

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, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.08.009
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, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.08.009

生态因子在黄海绿潮生消过程中的作用

白雨¹, 赵亮^{1*}, 刘境舟¹

(1. 天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘要: 2008–2017 年南黄海海域连续 10 a 发生绿潮, 影响周边沿海城市养殖、旅游和航运安全等。研究绿潮生消过程及其影响因素对于理解黄海绿潮分布特征, 开展绿潮灾害的预防与治理有重要意义。本文主要采用 MODIS LIB 数据, 通过归一化植被指数提取绿潮信息。根据逐年绿潮覆盖面积的变化特征, 将绿潮生消过程分为 3 个阶段: 触发阶段、快速发展阶段、消衰阶段, 分析了海表温度、降水和光照在绿潮生消过程中的作用。结果表明: 在触发阶段, 温度达到 15°C 后, 有效降水可以刺激绿潮的触发, 在降水后的半个月内可以通过 MODIS 影像发现绿潮。在快速发展阶段, 绿潮所在位置海表面温度为 16~21°C, 适宜绿潮的快速生长; 太阳短波辐射集中在 250~280 W/m² 范围内; 降水量是影响绿潮生长规模的一个重要因素, 降水量少时绿潮覆盖面积峰值明显较小, 而出现绿潮覆盖面积最大值的 2016 年降水量也极高。在消衰阶段, 海表温度上升至 22~26°C, 绿潮在卫星影像中消失时, 平均海表温度超过 26°C, 最高温度可达 27.48°C, 较高的海表面温度是导致绿潮消亡的主要原因之一; 太阳短波辐射集中在 240~260 W/m², 略低于快速发展阶段光照范围; 降水量在该阶段相对充足不再影响绿潮的生长。

关键词: 绿潮; 生消; 海表温度; 光照; 降水量; 南黄海

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)08-0097-09

1 引言

绿潮是海洋大型绿藻暴发性生长形成的藻华现象^[1], 自 2008 年后连续 10 a 不断在黄海形成灾害, 严重影响周边海域生态环境, 造成巨大的经济损失。仅 2012 年上报的直接经济损失就达 0.3 亿元, 但实际上为打捞和清理浒苔付出的经济代价以及由绿潮暴发引起的间接经济损失均要远高于此^[2]。研究绿潮的生消过程及其影响因素对预防与应对绿潮灾害有重要的意义。

自绿潮在黄海形成灾害后, 对绿潮藻种进行了大量研究, 结果表明黄海绿潮的主要优势种是浒苔^[3],

影响其生长的生态因子主要包括温度、光强、盐度、溶解氧、摄食动物等^[4]。温度影响绿潮的生长速率, 其最高生长率出现在 15~20°C^[5]。实验表明浒苔孢子/配子适宜萌发的温度范围为 15~25°C, 最适温度为 20°C, 浒苔孢子/配子体不具有耐高温性^[6]。光照强度的大小在一定程度上决定着绿潮光合作用的强弱和生长的快慢, 光照强度的升高可以显著促进浒苔的生长^[7]。浒苔的盐度适应范围较广, 在盐度 5~29 均能存活, 其中 25 和 29 为生长最适宜盐度^[8]。营养盐是浒苔生长的重要条件, 营养盐实验显示浒苔对氮的需求很高, 添加 Fe、Mn 等微量元素可明显促进浒苔的生长与繁殖^[9]。突发性、大量的营养盐输入会对浮

收稿日期: 2018-12-28; 修订日期: 2019-03-13。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1401602); 国家自然科学基金(41876018)。

作者简介: 白雨(1996—), 男, 天津市人, 研究方向为海洋生态学。E-mail: baiyu@mail.tust.edu.cn

* 通信作者: 赵亮(1975—), 教授, 从事海洋生态系统动力学研究。E-mail: zhaoliang@ouc.edu.cn

游植物生长和种群结构产生重要影响,且大气沉降中的微量元素(如 Fe、Mn 等)对海洋浮游植物的生长也有着不可忽视的作用^[10]。

研究温度和光照等生态因子对绿潮生消过程的影响,有助于理解这一灾害性生态过程。因此,本文利用遥感影像反演黄海绿潮分布,分析其变化特征,进而利用再分析数据,讨论温度、光照和降水量这 3 个生态因子在黄海绿潮生消过程中的作用。

2 数据来源与处理方法

黄海绿潮主要发生在春夏季,覆盖江苏盐城以北,山东半岛以南的黄海西部海域,本文主要研究区域范围: 31.5°~37.5°N, 119.0°~124.5°E。本文采用 2008–2017 年,云况较少或无云情况下 Terra/Aqua MODIS L1B 影像来获取绿潮分布,影像空间分辨率为 250 m×250 m,数据来源为 <https://adsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>。海表温度、太阳短波辐射和降水数据采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)提供的 ERA-interim 再分析数据,空间分辨率为 0.125°×0.125°,时间分辨率分别为 6 h、12 h 和 12 h,数据来源为 <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype%3Dsf/>。

本文利用归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)提取绿潮信息,具体方法和步骤参见郭伟等^[11]。根据绿潮的季节变化特征,将绿潮生消过程分为触发、快速发展和消衰 3 个阶段,在触发阶段,逐天提取绿潮发源地每年 4 月中旬至绿潮首次出现期间的降水量和海表温度,分析它们对绿潮触

