

## 基于多源、多时相遥感影像的黄、东海绿潮影响区检测

邢前国<sup>1</sup>, 郑向阳<sup>1</sup>, 施平<sup>1</sup>, 郝佳佳<sup>1</sup>, 禹定峰<sup>1</sup>, 梁守真<sup>1</sup>, 刘东艳<sup>1</sup>, 张渊智<sup>2</sup>

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003
2. 香港中文大学, 太空与地球信息科学研究所, 新界 沙田, 中国香港

**摘要** 利用不同空间分辨率、多时相卫星遥感数据, 对 2007—2010 年间黄海、东海发生的绿潮(大型绿藻——浒苔)进行了监测与评估。江苏北部浅滩沿岸水体浑浊, 浒苔在该海域中光谱混合现象严重, 高空间分辨率的遥感影像有利于其检测; 在水体极浑浊的射阳河口检测到的浒苔离岸最近距离为 1 km 左右。反演结果表明, 浒苔在 5 月初会沿苏北沿岸流向南漂移、影响东海海域; 随着东亚夏季季风的加强, 浒苔主要漂向南海并影响山东半岛邻近海域; 在有利的风和海流作用下, 亦可横跨黄海、影响朝鲜半岛南部邻近海域。

**关键词** 绿潮; 浒苔; 遥感; 黄海; 东海

**中图分类号:** O433.1; X87 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)06-1644-04

### 引言

2008 年夏季, 我国青岛近海经历了一场由大型绿藻——浒苔(*Ulva prolifera*)大规模暴发所致的绿潮事件。大规模的浒苔暴发, 不仅给海上交通、观光旅游等活动产生影响, 而且, 由于与水体富营养化密切相关, 它亦可带来一系列生态问题。通过改变正常的水下光照及生物化学条件, 浒苔暴发可引发水下生物活动的异常, 例如, 珊瑚白化<sup>[1,2]</sup>、海草生境的退化<sup>[3]</sup>。国外有类似的大型藻类在沿岸聚集的事件, 如芬兰湾<sup>[4]</sup>、法国的大西洋海岸<sup>[5]</sup>以及其他地域<sup>[6,7]</sup>, 此类事件中其藻类均来自本地; 墨西哥湾亦曾监测到大量的马尾藻条带<sup>[8]</sup>, 尽管尚未发现其在近岸聚集的现象。近年, 除青岛海域绿潮连年暴发外, 山东半岛北部的烟台有关海域绿潮也较为严重; 2010 年 6 月初, 我国南方三亚海域也出现过绿藻。

一些学者运用遥感手段揭示了 2008 年青岛浒苔来源于南黄海中部这一现象<sup>[9]</sup>; 结合遥感、野外调查等手段, 有学者进一步提出了浒苔源于苏北沿岸的观点<sup>[10,11]</sup>; 亦有学者运用多种传感器数据对 2008 年浒苔的分布进行监测<sup>[12]</sup>。遥感在绿潮监测中起到重要作用, 但由于受研究时空尺度、遥感资料的时空分辨率等因素限制, 我们在绿潮形成过程、影响区域等问题上认识不足。对地观测卫星双星-EOS(earth observing system) Terra/Aqua 上的 MODIS(moderate resolu-

tion imaging spectroradiometer)传感器的空间分辨率可达 250 m, 对同一地区可实现一天观测一次; 陆地卫星-Landsat-TM(theme mapper)空间分辨率则达 30 m, 可对 MODIS 遥感影像难以有效监测的细小地物进行识别。本研究拟运用 Landsat-TM 及 MODIS 数据对 2007 年以来的浒苔暴发进行监测, 以期对其来源、动态分布特征有全面、客观的认识。

### 1 数据与方法

本研究主要采用 2007 年以来的 Landsat-TM, EOS-MODIS(Terra/Aqua)遥感数据。根据浒苔的生活特性, 重点观测季节为每年的 4 月—8 月, 观测区为黄海、东海及其邻近水体。如图 1 所示, 浒苔在可见光波段的反射光谱与陆地植被类似, 漂浮的浒苔可用归一化植被指数(NDVI, normalized difference vegetation index)进行识别。NDVI 的计算公式为

