

# 苏北浅滩养殖筏架附生绿藻入海过程 在黄海绿潮形成中的作用\*

张清春<sup>1, 2, 4</sup> 孔凡洲<sup>1, 2, 4</sup> 颜天<sup>1, 2, 4</sup>① 于仁成<sup>1, 2, 3, 4</sup>  
胡晓坤<sup>1, 3</sup> 苗辉<sup>1</sup> 周名江<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266071; 3. 中国科学院大学 北京 100049; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071)

**摘要** 本研究采用现场定量观测为主的研究方法, 在 2017 年 5 月期间对苏北浅滩竹根沙收紫菜养殖筏架作业过程进行跟踪调查; 对养殖筏架绳索附生绿藻自然脱落和收筏架作业过程人为刮落附生绿藻, 以及收筏架作业前后入海的漂浮绿藻生物量进行定量观测。结果表明: 筏架绳附生绿藻自然脱落率低, 为  $3.58\% \pm 0.78\%$ ; 收筏架作业过程中绳索上刮落绿藻生物量为  $(12 \pm 3)$  kg 湿重/根, 由此估算 2017 年整个苏北浅滩刮落的生物量估算可达到万吨湿重; 收筏架作业后海域漂浮绿藻生物量是作业前的 7.6 倍。研究结果进一步明确了收筏架作业过程中人为刮落绿藻是目前筏架附生绿藻最主要的入海方式。刮落绿藻是海水中漂浮绿藻的主要来源, 其生物量对南黄海绿潮的规模大小有重要的影响。研究结果为绿潮防控措施的制定和实施提供科学依据。

**关键词** 黄海; 绿潮; 苏北浅滩; 绿藻; 养殖筏架

中图分类号 Q14 doi: 10.11693/hyhz20180400076

2007 年起, 每年春夏南黄海海域都会暴发以浒苔 *Ulva (Enteromorpha) prolifera* O. F. Müller 为绝对优势种的大规模绿潮。大量调查研究将苏北浅滩紫菜养殖筏架上附生绿藻圈定为黄海大规模漂浮绿藻的主要来源(Liu *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2010; Fan *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015)。苏北浅滩是泛指南起长江口北至射阳河口, 面积高达 2.2 万 km<sup>2</sup> 泥滩地域。独特的地理特征使其成为紫菜养殖的优良场所。从 20 世纪 70 年代末开始, 苏北沿岸居民开始在浅滩上养殖条斑紫菜(*Porphyra yezoensis*) (商兆堂等, 2008)。2000 年前, 苏北浅滩紫菜养殖面积小, 多集中于如东以南的近岸海域。2005 年日本取消从中国进口紫菜的限制后, 苏北浅滩紫菜养殖面积剧

增, 增加部分多集中如东以北离岸较远区域(邓邦平等, 2015)。浅滩紫菜养殖季一般从前一年 9—10 月份持续到第二年 5—6 月份, 包括养殖设施准备、出苗、成菜与采收、收架四个阶段(刘材材等, 2017)。苏北浅滩是采用半浮筏式养殖方法, 养殖筏架由用于支撑的绳索、短立竹竿、长横竹竿和用于养殖紫菜的网帘组成。养殖筏架上附生绿藻是紫菜养殖的主要病害之一。绿藻附生在紫菜养殖筏架上, 与紫菜互为竞争关系, 挤占紫菜的生长空间, 影响紫菜生长, 降低紫菜产量, 而且增加紫菜产品的加工难度, 降低产品质量(施敏健等, 1995)。

苏北浅滩上附生绿藻生物量在整个紫菜养殖季中存在明显动态变化。前一年 9—10 月份养殖季开始

\* 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 号; 中国科学院战略性先导科技专项(A 类)资助, XDA11020300 号; 国家基金委-山东省联合基金项目, U1606404 号。张清春, 副研究员, E-mail: qczhang@qdio.ac.cn

