

袁超, 张靖宇, 肖洁, 等. 基于哨兵 2 号卫星遥感影像的 2018 年苏北浅滩漂浮绿藻时空分布特征研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 12–20, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.002

Yuan Chao, Zhang Jingyu, Xiao Jie, et al. The spatial and temporal distribution of floating green algae in the Subei Shoal in 2018 retrieved by Sentinel-2 images[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(8): 12–20, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.002

基于哨兵 2 号卫星遥感影像的 2018 年苏北浅滩 漂浮绿藻时空分布特征研究

袁超^{1,2}, 张靖宇¹, 肖洁^{1,2}, 傅明珠^{1,2}, 张学雷^{1,2*}, 崔廷伟¹, 王宗灵^{1,2}

(1. 自然资源部第一海洋研究所 海洋生态环境科学与技术重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 黄海浒苔绿潮自 2007 年以来连年暴发, 但对漂浮绿藻在其源地——苏北浅滩的分布、发生和发展过程仍缺乏精细刻画。本文主要采用哨兵 2 号卫星遥感影像, 对 2018 年苏北浅滩的漂浮绿藻信息进行提取, 结合地形、微波+红外融合海表温度和 CCMP 海面风场数据, 分析了影响漂浮绿藻时空分布的重要环境因子。结果表明: 漂浮绿藻于 5 月 23 日在苏北浅滩南部首次通过遥感影像被探测到, 在 6 月逐渐向北发展扩大, 在 7 月中旬消失。漂浮绿藻最早可追溯至浅滩中心紫菜养殖筏架区边缘, 而后沿潮沟形成宽度为 10~200 m、断续绵延数十千米的条带。在黄海绿潮发展过程中, 浅滩持续向北及外海输送漂浮绿藻。在浅滩以北, 漂浮绿藻的分布和漂移与海面风向一致。本研究结果可为黄海绿潮的早期预警和防控提供依据。

关键词: 浒苔绿潮; 苏北浅滩; 哨兵 2 号; 海表温度; 风向

中图分类号: X55; X87

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2020)08-0012-09

1 引言

自 2007 年以来, 以浒苔(*Ulva prolifera*)为肇事种的黄海绿潮连年周期性暴发, 对山东南岸的海洋生态环境、水产养殖和滨海旅游造成重大损失^[1-2]。黄海绿潮在 4–5 月份发生于苏北浅滩, 随季风和海流向北漂移并快速生长, 覆盖和分布面积逐渐扩大, 在 6 月份到达山东南岸堆积成灾。浒苔具有高生长率^[3]、强漂浮力^[4]和多样化的繁殖方式^[5-6], 在适宜条件下会大规模增殖^[1,7]。漂浮绿藻生物量在苏北浅滩仅为数千吨^[8-9], 而到达山东南岸后可达数百万吨。在绿潮形成规模后打捞, 防控成本和难度将大大增加。因此, 应重视绿潮的早期防控工作。

现场调查、遥感追溯和数值模拟等手段均证实黄海绿潮发源于苏北浅滩^[1,9-14]。苏北浅滩紫菜养殖筏架上的附生绿藻脱落入海是南黄海大规模绿潮的重要来源^[12-13]。在早期发生过程中, 漂浮绿藻由零星绿藻、小斑块逐渐发展为条带状的大斑块^[1,7,13]。然而, 由于苏北浅滩水文环境复杂且面积较大, 船测调查手段难以实时和大范围地对漂浮绿藻进行监测。对于漂浮绿藻在苏北浅滩海域的分布、发生和发展过程仍缺乏精细的刻画, 制约了绿潮早期防控工作的研究。

卫星遥感方法具有时效性好和覆盖范围广的优点, 是绿潮动态观测的重要手段。目前, 国内外学者基于多源卫星, 发展出一系列的绿潮提取算法, 开展

收稿日期: 2019-11-10; 修订日期: 2020-03-23。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1402100)。

作者简介: 袁超(1991—), 男, 山东省新泰市人, 博士, 主要从事海洋生态学方面的研究。E-mail: yuanchao@fio.org.cn

* 通信作者: 张学雷, 研究员, 主要从事海洋生态学方面的研究。E-mail: zhangxl@fio.org.cn

了绿潮覆盖面积、影响面积和漂移路径的研究,并尝试进行绿潮生物量的估算^[14-22]。由于漂浮绿藻与陆地植被具有相似的光谱特征,光学遥感的绿潮提取算法主要基于漂浮绿藻和海水在红光和近红外波段的光谱差异。常见的绿潮提取算法包括归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)、漂浮藻类指数(Floating Algae Index, FAI)和针对GOCI卫星的漂浮绿藻指数(Index of Floating Green Algae for GOCI, IGAG)等。其中,NDVI由于表现稳定可靠而被广泛采用^[15-17]。在数据源方面,前期研究多基于中低分辨率卫星(MODIS、GOCI等)进行绿潮的跟踪监测,研究区域集中于盐城以北海域^[14,20]。由于苏北浅滩漂浮绿藻斑块面积较小^[8],中低空间分辨率卫星难以对其进行识别且可能会造成较大误差^[17,22]。近年来,随着国内外高分辨率卫星,如哨兵2号(Sentinel-2)、高分(GF)系列卫星等的运行,使研究漂浮绿藻在苏北浅滩时空分布规律成为可能。

