

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2023.05.010

基于HY-1C/D卫星数据的2021年黄海海域大型藻类 时空分布特征分析

商杰^{1,2}, 赵铮^{1,2*}, 王炜荔^{1,2}, 丁一^{1,2}, 宋彦^{1,2}

(1. 自然资源部北海预报减灾中心 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 基于HY-1C/D(CZI)卫星遥感影像数据,利用归一化植被指数阈值判别方法提取大型藻类(浒苔绿潮)的分布和覆盖信息;结合实地考察,分析大型藻类的藻类构成与光谱信息特征;获取大型藻类灾害暴发时间、空间分布、密集度、漂移路径并对其进行分析。结果表明:2021年黄海海域大型藻类灾害最早发生于5月上旬,5月中旬—6月上旬进入发展期,6月中旬—7月上旬进入暴发期,7月中旬—8月下旬进入消亡期。从大型藻类的持续时间、时空分布、密集度变化等指标看,2021年黄海大型藻类分布面积和覆盖面积较大,发生时间较长,结束时间较晚。

关键词: 大型藻类;浒苔;黄海;卫星遥感

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)05-0090-08

0 引言

据统计,2007年以来我国黄海和东海海域每年5—8月都会发生不同规模的大型藻类(主要藻种为浒苔绿潮)灾害。大型藻类的大规模爆发,不仅破坏海洋生态系统平衡,还会对沿海城市的发展产生严重威胁,尤其给山东、江苏的渔业、养殖业和旅游业发展带来巨大影响^[1]。近年来学者对大型藻类(浒苔绿潮)的生长特性、爆发成因以及发生和发展趋势开展研究,王建伟等^[2]对浒苔绿潮的生长特性进行分析;吴孟泉等^[3]利用中分辨率成像光谱仪(Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)数据研究了2008—2012年黄海浒苔绿潮的分布变化;章志等^[4]利用多源卫星遥感数据获取了2014年浒苔绿潮的时空分析特征;矫新明等^[5]利用高分一号卫星(GF1)遥感数据分析了2015年浒苔绿潮的时空分析特征;盛辉等^[6]利用静止轨道海洋水色卫星(Geostationary Ocean Color Imager, GOCI)等遥感数据结合多种分析方法进行浒苔绿潮

提取和时空分析特征;张广宗等^[7]利用“环境一号”卫星系统(HJ-1A/B)和MODIS卫星遥感数据对多年浒苔绿潮信息进行提取和分析;刘霜等^[8]描述了2017年浒苔绿潮的新变化趋势。以上研究表明,虽然大型藻类(浒苔绿潮)自身无毒,但因其生长繁殖期间会消耗水体中的溶解氧并遮蔽阳光,因此会导致一系列的环境和生态问题。为了更好地防控大型藻类爆发造成的风险与灾害,需要对其开展有效地监测、预警和处理等工作。

针对大型藻类增长速度快、影响范围大等特点,采用传统航空遥感和船舶实地观测打捞手段进行监测不仅费时费力,而且容易受海况、人力和物力的影响,不能长时间、不间断地获取观测信息。卫星遥感具有观测面积广、时间连续等特点,能够对大型藻类的产生、迁移路径、空间分布、生消过程等有效地开展监测,已成为开展海洋大范围监测的重要手段。

本文以黄海海域作为研究区域,采用卫星遥感监测与船舶现场监测的手段,对2021年大型藻类信

收稿日期: 2022-05-26。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3106005)。

作者简介: 商杰(1979-),女,高级工程师,本科,主要从事海洋灾害监测、预警及防灾减灾应对研究。E-mail: shangjie@ncs.mnr.gov.cn

*通信作者: 赵铮(1994-),男,助理工程师,硕士,主要从事海洋遥感监测技术研究。E-mail: zhaozhenggis@126.com

息(本文仅分析浒苔绿潮)进行提取,分析其生消过程、迁移路径、空间分布、密集度变化,并进一步分析针对新情况下大型藻类爆发的防控手段和措施,为后续大型藻类的预防与治理工作提供依据。

1 研究数据与研究方法

1.1 研究区域及数据

1.1.1 研究区域

研究区域为 $30^{\circ}\sim 38^{\circ}\text{N}$, $119^{\circ}\sim 125^{\circ}\text{E}$ (见图1红框位置),是每年大型藻类的主要影响区域。

