

Doi:10.20062/j.cnki.CN37-1453/N.2024.02.003

2011—2021年黄海海域浒苔斑块时空特征分析

刘佳燕¹,吴孟泉¹,郑龙啸²,薛明月¹,刘龙兴¹,刘博文¹

(1.鲁东大学 资源与环境工程学院,山东 烟台 264039;2.中山大学 地理科学与规划学院,广东 珠海 519000)

摘要:近年来中国黄海海域频繁发生浒苔增殖所形成的绿潮灾害,对养殖业、旅游业等产生了严重影响。本研究基于多源遥感数据,对2011—2021年黄海海域浒苔信息进行提取,对其时空分布特征进行分析,并从斑块角度探讨温度及风对其生消的影响。研究结果显示:浒苔最初于5月末在江苏盐城海域附近被监测,6月末至7月初覆盖面积达到峰值,7月末至8月初在青岛海域消亡;浒苔斑块在生长阶段连通性、聚集度逐渐增强,分离度降低,在消亡阶段,斑块零散,连通性、聚集度减弱,分离度增加;低于25℃时,随温度升高浒苔覆盖面积增加,高于25℃后,温度则是浒苔分布的非主导因素;此外,浒苔的漂移路径与风向高度契合。本研究通过探讨浒苔灾害时空演变过程及成因,为制定有效预防和管理策略,减少潜在风险提供科学依据。

关键词:浒苔;时空特征;斑块;生态因子;黄海

中图分类号:X834;X87 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2024)02-0113-10

浒苔灾害已经成为我国主要海洋灾害之一,严重破坏了近海海洋生态环境^[1]。在适宜的环境下,浒苔常表现为一种优势种,其整体管状、中空的结构特点使其能够成片聚集漂浮在海面上^[2]。浒苔生命周期结束后,大量死亡体会沉降至水底,释放有机物和硫化物,导致海水中溶解氧的消耗,为厌氧微生物提供适宜的生存环境^[3-6]。这些现象不仅会影响水生生物的生长、繁殖,还对附近沿海地区的交通运输、养殖业和旅游业产生负面影响。因此,浒苔灾害所引发的问题不仅局限于海洋生物层面,也扩展至人类社会及经济领域。

浒苔年际间的时空演变过程较为类似,但历年的暴发时间、规模及其演变的特征等存在一定的差异。袁超等^[7]利用哨兵2号(Sentinel-2)数据发现:2018年浒苔五月中旬便被探测到,7月中旬消失,其分布走向与盛行风向密切相关。何恩业等^[8]采用多源卫星数据分析了浒苔灾害时空演变规律,指出浒苔的生长周期可以划分为暴发、发展、盛期、消衰和结束5个阶段。卫星遥感具有较高的轨道高度和宽阔的视场,能够在单次扫描中覆盖广泛的地理区域,因此已成为广泛用于浒苔监测的重要方

法^[9-14]。詹雅婷等^[15]利用遥感监测手段进行图像拉伸以及背景水体特征对比,最终采用了NDVI提取绿潮。宋德彬等^[16]利用GOCI高时间分辨率遥感影像,比较了NDVI、IGAG和KOSC3种绿潮主流算法的探测能力,结果显示NDVI算法在探测能力和稳定性方面优于其他算法。浒苔作为一种大型漂浮绿藻,其灾害的产生与南黄海海域水文气象要素变化以及生态环境因子的影响密不可分。本研究将基于HJ-1数据和MODIS数据进行浒苔信息的提取,探讨浒苔多年时空特征分布规律;同时,结合景观格局指数对浒苔斑块的反映,探讨温度及风对浒苔斑块不同生长阶段的影响机制,旨在为未来预防与应对浒苔灾害提供科学支持,保护近海生态环境的稳定与可持续发展。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

研究区位于南黄海海域,包括山东半岛海域和江苏海域北部(119°E~123°E,32°N~38°N)地

收稿日期:2023-10-11;修回日期:2024-01-10

基金项目:国家自然科学基金(42071385);烟台市科技创新发展计划重点研发类项目(2022MSGY062);高分辨率对地观测系统国家科技重大专项(79-Y50-G18-9001-22/23);山东省海上航天装备技术创新中心(鲁东大学)开放课题基金(MAETIC2021-12);山东省科技型中小企业技术创新能力提升工程项目(2022TSGC2371);烟台市科技发展计划项目(2022MSGY057)

通信作者简介:吴孟泉(1975—),男,教授,硕士研究生导师,博士,研究方向为海洋环境遥感、空间分析及3S应用研究。E-mail:ld_wmq@ldu.edu.cn

区(图1),途径盐城、日照、青岛、烟台等多个城市。这一地理位置具有广阔的海岸线和四季分明的气候,夏季温暖而潮湿,气温适宜,为浒苔的生长提供了良好条件。其中江苏近岸地形复杂,具有特殊的海洋动力环境,其水文主要受到苏北沿岸流、黄海冷水团以及长江冲淡水的影响,夏季在苏北浅滩海域会出现显著的上升流^[17]。适宜的温度、丰富的营养盐供给、海洋环流和潮汐运动对该地区浒苔的生长、分布以及演变具有重要影响。

1.2 数据来源

本文利用环境卫星(HJ-1 A/B CCD)数据(<http://www.cresda.com/CN/>)、MODIS数据(<http://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)提取了2011—2021年南黄海海域浒苔信息,利用海温数据(<http://apps.ecmwf.int/registration/>)和海面风场数据进行分析。本文共使用了2011—2021年5—8月的98个日期影像,其中包括45个日期的HJ-1A/1B和53个日期的MODIS影像。

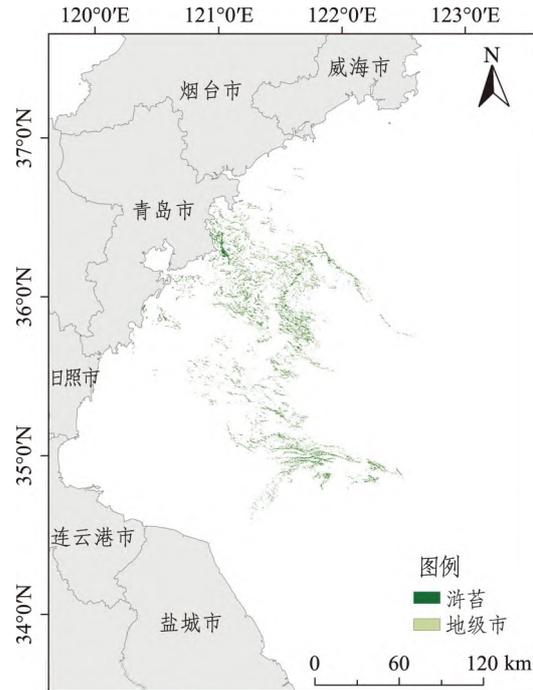


图1 研究区示意图(浒苔提取日期为2021-07-18)
Fig. 1 Schematic map of the study area(Ulva prolifera extraction date 2021-07-18)