本文利用高分辨率卫星(以哨兵2号为主)数据,提取了2018年黄海绿潮发生期间苏北浅滩的漂浮绿藻信息,研究了漂浮绿藻在苏北浅滩的时空分布特征,结合环境数据分析了地形、水温和风向对漂浮绿藻分布、发生和发展的影响,以期对黄海绿潮的早期防控提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究海区

研究区域位于南黄海西部的苏北浅滩及其北部(32.4°~34.4°N, 120°~122°E)。苏北浅滩具有似三角洲状的地形地貌——辐射沙洲(图1)。辐射沙洲以江苏东台琼港为中心,向东北和东南方向延伸出若干沙脊和潮沟。苏北浅滩的潮流受辐射沙洲影响显著。涨、落潮的主流向与潮沟走向一致,潮沟流速大于沙脊^[23]。苏北浅滩是中国条斑紫菜筏式养殖的重要区域,而养殖筏架上的附生绿藻脱落入海被认为是黄海绿潮的重要来源^[24]。

2.2 研究数据

哨兵2号卫星是欧洲航天局哥白尼计划发射的多光谱对地观测卫星。哨兵2号卫星的高度为786 km,幅宽为290 km,重访周期为5 d。在13个光谱波段中,可见光(B2, B3, B4)和近红外(B8)波段的分辨率为10 m。哨兵2号卫星的高时空分辨率特征为研究漂浮绿藻在苏北浅滩的分布、发生和发展规律提供了数据支撑。

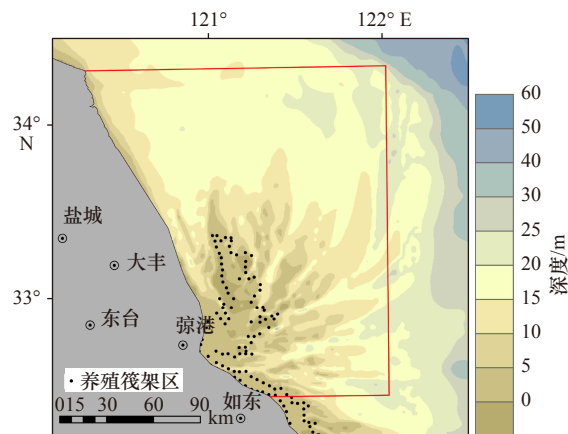


图1 苏北浅滩水深和地形概况

Fig. 1 Bathymetric topography of the Subei Shoal

图中红框为研究区域

The red rectangle indicates study area

哨兵2号影像为免费开放获取,下载于欧洲航天局网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>)。本文筛选了2018年黄海绿潮暴发期的少云影像(5月14日、5月24日、6月3日、6月8日、6月13日、6月23日、7月3日和7月13日),研究漂浮绿藻在苏北浅滩的时空分布特征。哨兵2号L1C级影像是经过正射校正和亚像元级几何精校的大气表观反射率产品。L1C级数据可基于欧洲航天局发布的Sen2cor插件进行辐射定标和大气校正,得到各波段的大气底层反射率(即L2A级产品)。5月14日,哨兵2号影像未检测到漂浮绿藻。5月24日,漂浮绿藻条带在苏北浅滩南部可见,但该区域被厚云覆盖。因此,本研究还选取了2018年5月23日的高分1号WFV影像,其空间分辨率为16 m。该数据来源于国家卫星海洋应用中心数据分发系统(dds.nsoas.org.cn/mainIndex.do)。

为了验证哨兵2号影像提取漂浮绿藻信息的可靠性,本研究于2018年6月13日在苏北浅滩南部海域开展了漂浮绿藻分布状态的现场观测。

利用美国Remote Sensing Systems(RSS)网站提供的微波+红外融合海表温度(Microwave+IR Signal Fusion SST, MISST)数据和CCMP(Cross Calibrated Multi-Platform)海面风场数据,研究影响漂浮绿藻时空分布的主要环境因子。MISST和CCMP海面风场数据的空间分辨率分别为9 km和0.25°。

2.3 漂浮绿藻提取方法

利用NDVI指数进行漂浮绿藻信息提取:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}, \quad (1)$$

式中, NIR 、 R 为近红外和红外波段的反射率。本研究中, NIR 采用哨兵2号的B8波段(842 nm), R 采用

B4波段(665 nm)。

通过设定阈值 T 来确定漂浮绿藻的存在与否。本研究通过 NDVI 阈值分割和假彩色合成图像进行目视解译来共同确定 T 值。阈值 T 的理论值为 0, 但受各种因素(浅滩、水深等)的影响而存在波动。本文中 T 值的范围为 $[-0.10, 0.05]$ 。

通过计算绿潮的覆盖面积(S)和漂浮绿藻分布区域的外包络面的面积(D)来表征绿潮的暴发规模和影响范围。 S 为 $NDVI > T$ 的像元数 N 与像元面积的乘积:

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

式中, r 为卫星传感器的空间分辨率。

3 结果与讨论

3.1 哨兵 2 号影像中漂浮绿藻信息的现场验证

通过现场同步调查,对 2018 年 6 月 13 日哨兵 2 号影像提取的漂浮绿藻信息进行验证(图 2, 表 1)。结果表明,哨兵 2 号提取的漂浮绿藻信息能够与现场数据相匹配。漂浮绿藻位于海水表面,在浑浊水体中可以与背景区分开。1 号站点存在微小的绿藻斑点,

