

黄海绿潮研究: 回顾与展望*

于仁成^{1, 2, 3, 4} 孙松^{1, 2, 3, 4} 颜天^{1, 2, 4} 周名江¹

(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 自 2007 年以来, 南黄海海域连年发生大规模绿潮(green tides), 至 2018 年已连续 12 年出现。大规模绿潮对南黄海西部沿海一线的景观、环境和养殖业造成了严重破坏, 已经成为黄海海域一类常态化的生态灾害问题。每年夏季, 苏、鲁沿海一线地方政府都要投入大量人力物力, 对海滩上堆积的绿藻进行收集和处理。针对绿潮问题, 我国政府组织相关学者, 围绕绿潮起源、成因、危害、监测和防控进行了大量调查和研究工作。经过多年研究, 在黄海绿潮原因种及其鉴定方法、黄海绿潮起源地与早期发展过程、影响黄海绿潮的关键因素等方面已经有了比较系统、深入的认识, 确认了黄海绿潮的原因种为浒苔(*Ulva prolifera*), 发现黄海绿潮主要起源于南黄海西部的苏北浅滩海域, 基本阐明了浅滩区绿潮早期发展的关键过程。浒苔自身的生物学特性、苏北浅滩独特的海域环境特征, 以及浅滩区的养殖活动是影响黄海绿潮形成的关键要素。但是, 在绿潮原因种浒苔的最初来源、绿潮的生态效应, 绿潮演变趋势以及绿潮防控对策等方面仍需进一步开展研究工作。为验证黄海绿潮成因方面的科学认识, 对绿潮防控工作提供思路和技术保障, 青岛海洋科学与技术国家实验室设立了鳌山科技创新计划项目“近海生态灾害发生机理与防控策略”, 将黄海绿潮作为一项重要生态灾害问题开展研究, 旨在进一步阐明绿潮成因, 为绿潮防控提供坚实的科学依据。

关键词 黄海; 绿潮; 成因; 防控

中图分类号 Q14 doi: 10.11693/hyh20180700158

绿潮(green tide)是大型绿藻脱离固着基形成漂浮群体后, 快速增殖或聚集导致的一类生态异常现象, 多发生在河口或内湾等半封闭海域, 如果不能及时处置, 会造成海洋动物死亡、底层海水缺氧, 以及海草床生境退化等危害。在近海富营养化和全球变化背景下, 绿潮发生呈现出加剧的态势, 受到高度关注(Smetacek *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2017)。2007 年 6 月, 在我国黄海海域首次出现了较大范围的绿潮现象, 沿海地区共处理绿藻约 6000 吨。2008 年 6 月, 正值青岛奥帆赛前夕, 黄海海域暴发大规模绿潮, 大量漂浮绿藻聚集在青岛沿岸一线, 60 平方公里的奥帆赛场海域约 1/3 被绿藻覆盖(中共青岛市委政策研究

室等, 2008)。为消除绿潮威胁, 青岛市政府组织大量人力物力, 在沿海一线进行绿藻打捞、拦截和清除, 清理绿藻总量超过 80 万吨。此后, 每年夏季黄海海域都会出现绿潮, 至今已连续 12 年(图 1)。大规模绿潮已经成为黄海海域一类常态化的生态灾害, 对南黄海西部沿海一线的景观、环境和养殖业构成严重威胁。

黄海绿潮出现之后, 我国政府组织相关学者进行了系统的研究工作, 在绿潮起源、成因、危害、监测和防控等方面取得了许多重要进展。通过研究确认了黄海绿潮的原因种, 揭示了绿潮来源和早期发展过程, 建立和完善了绿潮的监测和预警技术, 初步探

* 国家自然科学基金面上项目, 41676106 号; 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, XDA11020304 号; 国家自然科学基金委-山东省联合基金项目, U1606404 号。于仁成, 博士生导师, 研究员, E-mail: rcyu@qdio.ac.cn

收稿日期: 2018-07-04, 收修改稿日期: 2018-08-22

究了绿潮的危害效应, 也推进了绿藻的资源化利用。对于黄海海域的绿潮问题, 许多专家进行了综述分析(Sun *et al.*, 2008; 唐启升等, 2010; Keesing *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013a, b; Wang *et al.*, 2015; Zhou *et al.*,

2015; 王宗灵等, 2018), 从不同角度总结了绿潮的研究进展。本文在前期工作的基础上, 综述了近年来黄海绿潮研究工作所取得的科学认识, 并对需要进一步研究的方向和内容进行了分析。