表1 2011—2021年HJ-1A/1B CCD影像和MODIS影像的成像日期

Tab. 1 Imaging dates for HJ-1A/1B CCD images and MODIS images from 2011 to 2021

年份	成像日期	
	HJ-1A/1B 数据	MODIS 数据
2011	5-28,6-27,7-9,7-28,8-9	6-15,6-19,7-4
2012	5-21,6-3,6-12,6-20,6-22,8-6	5-28,7-11
2013	5-7,5-20,6-26,7-24,	5-13,6-3,6-29,8-5
2014	5-22,7-3,7-18,7-21,8-1	5-30,6-13,6-24,6-30,7-14,7-26
2015	6-3,6-6,6-12,7-14,8-5,8-13,8-17	5-20,6-21,7-4,7-30
2016	6-17,7-22,7-25,7-30	5-17,6-1,6-13,6-25,7-14
2017	7-8,7-11,7-28	5-24,5-28,6-4,6-8,6-11,6-17,6-27
2018	6-24	6-12,6-21,6-29,7-16
2019	6-7,6-11,6-23	5-20,5-29,6-3,7-2,7-8,7-20,8-16,8-20
2020	6-1,6-21,7-1	5-18,5-27,6-8,7-10,7-20
2021	5-31,6-21,6-23,7-14	5-21,5-28,7-9,7-18,8-11

2 研究方法

2.1 浒苔信息提取方法

根据浒苔光谱数据,本研究采用NDVI对浒苔分布信息进行遥感提取。即使在有薄云的情况下NDVI也能较好地提取浒苔的特性,因而受到广泛应用。浒苔的光谱曲线在可见光至近红外波段与植被的光谱曲线极为相似,浒苔越厚在近红外反射率越大,与红光(680 nm)处的吸收谷的反差也越显著,与水体的光谱存在明显差异^[18-23]。

此外,水体的NDVI表现为负数值,而大气云团的NDVI值略低于周边植被的NDVI值^[24]。NDVI的计算公式为:

$$I_{NDVI} = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$$

其中: R_{NIR} 、 R_{RED} 分别表示近红外波段和红光波段的遥感反射率。

对生成的单波段NDVI影像进行阈值分割,通过设置合理的NDVI阈值以提取浒苔信息^[25],有效实现了针对浒苔分布区域的精确提取与划分。在浒苔稀疏的情况下,因受水体对光谱吸收的影响,NDVI方法对浒苔提取有一定的局限性,

因此在阈值分割之后需进行人工辅助判读来对漏提或错提的浒苔进行补充或修改,以获得准确度较高的浒苔分布信息。

2.2 景观格局指数

景观格局指数是用于描述景观空间结构特征的参数。许多景观格局指数之间存在高相关性,并各自侧重不同的方面^[26-28]。在以往的研究中,

前人主要将景观格局指数应用于土地利用方面,本研究将浒苔斑块与景观格局指数相结合,选取斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、蔓延度指数(CONTAG)和分离度指数(SPLIT),对 2011—2021 年南黄海海域的浒苔斑块的景观格局指数(表 2)进行分析,以进一步探讨温度对浒苔斑块之间连通性、破碎化等指标的影响。

表 2 景观格局指数
Tab.2 Landscape pattern indexes

指数名称	单位	生态含义	公式
斑块密度 (PD)	个·ha ⁻²	体现某个景观类型斑块的个数与整体景观面积的比值。	$I_{PD} = \frac{N}{A}$
景观形状指数 (LSI)	个·ha ⁻²	体现了景观中斑块形状的变化规律,值越大,则景观中某斑块形状不规则情况增加。	$I_{LSI} = \frac{0.25E^*}{\sqrt{A}}$
蔓延度指数 (CONTAG)	%	表示景观中不同斑块类型之间的团聚程度或蔓延趋势。	$I_{CTG} = 1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m \left[P_i \times \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right] \times \left[\ln \left(P_i \times \frac{g_{ik}}{\sum_{k=1}^m g_{ik}} \right) \right]}{2 \ln m}$
分离度指数 (SPLIT)		直接表示景观的整体破碎化程度,该值越高,则表明人类活动对景观的影响越大。	$I_{SPLIT} = \frac{A^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij}^2}$

注: N 表示景观中的斑块总数; A 表示景观总面积(m²); E* 表示景观边缘总长(m); P_i 表示斑块类型所占景观比例; g_{ik} 表示基于双重计数法的 i 和 k 类型像素之间的邻接数; m 表示斑块类型数; a_{ij} 表示斑块面积(m²)。

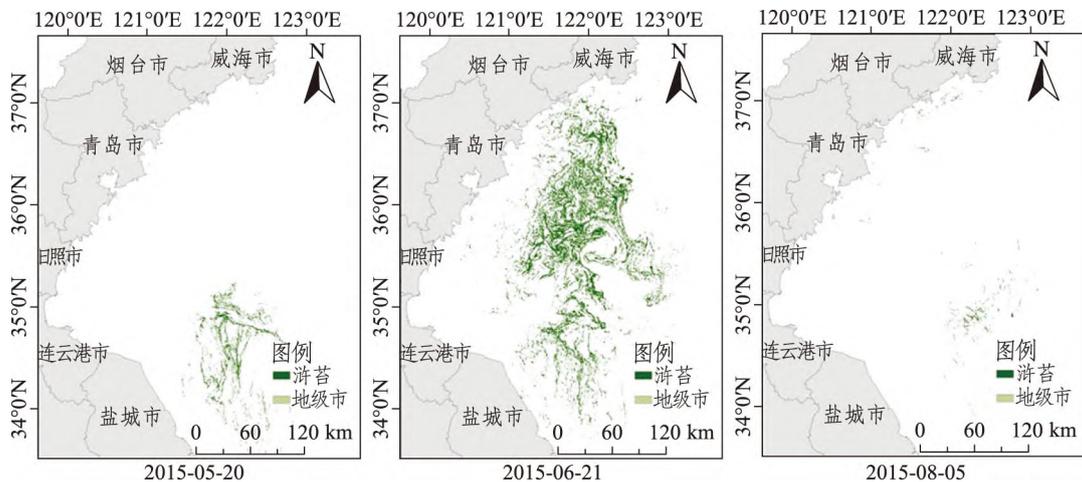
3 结果与分析

3.1 浒苔时空特征分析

由于 2015、2019 和 2021 年呈现出典型的浒苔生长周期现象,即“出现-发展-暴发-衰退-消亡”5 个阶段,所以用此 3 年作为典型代表绘制浒苔时空分布图(图 2)。