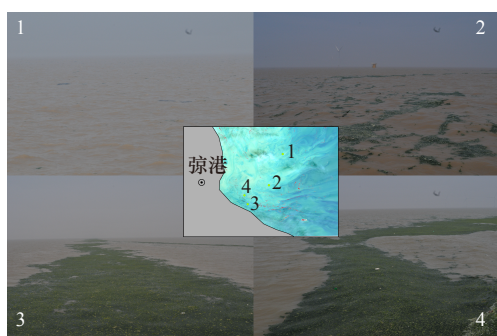


图 2 2018 年 6 月 13 日哨兵 2 号卫星影像中漂浮绿藻信号的现场验证

Fig. 2 Field verification of floating green algae signal from Sentinel-2 images on June 13, 2018

插入图显示了拍摄地点

The locations are shown in the pseudo-colored insert map

表 1 2018 年 6 月 13 日不同站位哨兵 2 号影像中漂浮绿藻信号的现场验证

Table 1 Field verification of floating green algae signal by Sentinel image at different stations on June 13, 2018

| 站位 | 经纬度 | 时间 | 分布状态 | NDVI |
|----|---------------------|-------|------|-------|
| 1 | 32.887°N, 121.298°E | 9:49 | 无 | -0.18 |
| 2 | 32.717°N, 121.223°E | 10:58 | 稀疏分布 | -0.01 |
| 3 | 32.613°N, 121.107°E | 11:48 | 宽条带状 | 0.19 |
| 4 | 32.662°N, 121.089°E | 13:07 | 宽条带状 | 0.27 |

面积小于 0.5 m^2 , 哨兵 2 号影像未探测到漂浮绿藻信息。2 号站点漂浮绿藻分布较为稀疏,覆盖度约为 10%,影像检测到微弱漂浮绿藻信息。3 号和 4 号站点存在显著的漂浮绿藻条带,可以清晰地从影像中看到。

3.2 漂浮绿藻在苏北浅滩的时空分布特征

本文采取 NDVI 阈值分割与目视解译法相结合的方法,对 2018 年苏北浅滩海域漂浮绿藻信息进行了提取(图 3);图 4 反映了漂浮绿藻外包络面、覆盖面积和分布面积随时间的变化规律。

2018 年苏北浅滩漂浮绿藻的发展过程可大体划分为发生—发展—维持—消失 4 个阶段。5 月 23 日,零星漂浮绿藻在苏北浅滩南部的太阳岛附近首次被发现,覆盖面积为 1.78 km^2 。6 月 3 日,漂浮绿藻的分布范围迅速扩大至整个苏北浅滩,覆盖面积扩大了 32 倍,分布面积达到 17830 km^2 。6 月中下旬,漂浮绿藻发展进入维持阶段。6 月 13 日的漂浮绿藻的分布特征与 6 月 3 日相似,但在浅滩以北海域的分布面积显著增加。6 月 23 日,漂浮绿藻在苏北浅滩以北的影响范围向东扩展到 122°E ,覆盖面积(199.28 km^2)达到最大,比 5 月 23 日约高两个数量级(图 4)。7 月 3 日,苏北浅滩大部分区域被厚云覆盖,但在无云区仍然可观测到漂浮绿藻条带。7 月 13 日,研究区域已无法检测到漂浮绿藻。整个过程持续约 50 d,与历年黄海绿潮生消过程相一致^[16, 25]。

在苏北浅滩,漂浮绿藻聚集成条带状,自紫菜养殖筏架区向外沿各潮沟呈辐射状分布。如图 3 所示,漂浮绿藻最早可追溯至浅滩中心筏架养殖区边缘,而后沿潮沟延伸扩展。绿藻条带的宽度在 $10 \sim 200 \text{ m}$ 之间,沿潮沟可断续绵延数十千米。出苏北浅滩后,漂浮绿藻仍呈条带状分布,生物量与覆盖面积显著增加,但其分布无明显规律,呈散布状(图 3d, 图 3e, 图 3f)。6 月 3 日,绿藻条带已覆盖整个北部浅滩,其中部分漂浮绿藻从浅滩西北沿岸和东部离岸潮沟漂移出浅滩。浅滩以北海域,漂浮绿藻在 6 月 3 日至 6 月 13 日明显向江苏近岸聚集,并在 34°N 以北出现东西跨越半个经度的绿潮锋面;6 月 23 日漂浮绿藻则向外海扩散,从近岸至 122°E 连成高覆盖率、高生物量的大面积绿潮。

3.3 漂浮绿藻时空分布的环境驱动机制

适宜的环境条件是黄海绿潮暴发的必要条件。苏北浅滩及周边海域较高的营养盐水平是支撑浒苔快速生长和繁殖的重要物质基础^[26-28]。图 5 展示了研究期间苏北浅滩及周边海域的海表温度和海面风场

