

苏北浅滩绿藻从定生到漂浮过程中的组成 及其生长特性*

韩笑天^{1, 2, 3, 4} 赵 婷¹ 苗 辉^{2, 3} 孙 斌⁵ 赵卫红^{2, 3, 4} 颜 天^{2, 3, 4}
于仁成^{2, 3, 4}

(1. 中国海洋大学 青岛 266100; 2. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 3. 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 青岛 266237; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071; 5. 天津大学 青岛海洋工程研究院 青岛 266200)

摘要 本文研究了苏北浅滩紫菜养殖筏架上附生的定生绿藻及海面上的漂浮绿藻在 3 月底和 5 月初的群落组成及其演替变化。分别通过设置滩涂围隔实验和船基围隔实验, 研究附着态和漂浮态绿藻和浒苔(*Ulva prolifera*)的相对生长率, 分析浒苔在苏北浅滩的实际生长状况以及滩涂潮水涨落对于浒苔成为优势种的影响, 以期了解其暴发绿潮的原因。结果显示 3 月底定生绿藻群落主要以曲浒苔(*U. flexuosa*)和盘苔(*Blidingia minima*)为主要优势种, 未见浒苔出现。5 月初定生绿藻群落中主要以盘苔和扁浒苔(*U. compressa*)为优势种, 其中浒苔只占 15%。而在 5 月初海面漂浮的绿藻中, 浒苔成为主要优势种, 比例达到 76%。在设置的船基围隔和滩涂围隔的生长实验中, 均以 5 月初定生绿藻为初始生物量, 其中附着态浒苔在转变为漂浮态浒苔过程中都获得了较高生长率, 其平均相对生长率分别为 53.0 和 64.2%/d, 而漂浮态浒苔在船基围隔中获得相对生长率则较低, 为 19.1%/d。实验结果表明, 定生绿藻中定生浒苔更快适应漂浮状态, 可以通过高生长率迅速成为漂浮绿藻中的绝对优势种, 为其暴发绿潮奠定生物量基础。

关键词 苏北浅滩; 绿藻; 浒苔(*Ulva prolifera*); 相对生长率; 围隔

中图分类号 Q14 **doi:** 10.11693/hyhz20181000258

20 世纪 70 年代, 一些大型绿藻过度生长, 并在岸线上沉积, 对生态及环境造成不良影响, 被称为“绿潮”(Fletcher, 1996)。绿潮主要由石莼属(*Ulva*)、刚毛藻属(*Cladophora*)、硬毛藻属(*Chaetomorpha*)等大型定生绿藻脱离固着基后, 漂浮并不断增殖导致的藻类灾害(Blomster *et al.*, 2002; Nelson *et al.*, 2003)。绿潮目前已成为世界沿海各国普遍发生的生态异常现象, 在欧洲、亚洲、北美洲和澳大利亚均有记录, 主要发生在河口、内湾、瀉湖和城市密集的沿海(Morand *et al.*, 2004)。绿潮藻通常无毒, 但会造成诸如破坏栖息地、

消耗氧气以及改变生物地球化学循环等环境变化, 并最终影响生态系统的生物多样性(Burkholder *et al.*, 2007; Van Alstyne *et al.*, 2015)。

从 2007 年至今, 黄海近海海域已经连续 11 年暴发了大规模绿潮灾害, 不仅破坏了海洋生态系统及生态服务功能, 也造成巨大的经济损失。2008 年青岛奥帆赛举办之前, 清理浒苔已花费了 6 亿元(Wang *et al.*, 2009; Zhou *et al.*, 2015)。通过形态和分子生物学分析, 浒苔 *Ulva prolifera* (*Enteromorpha prolifera*)被确认为黄海绿潮藻中的优势种(Ye *et al.*, 2011; Zhao *et al.*,

* 青岛海洋科学与技术国家实验室鳌山科技创新计划项目, 2016ASKJ02-01 号; 中国科学院战略性先导科技专项子课题, XDA1201020304 号。韩笑天, 副研究员, E-mail: xthan@qdio.ac.cn

通信作者: 于仁成, 研究员, E-mail: rcyu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2018-10-31, 收修改稿日期: 2018-12-10

2013)。使用遥感数据发现, 黄海和东海海域漂浮的绿潮来源于苏北近岸海域(Hu *et al.*, 2010; Son *et al.*, 2012), 特别是在北纬 32.8°至 33.8°之间(Liu *et al.*, 2009)。早期绿藻漂浮斑块起始于 4 月下旬, 在海面上自南向北迁移和漂浮生长, 并在 6 个星期左右到达山东近海, 形成大规模绿潮(Li *et al.*, 2014)。

苏北浅滩位于江苏省北岸, 从长江三角洲到射阳河, 宽 200 公里, 纵向 90 公里。这一地区的特点是沉积物松散, 潮汐活动强烈, 水动力复杂, 水体浑浊(Wang *et al.*, 2011)。在苏北浅滩的大部分地区, 水深小于 15 米, 周边水深为 20—30 米; 浅滩淹没在高潮中, 在退潮时暴露(Zhou *et al.*, 1981)。在这些径向沙丘上, 养殖了占中国生产总量 65%的紫菜。2006 年至 2008 年, 苏北浅滩紫菜养殖规模大幅度扩大, 养殖面积已达 20000 公顷左右。

