丁一,黄娟,崔廷伟,等. 基于 NDVI 与丰度关系的 MODIS 影像浒苔混合像元分解方法[J]. 海洋学报,2015,37(7): 123－131, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.07.012

Ding Yi, Huang Juan, Cui Tingwei, et al. The decomposition method of MODIS images *Enteromorpha* mixed pixels based on the relation of NDVI to abundance[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(7): 123－131, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.07.012

基于 NDVI 与丰度关系的 MODIS 影像浒苔混合像元分解方法

丁一[1,2],黄娟[1,2],崔廷伟[3],万振文[4],张怡[1,2],曹丛华[1,2],陈超[5],肖艳芳[3]

(1. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室,山东 青岛 266061;2. 国家海洋局 北海预报中心,山东 青岛 266061;3. 国家海洋局 第一海洋研究所,山东 青岛 266061;4. 丹麦气象研究所,丹麦;5. 浙江海洋大学 海洋科学与技术学院,浙江 舟山,316004)

摘要: MODIS 影像是浒苔业务化卫星遥感监测的重要数据源,但其空间分辨率(250 m)较低,混合像元效应导致传统的 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)阈值法浒苔提取误差较大。为解决此问题,本文以准同步的较高分辨率的 HJ-1 CCD 影像浒苔提取结果为基准,建立基于 MODIS NDVI 与浒苔像元丰度(浒苔覆盖面积占像元面积百分比)关系的浒苔信息提取模型,利用该模型可提取每个像元的丰度(即浒苔覆盖率),从而提高整景影像浒苔覆盖面积提取精度。该模型可为浒苔灾害等级的确定以及防灾减灾应急决策提供支持。

关键词: 浒苔;MODIS;HJ-1 CCD;NDVI;丰度

中图分类号: X55;X87 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2015)07-0123-09

1 引言

浒苔是一种繁殖能力和生命力强的大型绿藻,俗称苔条、青海苔等,呈棉花絮状,为绿藻门石莼目石莼科浒苔属的藻类植物[1],草绿色,既可分布在海水中,也可以在淡水中生长。2008 年中国黄海浒苔是迄今为止世界范围内最大规模的绿潮,持续时间 3 个多月,对沿岸水上运动、旅游、养殖和港口航运造成不同程度影响,直接经济损失超 13 亿元[2]。

掌握浒苔覆盖、分布状况是浒苔防灾减灾决策的先决条件。卫星遥感具有大范围、同步监测的优势,在浒苔监测中具有重要作用。2008 年后相关学者针对浒苔卫星遥感监测开展了大量研究,主要进行不同起源的浒苔信息提取方法[3－9],应用多源遥感手段建立浒苔多源立体监测系统[9－10],以及应用卫星遥感监测结果结合海洋动力环境信息开展浒苔源头和漂移分析[11－12]的研究。研究成果初步解决了浒苔灾害应急监测的问题,为浒苔业务化卫星遥感监测以及防灾减灾决策提供了技术支持。

2008 年后国家海洋局针对黄海浒苔开始业务化卫星遥感监测,所用卫星影像包括光学和 SAR。光学影像主要包括 MODIS 和 HJ-1 CCD 影像,MODIS 重访周期短,可免费获取,在业务化监测中应用最广泛。SAR 影像主要包括 Radarsat、Cosmo-Skymed 和 Terra-SAR,SAR 影像具有全天时全天候监测能力,但因其价格较高,业务化监测中作为光学影像的补

收稿日期: 2014-09-04;**修订日期:** 2014-12-08。

基金项目: 国家海洋局青年海洋科学基金项目(2012405);海洋公益性行业科研专项经费项目(201205010,2013418025－2);国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目(GY0214T03)。

作者简介: 丁一(1979—),男,山东省日照市人,工程师,主要从事海洋环境遥感监测和 GIS 应用研究。E-mail:dingyi@bhfj.gov.cn

充。归一化差值植被指数 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)是陆地植被生长状态及植被覆盖度的最佳指示因子,在植被遥感中应用最为广泛[14]。因此 NDVI 阈值法在光学影像浒苔提取中得到广泛应用。由于 MODIS 影像空间分辨率(250 m)较低,混合像元问题严重;传统 NDVI 阈值法是"硬分类"方法,忽视混合像元存在,导致浒苔提取误差较大。此外受海况、天气以及浒苔自身因素影响,阈值很难统一[5],不同监测人员选取的阈值往往不同,这进一步加大了结果的不确定性。部分学者针对中低分辨率影像监测结果误差较大的问题开展了初步分析,如崔廷伟等[12]对比分析了不同分辨率影像提取结果差异,钟山等[13]分析了 MODIS 影像不同 NDVI 值阈值浒苔提取误差。应用混合像元分解方法可提取每个浒苔像元丰度,从而解决"硬分类"方法导致误差的问题,然而应用混合像元分解法解决 MODIS 影像浒苔信息提取未见相关报道。

因此本文参考准同步 30 m 空间分辨率 HJ-1 CCD 影像,建立基于 MODIS NDVI 与浒苔像元丰度关系的浒苔混合像元分解模型,从而避开端元选取对混合像元分解造成的影响。选择晴空条件下准同步的 250 m 分辨率 MODIS 影像和 30 m 分辨率 HJ-1 CCD 影像为数据源,建立 MODIS(NDVI,丰度)样本集,然后应用样本建立基于 MODIS NDVI 的浒苔像元丰度估算模型。通过模型可计算每个像元浒苔丰度,提取结果能区分不同区域浒苔疏密程度,同时可提高浒苔覆盖面积总体估算精度,从而解决传统阈值法浒苔信息提取不能解决混合像元导致误差较大的问题。