对浒苔暴发时间和覆盖面积进行拟合分析(结果见图 3)可知:得到浒苔最初被监测的时间主要集中在第 130 天左右,即 5 月中下旬;随着时

间的推移,浒苔的分布面积逐渐增加,在 6 月份达到了浒苔覆盖面积分布的峰值;此后,浒苔覆盖面积开始减少,分布范围逐渐收缩,进入消亡期,最终浒苔被监测到的时间为 7 月末 8 月初。浒苔灾害分布年际之间差异不大,个别年份因卫星数据云层阻挡或卫星数据时间分辨率等因素影响,存在漏提问题。为此参考《中国海洋灾害公报》对卫星数据进行补充,其中 2016 年 5 月 10 日在江苏盐城以东海域发现绿海藻,较早于 5 月中旬;2021 年 5 月 17 日卫星首次在苏北浅滩附近海域发现成规模浒苔绿潮,符合卫星数据浒苔时间分布变化规律中的最初于 5 月中旬被卫星监测到。



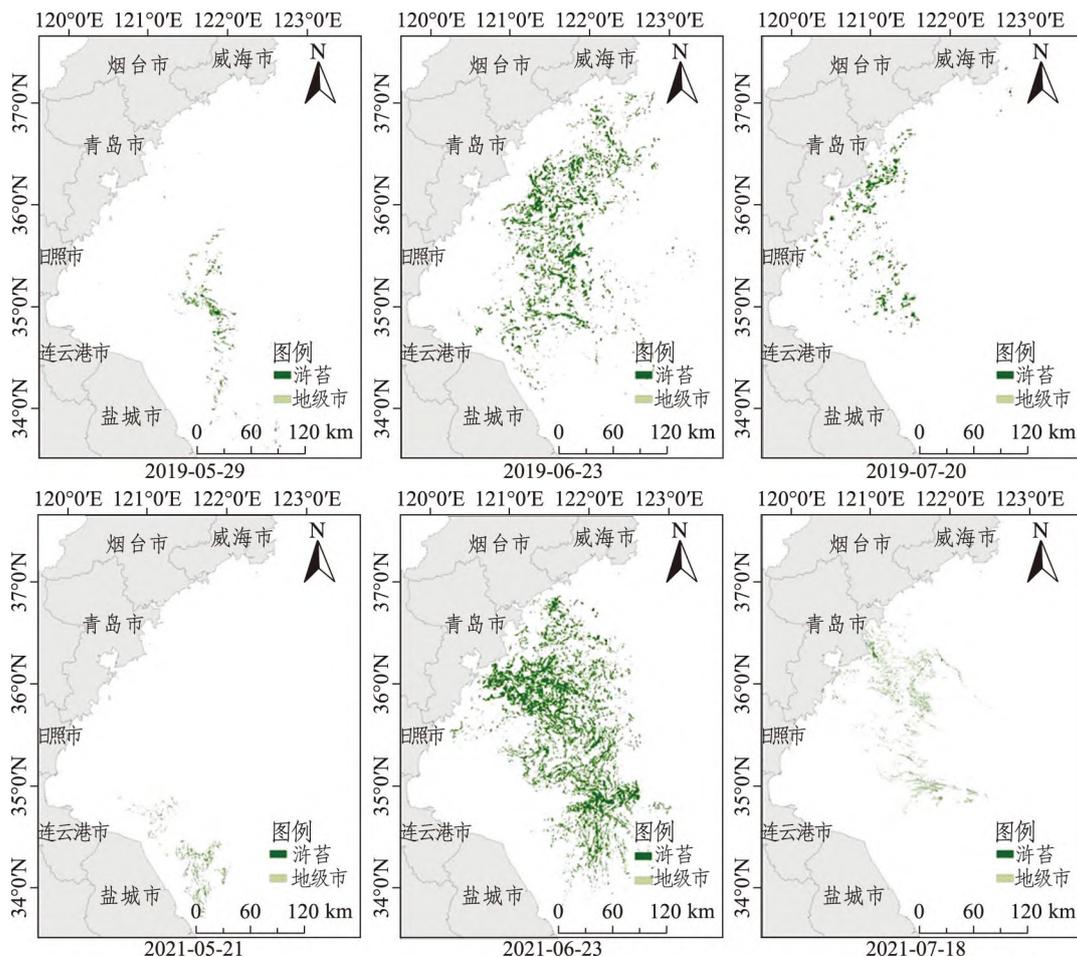
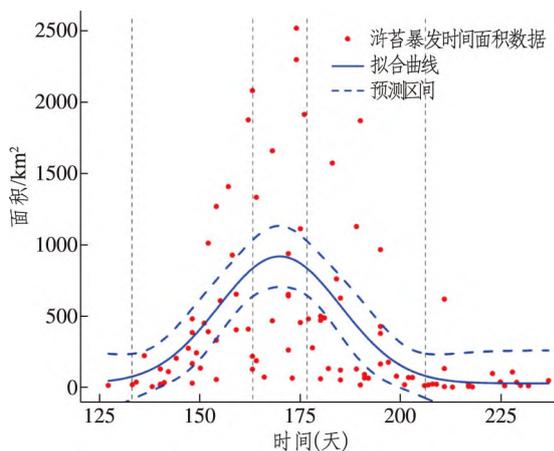


图2 浒苔时空分布图(2015、2019、2021年)

Fig. 2 Spatial and temporal distributions of *Ulva prolifera* (2015, 2019, 2021)