发的影响。在绿潮快速发展与消衰阶段,根据绿潮不同覆盖范围,提取绿潮变化过程中密集区域的海表温度、太阳短波辐射和降水量,讨论它们在绿潮生消过程中的作用。

3 结果与讨论

根据 2008–2017 年多年反演结果,给出黄海绿潮的生消特征,分阶段讨论光照、温度和降水在绿潮生消过程中的作用。

3.1 黄海绿潮生消特征

黄海绿潮整个生消过程持续 60~100 d, 2017 年绿潮持续时间最短,仅约 60 d; 2009–2011 年黄海绿潮生消过程相对较短,约 70~80 d; 其余 6 年均在 90~100 d 左右^[11]。过去 10 年间,黄海绿潮覆盖面积峰值变化较大,年际变化呈现先升高后降低的趋势变化(图 1), 2016 年出现全期最大峰值,约为 7990.43 km², 在 2017 年出现全期最小峰值,仅为 977.94 km², 2010–2012 年绿潮暴发规模相对较小,峰值均没有超过 2 000 km², 其余各年约 3 000~6 000 km²。虽然每年覆盖面积差异较大,但其季节变化规律基本相同: 绿潮触发主要发生在 5 月初至 6 月初,这段时间内绿潮的覆盖面积很低,绿潮首次被 MODIS 观测到的时间,最早为 5 月 6 日,最晚为 6 月 3 日。6 月至 7 月期间,绿潮浒苔进入快速发展阶段,覆盖面积在 30~40 d 内迅速上升,其覆盖面积峰值主要出现在 6 月中旬至 7 月初之间。7 月至 8 月初绿潮浒苔进入消衰阶段,绿潮覆盖面积在达到当年峰值后迅速减小,基本在 8 月初至 8 月下旬消失。除 2017 年外,其余各年最后一次观测到绿潮的时间最早为 7 月 29 日最晚为 8 月 15 日。

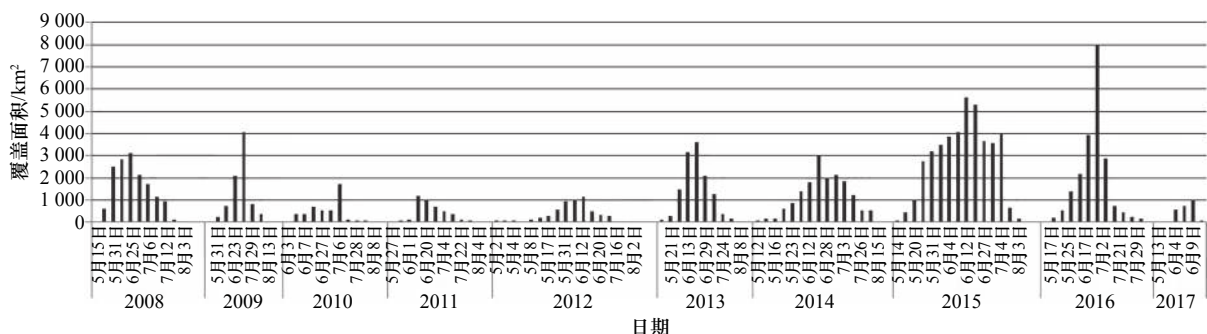


图 1 黄海绿潮覆盖面积季节和年际变化

Fig. 1 Seasonal and interannual variations of the green tide coverage in the Yellow Sea

3.2 温度和降水对绿潮触发的影响

卫星反演结果显示,绿潮首次出现时间集中在 5 月,位置集中于苏北浅滩(图 2), 2008 年、2010 年、

2014 年绿潮首先出现于江苏省盐城以北海域,呈零星状分布。2009 年、2011 年、2012 年、2015–2017 年均出现于南通以北及江苏辐射沙洲附近海域,由于早

期绿潮规模较小不易被 MODIS 观测,因此统计图 2 中 A 区域所示范围内,每年 4 月中旬至首次发现绿潮期间的降水量与海表面温度,分析它们对绿潮触发的影响。

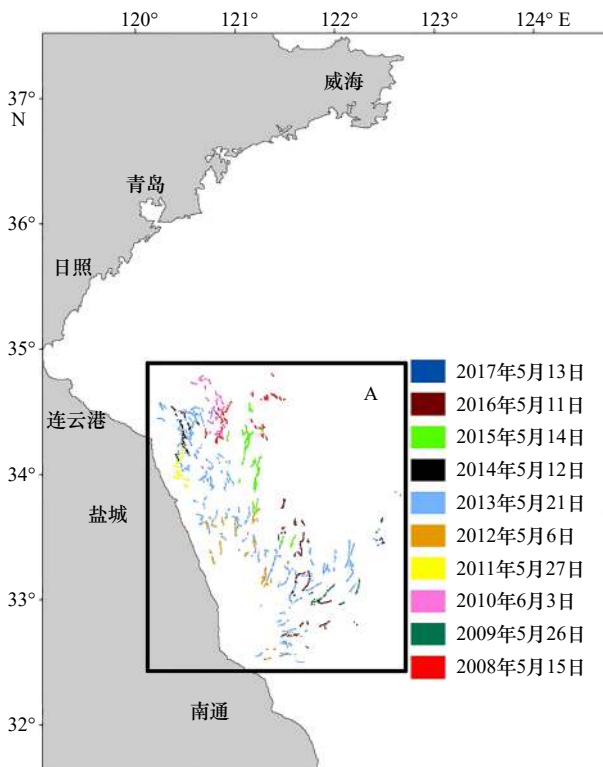


图 2 绿潮首次出现时间和位置

Fig. 2 The first appearing time and location of the green tide

以 2016 年为例,在 4 月 15 日至 5 月 11 日(绿潮首次出现)之间,降水次数较多且日降水量相差较大(图 3),根据我国气象局颁布的降水强度等级划分标准,记录中雨(24 h 内降水量为 10.0~24.9 mm)及以

