

基于 MODIS 数据的 2016 年黄海绿潮灾害动态监测研究

徐福祥^{1,2}, 高志强¹, 郑翔宇^{1,2}, 宁吉才¹, 宋德彬^{1,2}

(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)

摘要: 本研究利用高分辨率的 GF-1 卫星影像对 MODIS 数据绿潮监测的精度进行验证, 并在此基础上利用 MODIS 数据对 2016 年黄海绿潮过程进行连续动态监测, 结果表明: 相较于 GF-1 卫星影像, MODIS 数据对绿潮的监测误差高于 50%; 2016 年黄海绿潮移动路径总体呈先向北, 然后沿山东半岛海岸线向东北方向移动, 并最终停滞于青岛、威海附近海域; 此次绿潮持续时间为 80 天左右, 并呈现出与往年类似的“出现→发展→暴发→治理→消亡”的规律; 其中“出现”的时间为 5 月 12 日, “发展”阶段时间为 5 月中下旬, 此时绿潮主体分布于苏北浑水区, 适宜前置打捞治理, 当 5 月底 6 月初绿潮进入清水区之后才开始进入“暴发”阶段, 本年度绿潮灾害“暴发”规模较大, 对山东沿海水产养殖业及旅游业影响严重。本研究成果对于绿潮预警和防控具有科学和实际意义。

关键词: MODIS; 绿潮; GF-1; 验证; 动态监测

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2017)05-0080-05

DOI: 10.11759/hyhx20160922003

自 2008 年以来黄海大面积暴发以浒苔为主要藻类的绿潮灾害, 数万平方公里的海面上漂浮着几百平方公里的绿潮, 生物量在几百万吨以上^[1]。大量的绿潮死亡沉降后会消耗掉水中的溶解氧, 造成养殖的鱼虾减产, 甚至海洋生物的死亡, 同时漂浮的绿潮还影响海滨景观和旅游业, 给沿岸的经济、生态环境、养殖业等带来重大影响^[2-5]。

由于绿潮的分布范围极广, 传统的调查监测手段很难对绿潮进行大范围监测, 卫星遥感因其较高的时效性、经济性以及大面积同步观测的能力而成为绿潮动态监测的重要手段^[6-7]; 其中, MODIS 影像由于获取方便和较高的时间分辨率(一天两次)而在绿潮监测中得到广泛应用^[8]。吴孟泉等^[9]利用 MODIS 数据结合 NDVI 指数法提取 2008 年至 2012 年山东半岛绿潮暴发的时间、面积、影响范围等参数, 综合对比发现 2008 年和 2009 年绿潮较其他年份暴发较为严重; 邢前国等^[10]利用 MODIS 及 landsat-TM 数据对 2007-2010 年间黄海和东海绿潮进行了监测; Hu^[11]提出 FAI 指数并对青岛附近海域绿潮进行监测, 监测结果与 NDVI 指数进行对比, 发现 FAI 指数法能较好的从卫星影像中提取绿潮信息; Kessing 等^[12]和 Liu 等^[13]利用 MODIS 数据和 SAI、NDVI 分类法提取了 2007 年至 2009 年黄海绿潮暴发情况, 并认为江苏浅滩附近的紫菜养殖和绿潮暴发有密切关联。然

而受到分辨率和天气条件的限制, 基于 MODIS 数据的绿潮监测存在一定误差。但是由于验证方式的不同, 不同学者对于 modis 绿潮监测的误差有不同的观点。Qiao 等^[14]认为监测误差是数量级水平, 而钟山等^[15]利用 HJ-CCD 数据对比 MODIS 监测结果发现其误差在 30%左右。

本研究拟用高分辨率的 GF-1 数据对 MODIS 绿潮监测精度进行验证, 并在此基础上利用 MODIS 数据对 2016 年绿潮进行动态监测, 揭示其来源、动态、时空分布等特征, 以期对绿潮监测、防控及研究提供科学参考。

收稿日期: 2016-12-05; 修回日期: 2017-01-11

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); 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-14); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA11020000); 科技部基础支撑项目(2014FY210600); 中国科学院烟台海岸带所人才引进项目