2 数据和方法

2.1 数据

本文采用准同步的 MODIS 和 HJ-1 CCD 影像开展研究(图 1 和图 2),2013 年 6 月 29 日,浒苔处于爆发期,天气晴朗,MODIS 和 HJ-1 影像成像时间(北京时间)分别是 10:21 和 9:50。2014 年 5 月 26 日,浒苔处于发展中期,天气有轻微薄雾,MODIS 和 HJ－1 成像时间(北京时间)分别是 10:03 和 9:45。其中,MODIS 影像地面分辨率 250 m,扫描宽度为2 330 km,有红和近红 2 个波段[15]。HJ-1A 和 HJ-1B 卫星上均装载的两台 CCD 相机,联合完成对地刈幅宽度为 700 km、地面分辨率为 30 m、4 个谱段的推扫成像,其中 3、4 波段为红波段和近红波段[16]。

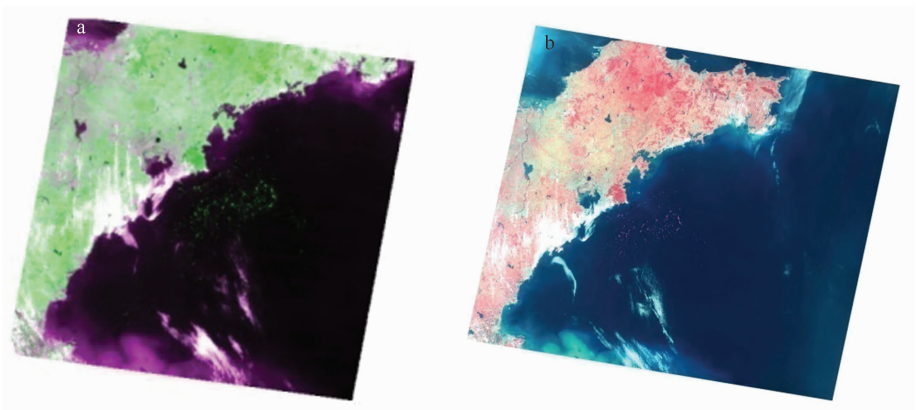

图 1 2013 年 6 月 29 日 MODIS(a)和 HJ-1 CCD(b)卫星影像

Fig. 1 Satellite images shot on June 29,2013 by MODIS (a) and HJ-1 CCD (b)

2.2 方法

为发现 MODIS 影像浒苔像素 NDVI 与浒苔丰度对应关系,以 HJ-1 CCD 浒苔提取结果为参考,计算 MODIS 影像浒苔像元 NDVI 对应的丰度,应用(NDVI,丰度)样本集建立基于以 MODIS 影像浒苔像元 NDVI 值为变量的丰度反演模型,利用该模型反演 MODIS 影像浒苔像元的丰度。其中,NDVI 由 MODIS 影像计算得到,丰度由与 NDVI 像元时空匹配的 HJ-1 CCD 浒苔提取结果计算得到。模型建立流程见图 3。

(1)影像处理,首先应用 ENVI4.7 辐射定标模块、几何校正模块和 FLASSH 大气校正模块对 MO-

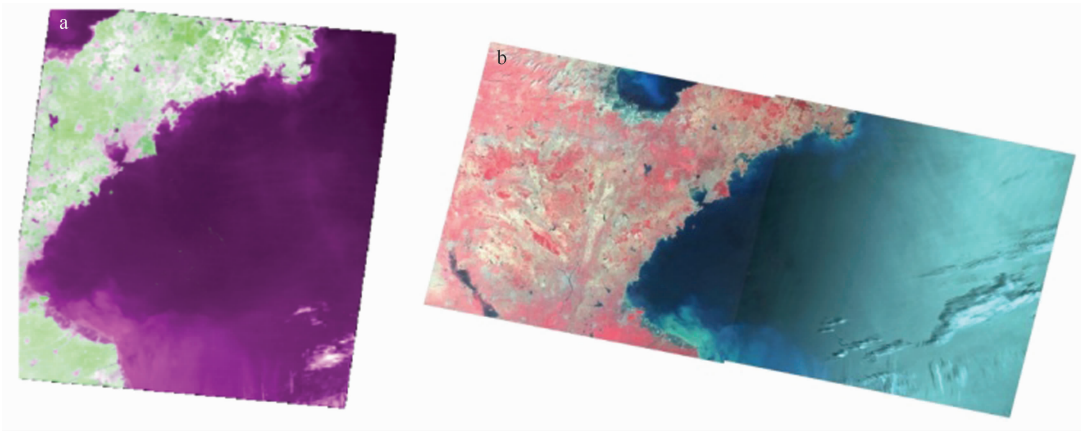

图 2　2014 年 5 月 26 日 MODIS(a)和 HJ-1 CCD(b)卫星影像

Fig. 2　Satellite images shot on May 26,2014 by MODIS (a) and HJ-1 CCD (b)