上级别的降水。发现该时间段内共有 5 次中雨及以上级别降水,分别为 4 月 16 日、4 月 20 日、4 月 27 日、5 月 2 日、5 月 10 日,其中前 3 次降水期间海表面温度相对较低,分别为 11.7℃、12.1℃、13.1℃,绿潮没有伴随降水出现。随着时间推移,海表面温度逐渐上升,在第 4、5 次降水时海表面温度分别达到 14.1℃、14.9℃。第 4 次降水 6 天后,海水温度超过 15℃;5 月 10 日发生第 5 次降水,1 天后,卫星影像中发现绿潮出现。由于浒苔微观繁殖体的最适萌发温度为 15℃^[12],故推测单纯的降水不能直接促使绿潮的出现。达到适宜浒苔微观繁殖体萌发的温度条件后,降水才可以有效刺激绿潮触发。本文将温度达到 15℃ 的前半月内降水定义为有效降水,并对 2008–2017 年连续 10 a 数据进行统计分析,结果如表 1。

表 1 结果表明,在一次或者多次有效降水后 17 d 内,均可以观测到绿潮的出现。衣立等^[13]对 2008 年和 2009 年黄海西部降水与绿潮出现时间进行了比对分析,发现两年间降水明显增多时间相差约 15 d,而 2008 年和 2009 年绿潮出现时间也相差约 15 d,与本文多年统计得到认识一致。

在黄海突发性的大气降水能暂时使黄海表层富营养化,给藻华物种提供必要的生长条件^[14],并且实验表明无论是一次性还是间歇性的添加高氮低磷的雨水,浮游植物的生长都有积极响应^[15]。大气沉降带来的微量元素(如 Fe、Mn 等)对海洋浮游植物的生长有着不可忽视的作用^[10],李瑞香等^[9]的营养盐实验结果表明浒苔对氮的需求很高,添加 Fe、Mn 等微量元素可明显促进浒苔的生长与繁殖。大气输送是黄海营养盐的主要来源之一^[16],在南黄海大气沉降对该海域溶解无机氮及溶解无机磷的贡献比例分别为

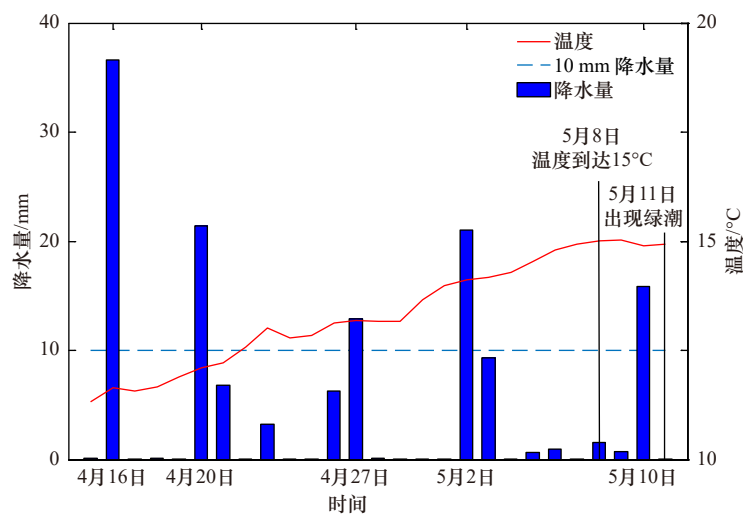


图 3 2016 年绿潮触发前温度与降水变化

Fig. 3 The variations of temperature and precipitation before the green tide trigger in 2016

表 1 2008–2017 年温度、降水与绿潮触发关系

Tab. 1 The relationship between temperature, precipitation and the green tide trigger from 2008 to 2017

年份	降水日期	温度达到15℃日期	降水与适宜温度的间隔天数/d	是否为有效降水	绿潮出现日期	首次有效降水与绿潮首发的间隔天数/d
2008	5月4日	5月11日	7	√	5月15日	11
2009	4月20日		17	×		
	5月16日	5月7日	9	√	5月26日	10
	5月20日		13	√		
2010	4月18日		26	×		
	4月19日		25	×		
	4月21日	5月14日	23	×	6月3日	17
	5月17日		3	√		
	5月22日		8	√		
2011	5月11日	5月10日	1	√	5月27日	16
2012	4月21日		16	×		
	4月24日	5月7日	13	√	5月6日	12
2013	5月9日	5月12日	3	√	5月21日	12
2014	4月26日		15	√		
	5月11日	5月11日	0	√	5月12日	16
2015	5月2日	5月11日	9	√	5月14日	12
2016	4月16日		22	×		
	4月20日		18	×		
	4月27日	5月8日	11	√	5月11日	14
	5月2日		6	√		
	5月10日		2	√		
2017	5月4日		3	√		
	5月8日	5月7日	1	√	5月13日	9
	5月12日		5	√		