由于苏北浅滩在低潮时, 潮间带海藻在空气中暴露呈干出状态, 且周围环境条件变化剧烈, 从而使其处于高光强、高温、脱水、营养限制以及渗透胁迫等胁迫环境因子条件下。同时通过苏北浅滩地区实地调查发现, 渔民从紫菜筏架上清除附着的绿藻, 许多绿藻藻体被释放到滩涂上使其处于干露状态(Liu *et al.*, 2010, 2013; Zhang *et al.*, 2011, 2014; Wang *et al.*, 2015)。以往研究主要在实验室内针对绿藻群落演替及其不同绿藻种类的生长特性开展研究, 并未进行现场研究。本文通过在苏北浅滩紫菜筏架养殖现场设置滩涂围隔实验和船基围隔实验, 针对特殊的潮汐作用下筏架干出和水浸过程中定生和漂浮绿藻生长特性开展相关研究。本研究的目的在于了解: (1) 绿潮暴发初期, 绿藻群落演替及生长率情况如何? (2) 绿藻从定生到漂浮过程中, 浒苔及其他绿藻的生长竞争状况如何? (3) 苏北浅滩潮水涨落对于脱落绿藻生长率有何影响? 此项研究的结果将为进一步了解浒苔绿潮的形成原因提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 藻体采集

选择苏北浅滩作为实验地点, 调查船定点坐滩, 实验地点为 32°47'N, 121°17'E(图 1), 季节选择绿藻附着和浒苔出现的关键期 3 月下旬(3 月 30 日—4 月 4 日)和 5 月初(5 月 7 日—12 日)。藻体样本选择该实验地点的紫菜养殖筏架, 采集 2017 年 3 月底和 5 月初筏架上附着的定生绿藻和海面采集的漂浮绿藻。取样时尤其要注意尽可能保持绿藻附着基的完整, 然后

分别装入样品袋, 采样结束回到船上对样品进行初处理, 用海水冲洗掉夹带在样品中的泥沙, 自然阴干、冷藏带回陆地实验室分析。

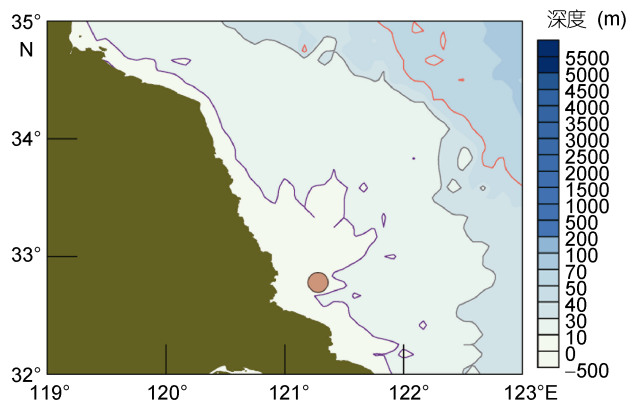


图 1 围隔实验地点(图中红色点为实验地点)

Fig.1 Location of the mesocosm experiment in the field (the red dot)

1.2 围隔设置

2017 年 3 月 30 日—4 月 4 日, 5 月 7 日—5 月 12 日期间, 在苏北浅滩设置滩涂围隔实验。针对 5 月初在海面上开始出现漂浮浒苔的现象, 同时设置了船基围隔实验。滩涂围隔设置为通透型围隔, 底部悬空 20cm, 围隔内水位随潮水涨落, 围隔网孔为 1mm(防止浒苔从网孔中漏出)。船基围隔装置为宽 1.5m、长 2m、高 1m 的小型模块化围隔装置, 该装置主要由围隔体系、循环水装置及装载水装置组成, 绿藻分别用透明网筛分隔。

滩涂围隔和船基围隔中分别放入初始生物量为 100g 的绿藻样品, 初始样品为 3 月底和 5 月初紫菜养殖筏架上附着的定生绿藻藻体和 5 月份海面采集的漂浮绿藻藻体, 设置 5 个平行样。每两天称重一次: 将藻样捞出, 用纱布包裹, 分别用吸水纸吸取水分至无水滴滴落, 再将样品放在电子秤上(精度为 0.01g, 友声 BS300+, 上海友声衡器有限公司)称重。

藻体相对生长率(relative growth rate, RGR)按照公式(1)计算,

$$RGR (\%/d) = 100(\ln W_t - \ln W_0)/t,$$

式中, W_0 为藻体初始湿重(g); W_t 为培养第 t 天藻体湿重(g); t 为培养时间(d)。

1.3 藻体形态鉴定

每个样本随机挑取 10 根单独藻体, 进行形态鉴定。将绿藻样品放置于样品盘, 加入海水使其悬浮于其中, 根据其形态学特点包括: 藻体颜色、形状、分

枝情况、是否中空等特点,参考相关文献(丁兰平等, 2008, 2009)对其进行形态学鉴定。

1.4 环境因子测定

海水表层温度采用海水表层温度计测量(wqg-17 表层温度计, 建兴仪表厂), 海水盐度采用手持式盐度计测量(master-s28 α 型手持式盐度计, 日本 ATAGO)。

