

近10 a 黄海浒苔绿潮时空分布特征分析

何恩业¹, 季轩梁¹, 黄洪辉^{2,3,4}, 王丹¹, 郭茂华^{5,6}, 高姗¹, 杨静¹

(1. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东广州 510300; 3. 广东省渔业生态环境重点实验室, 广东广州 510300; 4. 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东广州 510300; 5. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 6. 自然资源部空间海洋遥感与应用研究重点实验室, 北京 100081)

摘要: 收集和整理了2010—2019年黄海绿潮卫星遥感影像资料, 对黄海浒苔暴发期间生长消亡过程的年际变化、季节变化、暴发源地、历年漂移路径特征、发展规模及影响区域等进行了长时间尺度和多角度的分析和对比。结果表明: 历年卫星首次发现浒苔的区域均位于江苏盐城以东海域, 浒苔暴发时间集中在5月中旬—下旬, 经过10~20 d的聚集发展进入盛期, 6月中旬—7月上旬覆盖面积达到顶峰, 7月中下旬盛期结束, 之后进入半个月—一个月的消衰期, 整个灾害过程平均持续期约84 d。黄海浒苔成灾期间, 其覆盖面积的增减变动速率并不均匀, 具有跳变现象, 日均最大增长率出现在5月中旬—下旬, 其值可达22.6%; 日均最大衰减率出现在7月中旬—下旬, 约为12.3%。统计显示, 近10 a黄海浒苔的生长消亡过程、最大分布规模及其分布形态以及漂移路径均存在明显差异, 可能与历年环流形势和环境条件有关, 浒苔漂移路径和发展规模对未来影响岸段以及致灾程度起到决定性作用。此外, 近5 a黄海浒苔覆盖面积整体呈减小趋势, 但浒苔影响范围(分布面积)呈波动增大趋势, 分布范围由近海向外海扩展, 影响岸段由山东半岛以南的中西部沿海区域向东部岸线延伸。

关键词: 浒苔; 绿潮; 时空分布; 年际变化; 漂移路径; 黄海

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)06-0001-11

1 引言

近13 a来, 我国黄海中南部海域每年都会发生大规模浒苔绿潮灾害, 给江苏和山东沿海地区的水产养殖、海运交通、水上活动和生态环境造成重大影响^[1-2]。当前国内外众多学者针对黄海浒苔开展了多角度的研究与分析, 主要集中在3类: 一是基于黄海浒苔藻类的生物学特性以及物理和化学等环境条件对浒苔暴发机制进行内外因研究与分析^[3-11]; 二是利用卫星遥感监测、现场定量观测、分子生物学和遗传学以及数值模拟方法等对黄海漂浮浒苔进行溯源研究^[12-16]; 三是浒苔的早期预警与发展趋

势研究, 即利用卫星遥感、无人机以及现场船舶等手段对浒苔规模、分布区域和密集度等进行观测, 基于海洋大气环流条件以及理化要素指标变动状况对浒苔漂移路径和发展趋势进行预测预警^[17-24]。

黄海浒苔每年的生长消亡过程较为类似, 但是历年暴发时间、灾害时长、发展规模、漂移路径和影响岸段均有所差异^[25], 分析黄海浒苔时空分布状况和发展变化趋势对控制和治理浒苔灾害具有重要意义^[26]。部分学者对此开展了相关研究工作^[27-32], 但多针对个别年份的分析, 又因数据的不连续性, 鲜有学者从长时间序列角度研究分析黄海浒苔时空分布及演变规律。本文利用2010—2019年黄

收稿日期: 2020-05-14; 修回日期: 2020-07-10。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401605); 广东省海洋遥感重点实验室(中国科学院南海海洋研究所)开放课题(2017B030301005-LORS2011); 广东省渔业生态环境重点实验室(中国水产科学研究院南海水产研究所)基金课题(LTF-2015-3)。

作者简介: 何恩业(1981-), 男, 助理研究员, 学士, 主要从事海洋生态环境、生态灾害和水文气象预报研究。E-mail: heenye@163.com

通讯作者: 季轩梁(1987-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事海洋生态系统碳循环动力学研究。E-mail: jixl@nmfrc.cn

海浒苔成灾期间的业务化卫星遥感连续监测资料,对黄海浒苔暴发期间生长消亡过程的年际变化、季节变化、暴发源地、历年漂移路径特征、发展规模及影响区域进行长时间尺度和多角度的分析和对比,以期为黄海浒苔的监测预警和应急治理提供理论依据与科学参考。

2 数据来源

黄海浒苔绿潮资料来源于2010—2019年《国家卫星海洋应用中心绿潮遥感监测通报》中发布的基于HY-1B/1C、Aqua/Terra和GF系列等多源卫星数据对黄东海海域进行的业务化绿潮遥感影像反演结果,监测通报为1次/d,卫星遥感解译区域范围为119°~125°E,32°~38°N,信息包含黄海绿潮监测的时间、覆盖面积、分布面积和影响区域等,部分卫星遥感监测相关参数见表1。本文基于卫星遥感数据对近10 a黄海浒苔灾害的时空分布特征和演变规律进行分析研判。

表1 黄海浒苔绿潮卫星遥感监测相关参数

卫星	所属国家	主要传感器	分辨率/m
HY-1B	中国	CZI	250
HY-1C	中国	CZI	50
TERRA/AQUA	美国	MODIS	250
GF-1	中国	多光谱相机	8/16
GF-3	中国	SAR	10~50
GF-4	中国	多光谱相机	50
Radarsat1/2	加拿大	C-SAR	30~100

表2 2010—2019年卫星遥感监测的黄海浒苔灾害发生情况

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
首次发现时间/(月/日)	5/20	5/27	5/16	5/11	5/13	5/16	5/16	5/10	5/31	5/12
首发监测覆盖面积/km ²	17	7	9	39	15	4	20	1	9	25
峰值时间/(月/日)	7/7	6/19	6/19	6/12	7/8	7/4	6/26	6/18	6/23	6/26
最大覆盖面积/km ²	601	1095	725	1120	2330	654	1343	367	716	468
结束时间/(月/日)	8/22	8/14	7/29	8/11	8/6	8/5	7/28	7/13	8/10	9/9
最后监测覆盖面积/km ²	7	10	2	4	13	3	5	3	4	0.5
灾害持续时间/d	95	80	75	93	86	82	74	65	72	121
盛期开始时间/(月/日)	6/5	6/12	5/23	6/2	5/23	5/24	5/30	5/21	6/1	5/29
盛期结束时间/(月/日)	7/16	7/20	6/22	7/17	7/21	7/11	7/23	6/27	8/2	7/20
盛期持续时间/d	42	39	31	46	60	49	55	38	63	53