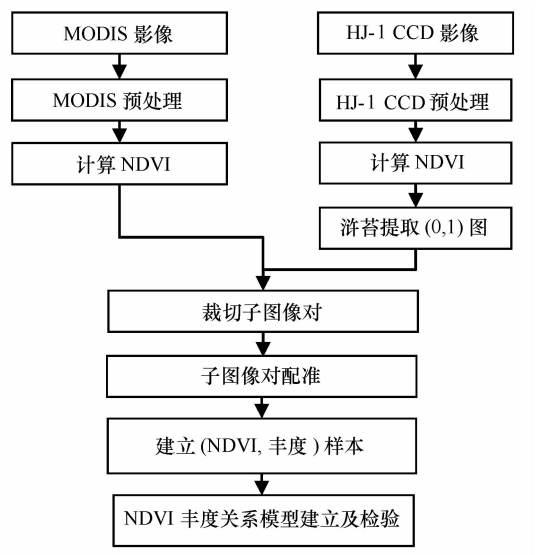

图 3　建模流程图

Fig. 3　Procedures of building the model

DIS 影像和 HJ-1 CCD 影像进行辐射标定、几何校正、大气校正等预处理操作,然后计算两景影像的 NDVI 值,并应用 NDVI 阈值法结合人工解译提取 HJ-1 CCD 影像中浒苔信息,得到(0,1)浒苔结果图,1 表示浒苔,0 表示海水。

(2)子图像裁切和配准,从 MODIS NDVI 图像和 HJ-1 CCD 浒苔提取结果图中裁切子图像对,以 MODIS NDVI 为基准对 HJ-1 CCD 提取结果进行配准,配准误差小于 1 个像元(通过裁切子图像进行子影像对之间配准可有效降低配准对样本误差造成的影响)。其中 HJ-1 CCD(0,1)结果子图像比 MODIS 稍大一些,可保证配准后 NDVI 像元都能在 HJ-1 CCD 结果图中找到对应的区域。

(3)样本集建立,样本由 MODIS NDVI 及其对应像素浒苔丰度组成,其中 NDVI 从 MODIS NDVI 子图像中读取,对应丰度由 HJ-1 浒苔提取结果图计算,计算方法是通过 MODIS NDVI 值对应像素位置,获取 HJ-1 CCD 浒苔提取结果图中同位置窗口,窗口内包含 9×9 个像素(270 m×270 m),通过统计窗口内浒苔像素个数 n(见图 4),计算出该 NDVI 对应的浒苔丰度 $a=n/81$,应用该方法读取子图像对内所有 NDVI 像素对应的丰度值,从而建立(NDVI,丰度)样本集。需要指出的是,MODIS NDVI 对应像素大小为 250 m×250 m,丰度计算窗口为 9×9,对应大小为 270 m×270 m,窗口大小不同对样本精度可能造成一定影响(见讨论部分),但本文未对影像重采样使窗口大小一致,是为了防止重采样引入新的误差。

本文从 2013 年 6 月 29 日准同步 MODIS 影像和 HJ-1 CCD 影像中裁切 10 对子图像见图 5,在整景影像中位置见图 6。应用 10 对子图像按照上述样本采集方法建立(NDVI,丰度)样本集。

(4)应用(NDVI,丰度)样本集,建立丰度反演模型,进而计算整景影像浒苔覆盖面积。并应用 2 景影像,参考 HJ-1 CCD 提取结果检验模型精度。

3　结果

3.1　基于 NDVI 的浒苔丰度反演模型

应用 2013 年 6 月 29 日影像对中裁切的 10 对子图像(见图 5)建立(NDVI,Abundance)样本集(散点见图 7),计算样本中 NDVI 与对应丰度间的相关系数为 0.79。样本集中,NDVI 小于−0.3 的所有样本其对应的丰度值都为 0,因此去掉了 NDVI 小于等于−0.3

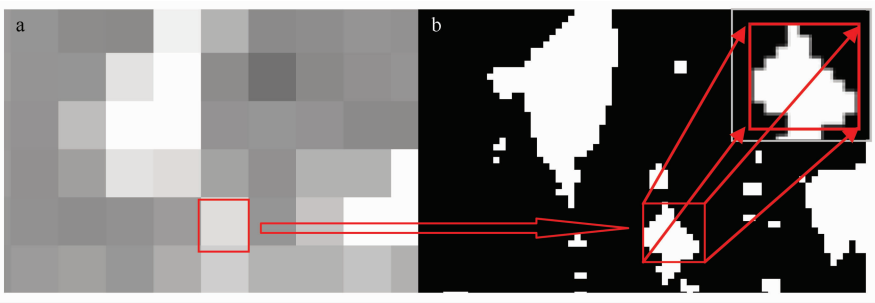

图 4 MODIS NDVI(a)与 HJ-1 CCD 浒苔覆盖(b)对应关系

Fig. 4 Matchup between MODIS NDVI(a) and HJ-1 CCD (b) *Enteromorpha* coverage

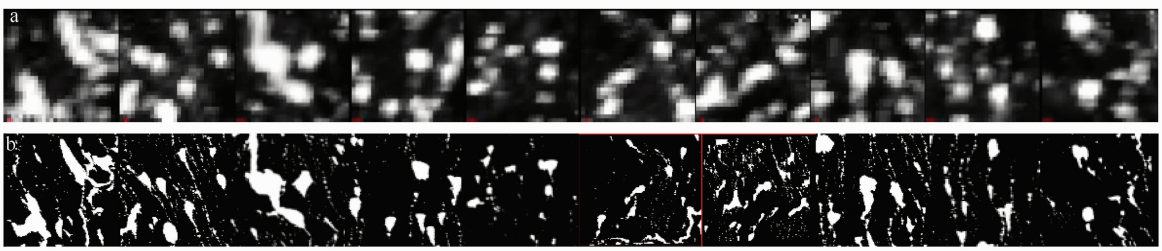

图 5 10 对子图像(a. MODIS NDVI;b. HJ-1 CCD)