通讯作者: 颜天, 研究员, E-mail: tianyan@qdio.ac.cn

收稿日期: 2018-04-03, 收修改稿日期: 2018-05-17

时,海水温度适合绿藻生长,筏架上开始附生绿藻;随着筏架附生绿藻经盐酸处理以及水温降低,筏架附生绿藻生物量急剧降低;到第二年3月份,随着温度回升,筏架附生绿藻生物量逐渐增加。Liu等(2010)对从吕泗至连云港紫菜养殖筏架上附生绿藻生物量进行调查,估算2009年4月苏北浅滩绿藻生物量约为7000吨湿重。基于如东小洋口及以北的高泥和泥螺沙三个沙洲养殖筏架附生绿藻的调查,估算2012年5月浒苔生物量为6400吨湿重(Fan *et al.*, 2015)。基于如东至滨海之间浅滩上养殖筏架附生绿藻的调查,2013年4月苏北浅滩附生绿藻生物量估算约为4800吨湿重(Zhang *et al.*, 2014)。可见,每年筏架回收前苏北浅滩养殖筏架上附生绿藻生物量应为数千吨。

筏架附生绿藻只有变为漂浮状态后,在风生流的作用下,向北漂浮、生长和聚集,最终才能形成大规模绿潮。以前调查研究多将筏架上附生绿藻生物量等同于入海绿藻的生物量,但附生绿藻的入海方式以及不同方式对漂浮绿藻生物量的贡献等缺少定量观测。其中包括筏架附生绿藻是否可在风浪等作用下自然脱落?紫菜养殖作业中哪些操作过程是可造成筏架附生绿藻入海?这两种不同入海方式对漂浮绿藻的贡献又如何?目前这些问题均不太了解。因此,本研究聚焦于苏北浅滩筏架附生绿藻入海过程,分别定量化观测2017年筏架附生绿藻的自然脱落和人为刮落两个过程,旨在提高对筏架附生绿藻入海过程在黄海绿潮形成中作用的认识,为南黄海大规模绿潮发生机制的阐明以及绿潮防控对策的制定和实施提供科学依据。

## 1 研究材料与方法

### 1.1 开展研究的沙洲紫菜养殖情况

竹根沙沙洲(121.2935°E, 32.7882°N)位于如东沿岸海域(图1),2016—2017年紫菜养殖季大约布置有

1500个养殖筏架,相当于1500亩紫菜面积(图2a)。每个养殖筏架由2根100m长缆绳、大约30—36个3m×3m紫菜养殖网帘、每2个相邻网帘间用于支撑筏架的2根竖立竹竿,以及用于固定2根缆绳间距的1根横竹竿组成(图2b)。2017年4月4—18日期间,筏架上紫菜养殖网帘已回收,仅保留一个筏架的网帘,是用于其他现场模拟实验(图2c)。

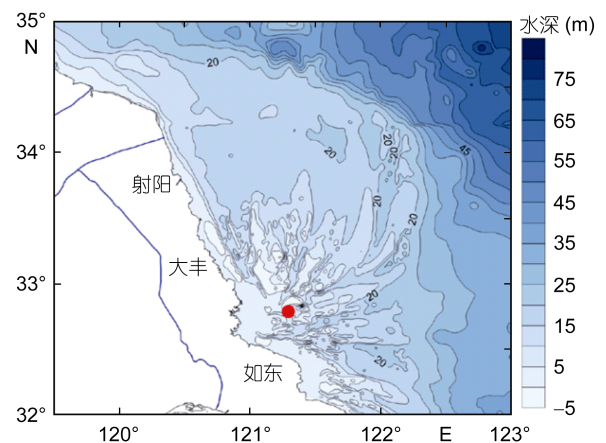


图1 采样站位图

Fig.1 The map of sampling site

### 1.2 自然脱落过程观测

2017年5月6日下午退潮期间,在竹根沙紫菜养殖筏架安置3个自行设计的自然脱落绿藻收集装置(长100cm×宽30cm×高40cm)(图3a)。经过一个潮周期,于5月7日上午打开脱落绿藻收集装置,收集其中自然脱落的绿藻,并用小刀仔细将脱落绿藻收集装置围住缆绳上附生绿藻刮下来,分别吸干水分,装入牛皮纸袋子中,低温保存。