注:时间(天)表示一年中的第几天。

图3 浒苔暴发时间和覆盖面积拟合分析

Fig. 3 Fitting analysis of *Ulva prolifera* outbreak time and area covered

在浒苔的空间分布特征方面,初期浒苔的分布位置主要集中在江苏盐城东部、苏北浅滩海域附近。随着时间的推移,浒苔向北偏西方向海域

扩散漂移,最终在山东南部海域发生显著的暴发性增长,并达到空间分布的峰值,陆续影响了青岛、日照、烟台等近岸海域。此后,浒苔分布呈现逐渐减弱的趋势,进入消亡期,最终监测地点多为山东青岛海域。

根据 2011—2021 年浒苔漂移路径(图 4)可将近 10 年的浒苔漂移分为北向型、北向偏西型、北向摇摆型。

综合近 10 年的浒苔时空特征分布规律,发现浒苔的生长暴发符合其他学者^[29—30]所归纳的 5 个阶段周期“出现-发展-暴发-衰退-消亡”。在 5 月中下旬,江苏滩涂及其东部海域首次出现浒苔踪迹,随后 6 月份浒苔迅速增长暴发,表现出明显的空间扩张趋势,在 6 月下旬的山东南部海域浒苔覆盖面积达到峰值,并持续一段时间。7 月初成片堆积的浒苔已漂移至山东青岛海域,其生长态势开始转变,覆盖面积逐渐减少,进入衰退阶段,部分年份可能会出现浒

苔暴发持续时间较长情况,但通常在 7 月末至 8 月初,浒苔灾害将会在青岛近岸海域结束其生

长周期。其漂移路径可分为北向型、北向偏西型、北向摇摆型。

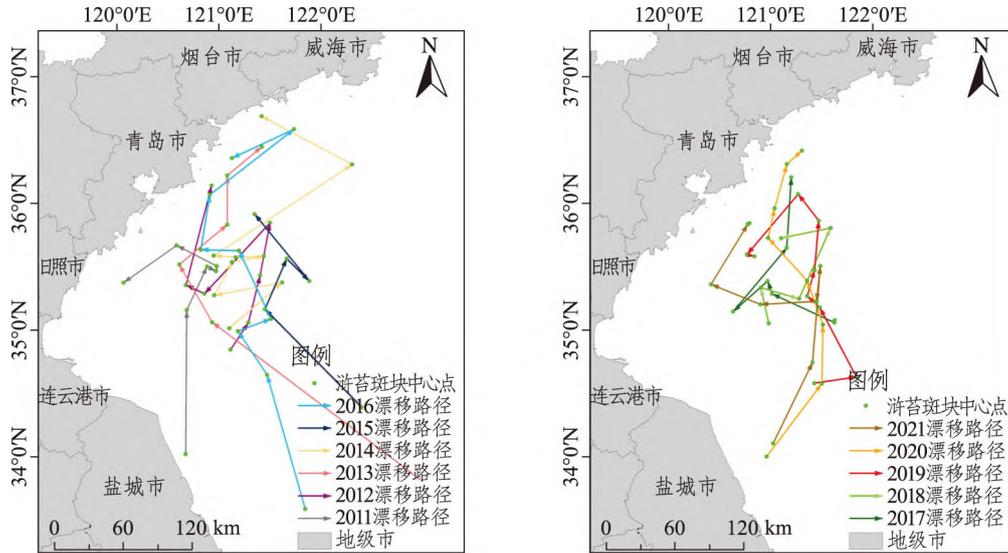


图 4 2011—2021 年浒苔漂移路径

Fig. 4 Drift paths of *Ulva prolifera* from 2011 to 2021

3.2 景观指数特征分析

斑块是具有一定内部均质空间的非线性的空

间单元,且与周围地区有本质性的差异^[31]。通过对 2011—2021 年浒苔斑块进行解译分析,得出相应的景观格局指数(图 5)。

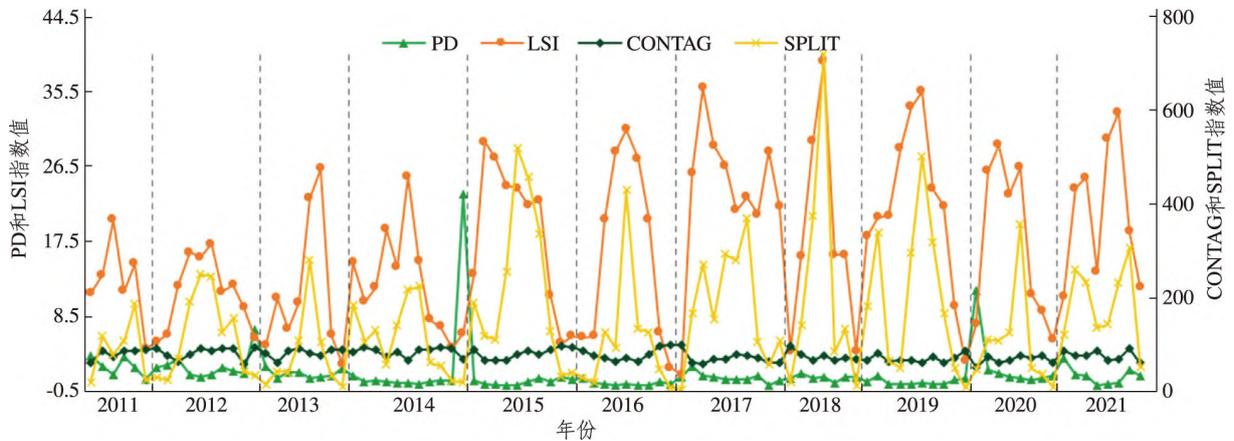


图 5 2011—2021 年浒苔斑块景观格局指数

Fig. 5 Landscape pattern indexes for *Ulva prolifera* patches from 2011 to 2021

斑块密度(PD)作为一项关键指标,能够有效地传达浒苔斑块空间特征。由图 5 可知:2011—2021 年的浒苔 PD 指数每年变化幅度不大,个别年份存在异常值现象,总体呈现先增长后下降的变化趋势。在浒苔生长阶段,此时斑块较为分散,导致 PD 较低。在暴发阶段,板块数量的增长速度较覆盖面积慢,则 PD 出现了显著的增加,甚至在短时间内呈现数倍增长。随着浒苔消亡,覆盖

面积减少,由于覆盖面积的下降速度快于斑块数量,导致 PD 呈现增加趋势。

景观形状指数(LSI)表示斑块形状的变化,值越大则斑块形状越不规则。图 5 中 LSI 每年总体变化趋势为先上升后下降。在浒苔生长阶段斑块较小,形状相对规则,导致较低的 LSI 值。随着浒苔生长进入暴发阶段,斑块连接增多,形状更加多样化,如稀疏或密集分布、条状带状分布,这种