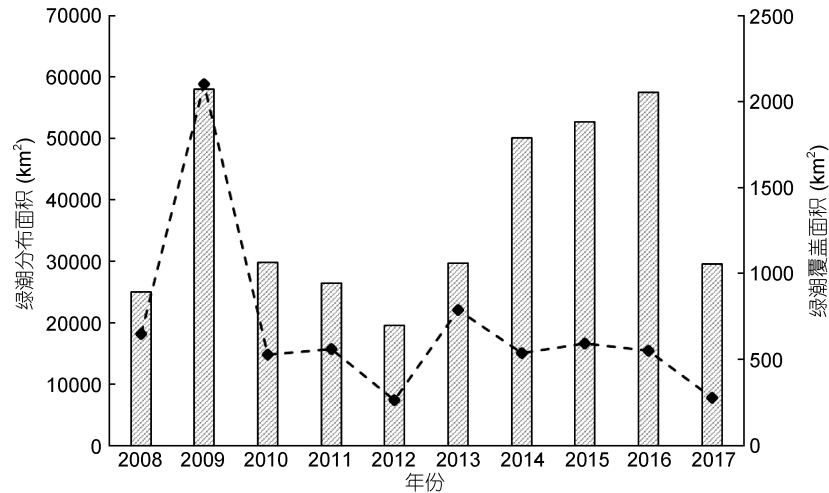


图1 2007年以来南黄海海域历年绿潮分布区面积和覆盖区面积变化情况

Fig.1 Variation of sea area affected or covered by green tides in the Yellow Sea from 2007 (数据来自中国海洋环境质量公报)

1 黄海绿潮研究回顾

2008年, 大规模绿潮在青岛近海海域出现, 对奥帆赛构成直接威胁。针对这一问题, 科技部启动了国家科技支撑计划应急项目“浒苔大规模暴发应急处置关键技术研究与应用”, 围绕浒苔暴发的生物学基础与生态过程、浒苔灾害监测预警、浒苔围捞清除及无害化处理与资源化利用等开展了研究。基于大量海上调查和室内实验工作, 确定了大规模绿潮的主要原因种为浒苔(*Ulva prolifera*); 发现大量漂浮浒苔并非源于青岛本地海域, 而是来自黄海西南部江苏沿海一带, 在风和海流作用下被输送到青岛近海; 提出江苏近岸海域高浓度的营养盐和紫菜养殖活动可能是大量漂浮浒苔出现的重要原因(Sun *et al.*, 2008)。基于数值模拟结果, 提出了“浒苔海上通道”的概念, 将影响青岛近海的浒苔上游海域圈定在黄海西南部(乔方利等, 2008)。这些工作构成了黄海绿潮研究的基本框架, 为此后的绿潮研究奠定了基础。之后, 国内学者针对黄海西南部海域漂浮浒苔的来源提出了多项机制假设, 认为漂浮绿藻可能源自苏北浅滩紫菜养殖区、江苏沿海一带动物养殖池塘, 抑或浅滩区微观繁殖体或藻段的直接萌发等(Liu *et al.*, 2009; Pang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013b)。2009年,

科技部启动 973 项目“我国近海藻华灾害演变机制与生态安全”, 黄海绿潮成因是项目的重要研究内容之一。针对黄海西南部海域漂浮浒苔来源的争议, 改善了浒苔的鉴定和量化分析方法、在浅滩区实施了时间序列调查等, 对苏北浅滩区养殖筏架上的浒苔种群变动情况进行了量化分析, 基本阐明了南黄海浒苔绿潮的起源及其早期发展过程(Zhou *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015)。在此期间, 国家海洋局也组织实施了“黄海绿潮业务化预测预警关键技术研究与应用”和“突发性聚集绿潮藻工程化快速处置及高值利用技术研究与示范”等海洋公益性行业科研专项项目, 在黄海绿潮成因方面得到了相似的科学认识(Huo *et al.*, 2016; 刘材材等, 2017)。通过多年研究, 围绕黄海绿潮原因种及其鉴定方法、黄海绿潮起源地与早期发展过程等形成了较为系统、深入的科学认识, 也基本确定了影响黄海绿潮形成的关键因素。

1.1 黄海绿潮原因种及其鉴定方法

黄海绿潮现象出现后, 国内学者基于绿藻的形态学特征, 将绿潮原因种鉴定为浒苔, 这一结果也得到了后续研究的支持和确认(张晓雯等, 2008; 丁兰平等, 2009; Ding *et al.*, 2009; Leliaert *et al.*, 2009)。但是, 由于浒苔形态特征变化较大, 而且不同种类绿藻在形态特征上具有一定的重叠性, 对于普通科研人员

而言,单纯依据形态特征很难对浒苔进行准确鉴定。分子生物学研究发现,利用绿藻核糖体 RNA 基因(rDNA)内转录间隔区(ITS)序列信息,可以对浒苔进行辅助鉴定,但仅依靠 ITS 区序列信息无法将其与另外两种浒苔(*Ulva linza* 和 *U. procera*)分开。进一步研究表明,结合 ITS 区和 5S rDNA 间隔区的序列分析可以将浒苔鉴定到种(Shimada *et al.*, 2008; Duan *et al.*, 2012), 这为浒苔的准确鉴定提供了重要的方法依据。到目前为止,结合形态学观察和 DNA 序列测定(ITS 区和 5SrDNA 间隔区)仍是浒苔鉴定最可靠的方法。基于上述方法的调查发现,黄海海域的绿潮主要由浒苔形成,且多年不变(Zhao *et al.*, 2013); 这与山东半岛沿海一线常见的定生绿藻种类明显不同,可以排除绿潮在青岛近海本地形成的可能性(Zhao *et al.*, 2011)。