[Foundation: Aoshan Science and Technology Innovation Program of Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, No. 2016ASKJ02; Key Program of the Chinese Academy of Sciences, No.KZZD-EW-14; Strategic priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA11020000; Basic Special Program of Ministry of Science and Technology, No.2014FY210600; Talent Fund of Yantai Institute of Coastal Zone Research]

作者简介: 徐福祥(1989-), 男, 山东济宁人, 博士研究生, 主要从事海洋灾害监测及应对研究, E-mail: fxxu@yic.ac.cn; 高志强, 通信作者, 研究员, 博士生导师, E-mail: zqgao@yic.ac.cn

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区域主要位于南黄海海域, 为 32°~37°N, 119°~124°E, 区域内有连云港、青岛、日照、威海等主要沿海城市, 苏北浅滩也在此区域内, 是绿潮的主要暴发海域^[15], 每年的 5~8 月份绿潮都会在此暴发, 给当地的旅游业和养殖业等造成巨大的损失^[9]。

1.2 数据处理

本研究使用 MODIS 数据和中国 GF-1 卫星数据进行绿潮绿潮的监测和验证工作。GF-1 卫星数据为 2016 年 6 月 1 日黄海绿潮暴发区宽视场多光谱影像 (WFV), 数据下载自中国资源卫星应用中心 (<http://www.cresda.com>), 同时从 NASA 网站 (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>) 下载时间接近的 6 月 1 日 modis 影像, 并经过了几何校正、数据镶嵌、水陆掩膜等预处理。

用于 2016 年绿潮动态监测的 MODIS 影像为从 NASA 网站下载的 2016 年 4 月至 8 月的黄海绿潮暴发海域 MODIS (Terra/Aqua) L1B 数据, 其中包括空间分辨率为 250 m、以及 1 000 m 地理定位文件 (MOD03), 共筛选出 86 景无云或少云的影像, 这些影像包含黄海绿潮发生、发展、暴发到最终消亡的整个生长周期。

1.3 研究方法

漂浮有绿潮的水体在可见光波段反射率较低, 近红外波段反射率较高, 这与植被的光谱特征极其相似, 而与水体的光谱差异十分明显^[16]。根据绿潮及海水在可见光-近红外波段的光谱反射特性, 利用归一化植被指数 (NDVI) 法能很好地提取绿潮信息^[17]。

$$NDVI = \frac{B_2 - B_1}{B_2 + B_1} \quad (1)$$

式中, B_1 表示红光波段的反射率, 对应 MODIS 的第 1 通道 (0.620~0.670 μm), B_2 表示近红外波段的反射率, 对应 MODIS 的第 2 通道 (0.841~0.876 μm); B_1 、 B_2 两波段的空间分辨率均为 250 m。

通过 NDVI 阈值分割法结合目视解译进行绿潮信息提取。目视解译主要依据合成的 RGB 假彩色影像, 合成通道分别对应 MODIS L1B 的第 1 通道、第 2 通道、第 1 通道, 漂浮有绿潮的水体呈翠绿色, 云呈现白色, 而海水则呈紫色或者黑色, 三者差异明显, 利用这一特性经过水陆掩膜处理后可以有效识别绿潮及水体。

2 结果与讨论

2.1 MODIS 绿潮监测精度

6 月 1 日时间相近的 GF-1 影像和 MODIS 影像对相同位置的绿潮斑块的监测结果表明 (图 1), 两者监测的绿潮分布轮廓整体上基本一致, 但如图 1 中黑色圆圈和红色方框所示, 对于一些细小的绿潮图斑和大型绿潮的边缘 MODIS 的监测结果还是存在较大误差。