复杂的斑块形状变化导致了 LSI 值的相对增加。在消亡阶段,斑块逐渐减小且分散,恢复到规则分布状态,使 LSI 值下降。

蔓延度指数(CONTAG)用于评估景观斑块集聚和蔓延程度,在景观格局研究中起重要作用。图5中CONTAG值无明显波动变化,表明浒苔斑块在生长周期中具有稳定的连通性。

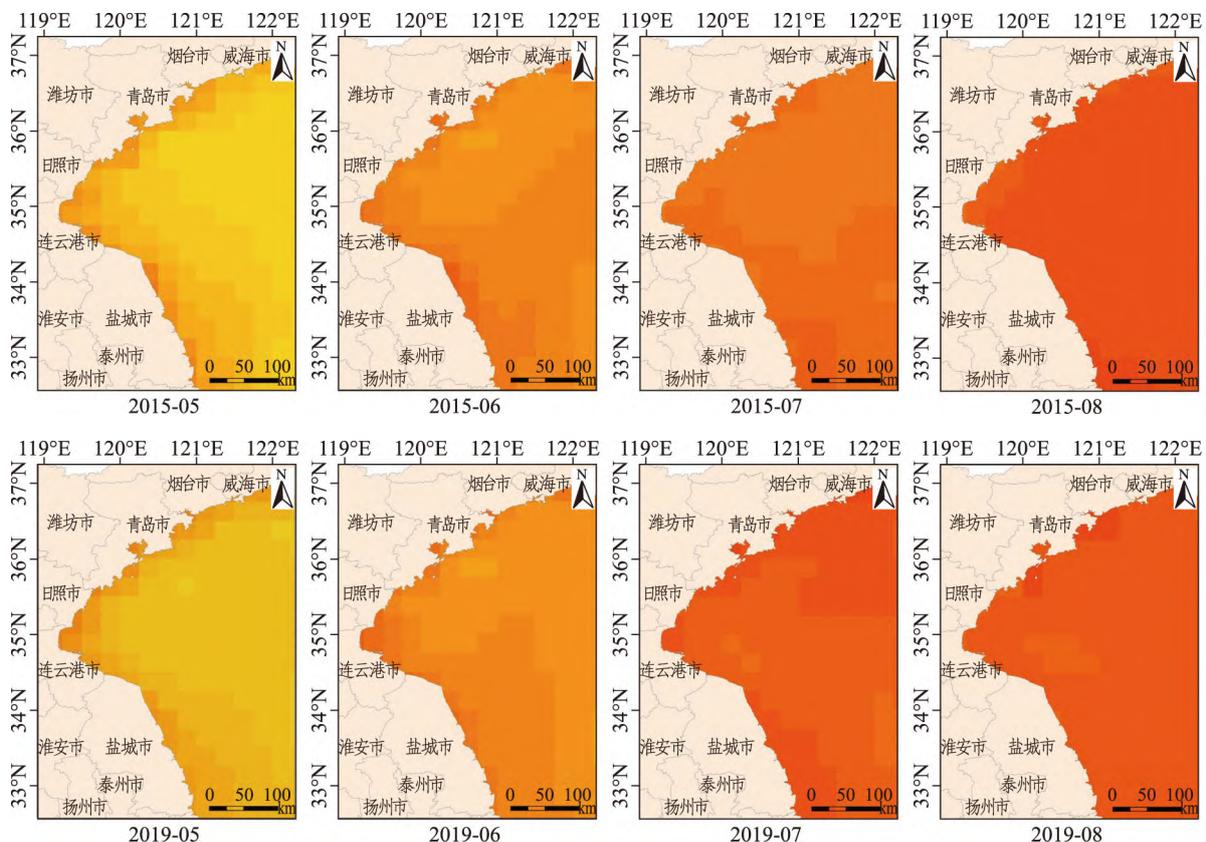
分离度指数(SPLIT)类似于CONTAG,能够反映景观的破碎程度。当景观由单个大斑块组成时,SPLIT随着焦点斑块类型面积的减少和细分而增加。浒苔进入暴发阶段,SPLIT值增加,表明浒苔的生长增强了斑块间的连通性,降低了分离度;随着浒苔进入消亡阶段,SPLIT值存在不同程度的降低,斑块分布零散,连通性减弱,分离度增加。与CONTAG值不同的是,SPLIT值显示浒苔斑块在2011—2021年每年存在两个增长期,这意味着分离程度存在两个峰值。

综上所述,在浒苔生长阶段,浒苔斑块密度低,形状规则,连通性低。在浒苔暴发阶段,浒苔斑块密度较高,形状多样化,具有良好连通性。在浒苔消亡阶段,浒苔斑块密度低,形状较为规则,破碎化程度高。

3.3 温度对浒苔斑块的影响

温度对浒苔的生长存在一定的影响^[32—36]。本文运用GEE平台获取南黄海海域2011—2021年海表温度数据,将其导入ArcGIS进行数据处理,得到5—8月份的月平均海表温度时空分布图(图6)。

依据图6可知,南黄海海域5月份的平均海表温度范围为16.5~18℃,6月份为19~22℃,7月份为23~26℃,而8月份为27~30℃。结合前人的相关研究^[37—38],对浒苔面积与海表温度进行分析(结果见图7),发现浒苔面积的变化与25℃有着密切联系。当海表温度低于25℃时,浒苔处于生长暴发阶段;当海表温度高于25℃时,浒苔的生长速度开始小于消亡速度,覆盖面积开始减小。2014年海表温度于7月份达到25℃,浒苔的生长受到影响,该年的最大覆盖面积为760.06 km²,海表温度与浒苔覆盖面积的 R^2 为0.7504。相反,2015年海表温度较晚达到25℃,导致浒苔的生长阶段延长,最大覆盖面积达到了2078.80 km²,海表温度与浒苔覆盖面积的 R^2 为0.8312。