### 1.3 紫菜作业收筏架造成附生绿藻脱落过程的观测

2017年5月11日16:00至19:00,在竹根沙东北角进行收筏架作业。现场观测记录收筏架过程,对收筏架后遗落浅滩上绿藻进行收集,随机收集3根缆绳

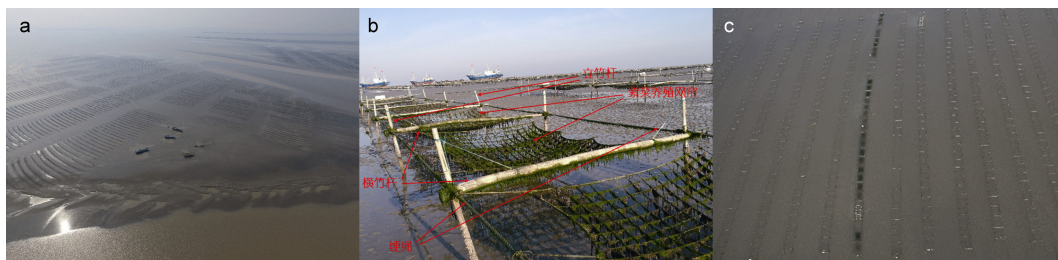


图2 苏北浅滩竹根沙全貌和紫菜养殖筏架

Fig.2 The full view of Zhugensha Sandbank on the Subei Shoal and aquaculture rafts on the Zhugensha Sandbank  
注: a: 竹根沙沙洲全貌; b: 紫菜养殖筏架; c: 2017年5月紫菜养殖网回收后的筏架

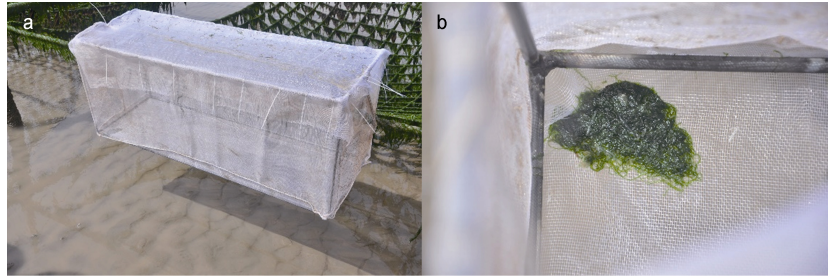


图3 自然脱落绿藻收集装置(a)和收集到绿藻(b)

Fig.3 The device used to collect naturally detached green algae (a) and the collected green algae (b)

上刮落的全部绿藻，运回调查船上，分别吸干水分，低温保存。

#### 1.4 紫菜作业收筏架前后浅滩海水中漂浮绿藻采集

2017年5月11日5:00在竹根沙浅滩东北角离收筏架作业区大约400—500m远的2排筏架间空隙放置1个漂浮绿藻收集网，网口为方形(1m×1m)，网长4m，网孔径1cm(图4)。经过一个潮周期，于11日

17:00将网内收集到绿藻全部取出，吸干水分，低温保存，此样品为收筏架作业前浅滩海水中漂浮绿藻。2017年5月11日17:00点将相同规格的漂浮绿藻收集网固定于同一位置，经过一个潮周期，于12日5:00将网内收集到绿藻全部取出，吸干水分，低温保存，因2017年5月11日16:00至19:00进行了收筏架作业，此样品为收筏架作业后浅滩海水中漂浮绿藻。

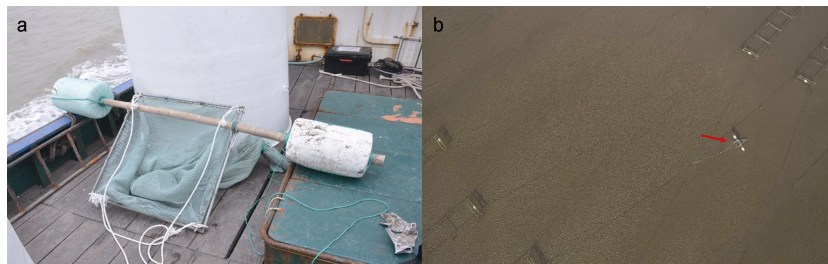


图4 漂浮绿藻收集网(a)和筏架区安放的漂浮绿藻收集网(b)

Fig.4 A net used to collect floating green algae (a) and a net placed in raft area (b)

#### 1.5 采集的绿藻样品生物量分析

将采集的绿藻样品在低温条件下运回实验室，在实验室内用无菌海水清洗绿藻样品中的泥沙，清洗后，先用手挤干水分，再用吸水纸吸干绿藻表面的水分，然后用天平定量各绿藻的生物量。