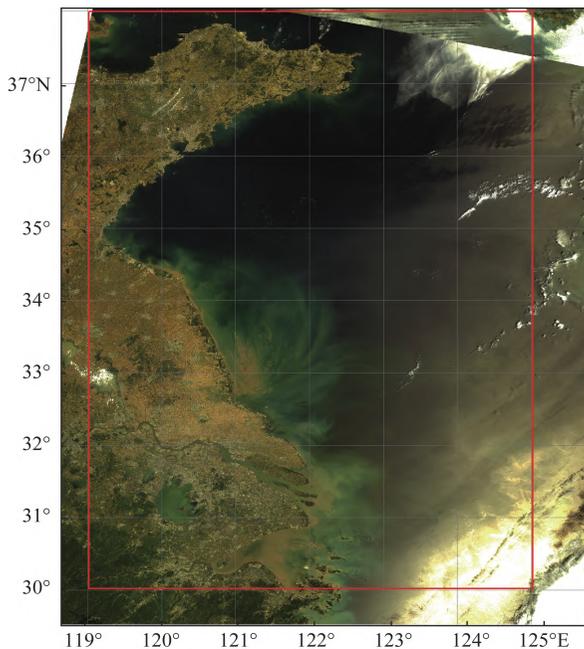


图1 研究区位置示意图

Fig.1 Location diagram of the study area

1.1.2 数据源

本文所用数据源为海洋一号卫星C星(HY-1C)和海洋一号卫星D星(HY-1D)海岸带成像仪(Coastal Zone Imager, CZI),以下简称HY-1C/D(CZI)。HY-1C/D(CZI)卫星影像具有覆盖面积广、空间分辨率高、时间分辨率高的特点,搭载的CZI传感器分辨率为50 m,幅宽优于950 km^[9],能够对大型藻类等海洋环境灾害进行实时监测,并有效提取大型藻类的覆盖信息和边界。本文选取2021年4—8月共6景的HY-1C/D(CZI)影像作为研究数据源,

分别代表不同发展时期晴好天气条件下的影像,用于大型藻类卫星遥感解译和漂移路径分析。

1.2 监测原理与方法

大型藻类的遥感监测是根据海水反射光谱与覆盖海水表面的藻类反射光谱的差异来提取藻类信息。黄海大型藻类主要为浒苔,其富含叶绿素a,爆发时其光谱曲线在400~900 nm波段,与陆地植被相近。藻类覆盖越厚,在近红外波段的反射现象越明显^[10-11]。

2021年5月和7月,研究组实地考察并采集了黄海海域的海水和大型藻类样本,测量获取其光谱信息。由于研究内容主要是观察并判别实测样本的光谱形态和特征波段,因此现场采集的光谱信息采用原始DN(Digital Number)值表达,没有处理成反射率信息。将现场光谱DN值进行可视化并标注HY-1C/D(CZI)波段范围,得到图2。结合对HY-1C/D(CZI)卫星遥感影像的光谱信息(见图3)分析,发现现场考察的光谱特征与影像的光谱形态特征基本一致,即光谱形状具有相似性,且各个波段反射强度的相对位置一致。