尽管通过 DNA 序列分析可以对浒苔进行鉴定,但这一过程耗时费力,很难满足绿潮生态学研究大量样品的分析需求。为解决这一问题,国内学者研发了基于荧光原位杂交、酶切片段长度多态性等手段的浒苔快速鉴别方法(Xiao *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2015a)。通过这些方法可以对大量绿藻样品进行快速筛查,确定其中是否存在浒苔,并估算浒苔在绿藻样品中的优势度,这些方法的应用显著推动了对黄海绿潮起源和早期发展过程的认识(Zhang *et al.*, 2015b)。

近年来的研究发现,在黄海海域形成绿潮的浒苔(以下称为黄海绿潮原因种浒苔)与我国沿海其他地区采集的浒苔在 DNA 序列上有明显不同,生理特征上也存在差异,推测黄海绿潮原因种浒苔是相对独特的“漂浮生态型”(Zhao *et al.*, 2011, 2015),并针对其特征 DNA 序列建立了基于 PCR 技术的检测方法。多年来的跟踪分析结果显示,黄海海域历年发生的绿潮都是由“漂浮生态型”浒苔形成(Zhao *et al.*, 2015)。

1.2 黄海绿潮起源地与早期发展过程

在黄海绿潮研究中,如何追溯其来源是备受关注的科学问题。大量野外调查、遥感分析以及数值模拟结果显示,黄海海域的漂浮绿藻最初出现在苏北浅滩附近海区(乔方利等, 2008; Liu *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2010; Xu *et al.*, 2014; Qi *et al.*, 2016)。但是,对于浅滩区漂浮绿藻的来源,则存在不同的认识和看法(Liu *et al.*, 2009, 2013b; Pang *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011)。到目前为止,越来越多的研究证据表明浅滩区的漂浮绿藻主要来源于浅滩区紫菜养殖筏架

(Keesing *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2015b; Huo *et al.*, 2016)。首先,在浅滩区的调查发现养殖筏架上有大量绿藻附着,在回收养殖筏架时,这些绿藻往往被人为清除入海,有可能构成浅滩区漂浮绿藻的最初来源(Liu *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2010)。而且,多种方法对养殖筏架上绿藻种类的分析发现,紫菜养殖筏架上的确存在浒苔(Liu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2015a)。而最近研究结果表明,浅滩区养殖筏架上的浒苔与黄海绿潮原因种浒苔同属“漂浮生态型”(Zhang *et al.*, 2018),而这一生态型的浒苔在我国沿海其他地区从未发现,为进一步确认漂浮浒苔源自浅滩区养殖筏架提供了更为准确可信的证据。更重要的是,随着每年春季浅滩区水温上升,筏架上浒苔的生物量快速增加,到 5 月份筏架回收时浅滩区浒苔的总生物量可达数千吨(Liu *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015a; Zhang *et al.*, 2015b),为绿潮形成提供了数量可观的“种源”。与之相比,关于浅滩区漂浮绿藻来源的其他假设缺乏令人信服的、系统化的证据链。

结合多年来的研究结果,可以基本刻画出苏北浅滩区绿潮的早期发展过程(图 2)。每年秋季,浅滩区的紫菜养殖筏架布设完成后,绿藻就开始在筏架上附着生长。随着春季温度逐渐上升,海水中浒苔的孢子或合子等生殖细胞开始在筏架上附着、萌发(Liu *et al.*, 2012)。研究发现,浒苔生殖细胞在苏北浅滩区常年存在(Liu *et al.*, 2012; Huo *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2014),其萌发状况与温度密切相关,在水温达到 15°C 时萌发率最高(Song *et al.*, 2015)。随着水温上升,浒苔幼苗开始在养殖筏架上逐渐出现,并在筏架定生绿藻群落中占据优势。到 5 月份整个浅滩区养殖筏架上固着生长的绿藻生物量超万吨,其中浒苔可达一半(Li *et al.*, 2015a)。在 4—5 月份养殖筏架回收期间,筏架上的大量定生绿藻被清除入海,在潮流冲刷作用下形成小的漂浮绿藻斑块。浒苔的生理特征适合漂浮生长,它能够在入海后迅速占据优势,成为漂浮绿藻的主要藻种(Gao *et al.*, 2016)。由于浅滩区营养盐丰富,漂浮绿藻出现后生物量迅速上升,大片漂浮绿藻开始出现。分析多年来苏北浅滩区漂浮绿藻的分布态势可以看出,这些漂浮绿藻能够通过不同“路径”漂离苏北浅滩,进入南黄海海域。在浅滩区北部,漂浮绿藻主要通过“近岸”或“离岸”两条通道向北漂移,“近岸”通道大致位于南通—盐城一带靠近海岸带的辐射沙洲沟槽区,而“离岸”通道则位于苏北浅滩区东侧深槽区(图 3)。数值模拟结果表明,绿藻漂离浅滩区的