## 2 研究结果

### 2.1 自然脱落率

2017年5月6日下午在沙洲上筏架绳上安装了3个绳附生绿藻自然脱落绿藻收集装置。经过1个潮周期，7日上午发现3个收集装置内部角落中均

脱落绿藻(图3b)。发现3个装置中脱落绿藻生物量1.09—1.13g湿重，绳附生绿藻生物量27.59—45.70g湿重/m绳，自然脱落率介于2.41%—3.80%之间，均值为3.58%±0.78%(表1)。这表明筏架绳附生绿藻在风浪的作用是可以自然脱落，但脱落率低。

### 2.2 收筏架作业在绿藻入海过程的作用

紫菜养殖网帘回收后，按照紫菜养殖作业流程需要对筏架进行回收。收筏架作业流程包括解支架绳子、回收支架、刮绳绿藻、卷盘回收绳、支架和绳装船几个步骤(图5a—h)。在回收支架过程没有

表1 绳附生绿藻自然脱落率

Tab.1 The natural detaching rate of green algae attached to the rope

样品编号	绳附生绿藻生物量(g 湿重)	脱落绿藻生物量(g 湿重)	总生物量(g 湿重)	自然脱落率
1	27.59	1.09	28.68	3.80%
2	36.50	1.73	38.23	4.53%
3	45.70	1.13	46.83	2.41%

人为去除竹竿上附生绿藻,但是在回收缆绳前,需要人为去除缆绳上附生的绿藻以减轻缆绳重量,这个过程中缆绳附生的大部分绿藻被刮落直接遗弃在浅滩上(图 5i—l)。在沙洲上随机采集了 3 根缆绳刮落的全部绿藻,其生物量分别为 7.61、15.31 和 13.79kg,均值为 $(12\pm 3)$ kg 湿重/根缆绳。2016—2017 年苏北浅滩紫菜养殖面积约为 50 万亩,根据缆绳刮落生物量来推算,若 2017 年整个苏北浅滩养殖筏架缆绳附生绿藻都被刮落遗弃在浅滩,累积生物量高达万吨湿重。结果表明目前收筏架作业过程中人为刮落绿藻是

筏架附生绿藻最主要的入海方式。

### 2.3 收筏架前后漂浮绿藻生物量的对比

在 5 月 11 至 12 日收筏架作业前后各 1 个潮周期,浅滩筏架区放置的漂浮绿藻收集网收集除了少量小鱼小虾和部分马尾藻外,大部分是绿藻。但收筏架作业前后收集的绿藻生物量差距很大(图 6),其中收筏架作业前收集到绿藻生物量为 17.4g 湿重,收筏架作业后收集到绿藻生物量为 132.2g 湿重,后者是前者的 7.6 倍。对比结果表明收筏架作业过程人为刮落绿藻是海水中漂浮绿藻的主要来源。



图 5 收筏架作业过程和收筏架作业前后缆绳上附生绿藻

Fig.5 Withdrawal and recycling of aquaculture rafts and green algae attached on ropes before and after raft withdrawal  
注: a: 支架固定绳子的解除; b: 支架回收; c, d, e: 缆绳附生绿藻的去除; f, g: 去除绿藻后的缆绳回收; h: 筏架和缆绳装船; i: 回收前缆绳上附生绿藻; j: 回收后缆绳附生绿藻; k, l: 收筏架作业后遗弃的绿藻



图 6 收筏架作业前后收集的浅滩漂浮绿藻

Fig. 6 The floating green algae collected before and after the raft withdrawal from sandbank  
注: a: 收筏架作业前收集网收集到全部生物; b: 收筏架作业后收集网收集到全部生物

## 3 讨论

### 3.1 筏架附生绿藻入海过程在黄海大规模绿潮形成中的作用

2008 年黄海大规模绿潮暴发对青岛奥帆赛造成

巨大威胁之后,围绕黄海大规模绿潮的发生从各个学科开展了大量研究。绿潮发生的生态学过程分为苏北浅滩浒苔微观繁殖体阶段,浅滩养殖筏架附生阶段,附生绿藻入海过程、苏北浅滩漂浮阶段和南黄海

大规模漂浮阶段(Zhou *et al.*, 2015)。其中从苏北浅滩微观繁殖体阶段至附生绿藻入海过程被视为黄海大规模绿潮早期发展阶段,是每年绿潮孕育和初步形成的关键时期,对大规模绿潮的规模和暴发时间等都具有决定性作用(Zhou *et al.*, 2015)。