3 黄海浒苔生长和消亡的时间变化过程特征分析

为了便于统计和分析,本文参考相关文献对部分术语做了规定^[25,32-33]:浒苔暴发时间指历年卫星遥感首次发现黄海浒苔的时间;浒苔盛期指历年黄海浒苔覆盖面积首次超过100 km²—最后一次超过100 km²的时间跨度(单位:d);浒苔峰值指浒苔最大覆盖面积;浒苔消亡(结束)指历年卫星遥感最后一次发现黄海浒苔的时间;浒苔消衰期指从浒苔盛期结束起至消亡(结束)时间。

本文利用近10 a基于多源卫星数据反演的黄海浒苔相关信息,统计了历年浒苔暴发时间、峰值时间、结束时间、灾害持续时长、盛期开始时间、盛期结束时间和盛期持续时长等相关信息(见表2),发现黄海浒苔成灾期间主要经历“暴发→发展→盛期→消衰→结束”几个阶段,浒苔生长和消亡过程所引起的绿潮规模变化在每年均表现为单峰规律^[33]。

3.1 黄海浒苔年际变化特征

3.1.1 浒苔暴发时间

近10 a统计显示,黄海浒苔灾害一般在5月中旬一下旬暴发,卫星首次发现浒苔绿潮的覆盖面积均值为14.6 km²。2017年浒苔暴发时间最早,卫星于5月10日首次在盐城附近海域(121.39°~122.11°E,34.35°~34.50°N)监测到斑块状浒苔分布,覆盖面积和分布面积分别为1 km²和740 km²。2013和2014年浒苔暴发也偏早,分别为5月11日和5月13

日。2018年浒苔暴发时间最晚,卫星于5月31日首次在连云港附近海域(120.45°~121.2°E, 34.5°~34.9°N)监测到斑块状浒苔分布,覆盖面积和分布面积分别为8.9 km²和1 930 km²,6月1日卫星又在盐城东南部海域(121.1°~122.1°E, 32.75°~33.7°N)监测到新的浒苔斑块分布,当日总覆盖面积达137 km²。对比显示,6月1日浒苔面积突然增大并不是5月31日浒苔斑块的快速增殖扩张所致,而是在其他海域有新浒苔斑块生成。此外,2011年浒苔暴发时间也偏晚,为5月27日。白雨等^[8]研究发现当水温达到适宜浒苔微观繁殖体萌发的15℃后,前后半月内的有效降水向海水中输入大量营养盐,其中绿潮生长所需的痕量元素如Fe等对触发黄海绿潮起到关键性作用。朱明等^[10]指出,苏北沙洲区沿岸径流众多,淡水携带大量氮磷等营养盐间歇性入海,导致海水富营养化并伴随着盐度的周期性波动,而低盐利于浒苔对氮源的高效吸收和快速生长。每年水温和有效降水的差异造成了黄海浒苔暴发时间的不同,以2017年为例,江苏盐城海域水温于5月7日达到15℃,在5月4日和8日均出现大气降水,浒苔在5月10日暴发^[8,25]。张清春等^[12]调查发现绿藻微观繁殖体在苏北浅滩区广泛分布,并附着在紫菜养殖筏架上萌发成长,每年4月底—5月紫菜机械式收割,造成养殖筏架梗绳附生浒苔绿藻大量入海^[15]。历年养殖设备回收进程的差异会对浒苔暴发规模产生影响,2018年养殖设备回收较晚,推测是导致当年浒苔暴发时间偏晚的重要因素之一。此外,江苏盐城近海6月份平均海温为19~22℃,正处于浒苔最佳生长的温度区间,苏北浅滩广泛分布的绿藻微观繁殖体及附着在紫菜养殖筏架和梗绳上的绿藻快

速、持续且大量生长,导致2018年浒苔进入盛期用时也较短。

3.1.2 浒苔盛期

黄海浒苔暴发后,适宜的气温、海温和营养盐条件^[31,34]造成浒苔快速连续增长,覆盖面积不断扩大,10~20 d后黄海浒苔覆盖面积超过100 km²,进入盛期(见表2和图1)。统计显示,历年浒苔灾害盛期平均持续时长为48 d,其中,2017年黄海浒苔最早进入盛期,为5月21日,2011年最晚进入盛期,为6月12日;2012年黄海浒苔最早结束盛期,为6月22日,2018年最晚结束盛期,为8月2日;2014年和2018年浒苔盛期持续时间均在60 d以上,2012年浒苔盛期持续时间最短,仅为31 d。郭丽娜等^[17]研究发现,在连续的雨雾天气过后,相对湿度骤降、日照时数增加且海表温度在18~25℃时,浒苔会进入面积最大的旺盛阶段。辛蕾等^[33]认为温度和盐度对绿潮生命周期变化具有重要影响,其中,温度是影响绿潮生理状态的重要因素之一,水温在20~25℃时绿潮覆盖面积处于较高水平,水温超过25℃且盐度下降时,绿潮覆盖面积呈现下降趋势。通过对2014—2017年统计分析发现,水温保持在20~25℃时段最长的为2014年,最短的为2017年。何世钧等^[19]在绿潮灾害预测主导因子的研究中发现,温度对绿潮藻生存影响所占权重最高,其值变化直接影响绿潮覆盖面积的变动状况。

3.1.3 浒苔峰值

历年黄海浒苔最大覆盖面积集中出现在6月中旬—7月上旬,最大覆盖面积均值为942 km²,其中,2011年、2013年、2014年和2016年均超过了1 000 km²(见表2和图2a)。近10 a中,2013年黄海浒苔覆盖