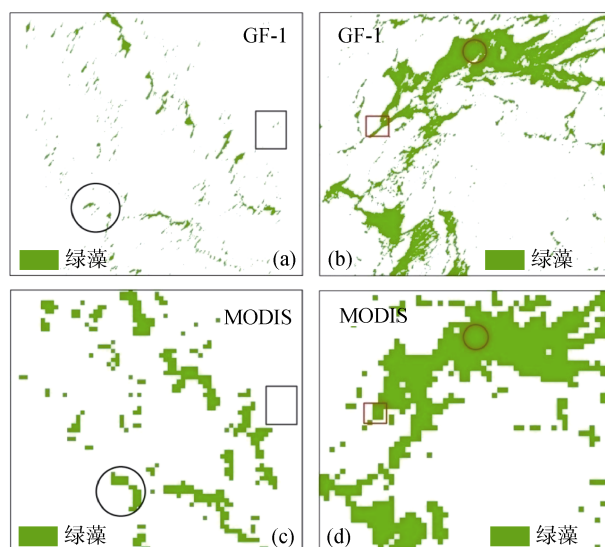


图 1 GF-1 和 MODIS 影像对相同位置绿潮的监测结果对比

Fig. 1 Comparison in monitoring Green Tides at the same location by GF-1 and MODIS images

对不同绿潮分布密度下 MODIS 监测误差进行统计分析, 结果表明绿潮分布较少的区域 (图 1 c) modis 监测结果为 23.49 km^2 , 比 GF-1 监测的 6.22 km^2 高 227.65%; 而在绿潮分布密集的区域 (图 1 d) modis 的绿潮结果为 55.75 km^2 , 与实际的误差较小, 仅为 50.43%。这说明随着绿潮覆盖密度的增加, MODIS 绿潮监测的精度也随之升高。这可能是因为较密的绿潮区域在卫星影像上混合像元较少, 而密度较小的区域混合像元严重, 在绿潮斑块提取时将海水误认为是漂浮绿潮斑块, 导致误差较大, 进而表现出 MODIS 绿潮监测的精度随绿潮分布的密度增加而增加的现象。

图 1b 和图 1d 中红色圆圈中所示的较大绿潮斑块在 GF 和 modis 两传感器的监测下面积相差很小, 而边缘的红色矩形内的绿潮面积则相差较大, 这证明低分辨率的 MODIS 卫星影像绿潮监测误差具有明显的边缘性, 即目标对象中间部分误差小, 边缘部分误

差大。这是因为较大的绿潮斑块中间对应完整的MODIS 像元, 混合像元较弱, 而大型绿潮斑块边缘部分往往以混合像元的形式与 MODIS 像元对应。

2.2 2016 年绿潮绿潮前锋运移趋势

以绿潮前进方向的边缘为边界, 做出 2016 年绿潮的趋势线, 如图 2, 结果显示 2016 年绿潮总体趋势是先向北移动, 而后往东北方向漂移, 经过青岛等地, 最后达到乳山、荣成, 自此消失, 运移趋势结果和往年相类似^[18-19]。其中可以看出漂浮绿潮前锋由 6 月 1 日的舌状变化为 6 月 16 日的从连云港连绵到青岛的大范围的条带状(图 2, 图 3), 并在几天后的 6 月 24 日于青岛、日照、乳山一线海岸登陆, 对山东沿海水产养殖业及旅游业影响严重。