Fig. 5 10 pairs of sub-images (a. MODIS NDVI;b. HJ-1 CCD)

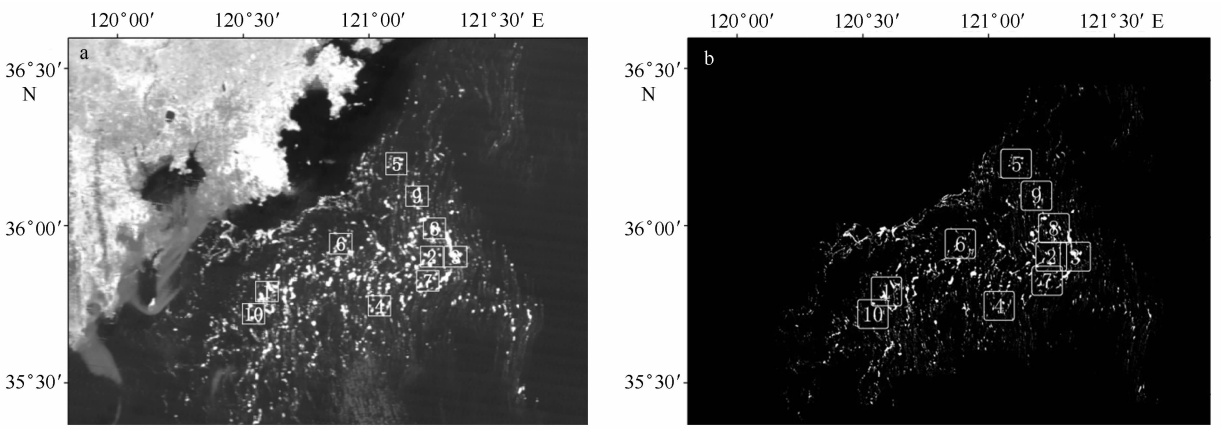

图 6 10 对子图像的位置(a. MODIS NDVI, b. HJ-1 CCD)

Fig. 6 Locations of 10 pairs of sub-images(a. MODIS NDVI, b. HJ-1 CCD)

的样本。应用剩余样本建立浒苔像元丰度与 NDVI 关系模型(式 1),$R^2=0.635$。

$$y=\begin{cases}0.975x+0.561x+0.099, & -0.243\ 8\leqslant x<0.715\ 7\\ 1, & x\geqslant 0.715\ 7\end{cases} \tag{1}$$

式中,y 为浒苔像元丰度,x 为 NDVI 值。

3.2 模型验证

应用 HJ-1 CCD 提取结果验证模型结果,为保证二者之间配准精度,本文分别从 2014 年和 2013 年 MODIS NDVI 图像和 HJ-1 CCD 结果图中裁切子图像对(见图 8)进行空间配准,应用本文发展模型计算 MODIS 子影像中每个浒苔像素的丰度,然后应用配准后的 HJ-1 CCD 浒苔提取结果计算 MODIS NDVI 浒苔像素的丰度来验证模型计算的丰度。MODIS 图像 NDVI 与上述两种方式计算丰度散点图见图 9,从图中可以看出 HJ-1 CCD 计算结果相对均匀分布于模型计算结果两侧。2013 年和 2014 年 HJ-1 CCD 计算丰度和模型计算丰度间相关系数分别为:0.69 和

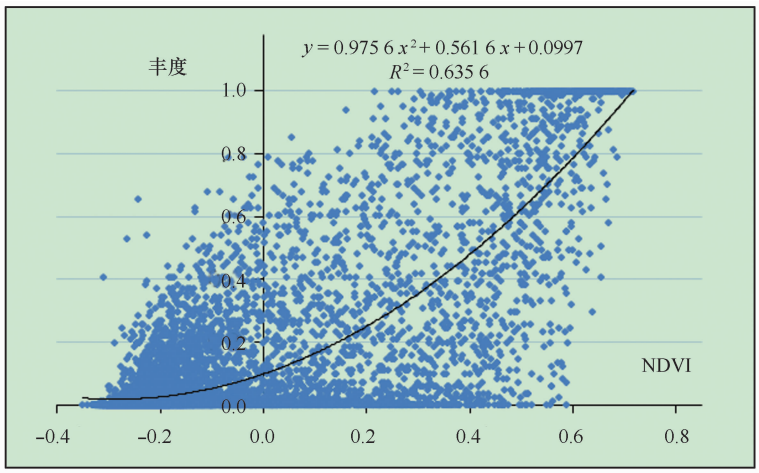

图 7　样本散点和浒苔像元 NDVI 与丰度关系模型曲线

Fig. 7　Scattered samples and regressive curve of *Enteromorpha* pixels NDVI and abundance