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (1)$$

其中  $R_{NIR}$  和  $R_{RED}$  分别为近红外、红光波段的反射率, 针对 Landsat TM 与 EOS-MODIS 传感器, 分别采用第 3 和 4 波段与第 1 和 2 波段。

在绿潮形成的不同时期, 浒苔斑块大小、形状差异较大, 特别是在形成初期, 斑块相对较小, 采用 MODIS 影像时, 与水体会严重的光谱混合的现象。本研究区水体浑浊

收稿日期: 2010-07-22, 修订日期: 2010-10-10

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q07-01)和山东省科技创新项目(2007GG2QT06019)资助

作者简介: 邢前国, 1975 年生, 中国科学院烟台海岸带研究所副研究员 e-mail: xingqg@163.com

程度差异很大,如图 2 所示,其不同背景水体的光谱存在明显差异。因此,为尽可能地不漏掉浒苔信息,本研究采用不同空间分辨率的影像数据、针对不同水体采用不同的 NDVI 阈值来提取浒苔斑块信息。采用动态 NDVI 阈值的方法,亦可把受太阳耀斑、薄云等影响的区域的浒苔识别出来。

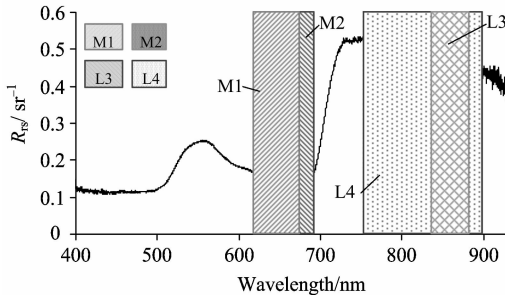


Fig. 1 Red and near-infrared band configurations of Landsat TM and EOS MODIS; L3, L4 and M1, M2. The curve is remote sensing reflectance of *Enteromorpha prolifera* measured by portable spectrometer

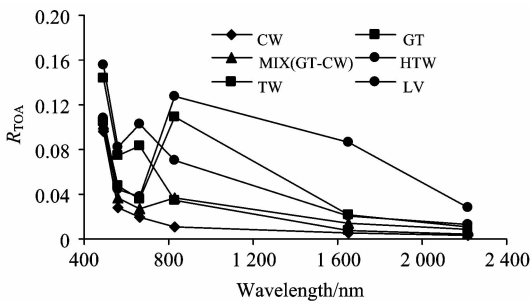


Fig. 2 TOA (top of atmosphere) reflectance of different targets recorded by Landsat TM

CW: Clear water; GT: Green tide patches; MIX(GT-CW): Mixture of clear water and green tide patches; HTW: Highly turbid water; TW: Turbid water; LV: Land vegetation

## 2 结果与讨论

### 2.1 浒苔分布与影响的动态特征

如图 3 所示,2007 年以来的浒苔暴发影响区分布在黄海与东海广大的海域,北到山东半岛荣成附近海域(北纬 36.5°),南到浙江省外侧东海水域(北纬 29°)。在有利的海面风应力作用下,如 2009 年 6 月 14 日,浒苔亦可向东漂移、横跨黄海,影响到朝鲜半岛附近的海域,因此,可能会带来跨国境的生态风险。针对 2008 年浒苔暴发的相关研究<sup>[10,11]</sup>,主要在南黄海小部分海域(如图 3 中黑线圈所示范围)。2008 年,仅在青岛附近海域,就收集了 100 万吨左右的浒苔,但,如遥感监测所示,大量的浒苔分布在东海、黄海的外海,没有聚集在岸边,也没有被收集。因此,尽管尚无较准确的数据,但是浒苔的产生量应远远高于在青岛海域的收集量。覆盖的面积可作为浒苔生产量的近似测度,但是大量浒苔并非浮在水面上,而是在水下<sup>[13]</sup>,水面以下的浒苔的遥感提取技

术还有待开发。本研究采用的是光学遥感数据,卫星过境时,云的存在也会减少观测到浒苔的机会。因此,浒苔的实际影响区不会小于如图 3 所示的海域,如此大规模绿潮的生态效应引起重视。