35.84% 及 26.67%^[17], 刘素美等^[18] 研究表明相对于河水和海水, 降雨是在工业城市近岸地区痕量化学要素的主要来源, 并且 Fe 主要通过湿沉降进入海水表面, 其湿沉降通量可达 11.33 g/(m²·a)。因此, 大量降水可以向黄海表层输送丰富的营养盐与 Fe 等浒苔所需的痕量元素, 为浒苔生长提供较好的营养环境。适宜的海水温度也对绿潮的触发起着一定的促进作用, 陈月红^[19] 对硝酸还原酶活力 (Nitric Acid Reductase Activity, NRA) 的实验显示, 浒苔的 NRA_{max} 与 NRA 平均值均在 15℃ 最大, 且 NRA 平均值与浒苔日均相对增长率呈正相关。韩红宾等^[6] 的研究显示, 浒苔孢子/配子适宜萌发的温度范围为 15~25℃, 最适温度为

20℃。综上所述, 在温度适宜绿潮浒苔生长的同时, 降水可以向海水中输入大量的营养盐与绿潮生长所需的痕量元素如 Fe 等, 适宜的温度和有效降水共同刺激黄海绿潮的触发。

3.3 绿潮快速发展阶段生态环境分析

图 1 和图 4 表明黄海绿潮在每年 5 月出现后, 向北漂移, 漂移过程中覆盖面积迅速增加, 至 6 月下旬达到最大, 经历了一个快速发展阶段, 快速发展阶段历时 30~40 d。其中 2009 年、2016 年、2017 年绿潮浒苔覆盖面积的相对变化较大, 从首次发现到最大覆盖面积发生时, 面积分别扩大 321 倍、181 倍、180 倍, 其余各年均扩大 12~82 倍。选取每年绿潮快

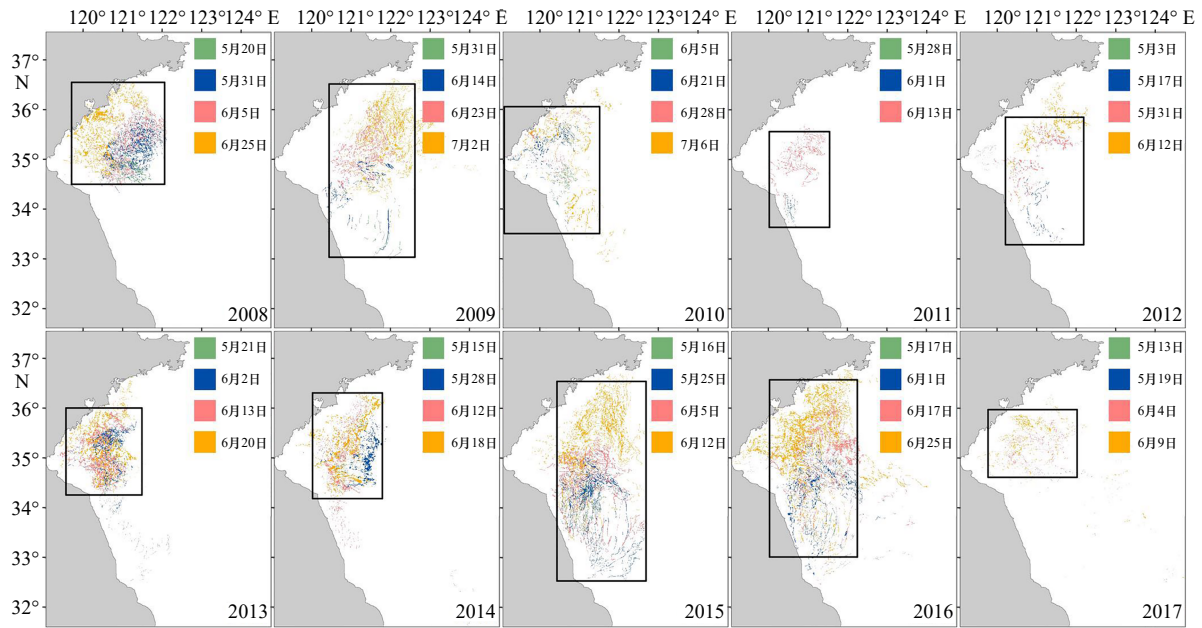


图4 绿潮快速发展阶段密集分布区域

Fig. 4 The distribution of intensive areas in the rapid development stage of green tide

速发展阶段绿潮分布密集区域作为研究区域,如图4黑框所示,分析光照、降水和温度特征。

对密集区域内的海表面温度、光照、降水进行统计,结果如表2。在绿潮快速发展阶段,绿潮主要密集区域的海表面温度普遍处于16~21℃范围内,其中最低为16.75℃,最高为20.66℃,平均为18.24℃。密集区海表温度处于适宜绿潮生长温度范围内,与Taylor等^[5]的研究结果一致,绿潮在该温度范围内出现最高生长率。Cui等^[20]研究显示,浒苔成体在

表2 2008–2017年绿潮快速增加阶段绿潮密集区域内海表面温度、太阳短波辐射、降水统计表

Tab. 2 Sea surface temperature, solar short-wave radiation, and precipitation in the intensive areas in the fast development stage of green tide from 2008 to 2017

快速发展阶段时间	海表面温度/℃	太阳短波辐射/W·m ⁻²	降水量/mm
2008 5月20日至6月25日	17.38	258.89	131.81
2009 5月31日至7月2日	20.39	276.84	41.11
2010 6月5日至7月6日	20.66	275.34	49.03
2011 5月28日至6月13日	17.52	276.40	14.15
2012 5月3日至6月12日	16.75	282.09	7.86
2013 5月21日至6月20日	17.42	259.60	103.72
2014 5月15日至6月18日	17.75	266.58	101.49
2015 5月16日至6月12日	17.51	272.49	37.81
2016 5月17日至6月25日	18.72	252.12	131.70
2017 5月19日至6月9日	18.30	284.89	20.22