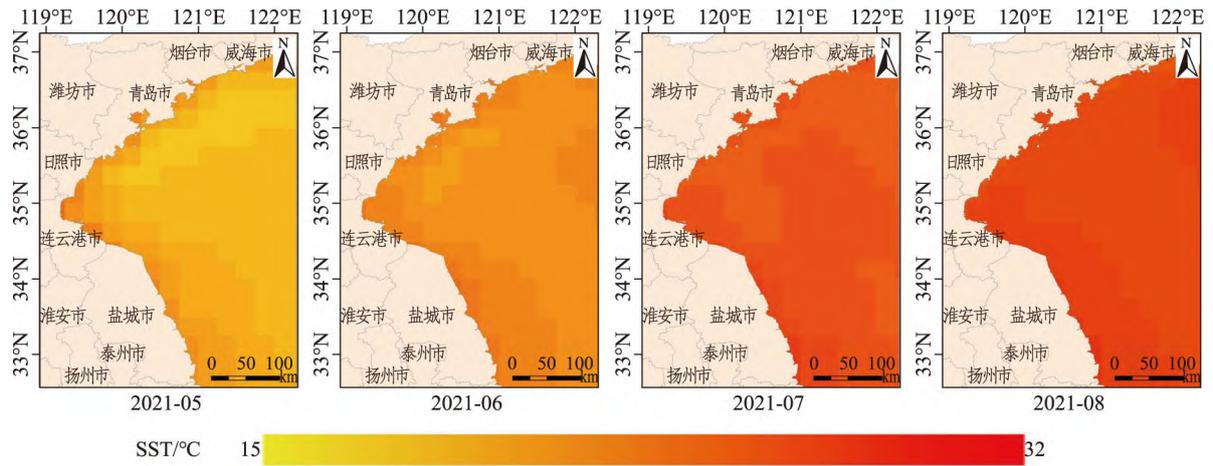


图 6 月平均海表温度时空分布图(以 2014,2015,2016 和 2017 年为例)

Fig. 6 Temporal and spatial distributions of monthly mean sea surface temperature (using 2014,2015,2016 and 2017 as examples)

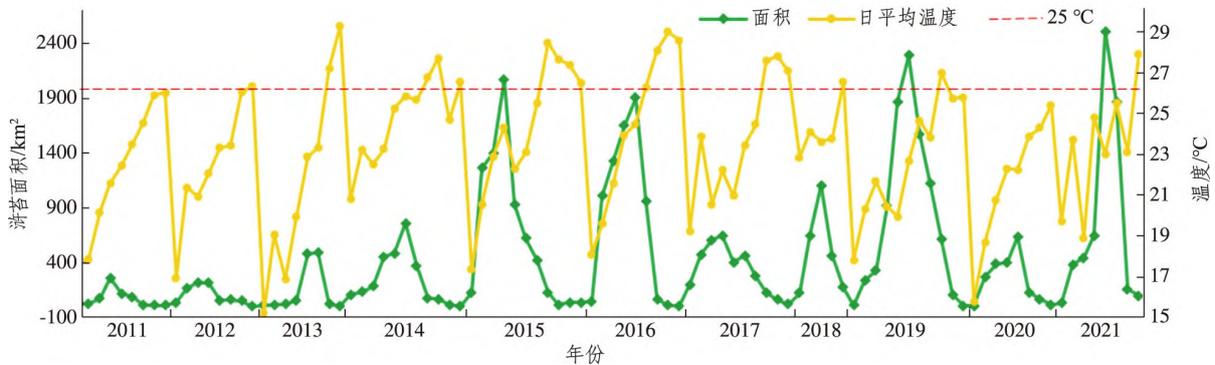


图 7 日平均海表温度与浒苔面积统计图

Fig. 7 Statistical chart of monthly average sea surface temperature and area of *Ulva prolifera*

在空间上,江苏滩涂海域每月平均温度较山东海域每月平均温度高 1~2 °C,海表温度呈现由江苏滩涂海域向山东海域方向递减的分布趋势,与浒苔的生长和漂移方向相一致,这种分布特征与纬度分布位置和季节更替存在密切关联。值得注意的是,温度的年际变化差异不明显,存在的个别节点可能与突发的天气情况相关,但这并不影响总体温度与浒苔面积之间的相关性。

为进一步探讨温度对浒苔斑块的影响,本文对研究区海表温度与浒苔斑块的景观格局指数进行分析,结果见图 8。浒苔斑块密度与蔓延度指数随着海表温度的逐渐升高并未显示明显变化,表明海表温度对浒苔斑块密度和蔓延度影响有限。景观形状指数呈现数值先增大后减小的趋势,即在暴发阶段,温度适宜生长时,LSI 值增大,浒苔斑块逐渐不规则;当海表温度超过 25 °C 时,浒苔基本进入消亡期,LSI 值开始降低,浒苔斑块趋于规则。分离度指数随着海表温度的升高先增大后减小,即在暴发阶段,SPLIT 逐渐增大,浒苔

斑块之间的连通性增强;随着海表温度的增加,超过 25 °C 时,浒苔斑块之间连通性降低,分布呈现零零散散。

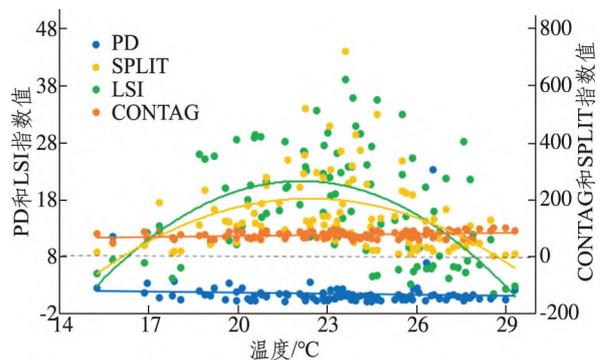


图 8 日平均海表温度与浒苔斑块景观格局指数

Fig. 8 Daily average sea surface temperature and landscape pattern index of *Ulva prolifera* patches

总的来说,景观格局指数可反映浒苔斑块之间的连通性、破碎化等特征指标,把这些特征指标与温度进行相关性分析会发现存在关联性,即在

浒苔生长周期的两端,浒苔斑块较为破碎;而暴发峰值阶段,浒苔蔓延度指数升高,破碎化程度降低,这与海表温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 促进浒苔生长存在联系,但不显著,即温度并不是浒苔斑块之间各指标现象的主要形成因素。