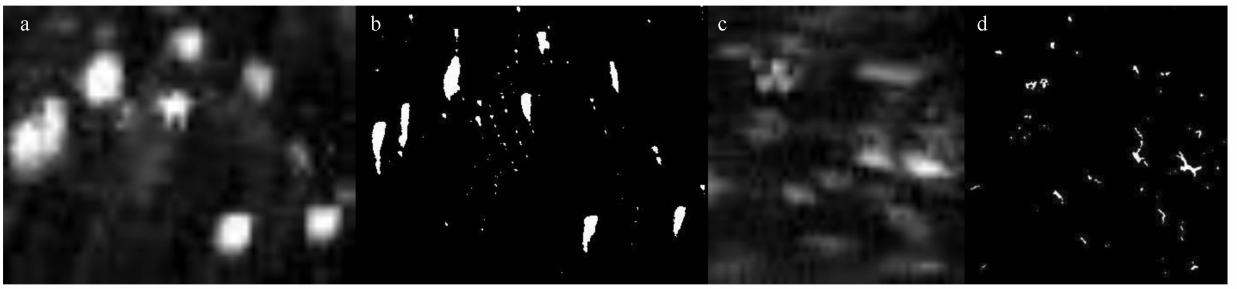

图 8　模型验证所用 2 对子图像(a、b. 2014 年 MODIS NDVI 和 HJ-1 CCD 浒苔提取结果,c、d. 2013 年相应的影像对)

Fig. 8　Two image-couplets for model validation MODIS NDVI and HJ-1 CCD subimages in 2014(a、b) and 2013 (c、d)

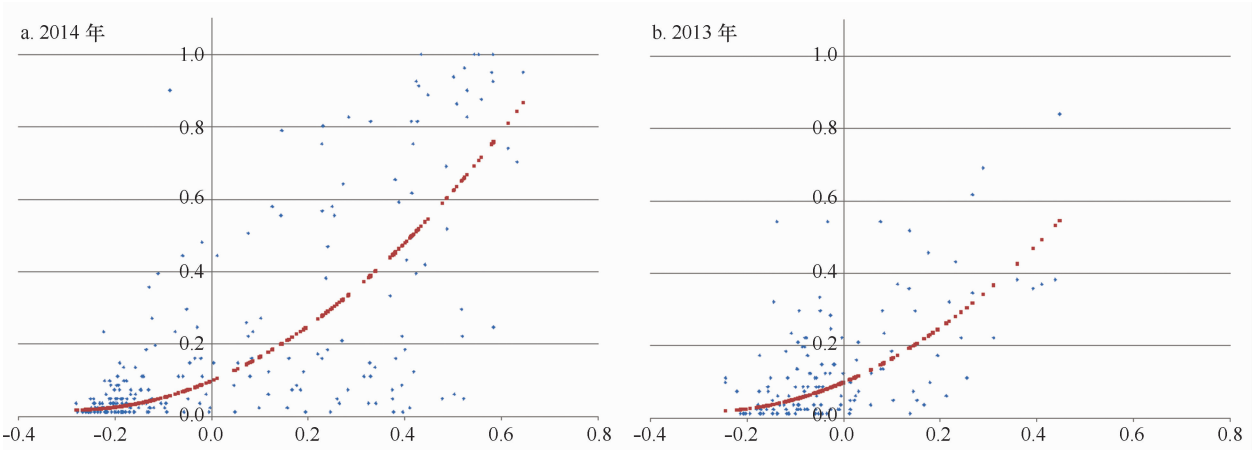

图 9　模型反演丰度(棕点)与 HJ-1CCD 计算丰度(蓝点)的对比

Fig. 9　Contrast of derived *Entromorpha* abundance (brown spots) with the abundance calculated from HJ-1 CCD (blue spots) in 2014 (a) and 2013 (b)

0.60,差值均值为−0.02 和−0.03;HJ-1 CCD 计算两景 MODIS 子图像浒苔覆盖面积分别为 2.99 km^2 和 1.27 km^2,模型计算面积分别为 2.79 km^2 和 1.01 km^2,总面积差分别为:−0.20 km^2 和−0.26 km^2。

3.3　模型应用

应用本文发展模型对 2014 年 5 月 26 日和 2013

年 6 月 29 日整景 MODIS 影像进行浒苔信息提取。信息提取分为两步:(1)应用阈值法结合人工解译,提取 MODIS 影像中所有浒苔像元;(2)应用模型计算浒苔像元的浒苔丰度,然后根据浒苔像元丰度计算整景影像中浒苔覆盖面积。2014 年和 2013 年 MODIS 影像浒苔像元丰度反演结果见图 10。为评估模型提取的浒苔覆盖面积,与应用 NDVI 阈值法结合人工解译提取准同步 HJ-1 CCD 影像浒苔覆盖面积进行对比分析,2014 年和 2013 年 HJ-1 CCD 影像浒苔提取结果见图 11,浒苔覆盖面积分别为 397 km^2 和 259 km^2。应用本文模型计算丰度然后求取整景影像中浒苔覆盖面积分别为:415 km^2 和 189 km^2,其与环境提取面积相对偏差分别为 4.5%和−27%。模型对两期 MODIS 影像浒苔覆盖面积估算精度相对偏差不同的原因分析见 4.2 节。