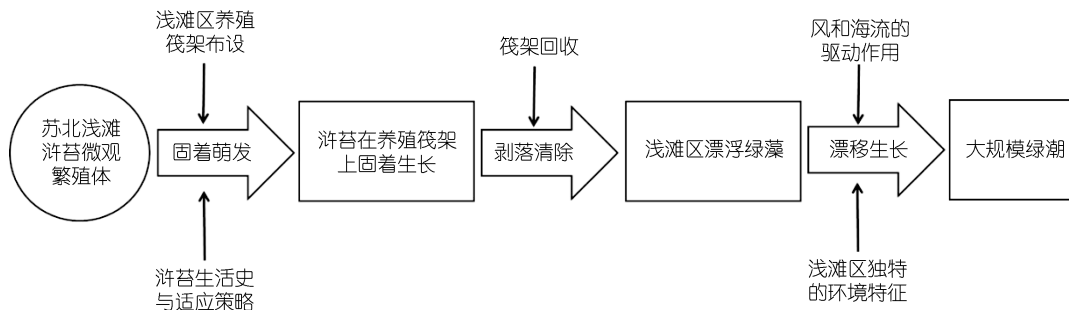


图 2 苏北浅滩区绿潮的早期发展过程示意图 (改绘自 Zhou *et al.*, 2015)

Fig.2 Illustration of the early development stage of green tide in Subei Shoal (modified from Zhou *et al.*, 2015)

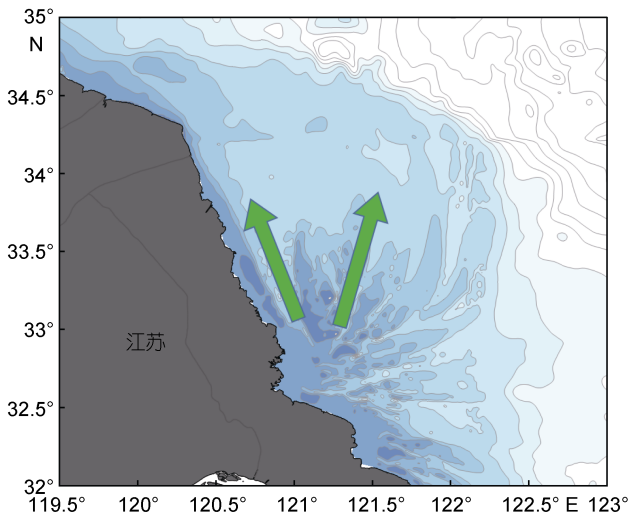


图 3 苏北浅滩区漂浮绿藻漂移通道示意图

Fig.3 Illustration of the floating routes of green algae in Subei Shoal

路径主要受到风的影响。自 5 月下旬开始, 大片漂浮绿藻持续向北漂移, 离开浅滩区进入南黄海, 生物量不断增加, 逐渐形成大规模绿潮。

1.3 影响黄海绿潮的关键因素

基于对黄海绿潮早期发展过程的分析可以看出, 黄海绿潮的出现受到许多因素影响。其中, 浒苔的生物学特性、苏北浅滩区环境特征, 以及浅滩区的养殖活动是影响绿潮形成最为关键的因素。

浒苔的生物学特性是黄海绿潮形成的内在原因。首先, 浒苔具有复杂的生活史和多样化的繁殖方式。研究发现, 浒苔不仅具有同型世代交替的生活史, 而且能够通过单性生殖, 由未经结合的配子直接萌发生长成叶状体(Liu *et al.*, 2015a)。这使得浒苔能够在适合的环境条件下快速增殖占据优势。同时, 浒苔的孢子及配子结合形成的合子等生殖细胞具有较强的抗胁迫能力, 能够耐受苛刻的环境条件, 在苏北浅滩周年

存在, 有利于藻种的保存。其次, 浒苔能够利用无机态和有机态氮、磷营养物质(Li *et al.*, 2016a, b), 具有极强的营养物质吸收和储存能力, 且具有特殊的光合作用途径(Xu *et al.*, 2012), 生长速率极快。在南黄海海域, 浒苔日生长速率可达 10%—37%。另外, 浒苔叶状体形态具有可塑性(Gao *et al.*, 2016), 一旦处于漂浮状态, 能够很快形成密集分支的叶状体, 独特的中空管状结构内部充满气泡, 适合于浒苔在海水中漂浮生长, 有利于大规模绿潮的形成。