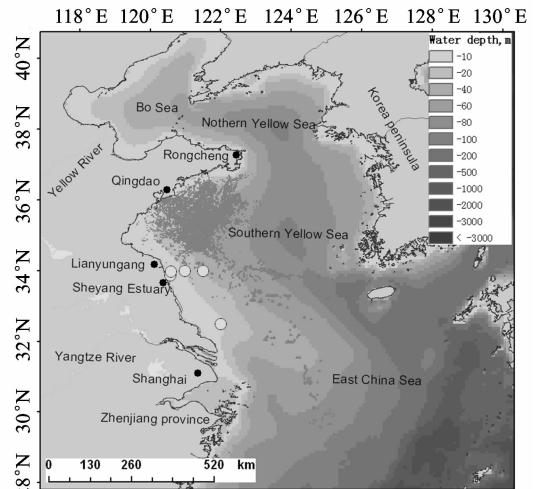


Fig. 3 Area impacted by green tide in the Yellow Sea and the East China Sea. The oval-shaped circle is the area mostly focused in 2008

黄海西部沿岸流变化受局地风场变换影响。遥感反演的结果显示,在 2008 年 5 月至 8 月期间,海表风场为西南风和东南风,这与浒苔向西北方向迁移的路径相吻合;数值模拟同时期的黄海海表海流结果显示,海流流向也与该路径一致<sup>[10]</sup>。如图 4 所示,在 5 月初期,有大量浒苔在长江口外侧及东海海域分布,该现象在以前的研究中没有受到充分关注,从而造成我们在浒苔来源、迁移特征等认识上的不足。以往的研究大多集中在南黄海海域,只关注到浒苔在 6、7 月

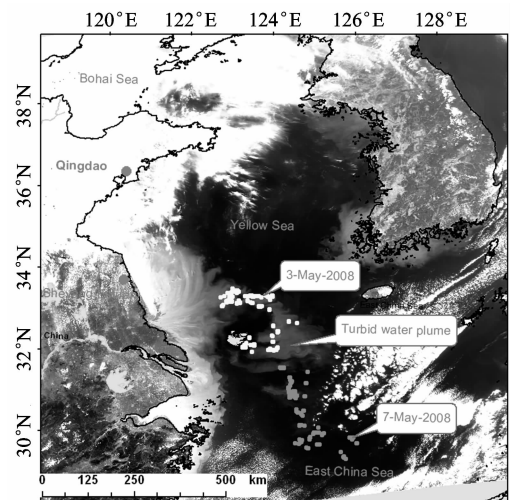


Fig. 4 Macro-algae patches and the turbid water plume in the early May of 2008. Bands 1, 4, and 3 of MODIS acquired on 3-May-2008 are used to form the RGB composite. Macro-algae patches detected on 7-May-2008 are distributed in the path of Subei coastal current indexed by turbid plume in this image

份主要在风的作用下向北迁移并影响青岛、山东半岛沿岸及海域<sup>[10]</sup>。5 月初期浒苔的分布与一支浑浊水舌的位置密切相关, 而该浑浊水舌正是携带苏北浅滩大量泥沙的苏北沿岸流的光学表征<sup>[14]</sup>。主要在苏北沿岸流的作用下, 浒苔向南可漂至东湖北纬 29°附近(2008 年 5 月 7 日, 图 4)。2009 年 5 月 7 日遥感探测出的浒苔分布与苏北沿岸流浑浊水舌也相吻合。

2010 年 5 月初, 在长江口外侧水域也观测到浒苔, 这与上述过去两年同期随苏北沿岸流南下的浒苔漂移路径相一致; 与往年同期一致, 2010 年 6 月在连云港东北部海域及青岛外侧海域也观测到大规模绿潮。东海、黄海的浒苔漂移总体特征表现为: 在 5 月初, 即, 东亚夏季季风(南风)还较弱的阶段, 浒苔主要随苏北沿岸流向南到达长江口及东海海域; 在东亚夏季季风的强盛时期, 即, 6 和 7 月份, 浒苔则主要随表层海流向北漂移并影响青岛、山东半岛附近海域。