1.5 统计分析

本研究所获得的数据,均来自完全独立的藻体样品。绿藻及浒苔生物量在不同生长时期的变化以 ANOVA 进行验证。

2 结果

2.1 不同时期和不同生长状态绿藻的群落组成及其在围隔的生长

2.1.1 紫菜养殖筏架上绿藻定生及其脱落后漂浮状态的群落组成变化

2017 年 3 月底紫菜筏架附着定生绿藻主要由曲浒苔、盘苔、扁浒苔和缘管浒苔组成, 曲浒苔和盘苔为主要优势种, 湿重生物量在绿藻群落中所占比例分别为 52.6%和 25.6%; 扁浒苔和缘管浒苔在绿藻群落中生物量所占比例相对较低, 分别为 14.6%和 7.2%; 绿藻群落中没有出现浒苔, 海面只见到极少量绿藻漂浮在海面(图 2)。5 月初紫菜养殖筏架上附着定生绿藻生物量明显高于 3 月底附着定生绿藻生物量(图 2a, 图 2d, 图 3), 主要优势种为盘苔和扁浒苔, 盘苔生物

量在绿藻群落中所占比例最高, 为 47%; 其次为扁浒苔, 为 38%; 定生绿藻群落中开始出现浒苔, 但是在绿藻生物量中所占生物量比例不高, 为 15%(图 3)。此次定生绿藻可见大量中空管状藻体(图 2e, 图 2f), 海面可见斑块状漂浮绿藻。海面漂浮绿藻的群落组成与定生绿藻的群落组成有较大差异, 其主要优势种为浒苔、扁浒苔和盘苔, 浒苔为主要优势种, 在漂浮绿藻群落中生物量所占比例为 76%, 其次为扁浒苔为 16%, 盘苔所占比例最少, 仅为 8%, 与定生绿藻群落中优势种差异较大, 结果见图 3。

2.1.2 滩涂围隔中不同时期定生绿藻的生长 3 月底和 5 月初定生绿藻在滩涂设置的围隔(藻体随潮水涨落有干露和水浸状态)中进行生长实验。由图 4 可知, 滩涂围隔中以 3 月底定生绿藻为初始绿藻时, 在实验 5 天后, 生物量从 100g 减少为 40.4g, 绿藻群落以盘苔、扁浒苔、曲浒苔和缘管浒苔组成, 生物量均下降(图 4)。滩涂围隔中以 5 月初定生绿藻为初始绿藻时, 在实验 5 天后, 生物量从 100g 增加到 146.9g, 绿藻群落由浒苔、盘苔和扁浒苔组成, 浒苔的生物量增加显著, 从第一天 15g, 第三天增加到 75.3g, 第五天即增加到 105.8g; 在绿藻中的组成比例同样增加显著, 实验过程中, 从第一天生物量组成比例为 15%, 在第三天和第五天分别增加到 62%和 72%, 生物量增加呈显著性差异; 盘苔组成比例则呈下降趋势, 由初始的 47%下降到 10%, 扁浒苔呈同样趋势, 由初始的 38%下降为 18%, 均呈显著性差异(图 5)。



图 2 2017 年紫菜养殖筏架定生绿藻及海面漂浮绿藻

Fig.2 Attached green algae on *Porphyra* agriculture rafts and free-floating green algae at sea surface in 2017

注: a. 3 月底紫菜养殖筏架上附着的定生绿藻; b. 3 月底定生绿藻形态; c. 3 月底定生绿藻采集后置于桶中的漂浮状态; d. 5 月初紫菜养殖筏架上定生绿藻; e. 5 月初定生绿藻形态; f. 5 月初漂浮在海面上的绿藻

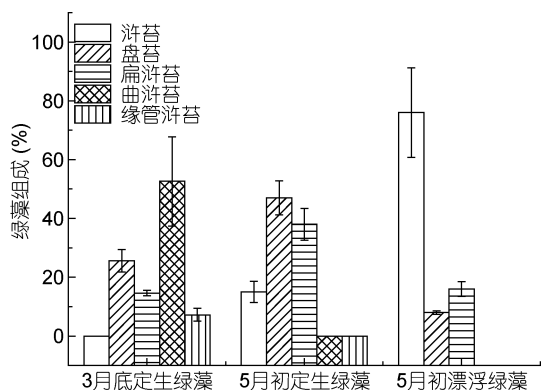


图3 2017年3月底和5月初紫菜养殖筏架定生绿藻及漂浮绿藻群落组成变化

Fig.3 Variation of the community composition of the attached green algae on *Porphyra* agriculture rafts and free-floating green algae at sea surface in early May and late March, 2017

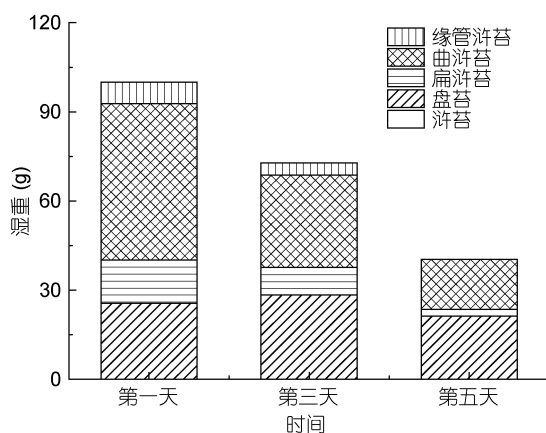


图4 3月底滩涂围隔绿藻生物组成和生物量变化

Fig.4 Variations in community composition and biomass of green algae in the shoal based mesocosm in late March, 2017