苏北浅滩独特的环境特征是黄海绿潮形成的前提和基础。苏北浅滩位于黄海西部江苏沿岸, 是亚洲最大的海岸滩涂湿地, 浅滩区水体浊度高、受潮汐扰动大, 沉积物再悬浮过程强烈。沉积物的再悬浮过程将大量浒苔微观繁殖体埋藏在沉积物中, 为浅滩区浒苔孢子或合子等生殖细胞的保存提供了重要条件。根据绿藻的培养实验发现, 浅滩区沉积物中保存有高丰度的绿藻孢子或合子等生殖细胞(方松等, 2012), 能够在适合的环境条件下, 从沉积物中释放并萌发生长。这一特征使苏北浅滩区成为浒苔的重要种床, 应当也是浒苔绿潮能够在苏北浅滩区连年发生的重要原因。另外, 受陆源排放和地下水输入影响(Liu *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2017), 苏北浅滩及其附近海域营养盐浓度显著高于周边海域(Liu *et al.*, 2015b; Shi *et al.*, 2015)。尽管营养物质丰富, 但浅滩区高浊度、强扰动的水体并不利于浮游植物生长, 对漂浮绿藻的生长却影响不大。因此, 浅滩区高浓度的氮、磷营养物质为绿藻生长和绿潮形成提供了重要的物质基础。此外, 浅滩区的水动力特征也有助于绿藻生长和绿潮形成(Bao *et al.*, 2015)。浅滩区海流多以往复流为主, 春季漂浮绿藻出现后, 能够在浅滩区保留较长时间, 有利于绿藻生物量的快速增加。到春末夏初, 在南风和东南风影响下, 苏北浅滩区的漂浮绿藻通过不同的漂

移“通道”逐渐离开浅滩区,并形成大规模绿潮(Liu *et al.*, 2015b)。

浅滩区的养殖活动是黄海绿潮出现的重要诱发因素。浒苔的微观繁殖体必须依靠附着基才能萌发生长成叶状体,而浅滩区的养殖筏架大量使用了竹竿和梗绳等材料,为浒苔微观繁殖体的固着萌发提供了重要的附着基。研究发现,浒苔的孢子和配子在竹竿和梗绳等材料上的附着萌发率远远高于浅滩区泥沙、石块等天然材料(Geng *et al.*, 2015; 耿慧霞等, 2018)。据估算,苏北浅滩区养殖筏架覆盖面积超过20 000公顷,所使用的竹竿和梗绳可以为绿藻微观繁殖体提供至少 $6 \times 10^7 \text{m}^2$ 的附着面积(Geng *et al.*, 2015),大量养殖筏架的布设显著了改变浅滩区生境。浅滩区的养殖筏架不仅为春季浒苔的快速生长提供了基础条件,其回收过程也是导致浒苔从固着生长状态向漂浮生长状态转变的重要原因(Liu *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2015; 刘材材等, 2017)。因此,养殖筏架对黄海绿潮的早期发展过程起到了“放大器”和“转换器”的作用。根据对南黄海紫菜养殖区的遥感分析,在2005—2009年,浅滩区养殖面积迅速扩展,养殖区域也从近岸向远离岸线的海域发展,2010年以后趋于稳定(刘材材等, 2017)。养殖业的快速发展是导致黄海大规模绿潮形成的重要诱因。

1.4 黄海绿潮的危害与影响

浒苔本身是一种无毒无害的大型绿藻,可以开发用于食品、饲料、肥料和生物能源生产。但是,大量漂浮浒苔形成的绿潮无法在短时间内有效处置,也会带来一系列危害效应,甚至成为生态灾害。绿潮最直接的影响是大量绿藻堆积、腐烂后对沿海景观的影响,每年夏季,地方政府都需要消耗大量费用清除和处置堆积的绿藻。据估算,2008年用于绿潮灾害紧急应对的费用支出约有20亿元(Ye *et al.*, 2011)。另外,绿藻在腐烂分解过程会产生有毒的氨氮和硫化氢,对海洋生物造成毒害,导致养殖动物死亡(Wang *et al.*, 2011)。2008年大规模绿潮暴发期间,初步估算养殖业的损失约8亿元,仅山东海阳一地的刺参养殖业就损失了3—4亿元。此外,绿潮过程中大量绿藻会与海水中的浮游植物竞争吸收营养盐,有可能导致海域浮游植物生物量的下降(Xing *et al.*, 2015)。而在绿潮后期,绿藻的腐烂分解则会释放大量营养盐,甚至刺激微藻的生长,有可能导致赤潮等次生灾害问题(Wang *et al.*, 2012; 孔凡洲等, 2018)。

2 黄海绿潮研究展望

自2007年黄海绿潮首次暴发以来,国内外学者针对黄海绿潮问题开展了大量研究工作,也取得了许多重要进展,基本查清了绿潮起源地与早期发展过程,初步揭示了绿潮的危害效应。但是,在绿潮原因种浒苔的最初来源、绿潮的生态效应,绿潮演变趋势以及绿潮防控对策等方面仍需进一步开展研究工作。