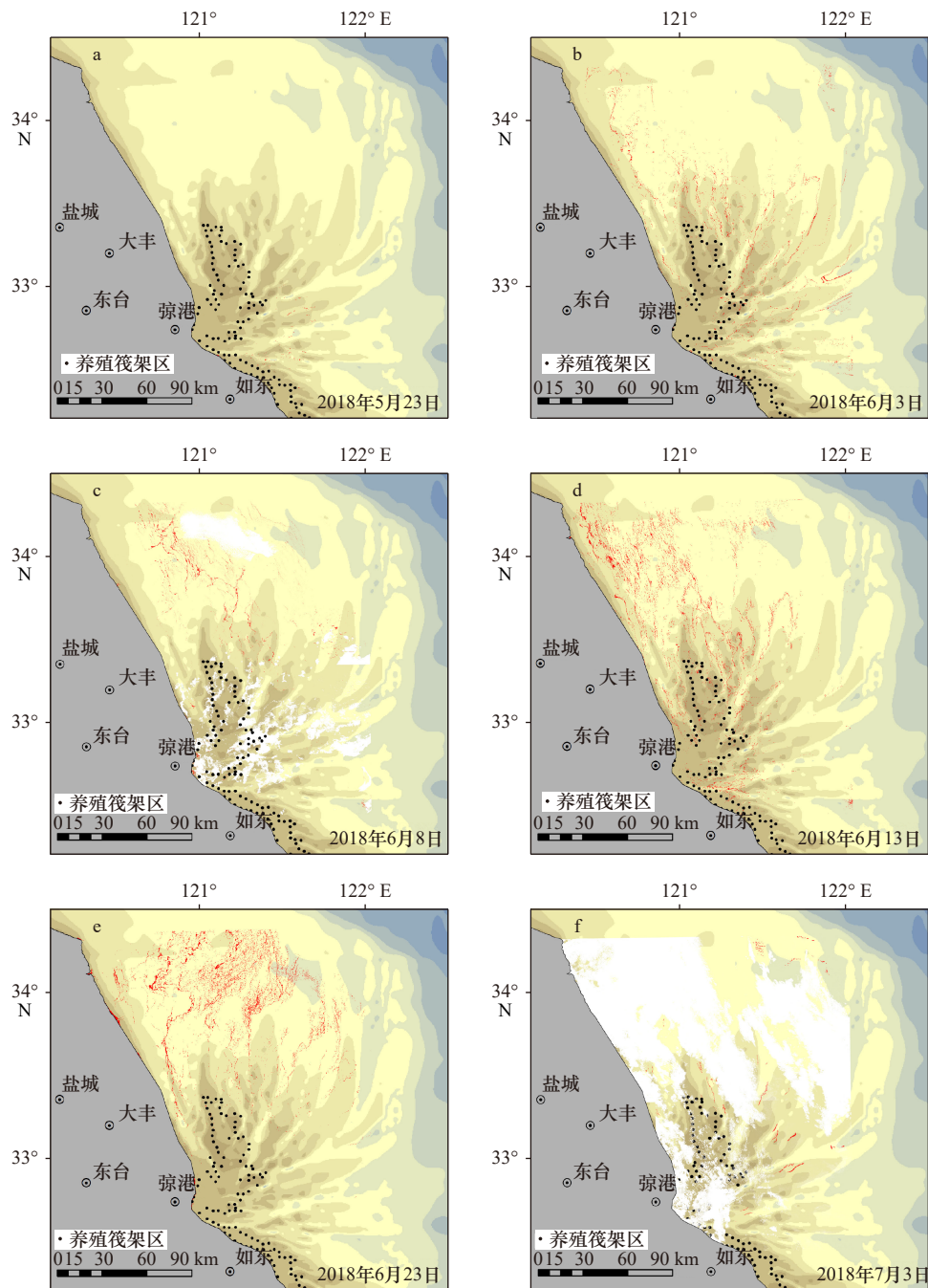


图3 2018年不同日期哨兵2号影像的漂浮绿藻(红点)分布(白色区域为云掩膜)

Fig. 3 Time-series distribution of the floating green algae (red dots) in the Subei Shoal in 2018 based on the Sentinel-2 images (the thick clouds are marked by white dots)

的变化过程。温度是影响浒苔微观繁殖体萌发和附生绿藻群落演替的重要环境因子^[1]。室内实验结果表明,浒苔的最适生长温度范围为14~26℃^[3],而其微观繁殖体在10~25℃萌发率较高^[5,6,29]。本研究中,研究区域的海表温度在各时间的空间分布较为一致,自南至北、由近岸向外海逐渐降低。苏北浅滩的海表温度最高,通常比同纬度的黄海外海高2℃左右。本研究首次探测到漂浮绿藻时苏北浅滩的海表温度约

为18℃,与往年船测调查中该区域大面积漂浮绿藻出现时的海表温度相一致^[13],也与历年卫星遥感首次探测到漂浮绿藻时的海表温度相符^[18,21,25]。在维持阶段,海表温度虽然持续上升,但是仍处于浒苔的最适生长温度区间内^[9]。