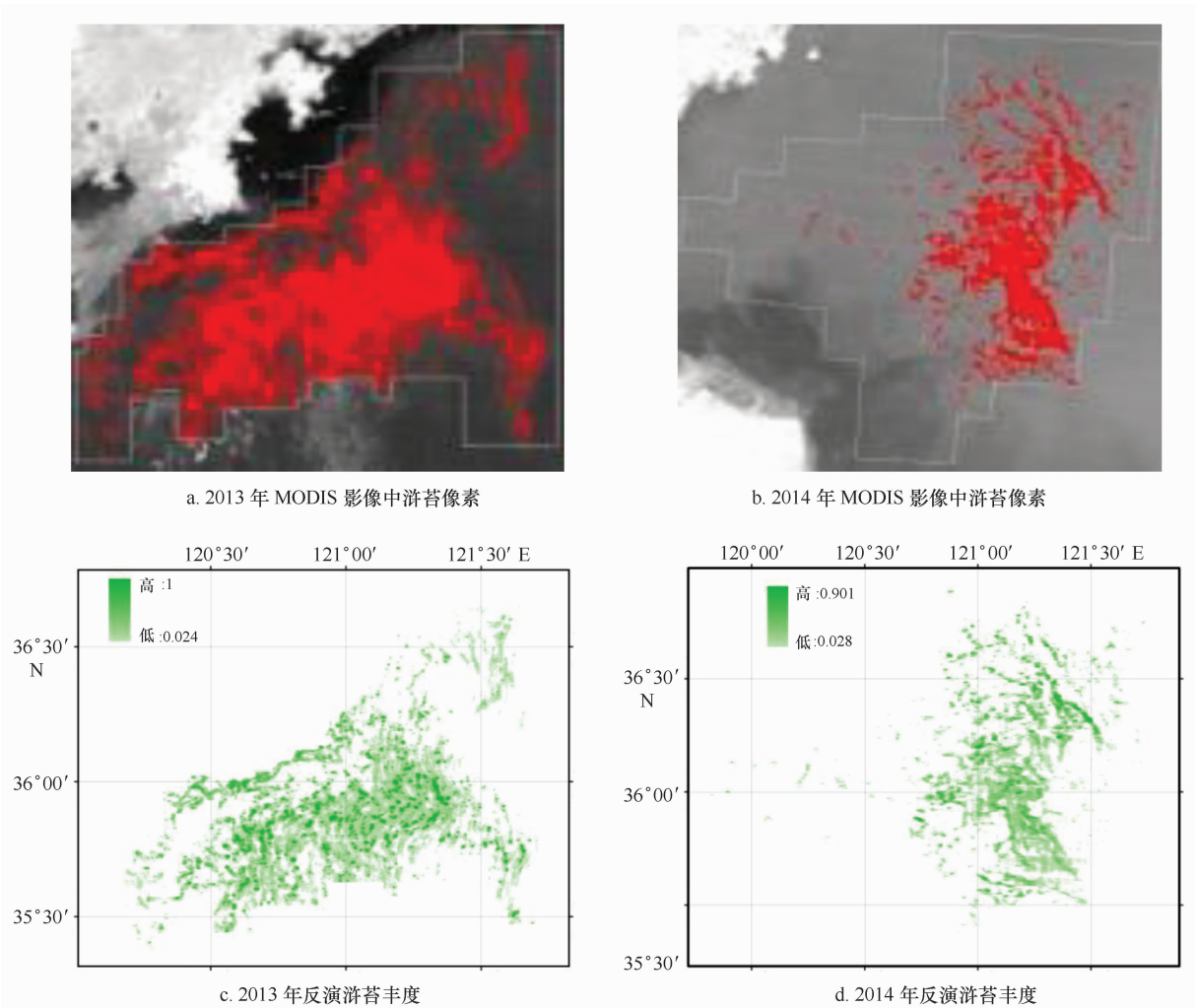

图 10 MODIS 影像浒苔像元与反演的丰度

Fig. 10 The MODIS *Enteromorpha* pixels and derived abundance

4 讨论

4.1 模型误差分析

从模型样本集散点图(见图 7)、模型单个像素验证(见图 9)以及覆盖面积验证和应用情况来看,样本以及单个像素验证情况精度都比较低,而对整景影像覆盖面积提取结果与 HJ-1 CCD 浒苔提取结果对比,精度比较高。原因分析如下:

(1)子图像间配准对样本和模型的影响

本文以 MODIS NDVI 为基准,对 HJ 提取结果进行配准,子图像对之间分辨率差别较大,且配准点和参考点都是浒苔像元,选择难度也较大。因此子影像

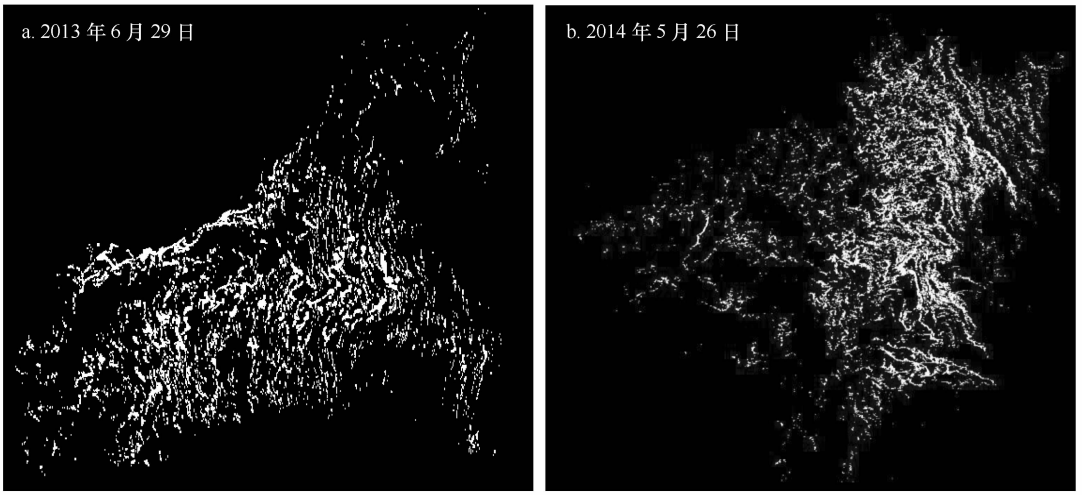

图 11　HJ-1 CCD 浒苔提取结果图

Fig. 11　*Enteromorpha* detected with HJ-1 CCD images

对间配准必然存在误差,会对(NDVI,丰度)样本建立以及验证过程中应用 HJ-1 CCD 提取结果计算丰度产生影响,特别是在浒苔覆盖区域的边缘影响较大。浒苔边缘配准偏差对样本中丰度计算产生的误差模拟分析见图 12,图中黑框代表 MODIS 像元,0,1 表示 HJ-1 CCD 提取浒苔结果,现有位置关系表示 MODIS 影像和 HJ-1 CCD 提取结果正确配准。若 MODIS 影像与 HJ-1 CCD 配准右偏 1 个像素和右下偏 1 个像素,那么产生误差见表 1。右偏和右下方向偏差 1 个像素时,丰度值计算误差较大,分别为 0.12 和 0.21,如果配准误差 2 个像素,那么对丰度计算产生更大误差。同样道理配准对于低覆盖区丰度计算也会产生较大影响。

0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	……	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	……	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	……	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	……	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	浒苔	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	区	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	……	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	……	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	……	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	……	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	……	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 12　配准对样本丰度计算的影响示意图

Fig. 12　The influence of calibration to the sample abundance calculation

表 1　配准误差分析

Tab. 1　Errors analysis of calibration

	真实丰度	右偏 1 像素丰度/误差	右下偏 1 像素丰度/误差
左边像素	0.22	0.33/+0.11	0.43/+0.21
右边像素	0.72	0.60/−0.12	0.51/−0.21

结合图 12 和表 1 可以得出，在浒苔斑块一侧丰度样本因配准误差被夸大，那么另一侧会相应的偏低，且偏差基本相等，这导致样本向着模型曲线的两侧(见图 7)对称偏离，相关性下降。但同时指出，丰度值偏大的像素数和偏小的是等量的，且偏移量基本相等，因此对模型的精度影响不大，这与样本散点图、评价散点图较分散和但整景影像浒苔覆盖面积提取精度较高是吻合的。

(2)样本窗口大小不统一

MODIS 影像一个像元大小为 250 m×250 m，文中计算丰度时，对应的 HJ-1 CCD 窗口为 9×9 个即为 270 m×270 m，因此丰度样本整体会偏大一些，这对模型建立会有一定影响。因此若应用更高分辨率影像作为参考，可以避免窗口大小不匹配、配准误差较大以及参考 HJ-1 CCD 影像也存在混合像元等问题对丰度样本的影响，从而提高模型浒苔覆盖面积估算精度。

(3)其他影响因素

MODIS 影像 NDVI 值除受像元浒苔丰度影响外，还受漂浮和悬浮状态、天气条件等因素影响[5]。本文选择浒苔大量繁殖的暴发期、晴空条件下影像开展研究，可部分消除漂悬浮状态和天气对 NDVI 影响。此外，NDVI 值还可能受海况的影响，进而影响模型精度。

4.2 模型适用性分析

应用本文模型，计算每个浒苔像元丰度，通过图 10 可以看出，丰度图可以反映不同海域浒苔分布以及疏密不同。应用丰度图计算总的覆盖面积比 NDVI 阈值法精度有大幅度提高。其中 2013 年与 HJ-1 CCD 提取结果相对偏差为 4.5%，2014 年为－27%。2014 年相对偏差较大原因是，该期影像有薄雾，使影像中浒苔像素 NDVI 值偏低，导致 NDVI 阈值法不能检测到低丰度区浒苔像元，对照图 8 中 HJ-1 CCD 提取浒苔结果可以看出，受云雾和分辨率影响 MODIS 影像不能检测到影像中左边部分浒苔，同时也导致较高丰度区浒苔像素模型计算丰度偏低，综合二者使整景影像浒苔检测面积偏小。

NDVI 与丰度的关系模型，是在天气晴朗情况下建立的，对薄云雾情况下，影像 NDVI 值受影响，不能有效检测到稀疏浒苔，则模型提取结果比浒苔真实面积偏小。模型建立所用卫星影像是浒苔爆发期，对于量小、分布稀疏的浒苔发展初期，MODIS 影像受分辨率影响不能检测到所有浒苔像元，模型检测结果会偏小，因此建议早期应用高分辨率影像开展浒苔监测。

5 总结

本文以准同步、较高分辨率 HJ-1 CCD 影像为参考，建立了基于 NDVI 和浒苔像元丰度关系的 MODIS 影像浒苔像元丰度反演模型。模型可反演 MODIS 影像中每个浒苔像元丰度，应用浒苔像元丰度计算影像中浒苔覆盖面积，可较大大幅度提高 MODIS 整景影像浒苔覆盖面积估算精度。