15~20℃之间生长速率最高。

密集区内太阳短波辐射最低为252.12 W/m²,最高为284.89 W/m²,平均约271.82 W/m²,主要集中在250~280 W/m²范围内。崔琳琳等^[1]研究显示在绿潮早期聚集期间,太阳短波辐射能量在200 W/m²左右,有利于浒苔繁殖。吴青等^[21]在对绿潮的跟踪监测过程中测量的野外自然光辐照强度平均在1000 μmol/(m²·s)以上,但该范围已超过适宜浒苔生长的光照强度范围(180~300 μmol/(m²·s))^[6]。由于南黄海悬沙浓度较高,低海水透明度可以削弱光强,减弱了强烈光照对上层浒苔的损害,与此同时漂浮气囊的遮荫效果使得悬挂分枝在海水中所承受的光照强度也大大减弱^[21-22],李彦之^[23]也认为受水表浒苔的遮盖以及水体透明度的影响,会使得到达水下的光照大幅衰减。因此,虽然密集区短波辐射超过绿潮适宜光照,但不是主要的影响因子。

密集区内降水量差异较大,最高为131.81 mm,最低为7.86 mm,其中2011年、2012年、2017年3年的降水量明显较小,分别为14.15 mm, 7.86 mm和20.22 mm,2008年、2013年、2014年、2016年4年的降水量较大均超过100 mm。根据图1和表2可以发现绿潮覆盖面积峰值最小的3年(2011年、2012年、2017年)其快速发展阶段降水量也最小,而覆盖面积最大的2016年在快速发展阶段的降水量也极大,超过130 mm。对降水量与绿潮覆盖面积进行了相关性分析,由于绿潮快速发展阶段密集区分布稍有不同,为了避免其余环境因素干扰,按分布区域将2008年、2010年、2013年、2017年归为一类,其余几年归为另一类。结

果如图 5 所示,发现降水量与绿潮覆盖面积峰值之间存在有较好的相关性,第一类相关性较高, R^2 达到 0.85,第二类相关性 R^2 也达到 0.53。在快速发展阶段降水量与太阳短波辐射呈现负相关趋势,降水量超过 100 mm 的 4 年太阳短波辐射也最低(图略)。降水

通过湿沉降带来绿潮生长需要的营养盐和微量元素,增强了海水的垂直混合,为浒苔生长提供了丰富的陆源营养物质^[24],另一方面可以有效的避免浒苔在高光强条件下受到损伤,并防止水分流失^[25]。

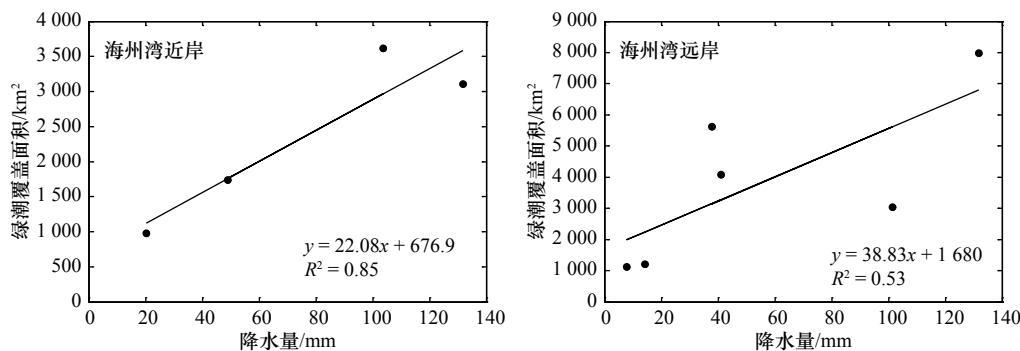


图 5 快速发展阶段绿潮覆盖面积与密集区降水量的相关分析

Fig. 5 Correlation of the green tide coverage area and precipitation in intensive areas in the rapid development stage of green tide

3.4 绿潮消衰阶段环境条件分析

根据图 1 所示,绿潮在每年 7 月至 8 月期间,面积明显下降进入消衰阶段,本文选取消衰阶段绿潮覆盖区域(图 6),对区域内的海表面温度、太阳短波辐射和降水进行统计分析,如表 3,在衰退期间覆盖区海表面温度介于 22~26℃ 间,最低为 22.50℃,最高为 25.46℃,平均约为 24.33℃,相对于快速发展阶段,绿潮分布区海表面温度明显升高。绿潮最后出现位置海表平均温度均超过 26℃,最高温度可达 27.48℃。

辛蕾等^[26]发现随着表层水温持续上升超过 25℃,绿潮覆盖面积呈现下降趋势,直至消亡。由于绿潮的消过程受海表温度影响较大^[27],通过比对末次观测到绿潮时的海表面平均温度与发展、消衰阶段海表面平均温度(图 7),发现海表面温度在绿潮发生不同阶段差异明显,超过 15℃ 绿潮触发,在快速发展阶段海表面温度范围为 16~21℃,到了消衰阶段,温度上升至 22~26℃,绿潮在卫星影像中消失的时候,平均温度超过 26℃。该认识与陈月红^[19]的实验结果相近,