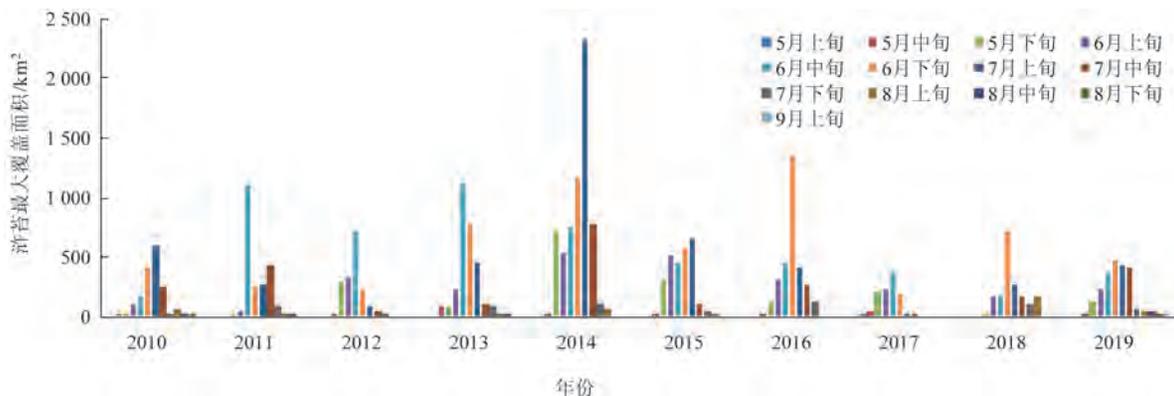


图1 近10 a 黄海浒苔每旬最大覆盖面积变化情况

面积最早达到峰值,为6月12日,面积为1 120 km²,2011年、2012年和2017年浒苔峰值也均出现在6月中旬;2016年、2018年和2019年浒苔峰值出现在6月下旬;2014年最晚达到峰值,为7月8日,面积达2 330 km²,这也是近10 a出现的最大覆盖面积,2010年和2015年浒苔峰值也出现7月上旬;2017年最大覆盖面积达到近10 a最小,为367 km²。2010—2019年,黄海浒苔覆盖面积呈现先增加后减小的趋势,2014年浒苔覆盖面积规模达到顶峰,随后波动下降。

从黄海浒苔分布面积角度分析,历年浒苔的最大分布面积和覆盖面积并未出现同步性。浒苔覆盖面积最小为2017年,其分布面积峰值达34 600 km²,已经超过2014年浒苔分布面积的峰值29 714 km²;2019年浒苔分布面积更是达到53 294 km²,为近10 a第二高值,但其最大覆盖面积仅为468 km²,低于近10 a均值(近500 km²),仅高于2017年。统计显示,前5 a浒苔最大覆盖面积和分布面积均值分别为1 174 km²和22 135 km²,后5 a两值分别为710 km²和41 606 km²,虽然近5 a黄海浒苔覆盖面积有所下降,但是浒苔影响海区范围并没有出现下降趋势,反而呈现整体扩大趋势。杨静等^[28]研究发现黄海绿潮分布范围与全球气候变化之间存在一定的相关性,在厄尔尼诺(El Niño)事件的影响下,绿潮的分布范围呈增大趋势,而在Niño3.4指数变化不明显的情况下,绿潮的年最大分布面积变化也不显著(见图2)。在厄尔尼诺年,中国近海大气异常能够给局地带来更多降水,径流量上升,引起近海海域

富营养化,同时黄海夏季海温异常偏低的概率也较大;而在拉尼娜(La Nina)年则具有相反的特征^[35],浒苔在营养盐浓度较高且温度适宜时表现出较高的相对生长率^[5]。2010年和2011年的拉尼娜现象造成黄海浒苔分布范围持续减小;2012年和2013年为正常年,浒苔最大分布面积变化不大;2014年起Niño3.4指数开始升高,2014年冬季—2016年春季形成了强厄尔尼诺事件,黄海浒苔分布面积也在此期间呈现出连年增加的趋势;2016年夏季Niño3.4指数开始转负,浒苔分布面积也开始下降,2017年冬季—2018年初的弱拉尼娜现象致使2018年浒苔分布面积达到近5 a最低值;2018年冬季—2019年春季转为厄尔尼诺现象,因此,2019年浒苔分布范围又开始扩大。全球气候变化会影响黄海区域的气象和环流状况,造成水体营养盐和温盐水平发生变动,而浒苔对环境条件变化响应较为敏感^[3-7],其发展规模也会产生年际差异。除此之外,相关研究发现人类养殖活动方式^[12]、绿藻微观繁殖体的时空动态变化^[15]以及浒苔藻自身的生态学特性^[36]也会对浒苔规模产生一定的影响,这些因素的影响机制和程度仍有待深入研究。

3.1.4 浒苔消衰

受海温持续升高影响,浒苔死亡率超过了生长率^[5-6,17,33]。7月中下旬黄海浒苔盛期结束,之后进入约半个月至一个月的消衰期,近10 a黄海浒苔消衰期平均为24 d。卫星遥感显示,7月下旬—8月中旬黄海海域卫星基本监测不到成片浒苔分布。2016年浒苔消亡过程速率最快,从7月23日盛期结束—

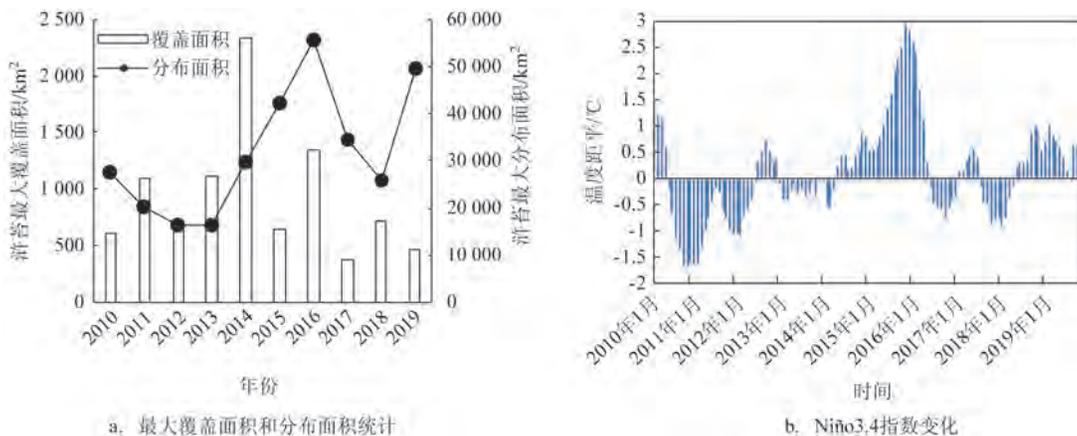


图2 2010—2019年黄海浒苔年际变化特征

7月28日浒苔完全消亡只用了5 d,其次为2018年,浒苔消衰期为8 d。2019年浒苔消衰期用时最长,从7月20日浒苔盛期结束—9月9日浒苔消亡长达50 d,2010年和2012年浒苔消衰期也都达到了37 d。

统计显示,近10 a 黄海浒苔灾害持续时间平均为84 d,其中,2017年黄海浒苔消亡时间最早,持续时间也最短,为65 d,卫星最后一次发现浒苔的时间为7月13日,覆盖面积为3 km²;2019年是浒苔灾害消亡时间最晚的一年,也是近10 a 来持续时间最长的一年,浒苔持续时间达121 d,相比平均时长多出37 d,卫星最后一次发现浒苔的时间为9月9日,覆盖面积为0.5 km²。