黄海海域的绿潮主要由浒苔形成。近年来的研究发现,黄海绿潮原因种浒苔在遗传信息上与我国沿海一线其他地区采集的浒苔存在差异,可以通过特定方法对二者进行区分(Zhao *et al.*, 2015)。到目前为止,黄海绿潮原因种浒苔仅在苏北浅滩区发现,其他沿海地区尚未发现其定生种群。这是浅滩区独有的一种“生态型”?还是来自外海的入侵种?目前仍不能作出回答。而弄清这一问题,对于从更深层面上回答黄海绿潮成因非常重要。

黄海海域的大规模绿潮明显有别于在其他沿海国家出现的绿潮。在其他海域以往报道的绿潮通常出现在半封闭的海湾区域,影响范围相对较小。与之相比,黄海绿潮的规模更大、影响范围更广、持续时间更长。在绿潮生消过程中,大量浒苔从苏北浅滩区漂移至南黄海水域,在沿海一线堆积、腐烂,或因生理状态下降在其它海域沉降。大量浒苔的生长、漂移、沉降、腐烂等过程会改变海域生源要素的生物地球化学过程,有可能导致赤潮等次生灾害的出现,甚至带来生态系统的显著变化。目前,这一方面的认识仍然非常有限,需要特别给予密切关注。

综合分析绿潮形成的影响因素可以看出,如果不能采取有效措施,黄海绿潮仍会在未来一段时期内稳定存在,而且规模会有增加趋势(Xu *et al.*, 2014; Qi *et al.*, 2016)。如前所述,苏北浅滩区是重要的浒苔种床,对浅滩区的周年调查发现,浒苔的孢子或合子等生殖细胞在浅滩区稳定存在。自2007年至今,浅滩区的浒苔绿潮每年都会出现,其累积效应极有可能造成浅滩区浒苔孢子或合子等生殖细胞的优势度持续增加,从而导致更多的浒苔在此生长,这种正反馈效应会引起黄海绿潮规模的持续增加。其次,苏北浅滩区海域污染问题也不容乐观。我国自1999年开始正式启动淮河入海水道工程建设,2006年全面建设完成,这使得苏北地区部分陆源污染物由长江入海转向由苏北灌溉总渠入海,对苏北浅滩区的污染

压力增加。浅滩区春季营养盐浓度的长期变化状况表明, 浅滩区海水中硝酸盐等营养盐浓度在此期间快速上升, N/P 比值也有明显增加(Li *et al.*, 2015b)。“十三五”期间, 我国将开工建设淮河入海水道二期工程, 随着更多淡水输入苏北浅滩区, 该海域营养盐污染问题势必更为严峻, 也有可能加剧绿潮的规模。

在绿潮规模持续加剧的态势下, 绿潮防控受到高度关注。黄海绿潮的形成受到诸多因素影响, 绿潮的出现不仅取决于浒苔自身的生活学特性和海域自然环境特征, 也与人类活动对苏北浅滩区生境的改变密切相关, 是生态系统长期变化的结果。因此, 对绿潮的防控不可能一蹴而就。为防控黄海绿潮及其灾害效应, 亟需基于已有科学认识, 进一步明确南黄海绿潮起源与早期发展的关键过程, 抓住绿潮形成的关键环节, 多管齐下, 形成系统化解决方案。对此, 国家实验室于 2016 年设立鳌山科技创新计划项目“近海生态灾害发生机理与防控策略”, 将黄海绿潮作为一项重要内容开展研究, 力求通过已有的科学认识, 进一步明确南黄海绿潮起源与早期发展的关键过程, 揭示控制绿潮发展过程的关键环境要素与生物学过程, 夯实绿潮起源地方面的科学基础, 在绿潮成因方面取得共识; 同时, 协调相关政府部门和养殖企业, 针对苏北浅滩区漂浮绿藻的清除, 探索相应的技术、方法和策略, 为绿潮防控提供依据和思路。项目目前正在实施, 取得的阶段性进展为应对和防控黄海绿潮问题提供了重要的思路和依据(颜天等, 2018)。

3 结论

自 2007 年黄海海域首次暴发大规模绿潮以来, 国内外学者围绕绿潮起源、成因、危害、监测和防控等开展了大量研究工作, 本文围绕绿潮研究相关工作, 对黄海绿潮研究进展进行了综述。到目前为止, 相关研究在黄海绿潮原因种及其鉴定方法、黄海绿潮起源地与早期发展过程、影响黄海绿潮的关键因素等方面已经有了比较系统、深入的认识, 确认了黄海绿潮的原因种为浒苔, 发现黄海绿潮主要起源于南黄海西部的苏北浅滩海域, 基本阐明了浅滩区绿潮早期发展的关键过程。在综述已有科学认识的基础上, 提出浒苔自身的生物学特性、苏北浅滩独特的海域环境特征, 以及浅滩区的养殖活动是影响黄海绿潮形成的关键要素。在今后研究中, 建议重点针对绿潮原因种浒苔的藻种来源、绿潮的生态效应, 绿潮演变趋