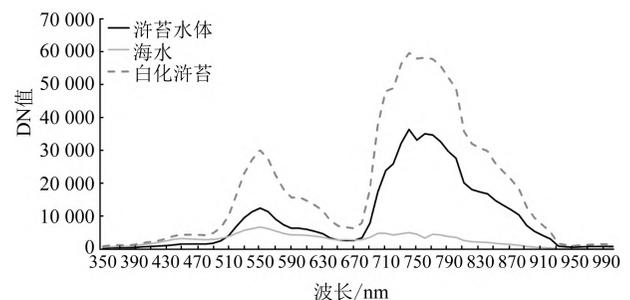


图2 大型藻类与海水实测光谱曲线

Fig.2 Measured spectral curves of macroalgae and seawater

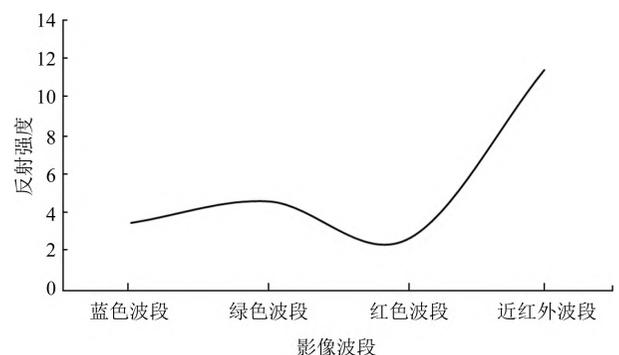


图3 HY-1C/D(CZI)影像光谱曲线

Fig.3 Spectral curve of HY-1C/D(CZI) image

根据光谱信息特征可以发现,大型藻类光谱特征与海水光谱特征差异较大。大型藻类在绿色波段处形成弱反射峰,近红外波段处形成强反射峰。两处反射峰相较于海水有较大的反射差异,可以用于提取大型藻类。利用红色和近红外波段计算归一化植被覆盖指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI),其作为大型藻类卫星遥感业务化监测方法,探测能力最强且最稳定^[12]。因此,本文选用NDVI提取大型藻类信息。

NDVI的计算公式为:

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

式中:Band_{NIR}、Band_{RED}分别代表近红外波段和红色波段的遥感反射值。

使用NDVI方法进行大型藻类信息提取的主要步骤包括数据预处理、NDVI计算、提取藻类信息、分析与制图,具体流程见图4。首先对影像进行几何校正、裁剪和镶嵌等数据预处理,并消除陆地植被、云雾、船舶以及其他干扰信息,只保留藻类和海水信息;在数据预处理的基础上进行NDVI计算,获得包含大型藻类信息的处理影像,采用阈值法对计算结果进行提取并获得大型藻类信息;最后将提取的大型藻类覆盖信息导入地理信息处理软件中,进行人工交互图件制作、大型藻类面积信息等数据统计并对藻类移动路径信息进行分析。结合不同影像波段合成方式对解译结果进行综合比较,更有利