浒苔的衰亡速率和持续时长与海温的变化和浒苔的分布区域有关^[3-11],当海表温度上升到25℃以上时,浒苔面积减小并逐渐消亡^[17,33]。营养盐和光照也是浒苔藻类生消的重要限制因子^[3,6],黄海中南部海域营养盐分布并不均匀^[34],不同海域海水透明度的不同造成浒苔所承受的光照强度不同,因此,分布在不同区域的浒苔藻类的衰亡速率也会产生差异^[8]。2017年7月上旬水温超过了25℃,浒苔消亡较早,2016年黄海中南部海域水温在7月下旬超过25℃后升幅较快,月底时高达28℃左右,因此当年浒苔消亡较快^[33]。2019年水温在7月下旬超过25℃后无明显持续升高趋势,直至8月底水温基本维持在26℃附近(见图3),加上当年浒苔分布范围较广,多样化的海域条件也减缓了2019年浒苔整体消亡的速率^[11,35]。

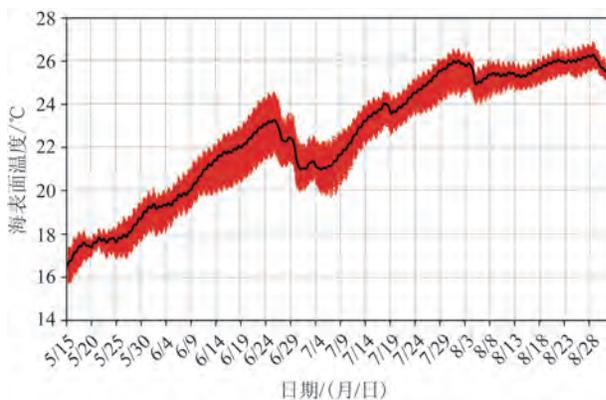


图3 2019年5—8月黄海浒苔分布区域水温变化情况(数据来源:美国国家环境预报中心)

3.2 黄海浒苔暴发期内季节变化特征

浒苔卫星遥感监测受云层遮挡影响较大,如果采用日均值进行统计会导致数据失真。本文在分析黄海浒苔成灾期间季节变化特征方面,选用旬度时间内少云或者无云日的浒苔最大覆盖面积和最大分布面积来表示本旬的绿潮规模。

从近10 a 浒苔平均覆盖面积的旬变化角度分析,大规模出现浒苔的时间段主要集中在5月下旬—7月中旬,期间平均覆盖面积超过400 km²(见图4)。具体来说,浒苔在暴发初期(5月中旬)规模较小,平均覆盖面积平均只有25 km²左右,5月下旬快速增长至近200 km²,10 d 时间大约增长了7~8倍,日均增长率达22.6%。5月下旬—6月上旬浒苔规模较为平稳,6月上旬—中旬浒苔平均覆盖面积由270 km²快速增长至570 km²,日均增长率约7.8%。6月中旬—7月上旬,浒苔规模维持最高水平,平均覆盖面积约为580 km²,持续时间近1 M。此后,浒苔平均覆盖面积迅速减少,7月上旬—中旬平均覆盖面积减少约300 km²,日均衰减率约为7.4%,7月中旬—下旬平均覆盖面积从255 km²减小至69 km²,日均衰减率约为12.3%。8月上旬浒苔平均覆盖面积已下降至50 km²以内,8月中旬浒苔基本消亡殆尽。

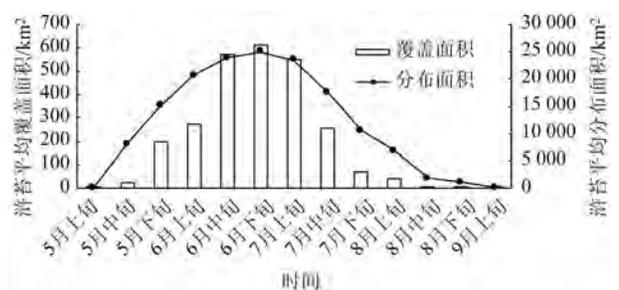


图4 黄海浒苔近10 a 各旬平均覆盖面积和平均分布面积变化

综合而言,黄海浒苔暴发在季节变化尺度上呈现出典型的单峰规律,5月中旬暴发,随后快速连续增长,6月下旬前后达到顶峰,随后进入快速消衰期。在浒苔生长和消亡过程中,其平均覆盖面积增减变动速率并不均匀,具有跳变现象,这对黄海浒苔相关治理和研究具有重要的科学参考价值。

4 黄海浒苔空间分布变化特征分析

4.1 历年黄海浒苔首次发现海域

近10 a卫星遥感监测结果显示,历年浒苔暴发初期呈现条带状或者斑块状分布形态(见图5),均位于江苏沿岸以东海域。浒苔暴发初期主要集中在两个区域:一个是苏北浅滩海域,包含A区和C区。离岸较近的盐城东北部海域A区(120.4°~121.4°E, 33.6°~34.9°N)为历年浒苔灾害首发最多的区域,2011年、2012年、2014年、2015年和2018年卫星遥感首次在此区域发现浒苔,且多以条带状分布为主,这与当地的流向基本一致^[8]。其次是苏北浅滩辐射沙洲海域C区,2016年卫星首次在该海域发现条带状分布的浒苔,卫星遥感显示,2016年5月17日出现在C区的浒苔绿潮,5月25日漂移至A区,因此推测A区部分浒苔为C区浒苔在卫星遥感可见前漂移而至。另一个是江苏外海海域,包含B区和D区。在盐城东南部外海B区(122.4°~124.2°E, 33.0°~33.8°N),2010年、2017年和2019年卫星首次在该区域遥感发现浒苔,以斑块状为主。2013年卫星首次在离岸约300 km,中心点为(123.6°E, 34.6°N)的海域D区发现条带状浒苔,这是近10 a离

