

黄海绿潮暴发期间浒苔沉降研究进展^{*}

刘金林^{1,2} 杨晓倩¹ 李继业² 文钦琳¹ 刘 炜¹ 宋文鹏² 何培民^{1,3} 张建恒^{1,3#}

(1.上海海洋大学海洋生态与环境学院,上海 201306;2.国家海洋局北海环境监测中心,山东 青岛 266033;

3.江苏省海洋生物产业技术协同创新中心,江苏 连云港 222005)

摘要 黄海大规模的绿潮生态灾害已连续多年持续暴发,对海域的生态安全造成重大影响,也进一步影响到人类健康。浒苔(*Ulva prolifera*)沉降是绿潮暴发周期中极为重要的环节,其在分解过程中释放大量的无机物、有机物等破坏生态系统的健康。系统总结了黄海绿潮藻的主要去向,重点关注了浒苔的主要沉降范围,梳理了浒苔分解过程中代谢产物释放与影响,并深入探讨了影响浒苔沉降的主要因素,为未来的绿潮研究及灾害防控工作提供建议与参考。

关键词 绿潮 浒苔 黄海 生态灾害

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.05.018

Research progress on settled mature *Ulva prolifera* during the outbreak of green tide in the Yellow Sea LIU Jinlin^{1,2}, YANG Xiaoqian¹, LI Jiye², WEN Qinlin¹, LIU Wei¹, SONG Wenpeng², HE Peimin^{1,3}, ZHANG Jianheng^{1,3}. (1.College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2.North China Sea Environmental Monitoring Center of State Oceanic Administration, Qingdao Shandong 266033; 3.Department of Marine Sciences & Co-Innovation Center of Jiangsu Marine Bio-industry Technology, Lianyungang Jiangsu 222005)

Abstract: The large-scale green tide disaster has broken out for many years in the Yellow Sea of China, causing a severe impact on the ecological security of the sea area, and this marine disaster also has the potential effect on human health. The settled mature *Ulva prolifera* is an indispensable process during the bloom of green tide. In this study, the main distribution of green tide algae and the potential settlement area in the Yellow Sea were summarized. Also, the influences of metabolites in the decomposition process were sorted out, and the main factors affecting the settlement were further discussed. This study would provide suggestions and references for the research of green tide blooming mechanism and prevention.

Keywords: green tide; *Ulva prolifera*; the Yellow Sea; ecological disaster

近年来,我国海域生态灾害频发,对海洋生态系统的健康及稳定造成一定冲击。长江口附近海域暴发的赤潮在危害渔业资源的同时,释放的藻毒素也对海域生态造成剧烈破坏^[1-2]。大规模暴发的金潮、绿潮等^[3-4]引起的生态灾害及次生灾害更为严重,我国渤海、黄海、东海等海域已持续多年出现绿潮规模性暴发,对海域的生态系统及沿岸地区的生态景观等造成较大破坏^[5-6]。其中,浒苔(*Ulva prolifera*)是引发我国渤海、黄海等暴发绿潮灾害的主要物种^[7-9]。浒苔是归属于绿藻门(Chlorophyta)、绿藻纲(Chlorophyceae)、石莼目(Ulvales)、石莼科(Ulvaceae)、石莼属(*Ulva*)的一种大型藻类,世界范围内已知的石莼属物种共有70余种,是引发绿潮暴发

的主要优势种类^[10-12]。全球范围内由石莼属藻类引发的绿潮暴发频率以及地理分布范围均呈显著增长趋势^[13],浒苔在全球范围内约有20余亚种,分布较为广泛。

我国黄海绿潮已持续10余年大规模暴发^[14-16],浒苔是引发黄海绿潮暴发的主要优势物种。黄海绿潮暴发不仅规模巨大且持续时间长^{[17]825},给江苏及山东沿岸地区造成巨大的经济损失,对生态系统、景观以及养殖业等产生了严重影响^[18-20]。黄海绿潮暴发期间,大量藻体最终以沉降形式进入海区,目前有关沉降绿潮藻对海域生态影响的研究相对较少且不全面,因而迫切需要对此开展深入的研究及总结。本研究依托现有文献,以优势绿潮藻物种浒苔为代