## 2.2 高空分辨率遥感与浒苔来源

2007 年 6 月 17 日的 Landsat TM 数据显示(如图 5), 自极浑浊的射阳河口至苏北浅滩浑浊水团北部较清澈的南黄海水体, 均有斑块大小不等的浒苔出现; 由遥感识别出的浒苔距射阳河口岸基的最近距离为 1 km 左右。2008 年的浒苔漂移轨迹显示, 青岛的浒苔主要来自苏北浅滩浑浊水体北部边缘, 但由于遥感数据的分辨率及浑浊水体特性等因素的影响, 无法更确切地探测到浒苔来源。2009 年在苏北射阳河口的海上实地调查中, 有较小的斑块在射阳河口发现。这些浒

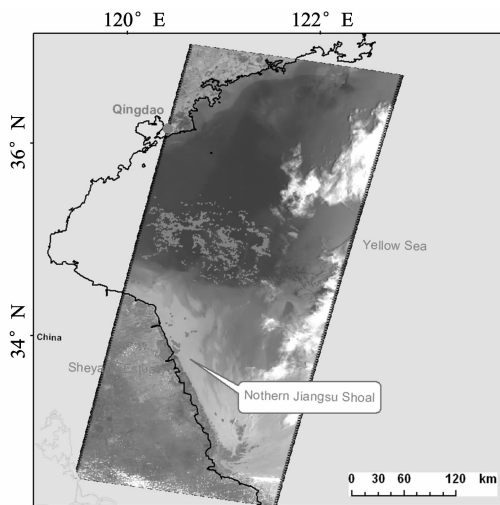


Fig. 5 Macro-algae retrieved from Landsat TM image acquired on 17-June-2007

苔是来自陆上养殖池塘<sup>[11]</sup>, 还是海水中的紫菜养殖<sup>[10]</sup>, 或者有其他来源, 仅从遥感影像尚不能确定, 但由此结果可以推定, 这些浒苔从苏北沿岸漂向黄海南部并大面积暴发。2009 年 7 月 14 日的遥感影像也显示, 大量浒苔沿苏北浅滩辐射状浅脊向外侧分布。

采用同期分辨率为 500m 的 MODIS 数据, 或者, 其最精细的 250m 空间分辨率的数据, 则很难从苏北浅滩浑浊水体中探测到浒苔。其原因主要为: (1) 绿潮形成初期斑块较小, 特别是高浑浊水体本身较差的光环境可能限制浒苔的快速生长, 如, 射阳河口水体的透明度不到 0.1m; (2) 高浑浊水体在可见光波段反射信号较强(见图 2), 同样大小的浒苔斑块与浑浊水体信息混合后, 较清洁水体更难识别。当浒苔进入透明度高的水体中, 良好的光照条件有利于其快速繁殖促使浒苔斑块增大, 在风的作用下, Langmuir 环流也会促使浒苔斑块成条状聚集<sup>[15]</sup>, 从而更易于为遥感所探测。Hu 等<sup>[16]</sup>利用空间分辨率为 30 m 的 Landsat 影像对 2000—2009 年间的苏北沿岸的浒苔分布进行检测, 发现每年均有小规模浒苔在该海域分布, 但在空间分辨率较低的 MODIS 遥感影像中往往检测不到。

## 3 结论

本研究利用 2007 至 2010 年不同空间分辨率的遥感数据对我国黄海、东海的绿潮进行了监测。结果显示, 在绿潮形成的初期 5 月初, 来自江苏北部浅滩沿岸浑浊水体的浒苔通常会沿苏北沿岸流向南漂移、影响东海海域; 随着东亚夏季季风的增强, 浒苔主要漂向南黄海; 我国黄、东海绿潮影响区范围广泛, 北到山东半岛荣成以东的海域、南到浙江以东的东海大陆架区, 亦可横跨南黄海、影响朝鲜半岛南部附近海域。近年, 我国近海大型绿藻暴发的频次越来越高, 特别是自 2007 年以来, 青岛附近海域连年发生的大规模的绿潮, 引起了国内外的广泛关注。本遥感监测结果表明, 黄、东海浒苔的产生量与影响区要远远高于目前的预期。我国近海岸大型绿藻暴发的机理与可能的生态效应亦有待进一步研究与评估。