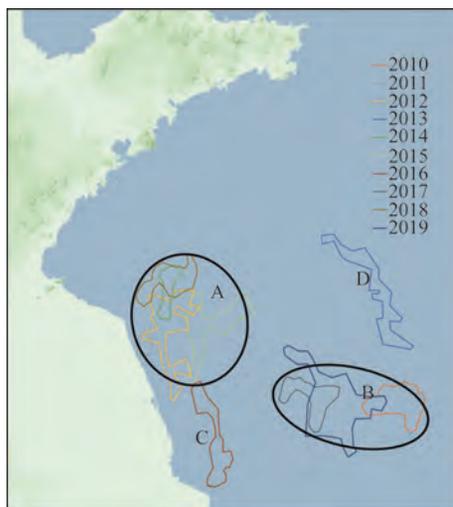


图5 2010—2019年卫星遥感监测首次发现黄海浒苔分布区域

该图基于国家地理信息公共服务平台审图号为GS(2018)1432号的专题图层制作,底图无修改,下同

岸距离最远的浒苔首发区域。卫星遥感对比发现,江苏外海海域首先发现的浒苔绿潮,一般维持时间较短,消失较快,并不能漂移至A区。郭伟等^[25]分析认为B区和D区出现的绿潮与A区与C区不同,可能是由更南的起源地漂移而来,5月中上旬江苏外海海温低于浒苔最适生长温度(15°~25 °C),不适合浒苔生长,故很快消失。

研究发现,苏北浅滩是我国重要的紫菜养殖基地,养殖筏架附生绿藻是黄海漂浮浒苔的主要来源,其入海量大小决定了黄海大型绿潮初始浮游生物量,并进一步影响绿潮规模^[12-13]。浅滩全年存在较高丰度的浒苔微观繁殖体,当地海域充足的营养盐供给、春季快速升高的水温和光照条件等,为浒苔微观繁殖体萌发生长提供了有利条件^[15]。Shen等^[14]从分子生物学DNA序列测定中发现青岛沿海、江苏沿海和黄海的绿潮主要种类相同,起源相同。卫星遥感反演回溯显示,黄海浒苔绿潮起源地主要集中在苏北浅滩33°N附近海区^[24,26,30]。数值模拟绿潮溯源结果显示,黄海漂浮浒苔最初出现在苏北浅滩附近海域,并在风和流的作用下向北漂移^[21-23,37-38]。上述大量黄海绿潮溯源研究表明,苏北浅滩是黄海浒苔暴发的主要源地。

4.2 历年黄海浒苔峰值时的分布形态特征

历年黄海浒苔发展到最大覆盖面积时,其分布区域主要集中在34°N以北、123°E以西的海域,浒苔主体受山东半岛沿岸流影响呈现西南—东北走向分布,此时大多数年份已出现少量前沿浒苔影响山东半岛沿岸现象,但是浒苔主体尚未开始大规模登滩(见图6)。由于历年大气、海洋环流、水温和营养盐存在差异^[8,28,34],黄海浒苔峰值时的分布区域、状态和密集度(覆盖面积与分布面积的比值,下同)也表现出明显的年际差异^[35]。

2010年和2018年浒苔主体呈南北向带状分布在120°~122°E之间,南北跨度达3个纬度,最南端到达33.5°N附近(见图6a);2011年、2012年和2014年浒苔主体沿山东半岛呈斜带状分布,浒苔主要集中在离岸约150 km以内的海域,外海未有成片浒苔分布迹象(见图6b);2013年浒苔主体呈斑状分布在121.2°E以西的黄海海域,在近10 a中分布区域最为偏西(见图6c);2015—2017年和2019年浒苔分布范

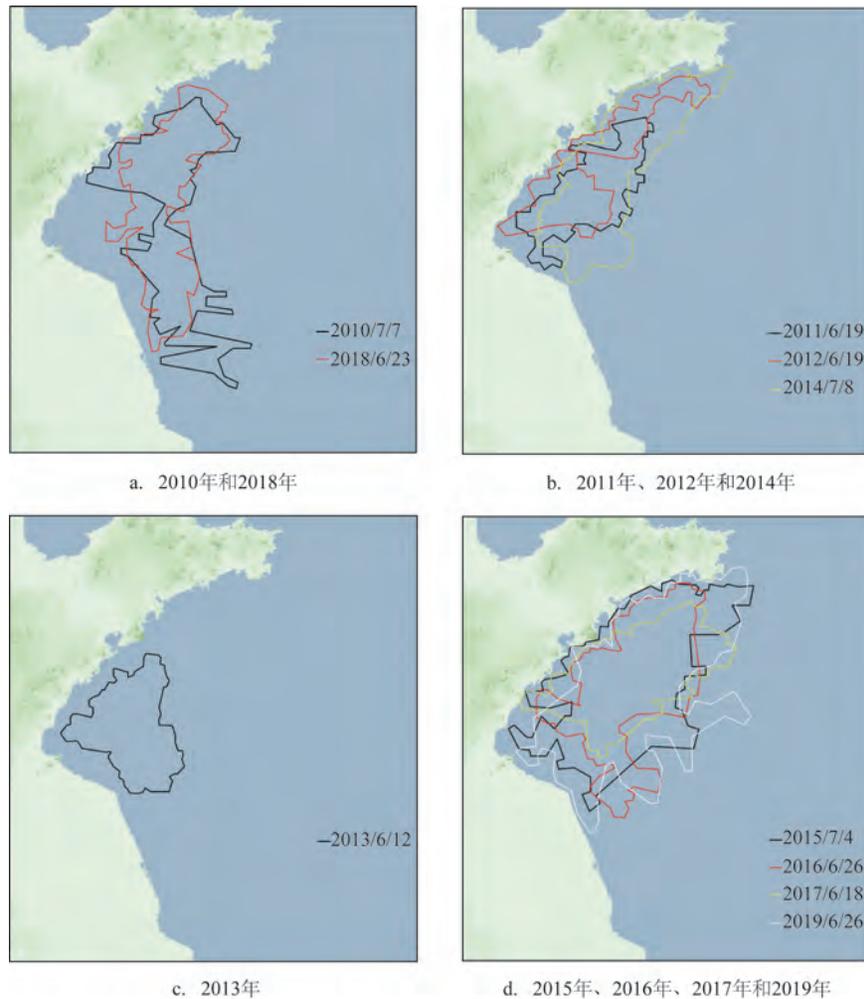


图6 2010—2019年卫星遥感浒苔最大覆盖面积分布情况

围较宽广,东西跨度和南北跨度均达到约3个纬度的距离(见图6d)。从覆盖密集度分析,2011年、2013年和2014年浒苔密集度均超过5%,明显高于近10 a均值的3.5%,覆盖面积也偏大;2015年、2017年和2019年浒苔密集度偏低,均低于2%,覆盖面积也偏小。从历年动态演变来看,近10 a黄海浒苔影响规模呈现波动增大趋势,分布范围由近海向外海扩展,影响岸段由山东半岛中西部区域向东部沿线延伸,为浒苔打捞治理增加了难度和成本。