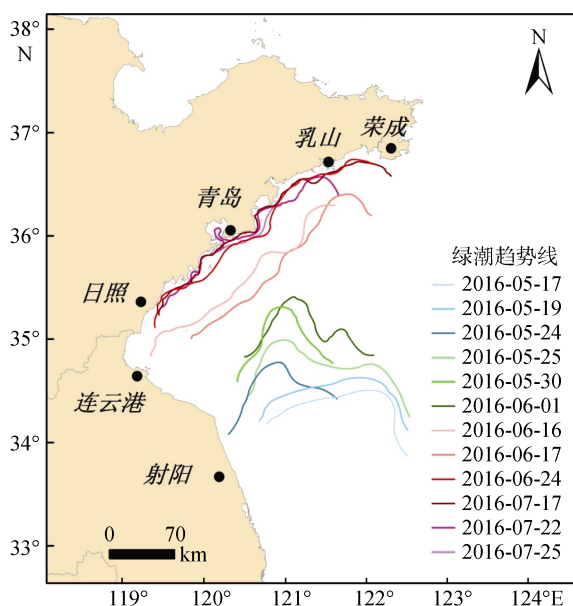


图 2 2016 年绿潮分布运移趋势图

Fig. 2 The drift trend of Green Tides in 2016

绿潮短时间内由小范围的舌状前锋发展为大面积的条带状绿潮前锋的可能原因是绿潮暴发前期主要分布在苏北浅滩的浑水区, 受光照等因素限制, 绿潮生长繁殖速度相对较慢, 而到了 6 月中下旬, 绿潮主要分布区已经漂移到清水区, 较强的光照条件导致绿潮迅速生长繁殖, 其繁殖率甚至可以达到每天 10%~37%, 短时间内绿潮就可以增加上千倍^[20], 绿潮的前锋也就由舌状变化为蔓延整个山东半岛南部的条状。因此对黄海绿潮进行打捞防治的最佳区域应该在绿潮进入清水区之前的浑水区, 因为一旦漂浮的绿潮进入清水区, 打捞防治的难度将随着绿潮生长繁殖速度的增加而迅速增大。

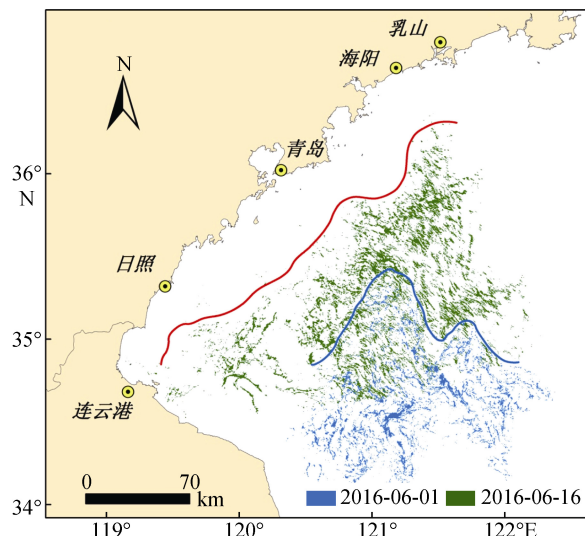


图 3 2016 年 6 月 1 日和 6 月 16 日绿潮分布示意图

Fig. 3 The map of Green Tides distribution on June 1, 2016 and June 16, 2016

2.3 2016 年黄海绿潮时空分布变化

2016 年黄海绿潮绿潮暴发的时间范围为 5 月 12 日至 7 月 30 日, 持续时间为 80 d(表 1), 呈现出与往年类似的“出现→发展→暴发→治理→消亡”的规律^[9, 21]。5 月 12 日最先在苏北浅滩附近发现绿潮覆盖面积为 26.87 km², 分布面积为 2 567.36 km²。随后, 绿潮绿潮暴发面积进一步“发展”, 到 5 月 17 日覆盖面积增加了 3 倍至 78 km², 分布面积更是增加近 10 倍, 达到 24 421.60 km²。此后绿潮暴发面积逐渐增加, 并于 6 月 26 日达到最大值, 最大分布面积为 59 685.75 km², 最大覆盖面积为 1 634.89 km², 绿潮进入“暴发”阶段。而后绿潮暴发面积逐渐缩小, 分布范围也不断减

表 1 2016 年黄海绿潮绿潮暴发面积统计表

Tab. 1 The distribution area of Green Tides in the Yellow Sea by MODIS in 2016

时间(年-月-日)	分布面积(km ²)	覆盖面积(km ²)
2016-05-12	2567.36	26.87
2016-05-17	24421.60	78.95
2016-05-19	20619.20	106.43
2016-05-25	35256.60	416.38
2016-05-30	30782.70	758.65
2016-06-13	45632.82	1269.31
2016-06-24	58955.90	1586.76
2016-06-26	59685.75	1634.89
2016-07-17	50295.20	636.16
2016-07-22	35201.10	106.28
2016-07-25	10153.90	49.37
2016-07-30	1068.32	8.96