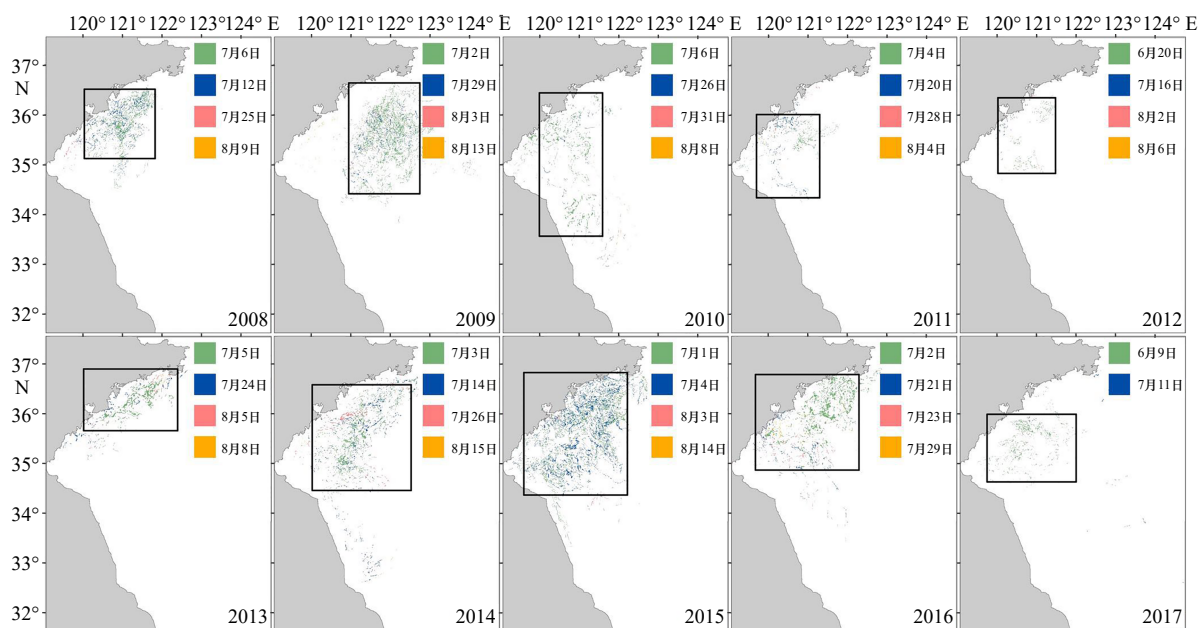


图 6 绿潮消衰阶段研究区域

Fig. 6 The study areas in the green tide depletion stage

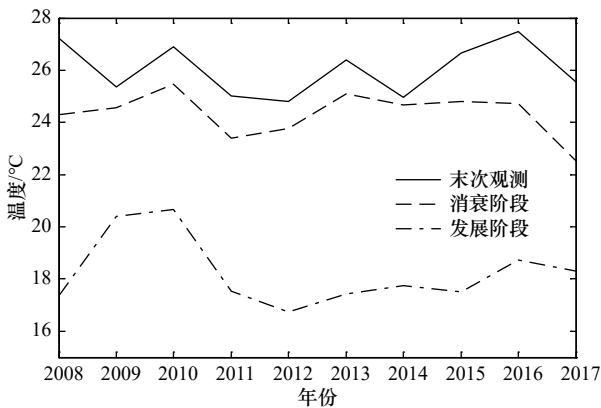


图7 绿潮发展、消衰阶段与末次观测到绿潮时海表面温度

Fig. 7 The sea surface temperature in the green tide fast development and depletion stages and at the last observation of the green tide

表3 2008–2017年绿潮消衰阶段研究区域内海表面温度、太阳短波辐射、降水统计

Tab. 3 Sea surface temperature, solar shortwave radiation, and precipitation within the study areas in the green tide depletion stage from 2008 to 2017

衰退时间	海表面温度/°C	太阳短波辐射/W·m ⁻²	降水量/mm
2008年7月6日至8月9日	24.29	235.68	131.10
2009年7月2日至8月13日	24.56	239.41	181.66
2010年7月6日至8月8日	25.46	254.23	94.77
2011年7月4日至8月4日	23.38	211.44	268.90
2012年6月20日至8月6日	23.75	249.93	201.95
2013年7月5日至8月8日	25.08	241.53	104.59
2014年7月3日至8月15日	24.66	244.85	85.06
2015年7月1日至8月14日	24.79	241.47	142.87
2016年7月2日至7月29日	24.72	246.71	84.22
2017年6月9日至7月11日	22.50	262.97	93.56

在实验后期浒苔的相对增长率大小顺序随温度升高而下降,即10°C组>15°C组>20°C组>25°C组>30°C组,且在25°C和30°C时下降趋势最为明显。Jin等^[24]也表示在消衰阶段高海表温度极大地抑制了绿潮的生长。

覆盖区太阳短波辐射最低为211.44 W/m²,最高为262.97 W/m²,平均约为242.82 W/m²,主要集中在

240~260 W/m²范围内,相比于发展阶段,太阳短波辐射略有下降,但仍超过浒苔生长的最适光照范围。在绿潮向北漂移到北黄海的过程中,海水透明度不断变高,由于没有悬浮固体的阴影,绿潮所接受的光照强度不断增强,经过日照海域的绿潮颜色显著变浅,已处于衰亡状态^[21-22],因此在北黄海,较高的透明度可能使光照成为绿潮的抑制因子^[28]。