**致谢:** 本研究的海上现场调查得到了中国科学国际合作伙伴计划, 中国科学院海洋研究所开放航次平台及中科院烟台海岸带研究所郝彦菊博士等的大力支持。美国 NASA 及 USGS 等机构为本研究提供遥感数据支持。作者在这里深表感谢。

## References

- [1] Hughes T P. *Science*, 1994, 265: 1547.
- [2] Norström A, Nyström M, Lokrantz J, et al. *Marine Ecology Progress Series*, 2009, 376: 295.
- [3] Hauxwell J, Cebrian J, Furlong C, et al. *Ecology*, 2000, 82: 1007.
- [4] Vahteri P, Mäkinen A, Salovius S, et al. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2000, 29(6): 338.
- [5] Charlier R H, Morand P, Finkl C W. *International Journal of Environmental Studies*, 2009, 65(2): 191.
- [6] Hiraoka M, Ohno M, Kawaguchi S, et al. *Hydrobiologia*, 2004, 512: 239.
- [7] Valiela I, McClelland J, Hauxwell J, et al. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42: 1105.

- [ 8 ] Gower J F R, Hu C M, Borstad G A, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44: 3619.
- [ 9 ] Shi W, Wang M H. Journal of Geophysical Research-Oceans, 114, C12010, doi: 10. 1029 /2009 JC 005513.
- [10] Liu D Y, Keesing J K, Xing Q G, et al. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(6): 888.
- [11] Pang S J, Liu F, Shan T F, et al. Marine Environmental Research, 2010, 69: 207.
- [12] JIANG Xing-wei, LIU Jian-qiang, ZOU Bin, et al(蒋兴伟, 刘建强, 邹斌, 等). Acta Oceanologica Sinica(海洋学报), 2009, 31(1): 52.
- [13] Lü X G, Qiao F L. Geophysical Research Letters, 2008, 35, L23614, doi:10.1029/2008GL036084.
- [14] SUN Xiao-gong, FANG Ming, HUANG Wei(孙效功, 方明, 黄伟). Oceanologia et Limnologia Sinica(海洋与湖沼), 2000, 31(6): 581.
- [15] Thorpe S A. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(12): 1787.
- [16] Hu C, Li D, Chen C, et al. Journal of Geophysical Research, 2010, 115, C05017, doi:10.1029/2009JC005561.

## Monitoring “Green Tide” in the Yellow Sea and the East China Sea Using Multi-Temporal and Multi-Source Remote Sensing Images

XING Qian-guo<sup>1</sup>, ZHENG Xiang-yang<sup>1</sup>, SHI Ping<sup>1</sup>, HAO Jia-jia<sup>1</sup>, YU Ding-feng<sup>1</sup>, LIANG Shou-zhen<sup>1</sup>, LIU Dong-yan<sup>1</sup>, ZHANG Yuan-zhi<sup>2</sup>

1. Key Laboratory of Coastal Environment Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China
2. Institute of Space and Earth Information Science, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, NT, Hong Kong, China

**Abstract** Landsat-TM (Theme Mapper) and EOS (Earth Observing System)-MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) Terra/Aqua images were used to monitor the macro-algae (*Ulva prolifera*) bloom since 2007 at the Yellow Sea and the East China Sea. At the turbid waters of Northern Jiangsu Shoal, there is strong spectral mixing behavior, and satellite images with finer spatical resolution are more effective in detection of macro-algae patches. Macro-algae patches were detected by the Landsat images for the first time at the Sheyang estuary where is dominated by very turbid waters. The MODIS images showed that the macro-algae from the turbid waters near the Northern Jiangsu Shoal drifted southwardly in the early of May and affected the East China Sea waters; with the strengthening east-asian Summer Monsoon, macro-algae patches mainly drifted in a northward path which was mostly observed at the Yellow Sea. Macro-algae patches were also found to drift eastwardly towards the Korea Peninsular, which are supposed to be driven by the sea surface wind.

**Keywords** Green tide; *Ulva prolifera*; Remote sensing; Yellow sea; East China sea

(Received Jul. 22, 2010; accepted Oct. 10, 2010)