势以及绿潮防控对策等进一步开展研究。

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
- 王宗灵, 傅明珠, 肖 洁等, 2018. 黄海水浒苔绿潮研究进展. 海洋学报, 40(2): 1—13
- 中共青岛市委政策研究室, 青岛市人民政府调查研究室, 2008. 浒苔, 保奥运——青岛市处置罕见浒苔自然灾害综述. 中国应急管理, (11): 37—40
- 方 松, 王宗灵, 李 艳等, 2012. 南黄海及长江口附近海域绿潮暴发前期微繁殖体的动态变化. 海洋学报, 34(4): 147—154
- 孔凡洲, 姜 鹏, 魏传杰等, 2018. 2017 年春、夏季黄海 35°N 共发的绿潮、金潮和赤潮. 海洋与湖沼, 49(5): 1021—1030
- 乔方利, 马德毅, 朱明远等, 2008. 2008 年黄海水浒苔爆发的基本状况与科学应对措施. 海洋科学进展, 26(3): 409—410
- 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
- 张晓雯, 毛玉泽, 庄志猛等, 2008. 黄海绿潮浒苔的形态学观察及分子鉴定. 中国水产科学, 15(5): 822—829
- 耿慧霞, 颜 天, 于仁成等, 2018. 浒苔孢子在不同材料基质上的附着萌发差异性研究. 海洋与湖沼, 49(5): 1006—1013
- 唐启升, 张晓雯, 叶乃好等, 2010. 绿潮研究现状与问题. 中国科学基金, (1): 5—9
- 颜 天, 于仁成, 周名江等, 2018. 黄海海域大规模绿潮成因与应对策略——“鳌山计划”研究进展. 海洋与湖沼, 49(5): 950—958
- Bao M, Guan W B, Yang Y *et al.*, 2015. Drifting trajectories of green algae in the western Yellow Sea during the spring and summer of 2012. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 9—16
- Ding L P, Fei X G, Lu Q Q *et al.*, 2009. The possibility analysis of habitats, origin and reappearance of bloom green alga (*Enteromorpha prolifera*) on inshore of western Yellow Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27(3): 421—424
- Duan W J, Guo L X, Sun D *et al.*, 2012. Morphological and molecular characterization of free-floating and attached green macroalgae *Ulva* spp. in the Yellow Sea of China. *Journal of Applied Phycology*, 24(1): 97—108
- Gao G, Clare A S, Rose C, 2017. Eutrophication and warming-driven green tides (*Ulva rigida*) are predicted to increase under future climate change scenarios. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1): 439—447
- Gao G, Zhong Z H, Zhou X H *et al.*, 2016. Changes in morphological plasticity of *Ulva prolifera* under different environmental conditions: a laboratory experiment. *Harmful Algae*, 59: 51—58
- 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
- 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