少,到7月30日绿潮覆盖面积不足9 km²,分布面积也小于5 000 km²,黄海绿潮开始进入“治理”、“消亡”期,30日以后未在附近海域发现明显绿潮分布,表明此次绿潮绿潮已经结束。

通过分析,可以看出2016年黄海绿潮绿潮暴发期间绿潮分布面积和覆盖面积均呈先缓慢增加,而后快速增加到最大值并在短时间内维持相对稳定,最后面积急剧减小,直至消失。5月19日之前,绿潮覆盖面积增加速率较为缓慢,仅为9.95 km²/d;5月19日至6月24日,绿潮覆盖面积快速增加,平均增加速率达到40.01 km²/d,这与黄海绿潮“暴发”期特征相一致;6月24日至6月26日绿潮覆盖面积维持短时间的稳定,而后覆盖面积急剧减小,截止到7月22日绿潮覆盖面积平均减少速率为56.62 km²/d,而后绿潮于7月底消失。从绿潮分布面积来看,绿潮暴发初期分布面积增加较快,为3 642.37 km²/d;5月中旬到5月底绿潮分布面积变化较小,5月17日至5月30日绿潮分布面积增加6 361.1 km²,平均增加速率为454.36 km²/d,仅为前期绿潮分布增加速率的12.47%;而后绿潮分布面积快速增加,至6月24日分布面积已达到58 955.90 km²,并在26日前维持短时间的稳定;26日至7月25日绿潮分布面积急剧减少,平均减少面积速率为1 651.06 km²/d。

3 结论

本研究基于高分辨率的GF-1卫星影像对2016年MODIS绿潮监测的结果精度验证基础上,利用MODIS数据对2016年黄海绿潮过程进行连续动态监测,研究发现:

以高分辨率的GF-1影像为基准,MODIS数据对绿潮的监测误差高于50%;2016年黄海绿潮绿潮移动路径总体呈先向北,然后沿山东半岛海岸线向东北方向移动,并最终停滞于青岛、威海附近海域。2016年黄海绿潮绿潮持续时间约80 d,呈现出与往年类似的“出现→发展→暴发→治理→消亡”的规律,其中“出现”的时间为5月12日,“发展”阶段时间为5月中下旬,此时绿潮主体分布于苏北混水区,此时绿潮分布面积较小,适宜前置打捞治理,当绿潮进入清水区之后才开始进入“暴发”阶段,并迅速在山东沿海登陆,造成灾害,严重影响了山东沿海的水产养殖及旅游业。

参考文献:

[1] 黄娟,吴玲娟,高松,等. 黄海绿潮分布年际变化分

析[J]. 激光生物学报, 2014, 23(6): 572-578.

Huang Juan, Wu Lingjuan, Gao Song, et al. Analysis on the interannual distribution variation of green tide in Yellow Sea[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2014, 23(6): 572-578.

- [2] Keesing J K, Liu D, Shi Y, et al. Abiotic factors influencing biomass accumulation of green tide causing *Ulva* spp. On pyropia culture rafts in the Yellow Sea, China[J]. Mar Pollut Bull, 2016, 105(1): 88-97.
- [3] Lyons D A, Arvanitidis C, Blight A J, et al. Macroalgal blooms alter community structure and primary productivity in marine ecosystems[J]. Global Change Biology, 2014, 20(9): 2712-2724.
- [4] Wang C, Yu R C, Zhou M J. Effects of the decomposing green macroalga *Ulva* (enteromorpha) prolifera on the growth of four red-tide species[J]. Harmful Algae, 2012, 16(2): 12-19.
- [5] Xing Q, Tosi L, Braga F, et al. Interpreting the progressive eutrophication behind the world's largest macroalgal blooms with water quality and ocean color data[J]. Natural Hazards, 2015, 78(1): 7-21.
- [6] 吴玲娟, 曹丛华, 高松, 等. 我国绿潮发生发展机理研究进展[J]. 海洋科学, 2013, 37(12): 118-121.
- Wu Lingjuan, Cao Conghua, Gao Song, et al. A review on the development mechanism of Green Tide in China[J]. Marine Sciences, 2013, 37(12): 118-121.
- [7] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 34-44.
- Zhao Yingshi. The Principle and Method of Analysis of Remote Sensing Application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 34-44.
- [8] 邱亚会, 卢剑波. 浒苔遥感监测研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 4977-4985.
- Qiu Yahui, Lu Jianbo. Advances in the monitoring of Enteromorpha prolifera using remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 4977-4985.
- [9] 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.
- 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.
- [10] 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 multi-temporal and multi-source remote sensing images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1644-1647.
- [11] Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. Remote Sensing of Envi-