第一作者:刘金林,男,1996年生,硕士研究生,主要从事藻类生态学研究。* 通讯作者。

* 国家重点研发计划项目(No.2018YFD0901500);国家自然科学基金资助项目(No.41576163);国家海洋局公益性科研专项(No.201205010);上海市青年科技英才扬帆计划项目(No.17YF1407900);骆肇尧科创基金资助项目(No.A1200400201307、No.A1200400201328)。

表,总结了黄海绿潮藻主要去向及影响,并着重关注浒苔沉降的影响因素,为将来黄海绿潮灾害防控工作提供建设性意见。

1 黄海绿潮藻的主要去向

1.1 进入岸滩堆积

黄海绿潮暴发规模庞大,2007—2019年绿潮最大覆盖面积统计见图1。风场驱动下的海洋表层流场是浒苔漂移路径变化的主要原因^{[21],[22]1472}。绿潮藻于每年6月进入山东半岛近岸海域,受海风、海流等因素的影响大规模登陆青岛附近海岸^{[23]409}。山东的岸滩浒苔清理工作主要集中在重点旅游区域,而绝大多数非旅游区域的岸滩浒苔则由群众自发组织清理并用于资源化利用,或者不进行清理自然堆积在岸滩。岸滩堆积浒苔在分解过程中会生成二甲基硫醚和硫化氢等恶臭气体,同时也对海水养殖、海陆交通等带来损失及影响^[24-25]。胡炜等^[26]调查发现,近岸区域堆积的绿潮藻会导致刺参出现过度应激与死亡现象,给刺参养殖业造成了巨大损失。

1.2 船舶打捞后资源化利用

自2008年起,山东政府已连续13年开展黄海绿潮藻打捞工作,主要打捞区域集中在青岛附近海域。起初,打捞的绿潮藻主要采用集中填埋的方式处理,随着新型打捞设备及去盐等技术的开发与应用^[27],目前已形成由打捞、脱水、打包、转运和资源化利用等环节构成的产业链^[28]。以2019年为例,截至8月4日,浒苔无害化处置基地已累计商业化处置浒苔约23.8万t,其中以生产浒苔粉、浒苔有机肥等粗加工产品为主。

此外,浒苔在其他领域也具有较广泛的应用。王淑贤等^[29]从腐烂浒苔中筛选出一株可高效降解浒苔纤维素的微生物菌株,用于提升浒苔发酵产乙醇的产量;张明等^[30]研究发现,在250~350℃下对

浒苔进行炭化处理,生成的生物炭对水中苯等有机污染物的吸附作用明显增强;高翔等^[31]的研究表明,浒苔干粉能够发挥显著的助凝作用从而提升有机高分子絮凝剂的絮凝效果。赵卫等^[32]利用浒苔制备纳米纤维化的海藻纤维素和高比表面积凝胶材料,在新材料制备方面应用前景广阔。大型藻能够有效抑制赤潮的暴发^[33-34],韩秀荣等^[35]发现浒苔提取物中含有可以影响赤潮藻类生长的克生物质,且克生作用具有明显的浓度效应。浒苔潜在开发价值巨大,有关技术的开发将进一步推进浒苔的资源化利用进程,继而减小因绿潮大规模暴发造成的经济损失。

1.3 沉降入海

打捞上岸及岸滩自然堆积的浒苔仅占暴发总量的小部分,多数浒苔沉降在海面水体表层以下。浒苔因管状中空,藻体内包含由光合作用形成的气泡,继而产生足够浮力^[36]。当藻体自身浮力不再足以支撑其漂浮时,处于消亡期的浒苔藻体将于水体中悬浮或沉降进入海底^{[37]301},在海流冲击及微生物等作用下逐渐碎片化并不断分解,在此过程中将会大量消耗溶解氧并释放出营养盐^{[17]832},极有可能诱发次生灾害,对海域生态系统稳定产生影响。