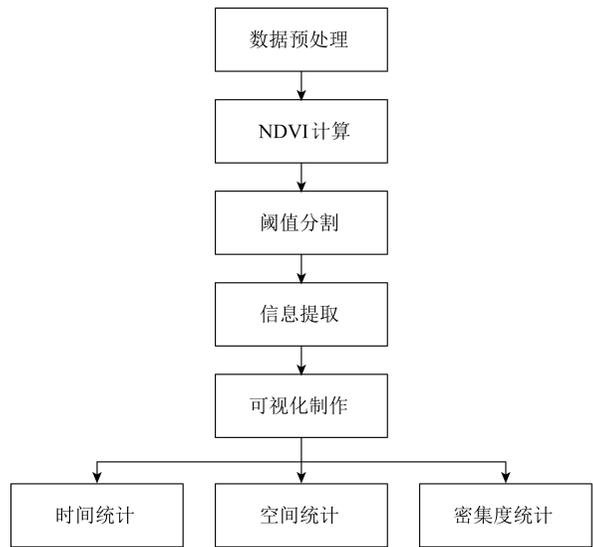


图4 NDVI大型藻类信息提取流程图

Fig.4 Flow chart of NDVI large algae information extraction

于显示大型藻类信息。如图5所示,432波段或343波段的假彩色合成影像更易显示大型藻类的信息和位置,有利于人工判断和辅助解译。

2 结果与分析

2.1 大型藻类信息提取

本文对黄海海域大型藻类的时间、空间、密集度特征进行分析。采用无云或少云情况下的HY-1C/D(CZI)影像,选取2021年5月22日、6月6

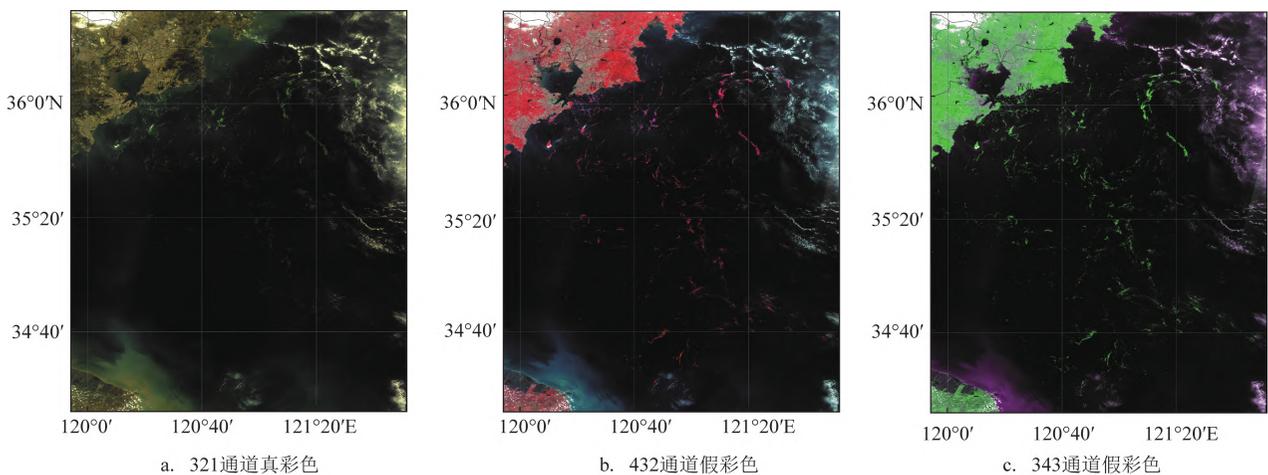


图5 2021年6月标准真彩色与假彩色HY-1C(CZI)合成影像

Fig.5 Standard true-color and false-color HY-1C (CZI) composite images in June 2021

日、7月21日、8月17日大型藻类分布遥感监测结果进行展示(见图6)。

根据2021年遥感监测结果,黄海海域大型藻类的发展特征为:5月上旬,苏北辐射沙洲海域出现零星浒苔,5月中旬大型藻类在苏北辐射沙洲向北至射阳、滨海一带聚集成规模,随后向北漂移;6月上旬开始影响山东沿岸,藻类面积快速增长,6月底大型藻类规模达到峰值;7月上旬大型藻类开始逐渐消亡,至8月25日主体消亡。从时间维度来看,大型藻类从出现到消亡存在明显的周期性,即包含“发生—发展—爆发—消亡”4个阶段。

2.2 大型藻类生长过程与时空分布分析

大型藻类覆盖面积以像元为单位进行计算,计算公式为:

$$S = N \times r^2 \quad (2)$$

式中: N 为大型藻类解译像素个数; r 为卫星影像空间分辨率, HY-1C/D(CZI)影像空间分辨率为50 m。绿潮分布面积依据计算解译结果面积获得。2021年黄海海域不同时间大型藻类的覆盖面积和分布面积统计见图7。