浒苔覆盖面积提取是浒苔业务监测的重要内容，是浒苔灾害防灾减灾中灾害定级以及应急决策的依据，应用本文发展模型提取的浒苔覆盖面积，可提高灾害定级和应急决策的准确性。

考虑到本文发展模型受到空间配准影响，以及参考影像 HJ-1 CCD 同时也会存在混合像元的问题，因此为了进一步提高模型精度，可选择更高空间分辨率的影像作为参考，以有效避免窗口大小不匹配和参考影像混合像元存在导致的样本误差，同时考虑天气、浒苔悬浮状态、生长期等影响浒苔像元丰度的因子，进一步开展 MODIS 影像浒苔像元丰度反演研究。

致谢：感谢数据提供单位，其中 MODIS 数据从国家气象局 Vsat 广播系统获取，HJ-1 CCD 数据由卫星资源应用中心提供。

参考文献：

[1] 吴洪喜，徐爱光，吴美宁. 浒苔实验生态的初步研究[J]. 浙江海洋学院学报（自然科学版），2000，19(3)：230－234.
Wu Hongxi，Xu Aiguang，Wu Meining. Preliminary study on experimental ecology of *Enteromorpha* prolifera[J]. Journal of Zhejiang Ocean University(Natural Science)，2000，19(3)：230－234.

[2] 刑婷. 浒苔之困[N]. 中国青年报，2011. 08. 01(05).
Xing Ting. Enteromorpha disaster [N]. China Youth Daily，2011. 08. 01(05).

[3] Wei Shi，Wang Menghua. Green macroalgae blooms in the Yellow Sea during the spring and summer of 2008[J]. J Geophys Res，2009，114：C12010.

[4] Hu Chuanmin，Li Daqiu，Chen Changsheng，et al. On the recurrent Ulvaprolifera blooms in the Yellow Sea and East China Sea[J]. J Geophys Res，2009，115：C05017.

[5] 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.
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.

[6] 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(1):76－82.
Li Sanmei,Li Yajun,Dong Haiying,et al. Satellite remote sensing application to *Enteromorpha prolifera* montoring in the Yellow Sea. [J]. Journal of Applied Meteorological Science,2010(1):76－82.

[7] 刘振宇,江涛. 基于 MODIS 数据的浒苔信息提取方法研究[J]. 测绘科学,2008(S1):113－114.
Liu Zhenyu,Jiang Tao. The research on the way of *Extracting enteromorpha* prolifera on the basis of MODIS[J]. Science of Surveying and Mapping,2008(S1):113－114.

[8] 曾韬,刘建强. "北京一号"小卫星在青岛近海浒苔灾害监测中的应用[J]. 遥感信息,2009(3):34－37.
Zeng Tao,Liu Jianqiang. The application of Beijing-1 micro satellite data to algae disaster monitoring in the sea of Qingdao[J]. Remote Sensing Information,2009(3):34－37.

[9] 蒋兴伟,刘建强,邹斌,等. 浒苔灾害卫星遥感应急监视监测系统及其应用[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 *Entermorpha prolifera* disaster and its application[J]. Haiyang Xuebao,2009,31(1):52－64.

[10] 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.
Gu Xingfa,Chen Xingfeng,Yin Qiu,et al. Stereoscopic remote sensing used in monitoring *Enteromorpha prolifra* disaster in Chinese Yellow Sea [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2011,31(6):1627－1632.

[11] 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.
Xing Qianguo,Zheng Xiangyang,Shi Ping,et al. Monitoring green tide in the Yellow Sea and the East China Sea using multitemporal and multisource remote sensing images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis,2011,31(6):1644－1647.

[12] Cui Tingwei,Zhang Jie,Sun Li'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.

[13] 钟山,丁一,李振,等. MODIS 浒苔遥感监测误差分析研究[J]. 遥感信息,2013,28(1):38－42.
Zhong Shan,Ding Yi,Li Zhen,et al. Error analysis on *Enteromorpha prolifera* monitoring using modis data[J]. Remote Sensing Information,2013,28(1):38－42.

[14] 赵英时,陈冬梅,李小明. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2003.
Zhao Yingshi,Chen Dongmei,Li Xiaoming. Analysis principle and method of remote sensing applications[M]. Beijing:Science Press,2003.

[15] http://modis.gsfc.nasa.gov/about/design.php

[16] http://www.cresda.com/n16/n1130/n1582/8384.html

The decomposition method of MODIS images *Enteromorpha* mixed pixels based on the relation of NDVI to abundance

Ding Yi[1,2], Huang Juan[1,2], Cui Tingwei[3], Wan Zhenwen[4], Zhang Yi[1,2], Cao Conghua[1,2], Chen Chao[5], Xiao Yanfang[3]

(1. *Shandong Provincial Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao* 266061, *China*; 2. *North China Sea Marine Forecasting Center, State Oceanic Administration, Qingdao* 266061, *China*; 3. *First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao* 266061, *China*; 4. *Danish Meteorological Institute, Denmark*; 5. *Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan* 316004, *China*)

Abstract: MODIS images are valuable data source generated from operational satellite remote sensing for monitoring *Enteromorpha* in the Yellow Sea. However, there are large errors inenteromorpha coverage derived on base of NDVI Threshold Method, because of mixed pixels in the coarse resolution(250 m) MODIS images. To solve the problem, this paper, using the near real-time HJ-1 CCD images as reference, the "NDVI-abundance" decomposition of mixed pixel model was established. The developed model can significantly improve the extracted *Enteromorpha* information. As the method presented here can extract more accurate information, it is speculated to play a significant role in copying with *Enteromorpha* disasters.

Key words: *Enteromorpha*; MODIS; HJ-1 CCD; NDVI; abundance