总体看来,浒苔的岸滩堆积和沉降入海均易引起大规模次生灾害的暴发,只有大力开发环境节约型、资源友好的浒苔资源化利用技术并投入实际生产应用,才能将绿潮大规模暴发造成的经济损失降至较低水平。

2 浒苔的主要沉降区域

黄海绿潮藻的漂浮时间及输送机制与紫菜养殖模式联系密切,此外其漂浮路径也受风、海流等因素影响^{[22]1475,[38-40]},在不借助特种设备的情况下难以开展水下观测,因此其沉降区域分布较为复杂,较难开

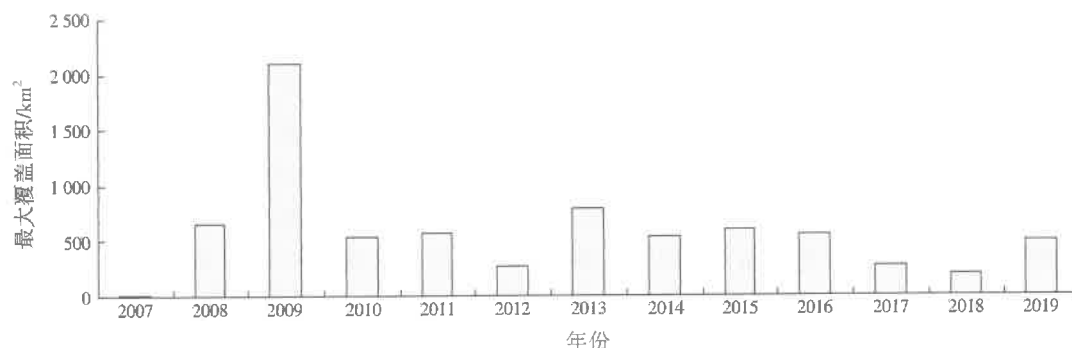


图1 2007—2019年中国黄海绿潮暴发最大覆盖面积

Fig.1 The maximum coverage area of the green tide in the Yellow Sea, China from 2007 to 2019

展研究。2008年是黄海绿潮大规模暴发的元年,初期未有成体系的联防联控措施应用于绿潮灾害控制,因此2008年的绿潮暴发及影响情况较为接近自然状态。

2.1 沉降区域范围及持续时间

2008年7月,易俊陶等^[41]对江苏省盐城市南黄海海域的绿潮藻开展研究,在浒苔沉降的海区打捞到褐色的藻团,验证发现该沉降藻体仍有光合作用,说明藻体依旧存在一定生理活性,从而具备恢复增殖的潜力。同期乔方利等^{[23]410}在北黄海青岛近海表层无浒苔海域处共开展了11次拖网观测,水平拖网深度为20 m,平均拖网浒苔生物量为0.154 kg/m,表明在暴发初期无明显的人为干扰下,青岛近岸等处也是黄海绿潮藻的沉降区域。上述研究也进一步说明,从南黄海至北黄海的绿潮藻漂流流经区域均是其沉降范围。

2013年1—4月,HUO等^[42]在江苏省定期开展船舶监测,1—2月在如东和大丰等断面发现一定数量的沉降藻体,种类包含浒苔、曲浒苔(*Ulva flexuosa*)以及缘管浒苔(*Ulva linza*),但3—4月仅采集到极少量的沉降藻体且种类均为浒苔,由此判定绿潮暴发前的少量沉降藻体不是构成大规模绿潮暴发的主要原因;5月大量的绿潮藻自周边紫菜养殖筏架区脱落后,由于光照、温度等条件适合^[43-44],浒苔大规模暴发并持续输入至山东省近岸。而8月绿潮藻自海面消失之后,进入水面以下的浒苔藻体仍将以悬浮或下沉进入海底的状态继续存在一段时间,对海域生态微环境产生持久影响。

2.2 沉降区域追踪

自2009年起,成体系的联防联控措施被应用于绿潮灾害控制全过程,如在海面布置拦截网及开展打捞作业等。研究人员连续多年在青岛近岸海域多个固定站位开展沉降浒苔监测,仅在个别站位采集到少量的沉降浒苔藻体。此外,近几年在青岛附近多个海湾开展的垂直拖网作业也未能采集到大规模的沉降浒苔。与2008年的调查结果^{[23]410}对比可知,大规模的人工提前打捞行动等可能促使近海海域的沉降浒苔生物量大大降低,继而减小了青岛近岸海域暴发次生灾害的可能性。