4.3 黄海浒苔历年漂移路径分析

黄海浒苔在生物学特征和遗传特征方面都与定生浒苔存在显著差异。黄海浒苔属于漂浮生态型^[36],在江苏近海暴发后,受东南季风和北向表层海流的驱动向北漂移发展,最终影响山东半岛南部沿

线城市^[37]。由于每年浒苔发生海域的理化条件和环流形势不尽相同^[38-39],导致浒苔历年规模、漂移速度、登陆区域和致灾程度等方面存在明显差异(见图7)。近10 a统计显示,浒苔的漂移路径和发展规模对未来影响岸段以及灾害程度起决定性作用^[39],此外,即使漂移路径相似的年份浒苔灾害表现情况也并不完全一致。2010—2019年,黄海浒苔主体运动轨迹主要有4种,分别是北向漂移发展型、前期北向后期东北向型、前期西北向后期东北向型和东北向漂移发展型。

4.3.1 北向漂移发展型

这种漂移路径的主要特征是浒苔在江苏近海海域暴发后以偏北方向漂移发展,青岛岸线是浒苔灾害影响的首要区域,浒苔盛期结束时其主体主要分布在青岛沿海。2011年、2012年、2015年和2018

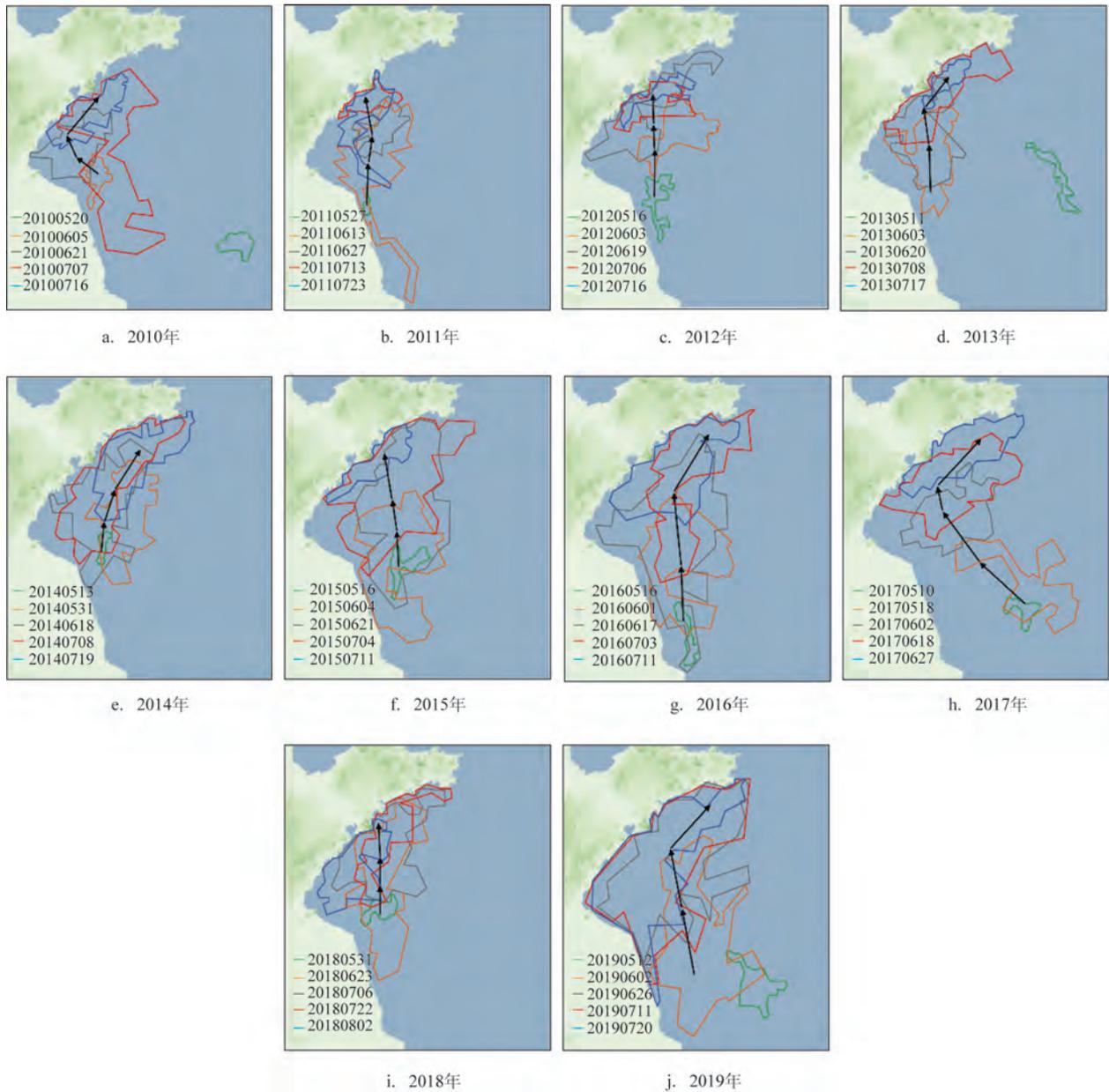


图7 2010—2019年黄海浒苔漂移发展分布区域变化情况

年都属于此种漂移轨迹:2011年浒苔在5月底暴发后向北漂移发展,6月中旬分布范围达到极大值,7月中旬浒苔大规模登陆青岛,日照受灾较轻,烟台和威海基本未受浒苔登滩影响;2012年浒苔漂移路径以北略偏东方向为主,6月中旬浒苔主体抵近山东半岛沿岸海域后开始向东西两向迅速扩展,卫星监测发现6月19日浒苔分布最西端在连云港海域,最东边位于威海荣成海域,7月上旬浒苔规模大幅减少,逐渐在青岛近海消亡;2015年和2018年浒苔

主体均在6月下旬进入山东近海后向东西两向扩展,2015年浒苔对青岛—威海乳山影响较大,浒苔盛期结束时主体主要分布在青岛和烟台近海,2018年浒苔盛期结束时主体分布在日照和青岛沿海,相比2015年位置偏西。

4.3.2 前期北向后期东北向型

这种漂移路径的主要特征是浒苔灾害主要影响山东半岛以南的中东部岸段,威海和烟台受灾程度更为严重,对山东半岛西部岸段影响较轻,浒苔

盛期结束时其主体主要分布在青岛—威海一带的近海海域。2013年、2016年和2019年属于该种漂移路径,这3 a的浒苔灾害均爆发于5月中旬,大幅聚集生长后向北略偏西方向漂移发展,6月中下旬抵近山东半岛后开始转向东北向漂移,期间不断登陆青岛、烟台和威海;区别在于2013年和2016年浒苔首先在青岛登陆,其次在烟台和威海登陆,而2019年浒苔首先于6月中旬登陆烟台和威海,之后在6月下旬登陆青岛,这与其他年份存在明显差异。