在苏北浅滩,漂浮绿藻自紫菜养殖筏架区沿潮沟向外辐射分布。这表明苏北浅滩是黄海绿潮的源头。前期研究表明,苏北浅滩的紫菜养殖筏架为浒苔

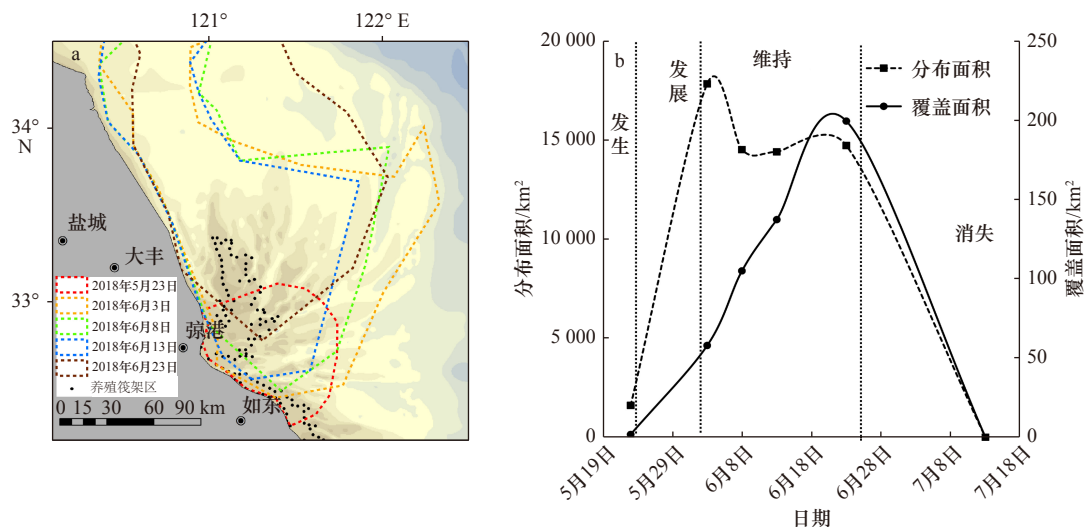


图 4 2018 年苏北浅滩海域漂浮绿藻的外包络面(a)、覆盖面积和分布面积(b)变化

Fig. 4 Temporal changes of envelopes (a), coverage and distribution area (b) of the floating green algae in the Subei Shoal in 2018

的微观繁殖体提供了附着基,是黄海绿潮的孕育场所^[5-8]。附生绿藻在紫菜养殖筏架回收过程中脱落入海,由附生转变为漂浮状态,是黄海绿潮的重要来源^[12-13,24]。苏北浅滩独特的潮流系统和辐射沙洲地貌特征有利于漂浮绿藻的带状聚集。该区域潮沟与沙脊相间,潮沟由外海向核心区变窄变浅。相同流量下,潮沟内海水流速大于沙脊,有利于漂浮绿藻聚集并向外输运^[22-23]。漂浮绿藻在潮沟中汇聚还可能与谷物圈效应(Cheerios Effect)有关^[30]。当两个能够产生液面变形的物体相互靠近时,由于系统重力势能和表面能倾向于最低,物体之间就会相互靠近聚集。

相关研究表明,绿潮漂移路径主要由风场驱动下的表层流场决定^[11,18,21]。从对应日期的CCMP海面风场图(图5)可以看出,漂浮绿藻条带在苏北浅滩以北的走向与盛行风向较为一致。5月中旬,海表风场由北风向南风转变,有利于漂浮绿藻的向北漂移。6月3-13日研究区盛行东南风,漂浮绿藻主要在江苏近岸堆积。6月23日,当风向转变为西南风,绿藻条带则向外海扩展。在较小空间尺度上,漂浮绿藻仍呈带状分布。这可能与拉弥尔环流有关,小的拉弥尔环流逐步合并会引起浒苔或其他漂浮物的条带状聚集^[11,31]。

3.4 对黄海绿潮早期防控的启示

黄海绿潮具有异地起源、大规模和长距离漂移的特征,对山东半岛南岸造成重大的经济和社会损失^[1]。对漂浮绿藻在苏北浅滩分布和发展过程的充分认识能够为制定和实施黄海绿潮早期防控措施提供科学依据。

减少绿藻附着和控制附生绿藻入海是控制黄海绿潮暴发规模的第一步。通过研发新型材料或对现

有材料进行处理以减少绿藻附着的相关研究已有报道,但由于成本和操作等问题而难以得到大规模应用^[28]。目前,将紫菜养殖网帘直接运回陆地处理可以减少附生绿藻入海。然而,仍有大量附着于梗绳上的绿藻通过机械作业去除入海,成为附生绿藻脱落入海的主要方式^[12,24]。附生绿藻入海后,浒苔由于具有高比生长率^[3]、强漂浮能力^[4]和多样化的繁殖方式,迅速成为漂浮绿藻群落的单一优势种^[1]。据估计,漂浮绿藻的初始入海生物量仅为几千吨,但到达山东沿岸时可达数百万吨^[8-9,32]。因此,黄海绿潮的早期防控可以起到事半功倍的效果。

本研究中,哨兵2号卫星影像首次探测到漂浮绿藻的时间为5月23日,比船测调查手段首次发现零星漂浮绿藻的时间(4月25日)晚了近1个月^[33]。这可能是由于早期零星漂浮绿藻面积较小,只有当汇聚成较大斑块才能够从卫星影像中解译出来^[13]。因此,在漂浮绿藻的早期监测和预警过程中,高分辨率卫星遥感仍需与船舶和无人机等手段相结合。

高分辨率卫星(哨兵2号和高分系列卫星等)能够提供准实时、精细的漂浮绿藻分布特征,为漂浮绿藻的前期防控提供数据支撑。本研究结果表明苏北浅滩的漂浮绿藻受辐射沙洲的约束而在潮沟中聚集呈条带状,且可能对黄海绿潮有持续贡献。绿潮在潮沟内的带状聚集有利于开展船舶打捞工作。在出浅滩后,绿藻条带走向会随风和流的作用而发生改变,增加了打捞难度。在向北漂移的过程中,漂浮绿藻会进入快速生长期,增加了打捞的经济成本。因此,在苏北浅滩进行漂浮绿藻打捞可能是一种切实可行、经济且高效的黄海绿潮防控手段。