苏北浅滩养殖筏架被当作浒苔等绿藻的孕育场所或“放大器”和“转换器”(Liu *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2015)。浒苔等绿藻是一种具有单细胞配子/孢子阶段与多细胞成体阶段交替生活史的物种,其“种子”(单细胞配子/孢子)必须附着到合适附着基质上才可以萌发长成多细胞大型藻体(Lin *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2015),苏北浅滩养殖筏架材料为绿藻微观繁殖体提供大量附着基质(Geng *et al.*, 2015),被认为是绿藻的孕育场所(Liu *et al.*, 2013)。浒苔等绿藻微观繁殖体在苏北浅滩周年存在,其丰度变化与筏架上附生绿藻的生物量之间存在明显的正相关性,两者之间存在正反馈关系(Song *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015)。微观繁殖体附着筏架萌发生长,成长成熟后释放大量的微观繁殖体进入水体中,这些微观繁殖体又附着筏架重新萌发生长,正是这种“滚雪球”方式使得4月底至5月份筏架上附生绿藻的生物量剧增(Zhang *et al.*, 2015)。在此过程中,养殖筏架起“放大器”作用(Zhou *et al.*, 2015)。水体中微观繁殖体附着筏架萌发成长,从游离的单细胞阶段转换为附生的多细胞阶段;然后附生浒苔在外力的作用下脱离筏架,从附生状态变为漂浮状态,这过程中养殖筏架起“转换器”作用(Zhou *et al.*, 2015)。

除了筏架附生绿藻生物量随时间有明显的变动外,绿藻群落组成随时间也有显著的演替。筏架至少附生有7种绿藻,包括1种盘苔 *Blidingia* sp.和6种石莼属绿藻,浒苔 *U. prolifera*、缘管浒苔 *U. linza*、扁浒苔 *U. compressa*、曲浒苔 *U. flexuosa*、肠浒苔 *U. intestinalis* 和条浒苔 *U. clathrata* (Han *et al.*, 2013; Fan *et al.*, 2015; Huo *et al.*, 2015)。在3月份之前,盘苔等绿藻是筏架附生绿藻优势种类;3月份之后,浒苔等才出现(Han *et al.*, 2013; Fan *et al.*, 2015)。随着时间推移,在5月份紫菜养殖季结束前,浒苔成为筏架附生绿藻群落的优势种之一(Fan *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015)。Fan等(2015)调查发现2012年3月初主要优势种是扁浒苔、肠浒苔和条浒苔,随着温度的升高,4月底至5月中旬的优势种演替为盘苔和浒苔。Zhang等(2015)利用荧光原位杂交技术特异性标记浒苔,发现3月绿藻群落中浒苔比例增加缓慢至4月底不超过

10%;但进入5月份后,浒苔比例剧增,至5月中下旬增加至40%—60%。从2012年12月至2013年4月逐月调查也发现浒苔比例可逐渐增加至48%—86%(Huo *et al.*, 2015)。

养殖筏架附生浒苔脱离筏架,从附生状态变为漂浮状态,才能成为南黄海大规模漂浮绿藻的最初来源。筏架附生浒苔是如何从附生状态变为漂浮状态(即:入海过程)是一个至关重要的过程,也是大规模绿潮形成中最容易受到人类活动直接影响的一个过程。本研究定量观测附生绿藻的入海过程,确定筏架绳索附生绿藻可自然脱落,自然脱落率为 $3.58\% \pm 0.78\%$ (表1)。随着紫菜养殖网帘的回收,在潮汐过程中的破浪效应消除。我们进行现场实验时观测的自然脱落率估计较紫菜养殖网帘回收前要高。前期大量调查都发现筏架附生浒苔的生物量及其在绿藻群落中比例是在4月底至5月初才开始明显增加,因此紫菜养殖网帘回收前筏架上自然脱落的浒苔生物量应很低。此外,在紫菜收割过程等作业过程中也难免还有少量绿藻被蹭落。这些绿藻中浒苔有可能是4月份在浅滩外围发现的小斑块漂浮绿藻的来源。