4.3.3 前期西北向后期东北向型

这种漂移路径的主要特征是浒苔主体前期为西北向漂移并发展扩大,到达35°N附近海域后开始转向,沿山东半岛岸线向东北方向漂移。该漂移路径致使浒苔在山东半岛南岸由西向东依次登陆,浒苔盛期结束时主体分布在青岛—烟台海阳一带海域。2010年和2017年属于此种漂移轨迹:2010年5月浒苔暴发后开始向西北方向漂移并发展扩大,6月下旬初浒苔区域最西端挺进海州湾,在35°N附近浒苔漂移方向转向东北并沿山东半岛岸线漂移,6月下旬浒苔登陆山东日照,7月上旬浒苔影响范围达到最大值,并在青岛登陆,烟台海阳也受到少量浒苔登滩影响,整个过程浒苔主体最东端未超过122.5°E;2017年也呈现出同样的漂移轨迹变化特征,区别在于2017年浒苔暴发位置在江苏远海,离岸更远,西北漂移速度更快,登陆山东半岛时间早,灾害过程结束也较早,6月上旬末就在日照抢滩登陆,6月下旬盛期便结束。

4.3.4 东北向漂移发展型

近10 a中只有2014年属于该型浒苔漂移路径。浒苔暴发后在江苏盐城东北部海域聚集,5月下旬开始向东北向外海漂移,且扩展速度较快,推测与外海风速较大有利于浒苔分布区域扩散有一定关系^[18],6月下旬少量浒苔开始登陆青岛—威海沿岸,7月上旬浒苔达到最大规模,7月中旬末期浒苔盛期结束时主要集中在青岛东端至威海沿线海域,烟台和威海受灾较重。

此外,从近10 a黄海浒苔漂移发展趋势角度分析,黄海浒苔影响范围有增大的趋势,2010—2013年主要影响122°E以西的江苏近岸和山东近海,2014年起浒苔影响范围向外海扩展,登陆范围越来越大,至2019年32.5°N以北、123°E以西的黄海海

域基本全部受到浒苔辐射面的影响,这种变化的根源还需进一步研究。

5 结论

本文基于2010—2019年多源卫星数据对黄海海域进行的业务化绿潮遥感影像资料,系统梳理了近10 a浒苔暴发时间、峰值时间、结束时间、灾害持续时长、盛期开始时间、盛期结束时间和盛期持续时长等相关信息,对黄海浒苔绿潮生长消亡的际年和季节变化特征进行了分析。此外,针对黄海浒苔的暴发源地、漂移路径和浒苔峰值时的分布形态、分布区域和发展规模等特征也进行了详细分析和对比。结果表明:

(1)黄海浒苔成灾期内主要经历“暴发→发展→盛期→消衰→结束”几个阶段,暴发时间集中在5月中旬一下旬,经过10~20 d的聚集发展进入盛期,6月中旬—7月上旬达到峰值,7月中下旬盛期结束后进入约半个月至一个月的消衰期,整个灾害过程平均持续约84 d,其中,盛期持续的平均时长为48 d。不同年份浒苔生长消亡过程有所差异,2017年黄海浒苔灾害暴发时间最早,为5月10日;2018年暴发时间最晚,为5月31日。2019年黄海浒苔灾害结束时间最晚,为9月9日,持续时间最长,达到121 d;2017年结束时间最早,为7月13日,持续时间最短,仅为65 d。

(2)黄海浒苔灾害期间覆盖面积在季节变化方面呈现典型的单峰规律,覆盖面积的增减变动速率并不均匀,具有跳变现象。5月中旬一下旬日均最大增长率可达22.6%,6月上旬—中旬日均最大增长率约7.8%;7月上旬—中旬日均衰减率约为7.4%,7月中旬一下旬日均衰减率可达12.3%;其他时间段浒苔规模变动较为平稳,在6月中旬—7月上旬,浒苔覆盖面积维持最高水平,持续时间近1 M。

(3)2010—2019年卫星遥感首次发现浒苔的区域均位于江苏以东海域,浒苔成灾前期主要集中在离岸较近的盐城东北部海域A区(120.4°~121.4°E,33.6°~34.9°N),以及盐城东南部外海B区(122.4°~124.2°E,33.0°~33.8°N),漂浮浒苔以条带状或斑块状分布为主,覆盖面积约1~39 km²不等。

(4)浒苔在黄海南部暴发后,开始向北漂移发

展,最终影响山东半岛南部沿岸城市。近10 a,黄海浒苔主体运动轨迹主要有北向漂移发展型、前期北向后期东北向型、前期西北向后期东北向型和东北向漂移发展型。此外,即使在漂移路径相似的年份,浒苔灾害在漂移速度、发展规模、灾害时长和影响岸段等方面的表现情况也并不完全一致,浒苔的漂移路径和发展规模对未来影响岸段及灾害程度起决定性作用。

(5)近10 a统计分析表明,2010—2013年黄海浒苔覆盖面积呈现波动增加的趋势,2014年达到历史极大值2 330 km²,2014—2019年呈现波动减小趋势,但浒苔影响规模(分布面积)反而表现为波动增大趋势,其与覆盖面积变动并未出现同步性。黄海浒苔分布范围由近海向外海扩展,影响岸段由山东半岛中西部区域向东部岸线延伸,其变化根源还需进一步研究。

参考文献:

- [1] Geng H X, Yu R C, Zhang Q C, et al. Tracing the settlement region of massive floating green algae in the Yellow Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2019, 37(5): 1555-1565.
- [2] Cui J J, Zhang J H, Monotilla A P, et al. Assessment of blooming *Ulva* macroalgae production potential in the Yellow Sea, China[J]. *Phycologia*, 2019, 58(5): 535-541.
- [3] Wang C Y, Su R G, Guo L D, et al. Nutrient absorption by *Ulva* proliferata and the growth mechanism leading to green-tides[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2019, 227: 106329.
- [4] Zheng M S, Lin J J, Zhou S D, et al. Salinity mediates the effects of nitrogen enrichment on the growth, photosynthesis, and biochemical composition of *Ulva proliferata*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(19): 19982-19990.
- [5] 苑克磊, 侯查伟, 丁一, 等. 我国黄海浒苔绿潮暴发海域环境因子季节性变化及年际变化分析[J]. *广西科学院学报*, 2018, 34(3): 204-209.
- [6] 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, 57.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Huo Y Z, Hua L, Wu H L, et al. Abundance and distribution of *Ulva* microscopic propagules associated with a green tide in the southern coast of the Yellow Sea[J]. *Harmful Algae*, 2014, 39: 357-364.
- [10] 朱明, 刘峰, 陈璐, 等. 低盐在短时间内对绿潮浒苔(*Ulva proliferata*)氮磷吸收的动态影响[J]. *海洋与湖沼*, 2018, 49(5): 975-982.
- [11] Li H M, Zhang C S, Han X R, et al. Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980-2012: sources and seaward gradients[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 44-55.
- [12] 张清春, 孔凡洲, 颜天, 等. 苏北浅滩养殖筏架附着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.
- [13] Han H B, Fan S L, Song W, et al. The contribution of attached *Ulva proliferata* on *Pyropia* aquaculture rafts to green tides in the Yellow Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2020, 39(2): 101-106.
- [14] Shen W J, He Y, Shen S D. A new molecular label applied to the study of the Yellow Sea green tide[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2019, 18(6): 1507-1514.
- [15] 缪晓翔, 肖洁, 王宗灵, 等. 江苏-山东沿岸大型绿藻微观繁殖体时空分布特征研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(2): 115-123.
- [16] Huo Y Z, Han H B, Hua L, et al. Tracing the origin of green macroalgal blooms based on the large scale spatio-temporal distribution of *Ulva* microscopic propagules and settled mature *Ulva* vegetative thalli in coastal regions of the Yellow Sea, China [J]. *Harmful Algae*, 2016, 59: 91-99.
- [17] 郭丽娜, 黄容, 马艳, 等. 影响青岛地区浒苔生消的水文气象要素分析[J]. *科技创新导报*, 2015, 12(6): 109-112, 114.
- [18] 吉会峰, 刘吉堂, 莫旭冬, 等. 江苏重点海域绿潮漂移扩散数值模拟[J]. *海洋科学*, 2018, 42(5): 82-91.
- [19] 何世钧, 周媛媛, 张婷, 等. 基于主导因子的绿潮灾害预测方法研究[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(3): 326-331.
- [20] 高姗, 刘桂梅, 王辉, 等. 海洋生态预报的研究进展与发展应用[J]. *海洋预报*, 2020, 37(2): 84-93.
- [21] Bao M, Guan W B, Yang Y, et al. Drifting trajectories of green algae in the western Yellow Sea during the spring and summer of 2012[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 163: 9-16.
- [22] 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.
- [23] Lee J H, Pang I C, Moon I J, et al. On physical factors that controlled the massive green tide occurrence along the southern coast of the Shandong Peninsula in 2008: a numerical study using a particle-tracking experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116(C12): C12036.
- [24] 严鹏德, 闫文友. 多源遥感数据绿潮监测研究[J]. *中国高新技术*, 2018(4): 5-9.
- [25] 郭伟, 赵亮, 李秀梅. 黄海绿潮分布年际变化特征分析[J]. *海洋学报*, 2016, 38(12): 36-45.
- [26] 徐福祥, 高志强, 郑翔宇, 等. 基于MODIS数据的2016年黄海绿潮灾害动态监测研究[J]. *海洋科学*, 2017, 41(5): 80-84.
- [27] 吉启轩, 赵新伟, 章志. 江苏海域浒苔时空分布特征及对海洋环境的影响[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(1): 61-64.
- [28] 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.
- [29] Liu X Q, Wang Z L, Fan S L, et al. The distribution of green algal micro-propagules and macroalgae at the early stage of green tide in the coastal area of South Jiangsu Province in 2014[J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 16(1): 81-86.
- [30] 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.
- [31] 矫新明, 袁广旺, 毛成贲, 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.
- [32] 刘帆, 费鲜芸, 王旻焯, 等. 黄、东海海域浒苔时空分布变化特征研究[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(3): 416-421.
- [33] 辛蕾, 丁一, 王宁, 等. 基于遥感的黄海绿潮覆盖面积受表层温盐的影响分析[J]. 广西科学院学报, 2018, 34(3): 210-215.
- [34] 潘俊, 于非, 魏传杰, 等. 南黄海绿潮暴发与硝酸盐及水文环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 1031-1037.
- [35] 张守文, 王辉, 姜华, 等. 厄尔尼诺和台风共同影响下的7月份黄、东海海温变化[J]. 海洋学报, 2017, 39(12): 32-41.
- [36] 庞云龙, 刘正一, 李佳霖, 等. 藻类生态型研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(4): 1079-1086.
- [37] 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.
- [38] Son Y B, Choi B J, Kim Y H, et al. Tracing floating green algae blooms in the Yellow Sea and the East China Sea using GOCI satellite data and Lagrangian transport simulations[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 156: 21-33.
- [39] 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.

The spatial and temporal distribution of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea in recent 10 years

HE En-ye¹, JI Xuan-liang¹, HUANG Hong-hui^{2,3,4}, WANG Dan¹, GUO Mao-hua^{5,6}, GAO Shan¹, YANG Jing¹

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, China Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300 China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300 China; 4. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510300 China; 5. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081 China; 6. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China)

Abstract: The characteristics and variation of the spatial and temporal distribution of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea is analyzed using 10 years satellite remote sensing images from 2010 to 2019. The results show that the green tide starts in the Subei shoal in middle-late May and continue to develop in the following 10~20 days, which reaches the peak between middle June and early July. The peak period of the green tide ends in middle or late July and starts to decay over the next 15~30 days. The whole lifecycle of a green tide event is about 84 days on average, during an *Ulva prolifera* event, the fluctuation rate of its coverage area is not flat with the maximum daily growth rate of 22.6% in middle or late May, while the maximum decay rate of about 12.3% appears in middle or late July. Statistical results show that the growing and decaying process, influence scale, distribution pattern and drift path of the *Ulva prolifera* events are significantly different in recent 10 years, which might be related to the different ocean circulation and environment condition. The location and extent of the disaster mainly depend on the drifting path and development scale of *Ulva prolifera*. In addition, the coverage area of *Ulva prolifera* in Yellow Sea over the past 5 years tends to decrease, while its influence scope tends to increase with a coverage expansion from nearshore to offshore and with an extension of the influencing area from the middle and western coastal area of Shandong Peninsula to the eastern coastal area.

Key words: *Ulva prolifera*; green tide; spatial and temporal distribution; inter-annual variability; drifting path; Yellow Sea