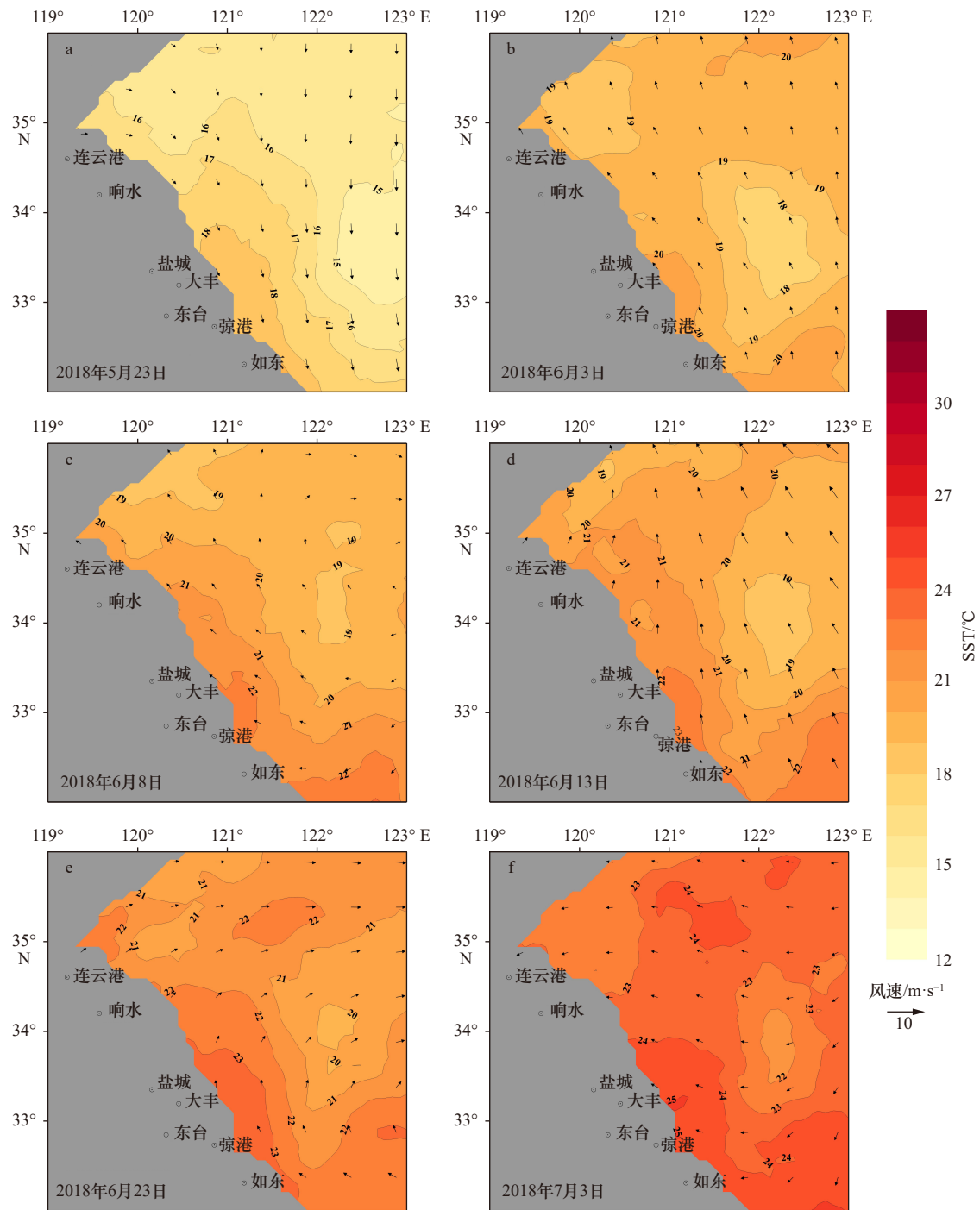


图5 2018年5月到7月南黄海西部海表温度(等值线, °C)和海面风场(矢量)

Fig. 5 Sea surface temperature (contour) and wind field (vectors) in the southwestern Yellow Sea during May to July, 2018

4 结论

本文主要采用空间分辨率为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的哨兵2号影像, 通过 NDVI 阈值分割和目视解译法相结合的方法提取 2018 年苏北浅滩的漂浮绿藻信息, 结合地形、MISST 海表温度和 CCMP 海面风场数据分析影响漂浮绿藻时空变化的主要环境因子。结论如下:

(1) 2018 年, 漂浮绿藻最早于 5 月 23 日在浅滩南

部被检测到, 在 6 月份逐渐向北扩大并维持, 在 7 月中旬消失。

(2) 苏北浅滩的漂浮绿藻聚集成条带状, 自紫菜养殖筏架区沿潮沟向外辐射分布, 并在黄海绿藻发展过程中持续向北输出。出浅滩后, 漂浮绿藻的分布和走向与盛行风向密切相关。

(3) 漂浮绿藻在苏北浅滩的带状聚集有利于开展船舶打捞工作。

参考文献:

- [1] 王宗灵, 傅明珠, 肖洁, 等. 黄海浒苔绿潮研究进展[J]. 海洋学报, 2018, 40(2): 1-13.
Wang Zongling, Fu Mingzhu, Xiao Jie, et al. Progress on the study of the Yellow Sea green tides caused by *Ulva prolifera*[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(2): 1-13.
- [2] 齐衍萍, 郭莉莉, 尹维翰, 等. 黄海浒苔绿潮防控对策研究[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(8): 90-92.
Qi Yanping, Guo Lili, Yin Weihang, et al. Green tide (*Ulva prolifera*) prevention and control countermeasures in the Yellow Sea[J]. Ocean Development and Management, 2016, 33(8): 90-92.
- [3] 张晓红, 王宗灵, 李瑞香, 等. 不同温度、盐度下浒苔(*Entromorphra prolifera*)群体增长和生殖的显微观测[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(2): 276-283.
Zhang Xiaohong, Wang Zongling, Li Ruixiang, et al. Microscopic observation on population growth and reproduction of *Entromorphra prolifera* under different temperature and salinity[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(2): 276-283.
- [4] Fu Mingzhu, Fan Shiliang, Wang Zongling, et al. Buoyancy potential of dominant green macroalgal species in the Yellow Sea's green tides, China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2019, 140: 301-307.
- [5] Gao Shan, Chen Xiaoyuan, Yi Qianqian, et al. A strategy for the proliferation of *Ulva prolifera*, main causative species of green tides, with formation of sporangia by fragmentation[J]. PLoS One, 2010, 5(1): e8571.
- [6] Song Wei, Peng Keqin, Xiao Jie, et al. Effects of temperature on the germination of green algae micro-propagules in coastal waters of the Subei Shoal, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 63-68.
- [7] Liu Dongyan, Keesing J K, He Peimin, et al. The world's largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: formation and implications[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2013, 129: 2-10.
- [8] Fan Shiliang, Fu Mingzhu, Wang Zongling, et al. Temporal variation of green macroalgal assemblage on *Porphyra* aquaculture rafts in the Subei Shoal, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163: 23-28.
- [9] Liu Dongyan, Keesing J K, Dong Zhijun, 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[J]. Marine Pollution Bulletin, 2010, 60(9): 1423-1432.
- [10] Qiao Fangli, Dai Dejun, Simpson J, et al. Banded structure of drifting macroalgae[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009, 58(12): 1792-1795.
- [11] 赵昌, 尹丽萍, 王关锁, 等. 黄海浒苔漂移运输模式的建立与应用[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 1075-1083.
Zhao Chang, Yin Liping, Wang Guansuo, et al. The modelling of *Ulva prolifera* transport in the Yellow Sea and its application[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(5): 1075-1083.
- [12] 刘材材, 徐韧, 何培民, 等. 南黄海绿潮暴发与紫菜养殖的关系[J]. 海洋科学, 2017, 41(2): 35-43.
Liu Caicai, Xu Ren, He Peimin, et al. Research on the relations between green tide and *Porphyra* cultivation in the south Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2017, 41(2): 35-43.
- [13] 范士亮, 傅明珠, 李艳, 等. 2009—2010年黄海绿潮起源与发生过程调查研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(6): 187-194.
Fan Shiliang, Fu Mingzhu, Li Yan, et al. Origin and development of Huanghai (Yellow) Sea green-tides in 2009 and 2010[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(6): 187-194.
- [14] Xing Qianguo, An Deyu, Zheng Xiangyang, et al. Monitoring seaweed aquaculture in the Yellow Sea with multiple sensors for managing the disaster of macroalgal blooms[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 231: 111279.
- [15] 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, 29(5): 44-50.
Cai Xiaqing, Cui Tingwei, Zheng Ronger, et al. Comparison of algorithms for green macro-algae bloom detection based on geostationary ocean color imager[J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(5): 44-50.
- [16] 宋德彬, 高志强, 徐福祥, 等. 基于GOCI的2017年南黄海浒苔演变遥感分析[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 1068-1074.
Song Debin, Gao Zhiqiang, Xu Fuxiang, et al. Spatial and temporal variability of the green tide in the South Yellow Sea in 2017 deciphered from the GOCI image[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2018, 49(5): 1068-1074.
- [17] 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.
- [18] 杨静, 张思, 刘桂梅. 基于卫星遥感监测的2011—2016年黄海绿潮变化特征分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(3): 56-61.
Yang Jing, Zhang Si, Liu Guimei. Variability analysis of the Green Tide based on satellite remote sensing monitoring data from 2011 to 2016 in the Yellow Sea[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(3): 56-61.
- [19] Hu Chuanmin. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2118-2129.
- [20] 肖艳芳, 张杰, 崔廷伟, 等. 海面漂浮绿潮生物量光谱特征及估算模型[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0430001.
Xiao Yanfang, Zhang Jie, Cui Tingwei, et al. Spectral characteristics and estimation models of floating green tide biomass on sea surface[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0430001.
- [21] 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 Guangzong, Wu Mengquan, Sun Xiao, et al. The inter-annual drift and driven force of *Ulva prolifera* bloom in the southern Yel-