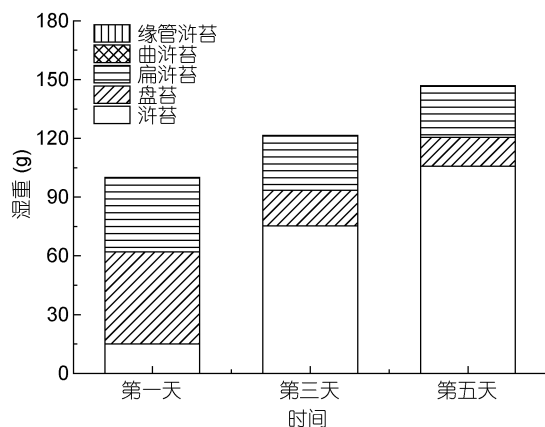


图5 5月初滩涂围隔绿藻生物组成和生物量变化

Fig.5 Variations in community and biomass of green algae in the shoal based mesocosm in early May, 2017

2.1.3 船基围隔中定生绿藻和漂浮绿藻的生长 5月初紫菜养殖筏架上附着生长的定生绿藻中开始出

现浒苔, 且在海面出现斑块状漂浮绿藻, 在船基围隔实验中分别放置定生绿藻和海面漂浮绿藻进行生长实验。船基围隔中初始绿藻为5月初定生绿藻组, 在围隔生长三天后, 浒苔生物量从3.75g增长到26.06g; 绿藻浒苔生物量所占比例从12.5%增加到72%; 曲浒苔和盘浒苔生物量减少, 分别从15.8g和10.5g减少到3.6g和6.5g; 浒苔生物量增加和曲浒苔、盘浒苔生物量减少均呈显著性差异(图6)。船基围隔中初始绿藻为海面漂浮绿藻组, 在围隔中生长三天后, 浒苔生物量从22.8g增加到40.3g, 绿藻中组成比例从76%增加到83%, 差异显著; 曲浒苔和盘浒苔生物量基本与初始保持一致, 生物量没有显著性增加(图6)。

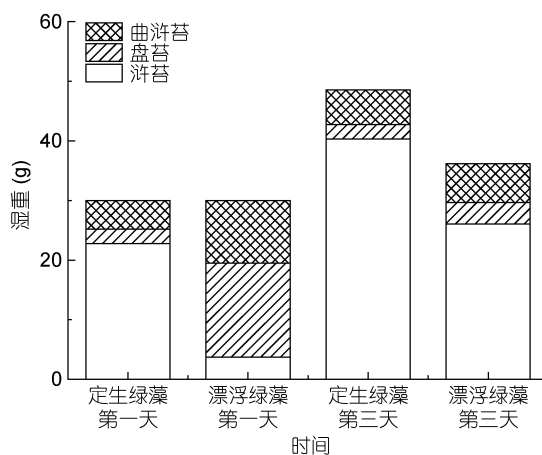


图6 5月初定生绿藻和漂浮绿藻在船基围隔中的生物组成及生物量变化

Fig.6 Variations in community composition and biomass of rooted and floating green algae in the ship-attached mesocosm in early May, 2017

2.2 绿藻在不同生长状态下相对生长率变化

以5月初定生绿藻作为初始培养对象放置在船基围隔中进行生长实验, 其中定生浒苔获得相对生长率较高为64.2%/d, 定生绿藻获得的相对生长率为7.1%/d; 而以5月初定生绿藻作为初始培养对象放置在滩涂围隔中进行生长实验时, 其中浒苔同样获得较高相对生长率, 在第3天时获得平均相对生长率为53.0%/d, 第5天时获得的平均相对生长率降低, 为39%/d(图7), 而定生绿藻在滩涂围隔中平均相对生长率仅为6.2%/d。

以5月初漂浮绿藻作为初始培养对象放置在船基围隔中进行3天的生长实验, 其中漂浮浒苔获得的相对生长率为19.1%/d, 与漂浮绿藻获得的相对生长率相近(16.0%/d)。

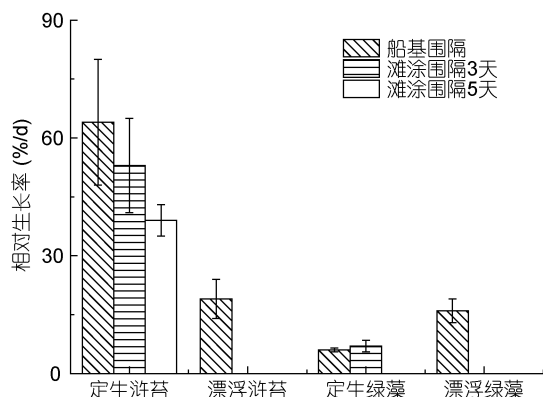


图7 定生绿藻、漂浮绿藻、定生浒苔和漂浮浒苔相对生长率的比较

Fig.7 Comparison in the relative growth rate of attached and free-floating green algae and *U. prolifera*