5月上旬,卫星遥感监测到苏北辐射沙洲北侧海域有呈点状或斑块状零星浒苔分布,大型藻类进

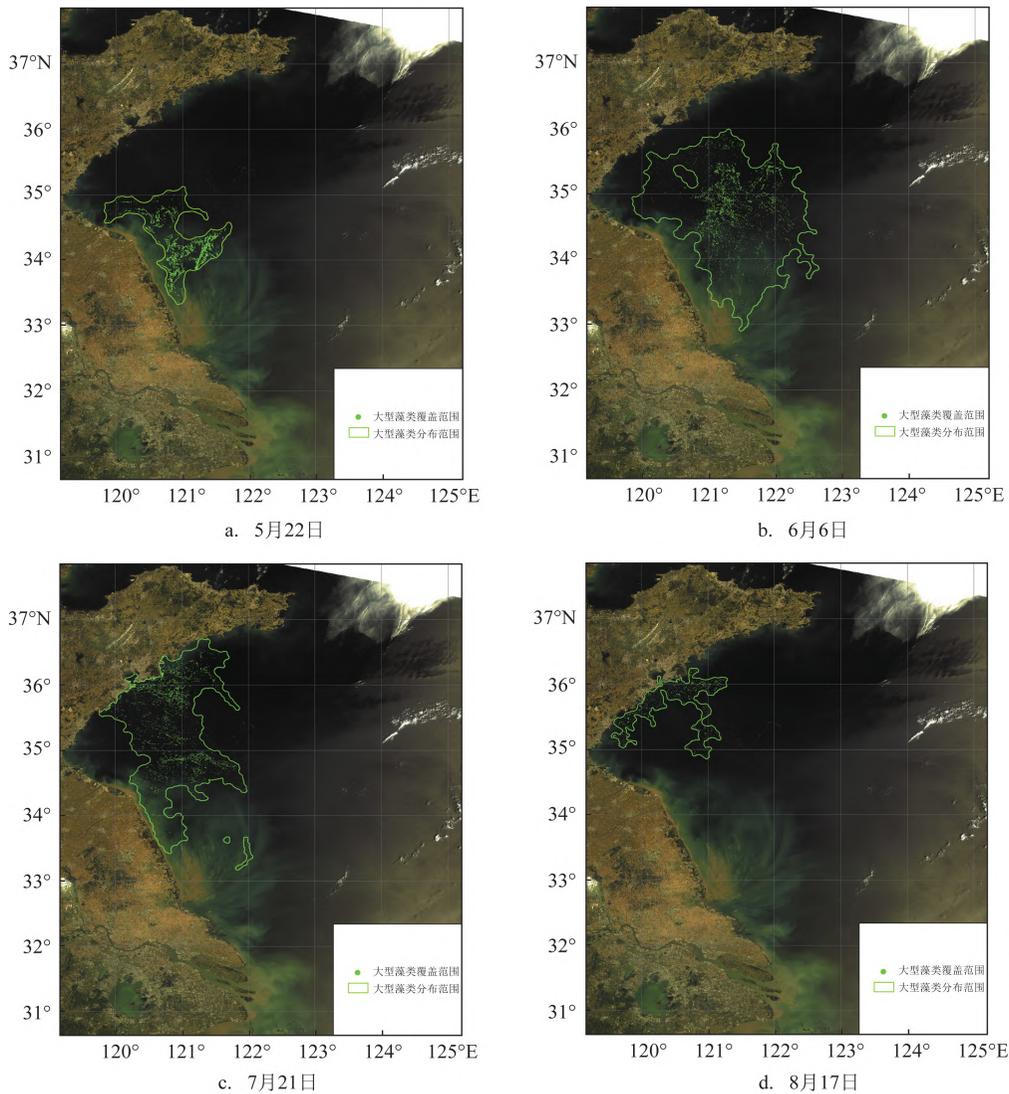


图6 2021年大型藻类卫星遥感影像解译图

Fig.6 Interpretation map of satellite remote sensing images of large algae in 2021

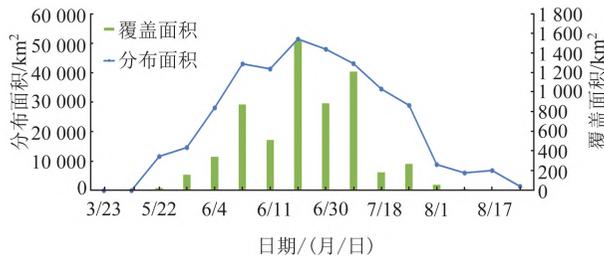


图7 大型藻类分布特征统计直方图

Fig.7 Statistical histogram of distribution characteristics of macroalgae

入发生阶段。5月中旬—6月上旬,卫星遥感监测显示大型藻类进入发展期,分布面积和覆盖面积快速上升并保持高增长率。6月中旬—7月上旬,大型藻类进入爆发期,6月底大型藻类规模达到峰值,整体分布范围最北端到达威海乳山市外海海域,最南端到达盐城外海海域,大型藻类密集区主要集中在山东南部外海海域并在沿岸大量登陆,对近海海域影响较为严重,直到7月中旬,由于海温等条件适合大型藻类继续生长和繁殖,其分布面积和覆盖面积维持在较高水平。7月中下旬—8月下旬为大型藻类消亡期,由于人为打捞、海水环境变化等影响,大型藻类的分布面积、覆盖面积、密集度逐步下降,8月末大型藻类完全消亡。

2.3 大型藻类移动轨迹分析

不同时间大型藻类分布范围的中心点可以代表其漂移位置变化。根据时间跨度绘制2021年大型藻类的漂移轨迹,结果见图8。2021年大型藻类在东海外海海域首次被监测到,整体从南向北、从外向内逐渐漂移,值得注意的是,5月中旬一下旬期间大型藻类主体在35°N线附近停留徘徊20余天,随后6月上旬越过35°N线向山东南部外海漂移聚集并最终于此消散。此次大型藻类灾害产生时间较早、消亡时间较晚,在快速生长期停留在适宜生长区过长,导致产生了较往年更为严重的影响。

大型藻类的移动主要受海面风和表层海流的共同影响。根据中国气象局和船舶现场监测的气象资料,分析2021年4月下旬—5月中旬射阳海域风向出现异常,以偏北风和偏东风为主,偏南风频率降为近十年最低值,其中5月偏北风风力明显高于近十年均值,偏北风限制了大型藻类北移。苏北