- low Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 1084–1093.
- [22] 巩加龙, 肖艳芳, 蔡晓晴, 等. 空间分辨率对绿潮覆盖面积、密集度卫星遥感信息提取的影响[J]. *激光生物学报*, 2014, 23(6): 579–584.
- Gong Jialong, Xiao Yanfang, Cai Xiaoqing, et al. Impact of the spatial resolution of satellite image on the remote sensing monitoring of green macroalgae bloom[J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2014, 23(6): 579–584.
- [23] 袁金金, 冯曦, 冯卫兵. 辐射沙洲地形对南黄海潮汐过程的影响[J]. *科学通报*, 2018, 63(27): 2904–2918.
- Yuan Jinjin, Feng Xi, Feng Weibing. Effects of Radial Sand Ridges on tidal process in the South Yellow Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(27): 2904–2918.
- [24] 张清春, 孔凡洲, 颜天, 等. 苏北浅滩养殖筏架附生绿藻入海过程在黄海绿潮形成中的作用[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(5): 1014–1020.
- Zhang Qingchun, Kong Fanzhou, Yan Tian, et al. Green algae detached from aquaculture rafts into seawater resulted in green tide occurrence in the Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 1014–1020.
- [25] 白雨, 赵亮, 刘境舟. 生态因子在黄海绿潮生消过程中的作用[J]. *海洋学报*, 2019, 41(8): 97–105.
- Bai Yu, Zhao Liang, Liu Jingzhou. The role of ecological factors in the progress of the green tide in the Yellow Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2019, 41(8): 97–105.
- [26] 王俊杰, 于志刚, 韦钦胜, 等. 2017年春、夏季南黄海西部营养盐的分布特征及其与浒苔暴发的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(5): 1045–1053.
- Wang Junjie, Yu Zhigang, Wei Qinsheng, et al. Distributions of nutrients in the western South Yellow Sea in spring and summer of 2017 and their relationship with *Ulva prolifera* outbreaks[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 1045–1053.
- [27] 高嵩, 石晓勇, 王婷. 浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(7): 2204–2209.
- Gao Song, Shi Xiaoyong, Wang Ting. Variation of nutrient concentrations at the inshore coastal area of northern Jiangsu Province and the occurrence of green tide caused by *Enteromorpha prolifera*[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(7): 2204–2209.
- [28] 高嵩, 范士亮, 韩秀荣, 等. 浒苔绿潮与南黄海近岸海域水质的关系[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(1): 213–218.
- Gao Song, Fan Shiliang, Han Xiurong, et al. Relations of *Enteromorpha prolifera* blooms with temperature, salinity, dissolved oxygen and pH in the southern Yellow Sea[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(1): 213–218.
- [29] Li Yan, Song Wei, Xiao Jie, et al. Tempo-spatial distribution and species diversity of green algae micro-propagules in the Yellow Sea during the large-scale green tide development[J]. *Harmful Algae*, 2014, 39: 40–47.
- [30] Vella D, Mahadevan L. The “Cheerios effect”[J]. *American Journal of Physics*, 2005, 73(9): 817–825.
- [31] 乔方利, 王关锁, 吕新刚, 等. 2008与2010年黄海浒苔漂移运输特征对比[J]. *科学通报*, 2011, 56(21): 2236–2242.
- Qiao Fangli, Wang Guansuo, Lü Xin'gang, et al. Drift characteristics of green macroalgae in the Yellow Sea in 2008 and 2010[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(21): 2236–2242.
- [32] Liu Xiangqing, Li Yan, Wang Zongling, et al. Cruise observation of *Ulva prolifera* bloom in the southern Yellow Sea, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 17–22.
- [33] 自然资源部. 2018年中国海洋灾害公报[R]. 北京: 自然资源部, 2019.
- Ministry of Natural Resources. Bulletin of China marine disaster in 2018[R]. Beijing: Ministry of Natural Resources, 2019.

The spatial and temporal distribution of floating green algae in the Subei Shoal in 2018 retrieved by Sentinel-2 images

Yuan Chao^{1,2}, Zhang Jingyu¹, Xiao Jie^{1,2}, Fu Mingzhu^{1,2}, Zhang Xuelei^{1,2}, Cui Tingwei¹, Wang Zongling^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Eco-Environmental Science and Technology, First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: Since 2007, the annually Yellow Sea green tide (YSGT) have caused significant economic losses and serious social impacts in China. Previous research indicated that the floating green algal was originated from Subei Shoal, southwestern Yellow Sea, while the early development of floating green algae in the shoal remains unclear. Using Sentinel-2 high-resolution images, we extracted the floating green algae information in 2018. The effects of topography, sea surface temperature and sea surface wind on the distribution and development of floating green algae were studied using CCMP sea wind data and Microwave+IR Signal Fusion SST sea surface temperature data.

The results showed that the first sign of floating green algae by satellites was detected in the south of Subei Shoal on May 23. The floating green algae expanded northwards in June, and decayed on July 13. The floating green algae could be traced back to the edge of *Prophyra* aquaculture area, aggregated and formed stripes along the sand grooves in the Subei Shoal. These stripes stretched tens of kilometers with width of 10–200 m and existed throughout the development of YSGT. In the region of north to Subei Shoal, the distribution and drifting of floating green algae were highly associated with wind directions. Based on our research, it is feasible and cost-effective to collect and remove the floating algae in the Subei Shoal.

Key words: *Ulva prolifera* green tide; Subei Shoal; Sentinel-2; sea surface temperature; wind direction