2.3 不同时期苏北浅滩海洋环境因子的变化

3 月底测定海域温度变化范围为 $10.6\text{--}12.6^{\circ}\text{C}$, 平均温度为 $(11.4\pm 0.8)^{\circ}\text{C}$; 5 月初温度变化范围为 $17.5\text{--}20.8^{\circ}\text{C}$, 平均温度为 $(18.8\pm 1.3)^{\circ}\text{C}$ 。3 月底测定海域盐度变化范围为 $29.4\text{--}30.3$, 平均盐度为 30.0 ± 0.5 ; 5 月初盐度变化范围为 $27.2\text{--}29.2$, 平均盐度为 28.7 ± 1.0 。3 月底和 5 月初温度及盐度变化见图 8。5 月初海域温度比 3 月底海域温度高 $6\text{--}8^{\circ}\text{C}$, 5 月初海域盐度比 3 月底海域盐度略低。

3 讨论

3.1 紫菜养殖筏架上定生绿藻群落组成的演替

筏架上定生绿藻群落演替现象明显, 3 月份筏架上定生绿藻的种类组成和生物多样性明显高于 5 月份, 筏架上存在 4 种定生绿藻, 分别为扁浒苔、盘苔、曲浒苔及缘管浒苔; 其中曲浒苔和盘苔为主要优势种, 浒苔没有出现。5 月份, 定生绿藻的种类多样性明显下降, 筏架上主要存在 3 种定生绿藻, 分别为盘苔、扁浒苔和浒苔; 其中盘苔藻为主要优势种, 其生物量比例显著高于浒苔和扁浒苔在绿藻中的生物量组成比例; 浒苔在 5 月份定生绿藻中出现, 但是所占比例不高。5 月份海面上漂浮绿藻中开始出现浒苔, 且浒苔的比例显著高于定生浒苔所在绿藻中的比例, 达到 76%。宋伟(2014)通过 2012 年 3 月初至 5 月中旬的六个航次中调查研究发现, 共计 6 种定生绿藻被发现存在于紫菜养殖筏架上, 它们分别为盘苔、浒苔、缘管浒苔、扁浒苔、肠浒苔 *Ulva intestinalis* 从及条浒苔 *Ulva clathrata*, 浒苔、缘管浒苔及盘苔藻是筏架上的主要定生绿藻。自 3 月初至 5 月期间, 筏架上定生绿藻的生物多样性呈明显下降趋势。在 3 月上旬

及中旬航次中, 此时筏架上定生绿藻共计发现 5 种绿藻, 其中浒苔的生物量较小。在 4 月份航次中, 盘苔藻及浒苔的出现频率较高, 而其他几种绿藻只是在某些时间段内出现。而到 5 月中旬, 紫菜养殖筏架上只发现三种定生绿藻, 其种类多样性达到最低, 此时在筏架上几乎已经无法发现缘管浒苔的存在(宋伟, 2014)。紫菜筏架早期附着的绿藻优势种为浒苔、肠浒苔, 绿潮初期海面漂浮绿藻有浒苔、肠浒苔和缘管浒苔, 然而在后期大规模绿潮暴发后, 漂浮绿藻主要为浒苔(Zhao *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2015)。Fan 等(2015)报道紫菜筏架上发现有 6 种绿藻, 而在紫菜养殖过程中, 筏架上的绿藻优势种由扁浒苔、肠浒苔、条浒苔转变为盘苔藻和浒苔。另有研究发现紫菜养殖筏架上收集到的大型绿藻样品主要有浒苔、缘管浒苔、扁浒苔、孔石莼 *Ulva pertusa* 和盘苔藻(Shen *et al.*, 2012; Han *et al.*, 2013), 浒苔在紫菜筏架附着绿藻中的比例从 3 月至 5 月逐渐增加, 5 月达到 40%, 从 4 月中旬至五月底大约有 6500 吨的浒苔被释放到海水中, 并成为漂浮绿藻(Wang *et al.*, 2015)。

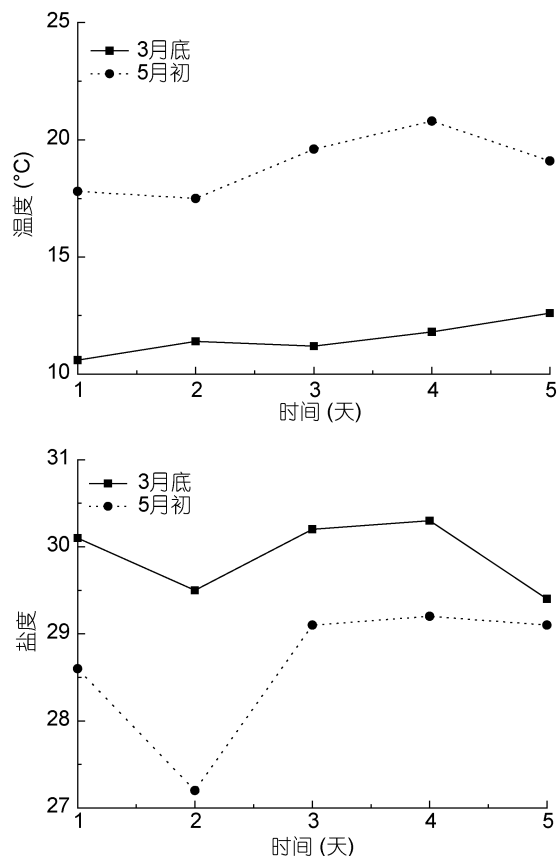


图8 苏北浅滩 3 月底和 5 月初温度盐度变化曲线
Fig.8 Variation of temperature and salinity in late March and early May, 2017 in the Subei Shoals

