. Cai Xiaqing. Remote Sensing Detection and Diurnal Variation Research of Green Macroalgae Bloom by Geostationary Ocean Color Imager[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [2] 孙立娥. 绿潮遥感探测影响因素分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2012. Sun Li'e. Analysis of Influence Factors of *Ulva prolifera* Remote Sensing[D]. Qingdao: Qingdao University, 2012.
- [3] Mahiny A S, Turner B J. A comparison of four common atmospheric correction methods [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(4): 361-368.
- [4] Song C, Woodcock C E, Seto K C, et al. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects [J]. Remote Sensing of Environment, 2000, 75(2): 230-244.
- [5] 陈新芳, 陈镜明, 安树青, 等. 不同大气校正方法对森林叶

- 面积指数遥感估算影响的比较 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(7): 769-773.
- Chen Xinfang, Chen Jingming, An Shuqing, et al. Comparison of different atmospheric correction models in their effects on Landsat TM estimation of forest leaf area index [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(7): 769-773.
- [6] 张婷媛, 林文鹏, 陈家治, 等. 基于 FLAASH 和 6S 模型的 Spot 5 大气校正比较研究 [J]. 光电子: 激光, 2009, 20(11): 1471-1473.
- Zhang Tingyuan, Lin Wenpeng, Chen Jiazhi, et al. Comparative study on atmospheric correction methods of FLAASH and 6S model based on Spot 5[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2009, 20(11): 1471-1473.
- [7] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正方法综述 [J]. 遥感信息, 2005(4): 66-70.
- Zheng Wei, Zeng Zhiyuan. A review on methods of atmospheric correction for remote sensing images[J]. Remote Sensing Information, 2005(4): 66-70.
- [8] 田庆久, 郑兰芬, 董庆禧. 基于遥感影像的大气辐射校正和反射率反演方法[J]. 应用气象学报, 1998, 9(4): 456-461.
- Tian Qingjiu, Zheng Lanfen, Tong Qingxi. Image-based atmospheric radiation correction and reflectance retrieval methods[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1998, 9(4): 456-461.
- [9] Ahern F J, Goodenough D G, Jain S C, et al. Use of Clear Lakes on Standard Reflectors for Atmospheric Measurements [C]//Eleventh International Symp on Rem Sens of the Environment, 1977: 731-755.
- [10] 郝建亭, 杨武年, 李玉霞, 等. 基于 FLAASH 的多光谱影像大气校正应用研究[J]. 遥感信息, 2008(1): 78-81.
- Hao Jianting, Yang Wunian, Li Yuxia, et al. Atmospheric correction of multi-spectral imagery ASTER based on FLAASH[J]. Remote Sensing Information, 2008(1): 78-81.
- [11] 吴传庆, 马万栋, 王雪蕾, 等. 基于环境卫星 CCD 数据的黄海浒苔遥感监测[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 161-165.
- Wu Chuangqing, Ma Wandong, Wang Xuelei, et al. Remote sensing monitoring HAB in Yellow Sea by HJ 1-CCD [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(3): 161-165.
- [12] Hu C, Li D, Chen C, et al. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115(C5):640-646.
- [13] 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.
- [14] Matthew M W, Adler-Golden S M, Berk A, et al. Atmospheric Correction of Spectral Imagery: Evaluation of the FLAASH Algorithm with AVIRIS Data[C]// Applied Imagery Pattern Recognition Workshop, 2002 Proceedings, 2002: 157-163.
- [15] 曾群, 赵越, 田礼乔, 等. HJ-1A/1B 卫星 CCD 影像水环境遥感大气校正方法评价研究: 以鄱阳湖为例 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 32(5): 1320-1326.
- Zeng Qun, Zhao Yue, Tian Liqiao, et al. Evaluation on the atmospheric correction methods for water color remote sensing by using HJ-1A/1B CCD image: taking Poyang Lake in China as a case study [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 32(5): 1320-1326.
- [16] 陈建珍, 何超, 岳彩荣. 基于 FLAASH 模块的高级陆地成像仪图像的大气校正 [J]. 浙江农林大学学报, 2011, 28(4): 590-596.
- Chen Jianzhen, He Chao, Yue Cairong. Atmospheric correction of an advance land imager (ALI) image based on the FLAASH module [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2011, 28(4): 590-596.
- [17] Vermote E F, Tanré D, Deuzé J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: an overview[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions, 1997, 35(3): 675-686.
- [18] Vol N. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1996, 62(9): 1025-1036.
- [19] Sobrino J A, Jiménez-Muñoz J C, Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 [J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 90(4): 434-440.
- [20] 王宁, 黄娟, 崔廷伟, 等. 基于 MODIS 数据的 5 种植被指数对不同生长阶段绿潮的探测能力对比及应用[J]. 激光生物学报, 2014(6): 590-595.
- Wang Ning, Huang Juan, Cui Tingwei, et al. Capability comparison of 5 vegetation indices for detecting the *Ulva* proliferation in different development phases and the application[J]. Acta Laser Biology Sinca, 2014(6): 590-595.
- [21] 蔡晓晴, 崔廷伟, 郑荣儿, 等. 静止海洋水色卫星 (GOCI) 绿潮探测算法对比研究[J]. 遥感信息, 2014(5): 44-50.
- Cai Xiaoping, Cui Tingwei, Zheng Rong'er, et al. Comparison of algorithms for green macroalgae bloom detection based on geostationary ocean color imager [J]. Remote Sensing Information, 2014(5): 44-50.
- [22] 胡子付, 曾志远, 张振龙, 等. 小波和 IHS 变换结合实现 ETM 图像波段融合[J]. 地球信息科学, 2005, 7(4): 29-32.
- [23] 程红霞, 林粤江, 胡列群. 植被指数监测绿洲农区风沙灾害的适宜性分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 302-305.
- Cheng Hongxia, Lin Yuejiang, Hu Liequn. Suitability analysis of vegetation indices for monitoring wind sand disaster in oasis agricultural district[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2): 302-305.