2015年8月,GENG等^[45]在黄海、渤海海域采集了大量沉积物样品,利用沉积物中的28-异褐藻甾醇作为生物标志物追踪黄海绿潮藻类的沉降区域。结果表明,2015年绿潮藻主要沉降于荣成市以南的外海处(122.66°E,36.00°N),该方法从化学的

角度追踪了沉降浒苔的主要沉降区域^[46],结合近几年开展的拖网等调查情况可以判断,该结论与实际调查结果基本吻合。

总体而言,当前绿潮藻的主要沉降区可能位于距离岸边较远处的海域,但沉降浒苔对山东近岸居民生产生活等的具体影响程度依旧未能得到有效评估;此外,目前仍需要使用船舶验证等方式进一步判断化学追踪结果的准确度,未来应进一步开展浒苔沉降区域的追踪研究,更为准确的生物标志物也亟需开发。

3 沉降浒苔代谢产物的释放与影响

沉降浒苔藻体在分解过程中向水体中释放大量氨氮和磷酸盐等无机盐并消耗溶解氧,继而导致总无机氮浓度迅速升高^[47-48]。水体中氨氮浓度的迅速增加将严重损坏海洋动物的呼吸、循环等系统,进一步导致生物死亡,使生物种群数量大量减少,影响生态系统的稳定。另外,藻体分解释放的无机盐可能被赤潮藻所吸收,当生长条件适宜时可能诱导赤潮的形成^[49],进一步引发次生灾害。

沉降藻体在分解过程中还向水体释放大量有机物。以2008年浒苔消亡末期为例,受浒苔消亡产生大量碎屑的影响,水体中颗粒有机碳(POC)和颗粒有机氮(PON)都显现出近岸高、远岸低,表层高、底层低的分布特征^[50-51]。王雪景等^[52]于2016年夏季开展的研究也符合上述结论。此外,绿潮藻对黄海海域叶绿素含量的影响也较为显著^[53]。绿潮的暴发及消亡除对环境等造成危害之外,也具备有益的一面。浒苔在漂浮过程中可以有效净化当地海域的水质,如大量吸收双酚类化合物^[54-55];而在浒苔消亡末期,大量沉降至海底的生物碎屑也可以有效吸附多环芳烃化合物,从而减少海域中有机污染物的量^[56]。总之,沉降浒苔代谢释放的无机、有机产物对环境的影响有利有弊,使黄海海域生态系统长期处于不稳定的状态,急需通过构建黄海海域海底生态监测网对相关影响进行数据监测及有效评估。

4 影响浒苔沉降速率的因素

浒苔的生长及消亡与海表温度、降水和光照等生态因素息息相关。张林慧等^[57]调查发现,绿潮藻向北黄海漂移过程中所受的光照强度不断增强,绿潮藻颜色显著变浅且叶绿素含量偏低,可以判断其进入了消亡期并将逐渐下沉。漂浮浒苔藻体独特的悬挂分枝使得其对高光强逆境胁迫具备生态适应性,悬挂分枝的长期存在极有可能延长浒苔的海面漂浮周

期^[58-59]。而“厄尔尼诺”或“拉尼娜”等事件的发生也可能影响黄海绿潮暴发总体规模及持续时长^[60],给绿潮的防控工作带来诸多不确定性以及挑战。

ZHANG 等^[61]通过分析认为,失去了南黄海海域泥沙的“遮光”作用,北黄海海域较高的透明度及较低的营养盐浓度等使绿潮藻提早进入消亡期,郭丽娜等^[62]结合水文气象数据分析,发现雾天偏多、海表温度偏低等因素间接延长了绿潮藻的消亡周期。连续的阴天会造成绿潮藻光合作用效率下降,从而造成藻体浮力发生改变并下沉至海面以下,当光照强度增加、上升流作用以及新的分枝细胞增殖产生气囊等条件下,低活性沉降藻体将重新恢复漂浮能力^{[37]603}。根据 2008—2017 年遥感影像反演黄海绿潮生消情况,降水不是造成绿潮消亡的最主要生态因子,夏季较高的海表温度(大于 22℃)与光照辐射强度(大于 240 W/m²)抑制了浒苔的生长,从而使浒苔藻体不断死亡下沉^[63]。