表 1 紫菜养殖筏架定生绿藻不同年际间生物多样性变化
Tab.1 Ulva biodiversity variation on the Porphyra culture raft in different years

定生绿藻		2012 ¹	2013 ²	2015 ³	2017
浒苔	<i>Ulva prolifera</i>	√	√	√	√
盘苔	<i>Blidingia minima</i>	√	√	√	√
扁浒苔	<i>U. compressa</i>	√	√	√	√
曲浒苔	<i>U. flexuosa</i>				√
缘管浒苔	<i>U. linza</i>	√	√		√
肠浒苔	<i>U. intestinalis</i>	√		√	
条浒苔	<i>U. clathrata</i>	√		√	
孔石莼	<i>U. pertusa</i>		√		

注: ¹: 引自宋伟, 2014; ²: 引自 Han *et al.*, 2013; ³: 引自 Fan *et al.*, 2015

紫菜养殖筏架附着定生绿藻在不同年度调查中, 表现出不同的生物多样性和生物群落组成。早期生物群落主要由 5—6 种绿藻组成(表 1), 而后期绿藻生物群落主要由 2—3 种绿藻组成, 主要为浒苔、盘苔和扁浒苔, 而漂浮绿藻中主要为浒苔。

3.2 绿藻生长的非生物影响因子

绿藻生长过程中温度和光照是其最重要的环境因子, 不同种类绿藻有不同的温度和光照适应性(Taylor *et al.*, 2001)。温度是控制大型海藻生长及其各种营养吸收的重要因子, 对藻类的呼吸作用、光合作用及酶活性都有显著影响(Nelson *et al.*, 2008)。曲浒苔具有广温广盐性, 因此在 3—5 月的紫菜养殖季节中都有曲浒苔的出现。扁浒苔和缘管浒苔在 15°C 下均具有最快生长率, 缘管浒苔在低温条件下仍然生长较好(Taylor *et al.*, 2001); 由于扁浒苔和缘管浒苔都适应低温和低光照, 因此在 3—4 月低温季节时是主要优势种。缘管浒苔在 10°C 和 15°C 下均生长较快, 但是培养温度一旦超过 20°C 藻体就较易腐烂, 因此 3—5 月随着温度的升高, 缘管浒苔逐渐消失。不同培养温度下的研究发现, 浒苔微观繁殖体的最适宜萌发温度是 15°C, 缘管浒苔为 10°C, 盘苔藻为 20°C, 曲浒苔为 25°C, 这一结果表明紫菜养殖筏架定生绿藻的群落演替主要受温度影响(宋伟, 2014)。盘苔同样为广温广盐性绿藻, 但是在不同温度下生长速率都明显较低(宋伟, 2014)。吴洪喜等(2000)研究表明, 浒苔的生长温度为 10—30°C, 最适生长温度为 15—25°C。浒苔、缘管浒苔以及盘苔在不同培养温度下的生长率不同, 单种培养的浒苔在 15°C 时生长速率最快。浒苔表现出更广的温度适应性, 在低温 5°C 至高温 25°C 下其生长率均有增加。在富营养化海域, 浒苔具有形态多样、营养盐吸收和同化能力强的特点(Luo *et al.*, 2012),

且具有广泛的温度和盐度适应性, 从而可以优于其他大型绿藻快速增加生物量(Li *et al.*, 2009)。由此可知, 浒苔具有更广泛的生态适应性, 在不同温度下均表现出较高的生长率。

苏北浅滩上的浒苔由于其特殊的定生环境, 在高潮时于水中进行光合作用而在低潮时暴露在空气中, 因此在紫菜养殖筏架上绿藻的演替不仅与温度相关, 而且与光照和暴露时间等非生物影响因子密切相关。Keesing 等(2016)研究表明, 筏架上浒苔的生物量积累与营养盐水平、温度和干出时间具有显著相关性, 而与 pH、光照和盐度的变化及浒苔生物量积累不相关。绿藻最大生物量出现在最低氮浓度区, 这表明在氮限制条件下, 温度、光照和暴露时间很重要。黄显军等(2012)研究了浒苔、肠浒苔和扁浒苔在有光照和无光照的条件下的死亡率, 发现干燥时浒苔在耐受性上明显优于肠浒苔和扁浒苔。吴洪喜等(2000)发现浒苔生长的最适光照强度是 5000—6000 lx, 此时生长最快, 高于 10000 lx 的强光照条件下, 生长又转为减慢, 但藻体生长仍呈正增长。浒苔适应生长季节为 5 月中旬至 6 月底, 当温度升到 30.8°C, 仍然可以存活, 且可以暴露在极高光照条件下(Liu *et al.*, 2009)。邹定辉等(2004)认为即使失水率达到 70% 时, 大型藻类仍可保持近 59% 的光合效率; 在低潮干出状态时, 筏架上的定生浒苔也能进行光合作用但其光合效率会明显下降, 然而在其脱离筏架成为漂浮状态时, 可保持更好的光合作用效率。在本研究中, 5 月份海面开始出现斑块状漂浮绿藻, 其中漂浮浒苔所占比例显著高于紫菜养殖筏架上的定生浒苔, 且 5 月份定生绿藻中浒苔从定生转变为漂浮状态初期, 在船基围隔和滩涂围隔中的生长实验中都表现出极高的相对生长率, 表明浒苔更适应漂浮状态, 通过高生长率可以