绿潮消衰阶段,降水量最低为84.22 mm,最高为268.90 mm,总体降水量明显高于发展阶段。在发展阶段降水量与绿潮覆盖面积峰值之间存在较好的相关性,降水可能是促使绿潮形成规模的一个有利因素,而在消亡阶段降水量同样充足,因此降水不是造成绿潮消衰的主要因子,较高的海表面温度与光照抑制了浒苔的生长^[23],使得浒苔不断死亡下沉直至彻底消亡。

4 结论

本文主要采用云况较少或无云情况下空间分辨率为250 m×250 m的Terra/Aqua MODIS L1B数据,通过NDVI算法提取绿潮信息。采用欧洲中期天气预报中心提供的ERA-interim再分析数据,分析了海表面温度、光照、降水对绿潮触发、快速发展和消衰3个阶段的影响。

在触发阶段,温度达到15°C后适宜绿潮微观繁殖体的萌发,降水带来大量的氮磷营养盐和浒苔发育所需的痕量元素如Fe等,两者共同刺激绿潮的触发。在快速发展阶段,海表面温度介于16~21°C之间,适宜绿潮的快速生长;光照集中在250~280 W/m²范围内。由于南黄海海水透明度较低,极大地削弱了光强,同时浒苔的漂浮气囊也可产生一定的遮阴效果,使得高光照在该阶段并不抑制浒苔的生长;降水量与绿潮覆盖面积峰值存在一定的相关性,大量降水有利于绿潮形成规模,因此降水量和合适的温度是促进绿潮快速增长的生态因素。消衰阶段,海表温度持续上升至22~26°C,较高的海表面温度是导致绿潮消亡的主要原因之一,绿潮在卫星影像中消失的时候,平均温度超过26°C;光照主要集中在240~260 W/m²,由于绿潮向北漂移的过程中海水透明度不断变高,使得较强的光照成为绿潮的抑制因子;降水量在该阶段相对充足,不是造成绿潮消衰的主要因子。

参考文献:

- [1] 崔琳琳, 胡松, 杨红, 等. 绿潮早期聚集期间天气过程分析[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(6): 941-946.
Cui Linlin, Hu Song, Yang Hong, et al. Weather process analysis for the period during the early aggregation of green tide[J]. Marine En-

- vironmental Science, 2014, 33(6): 941–946.
- [2] 温连杰, 江崇波, 马兆江, 等. 山东省2010–2014年海洋灾害概况及防御对策建议[J]. *海洋开发与管理*, 2016, 33(6): 98–104.
Wen Lianjie, Jiang Chongbo, Ma Zhaojiang, et al. The general situation of marine disasters in Shandong Province during 2010–2014 and the defense strategies[J]. *Ocean Development and Management*, 2016, 33(6): 98–104.
- [3] 田晓玲, 霍元子, 陈丽平, 等. 江苏如东近海绿潮藻分子检测与类群演替分析[J]. *科学通报*, 2011, 56(4): 309–317.
Tian Xiaoling, Huo Yuanzi, Chen Liping, et al. Molecular detection and analysis of green seaweeds from Rudong coasts in Jiangsu Province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(4): 309–317.
- [4] 刘峰. 黄海绿潮的成因以及绿潮浒苔的生理生态学和分子系统学研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2010.
Liu Feng. The causes of green tides in the Yellow Sea, and ecophysiological and phylogenetic analysis of the bloom-forming alga, *Ulva prolifera*[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [5] Taylor R, Fletcher R L, Raven J A. Preliminary studies on the growth of selected 'green tide' algae in laboratory culture: effects of irradiance, temperature, salinity and nutrients on growth rate[J]. *Botanica Marina*, 2001, 44(4): 327–336.
- [6] 韩红宾, 韦章良, 霍元子, 等. 温度与光照强度对浒苔孢子/配子放散和萌发的影响[J]. *海洋渔业*, 2015, 37(6): 517–524.
Han Hongbin, Wei Zhangliang, Huo Yuanzi, et al. Effects of temperature and light intensity on the release and germination of *Ulva prolifera* spores/gametes[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(6): 517–524.
- [7] 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.
Meng Xiaozhi, Su Guisen, Zhuo Pinli, et al. Combined effects of temperature and light intensity on the growth and physiological performances of *Ulva prolifera*[J]. *Journal of Biology*, 2018, 35(4): 49–52, 57.
- [8] 忻丁豪, 任松, 何培民, 等. 黄海海域浒苔属(*Enteromorpha*)生态特征初探[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(2): 190–192.
Xin Dinghao, Ren Song, He Peimin, et al. Preliminary study on experimental ecology of *Enteromorpha* in Yellow Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(2): 190–192.
- [9] 李瑞香, 吴晓文, 韦钦胜, 等. 不同营养盐条件下浒苔的生长[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(2): 211–216.
Li Ruixiang, Wu Xiaowen, Wei Qinsheng, et al. Growth of *Enteromorpha prolifera* under different nutrient conditions[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(2): 211–216.
- [10] Zhang Guosen, Zhang Jing, Liu Sumei. Characterization of nutrients in the atmospheric wet and dry deposition observed at the two monitoring sites over Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2007, 57(1): 41–57.
- [11] 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.
Guo Wei, Zhao Liang, Li Xiumei. The interannual variation of green tide in the Yellow Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(12): 36–45.
- [12] 宋伟. 苏北浅滩定生绿藻的鉴定、生理特征及群落演替研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014.
Song Wei. Studies on species identification, physiological characteristics and community succession of attached green algae on Subei shoal[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2014.
- [13] 衣立, 张苏平, 殷玉齐. 2009年黄海绿潮浒苔爆发与漂移的水文气象环境[J]. *中国海洋大学学报*, 2010, 40(10): 15–23.
Yi Li, Zhang Suping, Yin Yuqi. Influence of environmental hydro-meteorological conditions to *Enteromorpha prolifera* blooms in Yellow Sea, 2009[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2010, 40(10): 15–23.
- [14] Zhang Jing, Liu Min'guang. Observations on nutrient elements and sulphate in atmospheric wet depositions over the northwest Pacific coastal oceans—Yellow Sea[J]. *Marine Chemistry*, 1994, 47(2): 173–189.
- [15] 张国森. 大气的干、湿沉降以及对东、黄海海洋生态系统的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
Zhang Guosen. Atmospheric dry and wet deposition and impact on the marine ecosystem of Yellow Sea and East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [16] Zhang J, Chen S Z, Yu Z G, et al. Factors influencing changes in rainwater composition from urban versus remote regions of the Yellow Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, 104(D1): 1631–1644.
- [17] 李鸿妹. 营养盐与黄海浒苔绿潮暴发关系的探究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Li Hongmei. Relationship between nutrients and the occurrence of macroalgal blooms in the Yellow Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [18] 刘素美, 黄薇文, 张经, 等. 青岛地区大气沉降物的化学成分研究——I. 微量元素[J]. *海洋环境科学*, 1991, 10(4): 21–28.
Liu Sumei, Huang Weiwen, Zhang Jing, et al. Chemical composition analysis of atmospheric deposition at Qingdao — I. Trace elements[J]. *Marine Environmental Science*, 1991, 10(4): 21–28.
- [19] 陈月红. 温度、光照对浒苔生长及其硝酸还原酶活性的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Chen Yuehong. Effects of temperature and solar radiation on the growth and nitrate reductase activity of *Ulva prolifera*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [20] Cui Jianjun, Zhang Jianheng, Huo Yuanzi, 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.
- [21] 吴青, 张建恒, 赵升, 等. 黄海绿潮漂浮浒苔对高光强胁迫生态适应机制研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2016, 25(1): 97–105.
Wu Qing, Zhang Jianheng, Zhao Sheng, et al. An adjustment mechanism to high light intensity for free-floating *Ulva* in the Yellow Sea[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(1): 97–105.