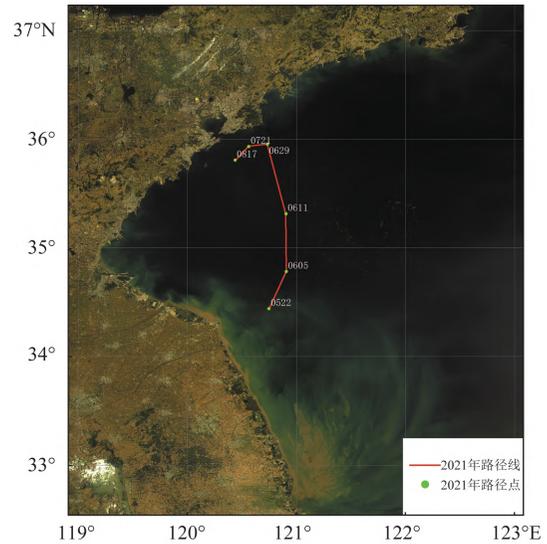


图8 2021年大型藻类移动轨迹图

Fig.8 Trajectory of macroalgae in 2021

辐射沙洲北侧海域的潮流以南北往复流为主,潮致余流较小,对大型藻类南北净运输影响不大,而对漂移起主要作用的是风致表层流,其与风作用基本一致。风和流的共同作用导致大型藻类5月中下旬在苏北辐射沙洲一带海域滞留。从现场船舶监测结果来看,大型藻类移动轨迹与遥感监测基本一致。

2.4 大型藻类生长过程分析

借助大型藻类的密集度变化对其生长过程进行分析。密集度是藻类覆盖面积与分布面积的比值,主要用于评价大型藻类发展阶段和增长速度。通过密集度的计算,在一定程度上能够减少云雾覆盖因素的干扰。2021年黄海海域大型藻类密集度见图9。由图可见,大型藻类密集度在不同阶段特

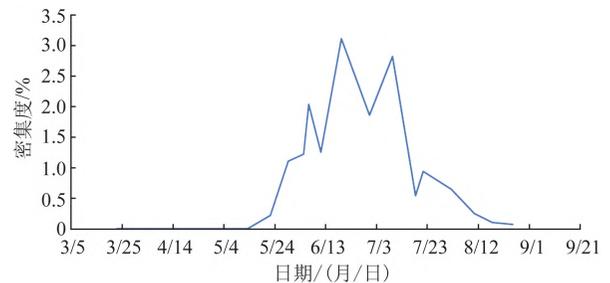


图9 2021年黄海海域大型藻类密集度

Fig.9 Density of macroalgae in the Yellow Sea in 2021

点明显,整体呈现先增加后减少的趋势。5月中旬大型藻类进入发展期,密集度开始迅速增长,6月中旬藻类进入爆发期,密集度达到顶峰并且维持较高水平,7月中旬后大型藻类进入消亡期,密集度迅速下降到较低水平并持续到结束。

结合现场实地考察(见图10)和密集度统计分析,5月中旬前为大型藻类发生阶段,密集度维持在0.5%以下的较低水平并缓慢增长。5月中旬—6月上旬为大型藻类发展阶段,海水温度、盐度、光照等条件有利于大型藻类的生长,密集度开始快速增长至2.0%,现场调查也表明5月中旬大型藻类呈零散团状或条带状分布且较为分散。6月中旬—7月上

旬为大型藻类爆发期,自然条件适宜浒苔等大量繁殖,密集度达到高峰并维持在2.0%~3.0%的较高水平,现场调查也反映该时期大型藻类呈大面积块状或条带状分布,密集程度高、厚度较大。7月中旬后为大型藻类消亡期,受自然环境变化影响,大型藻类不再繁殖增长且开始消亡,密集度呈迅速下降趋势。7月下旬后受到台风、水温等环境影响,藻类消亡速度加快,密集度低于1.0%,空间上呈零星分布,现场调查发现浒苔等呈斑块状分布,不能成片覆盖海面并出现白化浒苔,说明大型藻类已经进入消亡阶段,与密集度结果一致。因此,结合现场调查可以看出密集度能够反映大型藻类爆发—消亡的整个过程。