- ronment, 2009, 113(10): 2118-2129.
- [12] Keesing J K, Liu D, Fearn P, et al. 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[J]. *Mar Pollut Bull*, 2011, 62(6): 1169- 1182.
- [13] Liu D, Keesing J K, Dong Z, et al. Recurrence of the world's largest green-tide in 2009 in yellow sea, china: *Porphyra yezoensis* aquaculture rafts confirmed as nursery for macroalgal blooms. *Mar Pollut Bull*, 2010, 60(9): 1423-1432.
- [14] Qiao F L, Wang G S, Lü X G, et al. Drift characteristics of green macroalgae in the yellow sea in 2008 and 2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(21): 2236- 2242.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
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.
- [18] 李庆亭, 刘海霞, 方俊永, 等. MADC 在浒苔空间分布信息提取中的应用[J]. *遥感学报*, 2010, 14(2): 283-293.
Li Qingting, Liu Haixia, Fang Junyong, et al. Application of MADC system in spatial distribution information extraction of *Enteromorpha prolifera*[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(2): 283-293.
- [19] 高松, 黄娟, 白涛, 等. 2008 年与 2009 年黄海绿潮漂移路径分析[J]. *海洋科学*, 2014, 38(2): 86-90.
Gao Song, Huang Juan, Bai Tao, et al. Analysis on drifting path of Green Tides in the Yellow Sea in 2008 and 2009[J]. *Marine Science*, 2014, 38(2): 86-90.
- [20] 郑向阳, 邢前国, 李丽, 等. 2008 年黄海绿潮路径的数值模拟[J]. *海洋科学*, 2011, 35(7): 82-87.
Zheng Xiangyang, Xing Qianguo, Li Li, et al. Numerical simulation of the 2008 green tide in the Yellow Sea[J]. *Marine Sciences*, 2011, 35(7): 82-87.
- [21] 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: 自然科学版*, 2008, 38(4): 601-604.
Liang Zongying, Lin Xiangzhi, Mamu, 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.

Spatial and temporal distribution characteristic of green tides in the Yellow Sea in 2016 based on MODIS data

XU Fu-xiang^{1, 2}, GAO Zhi-qiang¹, ZHENG Xiang-yu^{1, 2}, NING Ji-cai¹, SONG De-bin^{1, 2}

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Received: Dec. 5, 2016

Key words: MODIS; Green Tides; GF-1; error analysis; dynamic monitoring

Abstract: This paper analyses the errors of the Green Tides monitoring results from MODIS data with high resolution GF-1 WFV satellite images based on the assumption that pixels of GF-1 WFV data are pure. On this basis, continuous and dynamic monitoring of the Green Tides of the Yellow Sea in 2016 were performed. The results show that the total error of the monitoring results using MODIS data is higher than 50%; the Green Tide moved northwards first, then moved in the northeast direction along the coastline of Shandong Peninsula, and finally was stranded in the sea areas near Qingdao and Weihai in 2016; Green Tides lasted around 80 days at this time, and showed a regularity similar to that of previous years, that is, it first appeared, developed and exploded, then was disposed, and finally disappeared. In detail, it appeared on May 12, it developed in mid- to late-May, at which period the main body of the Green Tide was distributed in muddy water in Subei Shoal, and began to explode in late May and early June after entering clear water. Based on these aspects, the macroalgal blooms caused by *Ulva prolifera* in 2016 were very serious and had huge impacts on the coastal aquaculture and tourism industry of Shandong Province.

(本文编辑: 梁德海)