- [22] Zhang Jianheng, Huo Yuanzi, Zhang Zhenglong, 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: 35–42.
- [23] 李彦之. 环境因子对黄海浒苔发展的影响[J]. *现代农业科技*, 2018(15): 194–198, 201.
Li Yanzhi. Effect of environmental factors on growth of *Enteromorpha prolifera* in Yellow Sea[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018(15): 194–198, 201.
- [24] Jin Song, Liu Yongxue, Sun Chao, et al. A study of the environmental factors influencing the growth phases of *Ulva prolifera* in the southern Yellow Sea, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 135: 1016–1025.
- [25] Kim J H, Kang E J, Park M G, et al. Effects of temperature and irradiance on photosynthesis and growth of a green-tide-forming species (*Ulva linza*) in the Yellow Sea[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2011, 23(3): 421–432.
- [26] 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.
Xin Lei, Ding Yi, Wang Ning, et al. Effect on Green Tide coverage area in the Yellow Sea by surface water temperature and salinity based on remote sensing[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2018, 34(3): 210–215.
- [27] 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 Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(5): 1084–1093.
- [28] Nordby Ø. Optimal conditions for meiotic spore formation in *Ulva mutabilis* Føyn[J]. *Botanica Marina*, 1977, 20(1): 19–28.

The role of ecological factors in the progress of the green tide in the Yellow Sea

Bai Yu¹, Zhao Liang¹, Liu Jingzhou¹

(1. College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The green tide occurred in the South Yellow Sea for 10 a from 2008 to 2017, affecting aquaculture, tourism and the safety of shipping in surrounding coastal cities. Studying the progress of the green tide and their influencing factors are of vital significance for understanding the distribution characteristics of the green tide in the South Yellow Sea and for preventing and controlling the green tide disaster. MODIS L1B data is used in this paper and normalized difference vegetation index is applied to extract related information of the green tide. According to the variation characteristics of the coverage area of the green tide, the whole progress of the green tide is divided into three stages: trigger stage, fast development stage and depletion stage. And the effects of sea surface temperature, precipitation and short-wave radiation on the variation of the green tide were analyzed. The results show that in the trigger stage, when the temperature is over 15°C, effective precipitation can stimulate the triggering of the green tide. The green tide can be detected by MODIS image within half a month following the effective precipitation. In the fast development stage, the sea surface temperature at the location of the green tide is 16–21°C, which is suitable for the rapid growth of the green tide. The solar short-wave radiation is concentrated in the range of 250~280 W/m², and the precipitation is important for the growth of the green tide during this stage. The peak coverage area of the green tide is low when precipitation is small, while the precipitation is extremely high in 2016 when the peak coverage area is the largest. During the depletion stage, the sea surface temperature rises to 22–26°C. When the green tide disappears, the average sea surface temperature exceeds 26°C, and the highest temperature reaches 27.48°C. The high sea surface temperature is one of the main factors for the demise of the green tide. The solar short-wave radiation is concentrated at 240–260 W/m², which is slightly lower than that in the fast development stage. The precipitation is relatively sufficient in this stage and no longer affects the growth of the green tide.

Key words: green tide; outbreak and extinction; sea surface temperature; short-wave radiation; precipitation; south Yellow Sea