总而言之,海表温度、降水和光照等生态因子均可能影响浒苔的沉降速率,多数学者仅针对单一影响因子进行分析,相关作用机制仍较为复杂且不够明晰。未来急需开展更为广泛的综合性研究,依托已有数据建立沉降模型,对黄海绿潮藻的沉降过程进行动态模拟,从而进一步完善已有的黄海绿潮联防联控系统,做好我国黄海绿潮灾害预警及防控工作。

5 展 望

黄海绿潮暴发十余年,针对沉降藻体的后续研究关注度较低,且尚未形成具备说服力的综合性生态影响评估报告,未来极有必要对沉降藻体的生态动态影响进行研究;此外,应开发实用型的沉降藻体监测设备并建立绿潮藻沉降模型,构建黄海海域海底生态监测网;后续应深入研究影响浒苔下沉速率的因素,开发出微生物干预等新型手段减小绿潮藻规模并加速浒苔的下沉,从而减少输入至山东近岸的绿潮藻生物量;在黄海绿潮暴发的源头海区开展防控措施方能从根源上控制绿潮藻暴发,减少陆源污染物等的排放方能解决实质性问题。

参考文献:

- [1] LANDSBERG J H, FLEWELLING L J, NAAR J. *Karenia brevis* red tides, brevetoxins in the food web, and impacts on natural resources: decadal advancements[J]. *Harmful Algae*, 2009, 8(4): 598-607.
- [2] PEACOCK M B, GIBBLE C M, SENN D B, et al. Blurred lines: multiple freshwater and marine algal toxins at the land-sea interface of San Francisco Bay, California[J]. *Harmful Algae*, 2018, 73: 138-147.
- [3] ZHANG J H, DING X W, ZHUANG M M, et al. An increase in new *Sargassum* (Phaeophyceae) blooms along the coast of the East China Sea and Yellow Sea[J]. *Phycologia*, 2019, 58(4): 374-381.
- [4] ZHAO X H, CUI J J, ZHANG J H, et al. Reproductive strategy of the floating alga *Ulva prolifera* in blooms in the Yellow Sea based on a combination of zoid and chromosome analysis[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 146: 584-590.
- [5] SONG W, WANG Z L, LI Y, et al. Tracking the original source of the green tides in the Bohai Sea, China[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2019, 219: 354-362.
- [6] WANG S Y, HUO Y Z, ZHANG J H, et al. Variations of dominant free-floating *Ulva* species in the source area for the world's largest macroalgal blooms, China: differences of ecological tolerance[J]. *Harmful Algae*, 2018, 74: 58-66.
- [7] 张晓雯, 毛玉泽, 庄志猛, 等. 黄海绿潮浒苔的形态学观察及分子鉴定[J]. *中国水产科学*, 2008, 15(5): 822-829.
- [8] SONG W, HAN H B, WANG Z L, et al. Molecular identification of the macroalgae that cause green tides in the Bohai Sea, China[J]. *Aquatic Botany*, 2019, 156: 38-46.
- [9] LIU X Q, WANG Z L, ZHANG X L. A review of the green tides in the Yellow Sea, China[J]. *Marine Environmental Research*, 2016, 119: 189-196.
- [10] HIRAOKA M, OHNO M, KAWAGUCHI S, et al. Crossing test among floating *Ulva* thalli forming 'green tide' in Japan[J]. *Hydrobiologia*, 2004, 512(1): 239-245.
- [11] PERROT T, ROSSI N, MENESGUEN A, et al. Modelling green macroalgal blooms on the coasts of Brittany, France to enhance water quality management[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 132: 38-53.
- [12] BERMEJO R, HEESCH S, MAC MONAGAI M, et al. Spatial and temporal variability of biomass and composition of green tides in Ireland[J]. *Harmful Algae*, 2019, 81: 94-105.
- [13] SMETACEK V, ZINGONE A. Green and golden seaweed tides on the rise[J]. *Nature*, 2013, 504(7478): 84-88.
- [14] CUI J J, MONOTILLA A P, ZHU W R, et al. Taxonomic re-assessment of *Ulva prolifera* (Ulvothamnaceae, Chlorophyta) based on specimens from the type locality and Yellow Sea green tides[J]. *Phycologia*, 2018, 57: 692-704.
- [15] ZHANG J H, HUO Y Z, WU H L, et al. The origin of the *Ulva* macroalgal blooms in the Yellow Sea in 2013[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 89(1/2): 276-283.
- [16] ZHAO J, JIANG P, LIU Z Y, et al. The yellow sea green tides were dominated by one species, *Ulva* (*Enteromorpha*) *prolifera*, from 2007 to 2011[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(19): 2298-2302.
- [17] ZHANG Y Y, HE P M, LI H M, et al. *Ulva prolifera* green-tide outbreaks and their environmental impact in the Yellow Sea, China[J]. *National Science Review*, 2019, 6(4).
- [18] 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.
- [19] 于仁成, 刘东艳. 我国近海藻华灾害现状、演变趋势与应对策略[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(10): 1167-1174.
- [20] ZHANG X W, XU D, MAO Y Z, et al. Settlement of vegetative fragments of *Ulva prolifera* confirmed as an important seed source for succession of a large-scale green tide bloom[J]. *Limnology and Oceanography*, 2011, 56(1): 233-242.