随着苏北浅滩紫菜养殖作业方式的改进,养殖季结束后,将紫菜养殖网帘摘下直接运回陆地处理,上面附生绿藻不再被人为除去丢弃在浅滩上。但是,目前依然有这些作业过程直接造成附生绿藻大量入海。在浅滩现场观测中发现,筏架竹竿附生绿藻也不再人为去除(图5),但是,绳索附生绿藻依然被用机械作业方式高效地去除,直接遗弃在浅滩上(图5)。不同沙洲筏架附生绿藻生物量有所差异,收筏架的时间有前有后,对绿藻入海生物量有一定影响。按照本研究随机采集的3根绳索上刮落绿藻生物量进行推算,若2017年整个苏北浅滩养殖筏架绳索附生绿藻都被刮落遗弃在浅滩,累积生物量高达万吨湿重。不排除部分沙洲筏架绳索附生绿藻可能不全部刮落而直接运回路陆地处理的可能性。在收筏架作业过程中被人为刮落而遗弃在浅滩上的绿藻生物量应该也可达千吨数量级,这与往年估计的生物量无数量级差异(Liu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2014; Fan *et al.*, 2015)。2017年5月11日16:00—19:00在竹根沙东北角约完成70—100个筏架的回收,占整个沙洲筏架量的5%—7%。对比作业前后各一个潮周期在筏架区安放的漂浮绿藻收集网收集到的绿藻生物量(图6),发现收筏架作业过程显著增加绿藻的入海生物量。而且,收筏架作业前收集的漂浮绿藻不能全部

归结于自然脱落, 因为这段时期苏北浅滩很多沙洲都在进行收筏架作业, 刮落的绿藻有可能漂浮经过竹根沙沙洲被漂浮绿藻收集网收集。可见, 收筏架过程中人为刮落筏架绳附生绿藻应是浅滩漂浮绿藻来源的主体。

综上所述, 苏北浅滩绿潮早期发展阶段几个关键生态学过程对后期大规模绿藻的形成至关重要。养殖筏架在绿潮早期发展阶段中扮演“放大器”和“转换器”角色, 其上附生的绿藻群落中浒苔是南黄海大规模漂浮绿藻的主要来源。附生绿藻入海过程是绿藻从附生状态向漂浮状态转变的关键, 这个过程易受到紫菜养殖作业的影响。目前绳上附生绿藻被人为去除遗弃在浅滩上仍是附生绿藻主要的入海方式, 这些绿藻是浅滩漂浮绿藻的主要来源。

### 3.2 附生绿藻入海过程定量观测对黄海大规模绿潮防控的指示意义

连续暴发大规模绿潮已对南黄海的生态系统和山东半岛沿海城市的城市景观、旅游业和养殖业等构成了巨大的冲击, 针对黄海大规模绿潮制定防控措施并实施迫在眉睫。南黄海大规模绿潮发生发展过程中, 苏北浅滩绿潮早期发展阶段至关重要(Liu *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2015), 对其中关键过程了解和量化观测可为防控措施的制定和实施提供科学依据。

虽然改性黏土等对海水中绿藻微观繁殖体具有去除效果, 但是对广袤的苏北浅滩而言, 目前去除或降低海水中的绿藻微观繁殖体无可操作性。浅滩养殖筏架附生阶段是浒苔等绿藻生物量剧增的关键时期。已有不少研究在研发新的筏架材料或对已有的材料进行处理, 力求减少绿藻的附着, 但目前依然无法大量应用或效果不明显。大量漂浮绿藻分布于苏北浅滩海水中, 组织船只进行打捞是目前控制绿藻向北漂浮和生长的有效方式, 但操作难度和成本代价巨大。养殖筏架附生绿藻入海过程是绿藻从附生状态到漂浮状态转变的一个极其重要的关键过程, 决定有多少绿藻生物量进入海水中, 也是被紫菜养殖作业活动强烈影响的阶段。筏架附生绿藻入海方式主要有两个途径, 自然入海过程和人为入海过程。本研究量化观测了这两个过程, 并对比了不同入海方式对入海绿藻生物量的影响, 明确了人为入海方式目前依然是最主要入海方式。因此, 改进收筏架等紫菜作业方式, 杜绝将养殖筏架上附生绿藻除去直接遗弃在浅滩上, 是短期内对南黄海大规模绿潮防控的重要突破口。