3.4 风对浒苔斑块的影响

本文整理了南黄海海域 2011—2021 年月平均海面风场数据(图 9),将其与浒苔漂移路径图(图 4)进行对比分析。

浒苔的漂移路径可分为北向型、北向偏西型、北向摇摆型。由图 9 可知:每年 5 月份,在山东江苏海域,东南风和南风多呈现主导风向,其风速平均在 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间;随后,6、7 和 8 月,风向逐渐趋向东风和东南风,其平均风速在 $5\sim 7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间。其中 2021 年较之前平均风力再次增加,7 月份海表面风速达到了 $7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,江苏滩涂海域达到了 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向依旧以东南风为主,浒苔 2021 年漂移路径也存在大幅向西漂移现象。总体上看,浒苔斑块的漂移路径受到海面风场的影响。

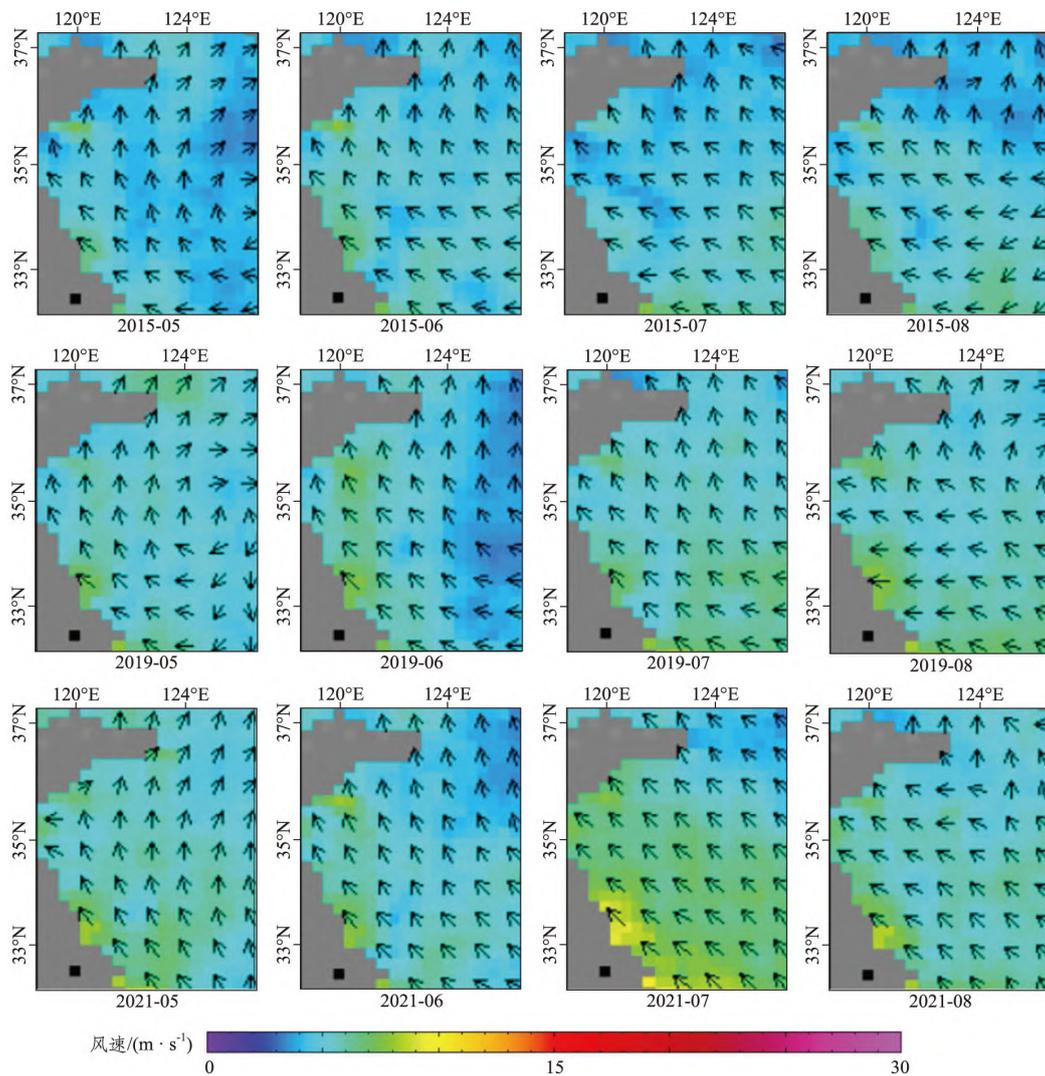


图 9 月平均海面风场数据(以 2015、2019、2021 年为例)

Fig. 9 Monthly data of sea surface wind field (using 2015, 2019 and 2021 as examples)

4 结论

本研究利用 HJ-1 A/B CCD 数据和 MODIS 数据,探究了近 10 年南黄海浒苔的时空变化,分析了

温度对浒苔斑块 4 种指标的影响,得出如下结论。

1) 在 2011—2021 年间,浒苔最初被监测到的时间为 5 月中下旬,主要分布在江苏滩涂海域附近,6 月份覆盖面积达到峰值,7 月末至 8 月初在青岛附近海域消亡。

2) 在海表温度低于 25 ℃ 时,温度与浒苔覆盖面积呈正相关;海表温度高于 25 ℃ 时,温度不再是影响浒苔覆盖面积的主要因素。

3) 温度对浒苔斑块之间的连通性、破碎化等特征指标存在一定的影响,但影响不显著。

4) 浒苔漂移路径可以分为北向型、北向偏西型、北向摇摆型,与海面风场方向相一致。

参考文献:

- [1] 蒋雪蕾,周晓见,林佳宁,等. 黄海浒苔绿潮生态效应研究进展[J]. 海洋环境科学,2021,40(4):647-652.
- [2] 王广策,王辉,高山,等. 绿潮生物学机制研究[J]. 海洋与湖沼,2020,51(4):789-808.
- [3] 宋晓丽,黄蕊,苑克磊,等. 山东半岛东部沿海绿潮灾害的发生特点[J]. 海洋环境科学,2015,34(3):391-395.
- [4] 刘海龙,邢前国,丁静,等. 漂浮大型藻运移高分辨率遥感观测:以黄海浒苔绿潮为例[J]. 遥感学报,2023,27(1):187-196.
- [5] SUN X, WU M Q, XING Q G, et al. Spatio-temporal patterns of *Ulva prolifera* blooms and the corresponding influence on chlorophyll - a concentration in the Southern Yellow Sea, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 640(11):807-820.
- [6] GAO G, ANTHONY S C, CRAIG R, et al. Intrinsic and extrinsic control of reproduction in the green tide-forming alga, *Ulva rigida* [J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 139(7):14-22.
- [7] 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.
- [8] 何恩业,季轩梁,黄洪辉,等. 近10a 黄海浒苔绿潮时空分布特征分析[J]. 海洋预报,2021,38(6):1-11.
- [9] 万剑华,万献慈,刘善伟,等. 多指数决策融合的MODIS 浒苔提取方法[J]. 海洋环境科学,2022,41(2):316-324.
- [10] 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.
- [11] 郑翔宇,高志强,徐福祥,等. 基于VB-FAH指数的黄海绿潮遥感监测及对比研究[J]. 海洋科学,2017,41(5):71-79.
- [12] 刘帆,赵耀龙,徐涛. 全生命周期浒苔信息提取的空间尺度效应:基于Landsat/HJ与MODIS影像的比较[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2020,45(4):41-49.
- [13] 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.
- [14] FAN S L, FU M Z, WANG Z L, 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(9):23-28.
- [15] 詹雅婷,王玉军,宋珂,等. 南黄海海域2021年绿潮的遥感监测与分析[J]. 地质学刊,2022,46(3):300-304.
- [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.
- [17] 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(中文版),2012,34(6):187-194.
- [18] 安德玉,邢前国,魏振宁,等. 黄海典型漂浮大型藻类光谱特征分析[J]. 海洋与湖沼,2018,49(5):1054-1060.
- [19] 白羽. 基于自适应NDVI阈值的青岛海域浒苔监测研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2014.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 郑龙啸,吴孟泉,赵杰,等. 南黄海金潮的遥感监测及时空分布特征研究[J]. 海洋学报,2022,44(5):12-24.
- [23] XIAO J, FAN S L, WANG Z L, et al. Decadal characteristics of the floating *Ulva* and *Sargassum* in the Subei Shoal, Yellow Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2020, 39(11):1-10.
- [24] JOHN K K, LIU D Y, SHI Y J, et al. Abiotic factors influencing biomass accumulation of green tide causing *Ulva* spp. on *Pyropia* culture rafts in the Yellow Sea, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016, 105(1):88-97.
- [25] EDUARDO C, ABIGAIL U M, MARIA D L Á. A satellite remote-sensing multi-index approach to discriminate pelagic *Sargassum* in the waters of the Yucatan Peninsula, Mexico [J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(11):3608-3627.
- [26] 宁启蒙,欧阳海燕,汤放华,等. 土地利用变化影响下洞庭湖地区景观格局的时空演变[J]. 经济地理,2020,40(9):196-203.
- [27] 梁庆璇,廖超明,滕永核,等. 南宁市主城区土地利用景观格局变化及驱动力研究[J]. 江苏农业科学,2021,49(2):187-193.
- [28] 徐逸飞,冯一凡,杨金明,等. 基于Arcgis和Fragstats

- 的大沽河河口候鸟栖息地生境格局分析与优化[J]. 中国城市林业, 2022, 20(6): 48-56.
- [29] 孙晓. 黄海绿潮和叶绿素 a 浓度的遥感时空分异及两者响应机制[D]. 烟台: 鲁东大学, 2018.
- [30] 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.
- [31] 于婧, 陈艳红, 彭婕, 等. 基于 GIS 和 Fragstats 的土地生态质量综合评价: 以湖北省仙桃市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2932-2943.
- [32] 孟晓智, 苏贵森, 卓品利, 等. 温度和光照强度对浒苔生长和光合生理特性的影响[J]. 生物学杂志, 2018, 35(4): 49-52.
- [33] 耿倩倩, 陈晶, 李鸿妹, 等. 温度对浒苔降解过程中溶解有机物释放及其组成的影响[J]. 渔业科学进展, 2020, 41(2): 27-34.
- [34] 孙晓, 吴孟泉, 何福红, 等. 2015 年黄海海域浒苔时空分布及台风“灿鸿”影响研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(5): 921-930.
- [35] 郝雅, 管晨, 侯承宗, 等. 苏北浅滩筏架附生绿藻群落结构变化及与环境因子的相关性探究[J]. 海洋与湖沼, 2021, 52(1): 123-131.
- [36] GRABA A C, LOFFLER Z, MCCLURE E C, et al. Impaired growth and survival of tropical macroalgae (*Sargassum* spp.) at elevated temperatures [J]. Coral Reefs, 2020, 39(3): 475-486.
- [37] XUAN J Y, ZHOU F, HUANG D J, et al. Physical processes and their role on the spatial and temporal variability of the spring phytoplankton bloom in the central Yellow Sea [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(1): 61-70.
- [38] ZHENG L X, WU M Q, ZHOU M, et al. Spatiotemporal distribution and influencing factors of *Ulva prolifera* and *Sargassum* and their coexistence in the South Yellow Sea, China [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 2022, 40(3): 1070-1084.

Spatiotemporal Characteristics of *Ulva Prolifera* Patches in the Yellow Sea from 2011 to 2021

LIU Jiayan¹, WU Mengquan¹, ZHENG Longxiao², XUE Mingyue¹, LIU Longxing¹, LIU Bowen¹

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China;

2. School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519000, China)

Abstract: In recent years, the green tide disaster caused by *Ulva prolifera* proliferation has occurred frequently in the Yellow Sea area of China, which has had a serious impact on aquaculture and tourism. In this study, based on multi-source remote sensing data, the informations of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea from 2011 to 2021 were extracted, its spatial and temporal distribution characteristics were analyzed, and the effects of temperature and wind on its growth and disappearance from the perspective of patches were explored. The results are as follows. *Ulva prolifera* was initially detected at the end of May in the vicinity of Yancheng Sea, Jiangsu Province, and its coverage peaked at the end of June and the beginning of July, and then died out at the end of July and the beginning of August in the Qingdao Sea. *Ulva prolifera* patches gradually increased connectivity and aggregation, and decreased the degree of separation during the growth stage, and during the extinction stage, the patches were fragmented, and the connectivity and aggregation weakened, and the degree of separation increased. Below 25 °C, the area covered by *Ulva prolifera* increased with increasing temperature, while above 25 °C, temperature was a non-dominant factor in the distribution of *Ulva prolifera*. Moreover, the drift path of *Ulva prolifera* was highly compatible with the wind direction. This study explores the spatial and temporal evolution of *Ulva prolifera* disaster and its causes, and provides a scientific basis for the development of effective prevention and management strategies to reduce potential risks.

Keywords: *Ulva prolifera*; spatiotemporal characteristics; patches; ecological factors; the Yellow Sea

(责任编辑 李秀芳)