迅速成为漂浮绿藻中的绝对优势种,为其暴发绿潮奠定生物量基础。

4 结语

通过本研究发现,紫菜筏架定生绿藻群落的演替变化为随温度升高,其生物多样性降低。浒苔通常在 4—5 月份出现,在定生绿藻中浒苔比例并不占主要优势,但是由于紫菜养殖筏架附着绿藻特殊的消除方式,使其从定生转变为漂浮状态,在此转变过程中,浒苔表现出极高的生长率和迅速适应的漂浮状态,因此成为漂浮绿藻中的绝对优势种,并最终暴发绿潮。因此紫菜筏架早期绿藻的及时处置对于绿潮早期防治具有重要的科学意义。

参 考 文 献

- 丁兰平, 栾日孝, 2009. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)的分类鉴定、生境习性及其分布. 海洋与湖沼, 40(1): 68—71
- 丁兰平, 栾日孝, 黄冰心等, 2008. 黄海西部、渤海海域盒管藻科 Capsosiphonaceae(石莼目 Ulvales)的分类研究. 海洋学报, 30(2): 169—174
- 吴洪喜, 徐爱光, 吴美宁, 2000. 浒苔实验生态的初步研究. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 19(3): 230—234
- 邹定辉, 阮祚禧, 陈伟洲, 2004. 干出状态下羊栖菜的光合作用特性. 海洋通报, 2004, 23(5): 33—39
- 宋 伟, 2014. 苏北浅滩定生绿藻的鉴定、生理特征及群落演替研究. 长沙: 湖南农业大学博士学位论文
- 黄显军, 骆其君, 2012. 光照与低温对 3 种浒苔存活的影响. 宁波大学学报(理工版), 25(1): 24—26
- Blomster J, Bäck S, Fewer D P *et al*, 2002. Novel morphology in *Enteromorpha* (Ulvophyceae) forming green tides. American Journal of Botany, 89(11): 1756—1763
- Burkholder J M, Tomasko D A, Touchette B W, 2007. Seagrasses and eutrophication. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 350(1—2): 46—72
- Fan S L, Fu M Z, Wang Z L *et al*, 2015. Temporal variation of green macroalgal assemblage on *Porphyra* aquaculture rafts in the Subei Shoal, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 163: 23—28
- Fletcher R L, 1996. The occurrence of “green tides”—a review. In: Schramm W, Nienhuis P H eds. Marine Benthic Vegetation. Berlin, Heidelberg: Springer, 7—43
- Han W, Chen L P, Zhang J H *et al*, 2013. Seasonal variation of dominant free-floating and attached *Ulva* species in Rudong coastal area, China. Harmful Algae, 28: 46—54
- Hu C M, Li D Q, Chen C S *et al*, 2010. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea. Journal of Geophysical Research: Oceans, 115(C5): C05017, doi: 10.1029/2009JC005561
- Keesing J K, Liu D Y, Shi Y J *et al*, 2016. Abiotic factors influencing biomass accumulation of green tide causing *Ulva* spp. on *Pyropia* culture rafts in the Yellow Sea, China. Marine Pollution Bulletin, 105(1): 88—97
- Li R X, Wu X W, Wei Q S *et al*, 2009. Growth of *Enteromorpha prolifera* under different nutrient conditions. Advances in Marine Science, 27(2): 211—216
- Li Y, Song W, Xiao J *et al*, 2014. Tempo-spatial distribution and species diversity of green algae micro-propagules in the Yellow Sea during the large-scale green tide development. Harmful Algae, 39: 40—47
- Liu D, Keesing J K, Dong Z *et al*, 2010. Recurrence of Yellow Sea green tide in June 2009 confirms coastal seaweed aquaculture provides nursery for generation of macroalgal blooms. Marine Pollution Bulletin, 60: 1423—1432
- Liu D Y, Keesing J K, He P M *et al*, 2013. The world's largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: formation and implications. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 129: 2—10
- Liu D Y, Keesing J K, Xing Q G *et al*, 2009. World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China. Marine Pollution Bulletin, 58(6): 888—895
- Luo M B, Liu F, Xu Z L, 2012. Growth and nutrient uptake capacity of two co-occurring species, *Ulva prolifera* and *Ulva linza*. Aquatic Botany, 100: 18—24
- Morand P, Merceron M, 2004. Coastal eutrophication and excessive growth of macroalgae. In: Pandalai S G ed. Recent Research Developments in Environmental Biology, Vol 1(2). Trivandrum, Kerala, India: Research Signpost, 395—449
- Nelson T A, Haberlin K, Nelson A V *et al*, 2008. Ecological and physiological controls of species composition in green macroalgal blooms. Ecology, 89(5): 1287—1298
- Nelson T A, Lee D J, Smith B C, 2003. Are “green tides” harmful algal blooms? Toxic properties of water-soluble extracts from two bloom-forming macroalgae, *Ulva fenestrata* and *Ulvaria obscura* (Ulvophyceae). Journal of Phycology, 2003, 39(5): 874—879
- Shen Q, Li H Y, Li Y *et al*, 2012. Molecular identification of green algae from the rafts based infrastructure of *Porphyra yezoensis*. Marine Pollution Bulletin, 64(10): 2077—2082
- Son Y B, Min J E, Ryu J H, 2012. Detecting massive green algae (*Ulva prolifera*) blooms in the Yellow Sea and East China Sea using geostationary ocean color imager (GOCI) data. Ocean Science Journal, 47(3): 359—375
- Taylor R, Fletcher R L, Raven J A, 2001. Preliminary studies on the growth of selected ‘green tide’ algae in laboratory culture: effects of irradiance, temperature, salinity and nutrients on growth rate. Botanica Marina, 44: 327—336
- Van Alstyne K L, Nelson T A, Ridgway R L, 2015. Environmental chemistry and chemical ecology of “green tide” seaweed blooms. Integrative and Comparative Biology, 55(3): 518—532
- Wang X H, Li L, Bao X *et al*, 2009. Economic cost of an algae bloom cleanup in China's 2008 Olympic sailing venue. Eos, Transactions American Geophysical Union, 90(28): 238—239
- Wang X H, Qiao F L, Lu J *et al*, 2011. The turbidity maxima of