- [21] XING Q G, LOISEL H, SCHMITT F G, et al. Detection of the green tide at the Yellow Sea and tracking its wind-forced drifting by re-mote sensing[J]. Geophysical Research, 2010, 14: 283-293.
- [22] 乔方利, 王关锁, 吕新刚, 等. 2008 与 2010 年黄海浒苔漂移输运特征对比[J]. 科学通报, 2011, 56(18).
- [23] 乔方利, 马德毅, 朱明远, 等. 2008 年黄海浒苔爆发的基本状况与科学应对措施[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3).
- [24] 林雨霁, 杨阳, 王国善, 等. 浒苔绿潮灾害损失调查与评估方法构建[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(3): 452-456.
- [25] 孙晓娜. 藻华灾害对沿海区域的影响分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [26] 胡炜, 李成林, 韩莎, 等. 异常气候和环境对刺参养殖业的影响及应对策略[J]. 海洋科学, 2018, 42(2): 159-166.
- [27] 江涛, 徐皓, 谌志新. 浒苔打捞脱水工艺及关键设备[J]. 渔业现代化, 2009, 36(1): 38-41.
- [28] 姜紫彬. 随船浒苔打捞、脱水、打包一体化装备关键技术研究[D]. 济南: 济南大学, 2017.
- [29] 王淑贤, 韦章良, 贾睿, 等. 绿潮藻浒苔微生物高效降解及生物乙醇制备[J]. 海洋科学, 2017, 41(1): 76-82.
- [30] 张明, 徐立恒, 吕黎. 浒苔生物炭对水中砷的吸附作用[J]. 科技导报, 2015, 33(14): 78-81.
- [31] 高翔, 虞宗政, 周荣. 浒苔对有机高分子絮凝剂助凝作用的研究[J]. 渔业现代化, 2010, 37(5): 22-25.
- [32] 赵卫, 卢芸, 欧阳欢, 等. 海藻纤维素气凝胶: 从绿潮到新材料[J]. 科技导报, 2014, 32(4/5): 34-39.
- [33] 刘海燕, 马标, 单俊伟. 浒苔生物抗藻剂的研究和应用进展[J]. 海洋开发与管理, 2016, 33(4): 35-39.
- [34] JEONG J H, JIN H J, SOHN C H, et al. Algicidal activity of the seaweed *Corallina pilulifera* against red tide microalgae[J]. Journal of Applied Phycology, 2000, 12(1): 37-43.
- [35] 韩秀荣, 高嵩, 侯俊妮, 等. 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用[J]. 生态学报, 2013, 33(23): 7417-7429.
- [36] 吴青. 浒苔漂浮与沉降机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [37] 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).
- [38] 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]. 海洋与湖泊, 2018, 49(5): 1084-1093.
- [39] ZHANG J H, SHI J T, GAO S, et al. Annual patterns of macroalgal blooms in the Yellow Sea during 2007-2017[J]. PLoS ONE, 2019, 14(1): e0210460.
- [40] 卢健, 张启龙, 李安春, 等. 苏北沿岸流对浒苔暴发及漂移过程的影响[J]. 海洋科学, 2014, 38(10): 83-89.
- [41] 易俊陶, 黄金田, 宋建联. 对盐城市沿海 2008 年浒苔发生情况的初步认识[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(增刊 1): 57-58.
- [42] 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.
- [43] CUI J J, ZHANG J H, HUO Y Z, et al. Adaptability of free-floating green tide algae in the Yellow Sea to variable temperature and light intensity[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 101(2): 660-666.
- [44] WU H L, GAO G, ZHONG Z H, et al. Physiological acclimation of the green tidal alga *Ulva prolifera* to a fast-changing environment[J]. Marine Environmental Research, 2018, 137: 1-7.