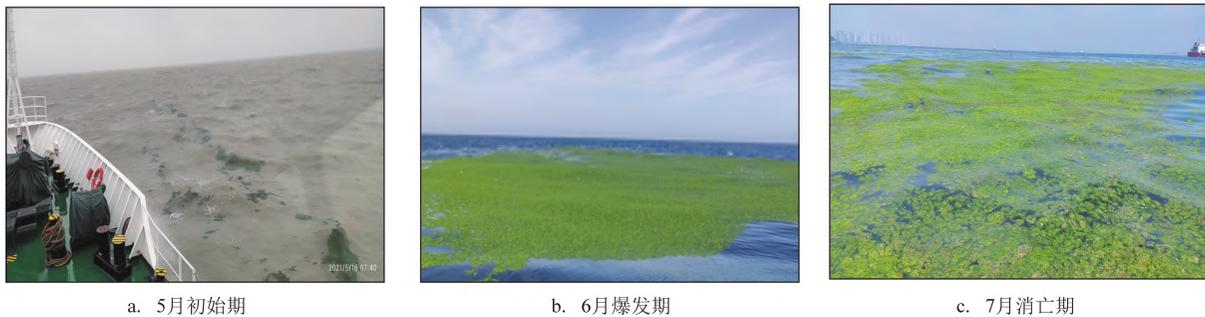


图10 2021年黄海大型藻类实地考察图片

Fig.10 Field survey of large algae in the Yellow Sea in 2021

3 结论

基于2021年的HY-1C/D(CZI)遥感影像数据,采用NDVI、彩色影像目视解译等方法对2021年黄海海域大型藻类信息进行提取,并对大型藻类的分布面积、覆盖面积、时空分布、密集度进行分析。结果表明:

①从时间分布来看,2021年大型藻类可监测时间为4月17日—8月25日,持续时间大约为130 d,持续时间较长。大型藻类的生长周期可以分为4个阶段,即4月—5月中旬为发生阶段,5月中旬—6月上旬为发展阶段,6月中旬—7月上旬为爆发阶段,7月中旬—8月下旬为消亡阶段。

②从空间分布来看,2021大型藻类灾害总体由南向北漂移,发生阶段大型藻类中心主要集中在东海以及黄海和东海交界处海域。5月上旬大型藻类进入黄海海域,5月下旬徘徊在35°N以南苏北辐

射沙洲海域;6月上旬主体密集区越过35°N并逐渐向北移动,最终到达山东南部外海海域并开始影响沿岸城市;7月—8月下旬大型藻类主体逐渐消散。与往年(2009—2021年)大型藻类峰值数据进行对比,此次大型藻类灾害总体上呈现时间提前、持续时间更久、峰值分布面积和覆盖面积更大等特点。

③从密集度分析结果来看,大型藻类发生阶段密集度较低;发展阶段由于藻类快速生长,密集度也迅速增长;爆发阶段密集度达到高峰;消亡阶段随着藻类消亡,密集度下降。密集度整体呈现从小到大再到小的变化特点,最大值出现在6月中旬,表明大型藻类呈现先生长再聚集最后消亡扩散的变化特点。

通过业务化工作验证,表明HY-1C/D(CZI)卫星数据在监测黄海海域大型藻类的应用中具有独特的优势,大大减少了混合像元造成的解译结果误

差。此外HY-1C/D(CZI)卫星采用上、下午卫星组网,可增加观测次数,基本满足大型藻类监测的需要。与其他卫星数据结果相比,本文得到的大型藻类的分布面积和覆盖面积更精确,图幅范围更大,因此能大范围精确地监测大型藻类。此方法可以为大型藻类遥感监测工作提供更为精确和实时的数据,为制作大型藻类精细监测模型提供更为精准的监测结果。

参考文献:

- [1] 叶娜,贾建军,田静,等. 浒苔遥感监测方法的研究进展[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 7-12.
YE N, JIA J J, TIAN J, et al. Advances in the study of Ulvaplifera monitoring with remote sensing[J]. Remote Sensing for Land Resources, 2013, 25(1): 7-12.
- [2] 王建伟, 阎斌伦, 林阿朋, 等. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)生长及孢子释放的生态因子研究[J]. 海洋通报, 2007, 26(2): 60-65.
WANG J W, YAN B L, LIN A P, et al. Ecological factor research on the growth and induction of spores release in *Enteromorpha Prolifera* (Chlorophyta)[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(2): 60-65.
- [3] 吴孟泉, 郭浩, 张安定, 等. 2008年-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 M Q, GUO H, ZHANG A D, 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.
- [4] 章志, 陈艳拢, 罗锋. 基于遥感技术的2014年南黄海浒苔时空分布特征研究[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2016, 25(1): 80-85.
ZHANG Z, CHEN Y L, LUO F. Temporal and spatial distribution characteristics of *Enteromorpha prolifera* in the south Yellow Sea based on remote sensing data of 2014[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2016, 25(1): 80-85.
- [5] 矫新明, 袁广旺, 毛成责, 等. 2015年南黄海海域浒苔时空分布特征[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2017, 16(1): 51-56.
JIAO X M, YUAN G W, MAO C Z, et al. Tempo-spatial distribution features of *Ulva prolifera* in South Yellow Sea in 2015 [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2017, 16(1): 51-56.
- [6] 盛辉, 郭结琮, 王法景. 基于GOCI数据的2015年黄海海域绿潮监测及时空变化分析[J]. 测绘工程, 2018, 27(1): 52-58.
SHENG H, GUO J Q, WANG F J. Monitoring of green algae and analysis of spatial-temporal changes based on GOCI image data in Yellow Sea in 2015[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(1): 52-58.
- [7] 张广宗, 吴孟泉, 孙晓, 等. 南黄海浒苔漂移轨迹年际变化规律及驱动因素[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 1084-1093.
ZHANG G Z, WU M Q, SUN X, et al. The inter-annual drift and driven force of *Ulva prolifera* bloom in the Southern Yellow Sea [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(5): 1084-1093.
- [8] 刘霜, 张洪亮, 刘旭东, 等. 2017年黄海绿潮特点及绿潮灾害防控新挑战[J]. 海岸工程, 2018, 37(4): 62-70.
LIU S, ZHANG H L, LIU X D, et al. Green tide characteristics in the Yellow Sea in 2017 and new challenges in prevention and control of green tide disaster[J]. Coastal Engineering, 2018, 37(4): 62-70.
- [9] 沈亚峰, 刘建强, 丁静, 等. 海洋一号C星光学载荷对海面溢油的识别能力分析[J]. 遥感学报, 2020, 24(8): 933-944.
SHEN Y F, LIU J Q, DING J, et al. HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(8): 933-944.
- [10] 韩君君, 黄惠明, 张薇娜, 等. 2018年黄海浒苔分布特征及动力机制分析[J]. 海洋科学, 2020, 44(6): 37-44.
HAN J J, HUANG H M, ZHANG W N, et al. Distribution characteristics and dynamic mechanism of *Enteromorpha prolifera* in the Yellow Sea in 2018[J]. Marine Sciences, 2020, 44 (6): 37-44.
- [11] 陈莹, 孙德勇, 张海龙, 等. 结合GOCI数据的黄海绿潮遥感监测及漂移轨迹研究[J]. 光学学报, 2020, 40(3): 7-19.
CHEN Y, SUN D Y, ZHANG H L, et al. Remote-sensing monitoring of green tide and its drifting trajectories in Yellow Sea based on observation data of geostationary ocean color imager[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(3): 7-19.
- [12] 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, 23(6): 590-595.
WANG N, HUANG J, CUI T W, et al. Capability comparison of 5 vegetation indices for detecting the green tide in different development phases and the application[J]. Acta Laser Biology Sinica, 2014, 23(6): 590-595.

Spatial and temporal distribution characteristics of macroalgae in the Yellow Sea in 2021 based on HY-1C/D satellite data

SHANG Jie^{1,2}, ZHAO Zheng^{1,2*}, WANG Weili^{1,2}, DING Yi^{1,2}, SONG Yan^{1,2}

(1. North China Sea Marine Forecast and Hazard Mitigation Center of the Ministry of Natural Resources, Qingdao 266100, China; 2. Shandong province marine ecological environment and Disaster Prevention Laboratory, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on HY-1C / D (CZI) satellite remote sensing data, normalized vegetation index threshold discrimination method is used to extract the distribution and coverage information of macroalgae (*Enteromorpha prolifera*). The composition and spectral information characteristics of macroalgae are analyzed combined with field investigation. The occurrence time, spatial distribution, density and drift path of large algae disaster are obtained and analyzed. The results show that large-scale algae disaster in the Yellow Sea area in 2021 occurs in early May, develops between middle May and early June, blooms between middle June and early July, and perishes between middle July and late August. According to the duration, spatial and temporal distribution, and concentration changes of macroalgae, the distribution and coverage areas of macroalgae in the Yellow Sea in 2021 are relatively larger, the occurrence time is relatively longer, and the end time is relatively later.

Key words: green tide; *Enteromorpha*; Yellow Sea; satellite remote sensing