## 4 结论

从 2007 年起, 连年暴发的大规模绿潮已成为南黄海最突出的生态灾害问题。苏北浅滩绿潮早期发展阶段对后期大规模绿潮的形成具有决定作用, 其中养殖筏架附生绿藻入海过程是绿潮早期发展阶段中多个关键过程之一, 也是被紫菜养殖作业活动强烈影响的阶段。通过本研究的现场定量观测, 明确了目前人为去除筏架绳附生绿藻直接遗弃在浅滩上仍然是最主要入海方式, 这些绿藻是浅滩漂浮绿藻的主要来源。研究结果进一步明确了苏北浅滩紫菜养殖筏架附生绿藻的不同入海方式在黄海大规模绿潮形成中的作用, 为黄海大规模绿潮防控措施的制定和实施提供科学依据。

## 参 考 文 献

- 邓邦平, 刘材材, 徐 韧等, 2015. 南黄海绿潮对江苏海水养殖的影响及防控对策. 海洋开发与管理, 32(5): 103—106
- 刘材材, 徐 韧, 何培民等, 2017. 南黄海绿潮暴发与紫菜养殖的关系. 海洋科学, 41(2): 35—43
- 施敏健, 王惠冲, 1995. 条斑紫菜人工育苗期绿藻的预防. 海洋渔业, (2): 82, 93
- 商兆堂, 蒋名淑, 濮梅娟, 2008. 江苏紫菜养殖概况和气候适宜性分析. 安徽农业科学, 36(13): 5315—5319
- 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
- Geng H X, Yan T, Zhou M J *et al.*, 2015. Comparative study of the germination of *Ulva prolifera* gametes on various substrates. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 163: 89—95
- 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
- Huo Y Z, Han H B, Shi H H *et al.*, 2015. Changes to the biomass and species composition of *Ulva* sp. on *Porphyra* aquaculture rafts, along the coastal radial sandbank of the Southern Yellow Sea. Marine Pollution Bulletin, 93(1—2): 210—216
- Lin A P, Shen S D, Wang J W *et al.*, 2008. Reproduction diversity of *Enteromorpha prolifera*. Journal of Integrative Plant Biology, 50(5): 622—629
- Liu D Y, Keesing J K, Dong Z J *et al.*, 2010. Recurrence of the world's largest green-tide in 2009 in Yellow Sea, China: *Porphyra yezoensis* aquaculture rafts confirmed as nursery for macroalgal blooms. Marine Pollution Bulletin, 60(9): 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 U *et al*, 2009. World's largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China. *Marine Pollution Bulletin*, 58(6): 888—895
- Liu Q, Yu R C, Yan T *et al*, 2015. Laboratory study on the life history of bloom-forming *Ulva prolifera* in the Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 82—88
- Song W, Li Y, Fang S *et al*, 2015. Temporal and spatial distributions of green algae micro-propagules in the coastal waters of the Subei Shoal, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163, 29—35
- 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
- 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 Q C, Liu Q, Yu R C *et al*, 2015. Application of a fluorescence *in situ* hybridization (FISH) method to study green tides in the Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 112—119
- 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

## GREEN ALGAE DETACHED FROM AQUACULTURE RAFTS INTO SEAWATER RESULTED IN GREEN TIDE OCCURRENCE IN THE YELLOW SEA

ZHANG Qing-Chun<sup>1,2,4</sup>, KONG Fan-Zhou<sup>1,2,4</sup>, YAN Tian<sup>1,2,4</sup>, YU Ren-Cheng<sup>1,2,3,4</sup>,  
HU Xiao-Kun<sup>1,3</sup>, MIAO Hui<sup>1</sup>, ZHOU Ming-Jiang<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Laboratory for Marine Ecology and Environmental Science, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract** We analyzed the different approaches of green algae attached on *Porphyra yezoensis* aquaculture rafts into seawater via natural falling off and artificial cleanup during aquaculture facility withdrawal in the Zhugensha Sandbank, Subei Shoal, the Yellow Sea, in May 2017, and the causative relation to on green algae bloom occurrence. Floating green algae were sampled before and after the withdrawal. We found the biomass of the floating green algae after raft withdrawal was 7.6 times more than that before the withdrawal. And only 3.58%±0.78% of the attached algae could fall off from the rafts naturally, while the artificial cleanup was (12±3)kg (wet weight)/rope, based on which the total biomass of the field could amount to 10000t (wet weight) in the shoal area by estimate. Therefore, the green algae detached from the culture devices into seawater by artificial cleanup as the “seed” resulted in later floating green algae bloom in the Yellow Sea. These results shall be insightful to the monitoring and preventing of green tides in the Yellow Sea.

**Key words** the Yellow Sea; green tide; Subei Shoal; green algae; aquaculture raft