- [45] 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.
- [46] 耿慧霞. 黄海绿潮原因种浒苔(*Ulva prolifera*)的附着生长特性与沉降区域研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2017.
- [47] 刘湘庆, 王宗灵, 辛明, 等. 浒苔衰亡过程中营养盐的释放过程及规律[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6): 801-805.
- [48] 丁月昱. 黄海浒苔绿潮中生源要素的迁移转化及对生态环境的影响[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2014.
- [49] 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: 12-19.
- [50] 张婷, 张传松, 石晓勇, 等. 2008 年浒苔消亡末期 35°N 断面颗粒有机物垂直分布情况[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(6): 804-807.
- [51] 张婷, 石晓勇, 张传松, 等. 2008 年浒苔消亡末期有机碳分布情况的初步研究[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(3): 324-328.
- [52] 王雪景, 金春洁, 王丽莎, 等. 2016 年夏季黄、渤海颗粒有机碳的分布特征及影响因素[J]. 海洋学报, 2018, 40(10): 200-208.
- [53] 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: 807-820.
- [54] 王婷. 浒苔对苏北近岸海域水质影响的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [55] ZHANG C, LU J, WU J, et al. Phycoremediation of coastal waters contaminated with bisphenol A by green tidal algae *Ulva prolifera*[J]. Science of the Total Environment, 2019, 661: 55-62.
- [56] ZHANG C, LU J, WU J. Adsorptive removal of polycyclic aromatic hydrocarbons by detritus of green tide algae deposited in coastal sediment[J]. Science of the Total Environment, 2019, 670: 320-327.
- [57] 张林慧, 张建恒, 赵升, 等. 2014 年青岛海域消亡漂浮浒苔生理特征研究[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(4): 591-598.
- [58] 吴青, 张建恒, 赵升, 等. 黄海绿潮漂浮浒苔对高光胁迫生态适应机制研究[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(1): 97-105.
- [59] ZHENG Z B, GAO S, WANG G C. High salt stress in the upper part of floating mats of *Ulva prolifera*, a species that causes green tides, enhances non-photochemical quenching[J]. Journal of Phycology, 2019, 55(5): 1041-1049.
- [60] 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.
- [61] ZHANG J H, HUO Y Z, ZHENG L Z, et al. Variations of morphology and photosynthetic performances of *Ulva prolifera* during the whole green tide blooming process in the Yellow Sea[J]. Marine Environmental Research, 2013, 92(6): 35-42.
- [62] 郭丽娜, 黄容, 马艳, 等. 影响青岛地区浒苔消的水文气象要素分析[J]. 科技创新导报, 2015, 12(6): 109-112.
- [63] 白雨, 赵亮, 刘境舟. 生态因子在黄海绿潮消过程中的作用[J]. 海洋学报, 2019, 41(8): 97-105.

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2019-10-23)