- the northern Jiangsu shoal-water in the Yellow Sea, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 93(3): 202—211
- Wang Z L, Xiao J, Fan S L *et al*, 2015. Who made the world's largest green tide in China? — An integrated study on the initiation and early development of the green tide in Yellow Sea. *Limnology and Oceanography*, 60(4): 1105—1117
- Ye N H, Zhang X W, Mao Y Z *et al*, 2011. 'Green tides' are overwhelming the coastline of our blue planet: taking the world's largest example. *Ecological Research*, 26(3): 477—485
- Zhang J H, Huo Y Z, Wu H L *et al*, 2014. The origin of the *Ulva* macroalgal blooms in the Yellow Sea in 2013. *Marine Pollution Bulletin*, 89(1—2): 276—283
- Zhang X W, Xu D, Mao Y Z *et al*, 2011. Settlement of vegetative fragments of *Ulva prolifera* confirmed as an important seed source for succession of a large-scale green tide bloom. *Limnology and Oceanography*, 56(1): 233—242
- Zhao J, Jiang P, Liu Z Y *et al*, 2013. The Yellow Sea green tides were dominated by one species, *Ulva (Enteromorpha) prolifera*, from 2007 to 2011. *Chinese Science Bulletin*, 58(19): 2298—2302
- Zhou M J, Liu D Y, Anderson D M *et al*, 2015. Introduction to the Special Issue on green tides in the Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 3—8
- Zhou C Z, Sun G S, 1981. On the genesis of the shoal off north Jiangsu. *Marine Geological Research*, 1(1): 83—91

GROWTH CHARACTERISTICS OF GREEN ALGAE FROM ATTACHED TO FLOATED GROWTH PROCESS IN THE SUBEI SHOAL

HAN Xiao-Tian^{1, 2, 3, 4}, ZHAO Ting¹, MIAO Hui^{2, 3}, SUN Bin⁵, ZHAO Wei-Hong^{2, 3, 4}, YAN Tian^{2, 3, 4},
YU REN-Cheng^{2, 3, 4}

(1. Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 5. Qingdao Institute for Ocean Engineering of Tianjin University, Qingdao 266200, China)

Abstract We studied the community structure of attached green algae and floated green algae in late March and early May. The relative growth rate (RGR) of green algae and *Ulva prolifera* was conducted in the experiments of ship-based mesocosm and shoal-based mesocosm. The results show that the main dominant species of the green algae community in late March were *U. flexuosa* and *Blidingia minima* but no *U. prolifera* occurred. The dominant species in early May were *Blidingia minima* and *U. compressa*. *U. prolifera* accounted for 15% of the total biomass of attached green algae in late May, but increased to 76.0% after they floated onto the sea surface. The results of ship-based mesocosm and shoal-based mesocosm experiments showed that the relative growth rate of attached *U. prolifera* reached the highest RGR value of 64.2%/d. The RGR of the free-floating *U. prolifera* was 19.1%/d lower than the attached *U. prolifera*. Therefore, the fast floating ability and high growth ability of *U. prolifera* were the main reasons for blooming into the green tides.

Key words Subei shoal; green algae; *Ulva Prolifera*; relative growth rate; mesocosm