- Huo Y Z, Han H B, Hua L *et al*, 2016. 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. *Harmful Algae*, 59: 91—99
- Huo Y Z, Hua L, Wu H L *et al*, 2014. Abundance and distribution of *Ulva* microscopic propagules associated with a green tide in the southern coast of the Yellow Sea. *Harmful Algae*, 39: 357—364
- Keesing J K, Liu D Y, Fearn P *et al*, 2011. Inter- and intra-annual patterns of *Ulva prolifera* green tides in the Yellow Sea during 2007—2009, their origin and relationship to the expansion of coastal seaweed aquaculture in China. *Marine Pollution Bulletin*, 62(6): 1169—1182
- Leliaert R, Zhang X W, Ye N H *et al*, 2009. Research note: identity of the Qingdao algal bloom. *Phycological Research*, 57(2): 147—151
- Li H M, Zhang C S, Han X R *et al*, 2015b. Changes in concentrations of oxygen, dissolved nitrogen, phosphate, and silicate in the southern Yellow Sea, 1980—2012: sources and seaward gradients. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 44—55
- Li H M, Zhang Y Y, Han X R *et al*, 2016b. Growth responses of *Ulva prolifera* to inorganic and organic nutrients: implications for macroalgal blooms in the southern Yellow Sea, China. *Scientific Reports*, 6: 26498
- Li H M, Zhang Y Y, Tang H J *et al*, 2017. Spatiotemporal variations of inorganic nutrients along the Jiangsu coast, China, and the occurrence of macroalgal blooms (green tides) in the southern Yellow Sea. *Harmful Algae*, 63: 164—172
- Li S X, Yu K F, Huo Y Z *et al*, 2016a. Effects of nitrogen and phosphorus enrichment on growth and photosynthetic assimilation of carbon in a green tide-forming species (*Ulva prolifera*) in the Yellow Sea. *Hydrobiologia*, 776(1): 161—171
- 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
- Li Y, Xiao J, Ding L P *et al*, 2015a. Community structure and controlled factor of attached green algae on the *Porphyra yezoensis* aquaculture rafts in the Subei Shoal, China. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(8): 93—99
- 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*, 2013a. 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
- Liu F, Pang S J, Chopin T *et al*, 2013b. Understanding the recurrent large-scale green tide in the Yellow Sea: Temporal and spatial correlations between multiple geographical, aquacultural and biological factors. *Marine Environmental Research*, 83: 38—47
- Liu F, Pang S J, Zhao X B *et al*, 2012. Quantitative, molecular and growth analyses of *Ulva* microscopic propagules in the coastal sediment of Jiangsu province where green tides initially occurred. *Marine Environmental Research*, 74: 56—63
- Liu J A, Su N, Wang X L *et al*, 2017. Submarine groundwater discharge and associated nutrient fluxes into the Southern Yellow Sea: A case study for semi enclosed and oligotrophic seas implication for green tide bloom. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(1): 139—152
- Liu Q, Yu R C, Yan T *et al*, 2015a. Laboratory study on the life history of bloom-forming *Ulva prolifera* in the Yellow Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 82—88
- Liu X Q, Li Y, Wang Z L *et al*, 2015b. Cruise observation of *Ulva prolifera* bloom in the southern Yellow Sea, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 17—22
- Pang S J, Liu F, Shan T F *et al*, 2010. Tracking the algal origin of the *Ulva* bloom in the Yellow Sea by a combination of molecular, morphological and physiological analyses. *Marine Environmental Research*, 69(4): 207—215
- Qi L, Hu C M, Xing Q G *et al*, 2016. Long-term trend of *Ulva prolifera* blooms in the western Yellow Sea. *Harmful Algae*, 58: 35—44
- Shi X Y, Qi M Y, Tang H J *et al*, 2015. Spatial and temporal nutrient variations in the Yellow Sea and their effects on *Ulva prolifera* blooms. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 36—43
- Shimada S, Yokoyama N, Arai S *et al*, 2008. Phylogeography of the genus *Ulva* (Ulvophyceae, Chlorophyta), with special reference to the Japanese freshwater and brackish taxa. *Journal of Applied Phycology*, 20(5): 979—989
- Smetacek V, Zingone A, 2013. Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504(7478): 84—88
- Song W, Peng K Q, Xiao J *et al*, 2015. Effects of temperature on the germination of green algae micro-propagules in coastal waters of the Subei Shoal, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 63—68
- Sun S, Wang F, Li C L *et al*, 2008. Emerging challenges: massive green algae blooms in the Yellow Sea. *Nature Proceedings*, NPRE20082266-1
- Wang C, Yu R C, Zhou M J, 2011. Acute toxicity of live and decomposing green alga *Ulva (Enteromorpha) prolifera* to abalone *Haliotis discus hannai*. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 29(3): 541—546
- Wang C, Yu R C, Zhou M J, 2012. Effects of the decomposing green macroalga *Ulva (Enteromorpha) prolifera* on the growth of four red-tide species. *Harmful Algae*, 16: 12—19
- 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

- Xiao J, Li Y, Song W *et al*, 2013. Discrimination of the common macroalgae (*Ulva* and *Blidingia*) in coastal waters of Yellow Sea, northern China, based on restriction fragment-length polymorphism (RFLP) analysis. *Harmful Algae*, 27: 130—137
- Xing Q G, Hu C M, Tang D L *et al*, 2015. World's largest macroalgal blooms altered phytoplankton biomass in summer in the Yellow Sea: satellite observations. *Remote Sensing*, 7(9): 12297—12313
- Xu J F, Fan X, Zhang X W *et al*, 2012. Evidence of coexistence of C₃ and C₄ photosynthetic pathways in a green-tide-forming alga, *Ulva prolifera*. *PLoS One*, 7(5): e37438
- Xu Q, Zhang H Y, Ju L *et al*, 2014. Interannual variability of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea. *International Journal of Remote*, 35(11—12): 4099—4113
- 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
- Zhang Q C, Liu Q, Kang Z J *et al*, 2015a. Development of a fluorescence *in situ* hybridization (FISH) method for rapid detection of *Ulva prolifera*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 103—111
- Zhang Q C, Liu Q, Yu R C *et al*, 2015b. 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
- Zhang Q C, Yu R C, Chen Z F *et al*, 2018. Genetic evidence in tracking the origin of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea, China. *Harmful Algae*, 78: 86—94.
- 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*, 2011. Genetic variation of *Ulva (Enteromorpha) prolifera* (Ulvales, Chlorophyta)—the causative species of the green tides in the Yellow Sea, China. *Journal of Applied Phycology*, 23(2): 227—233
- 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
- Zhao J, Jiang P, Qin S *et al*, 2015. Genetic analyses of floating *Ulva prolifera* in the Yellow Sea suggest a unique ecotype. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 163: 96—102
- 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

PROGRESSES AND PERSPECTIVES ON GREEN-TIDE STUDIES IN THE YELLOW SEA

YU Ren-Cheng^{1, 2, 3, 4}, SUN Song^{1, 2, 3, 4}, YAN Tian^{1, 2, 4}, ZHOU Ming-Jiang¹

(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 Large-scale green tides, which have been recorded in the Yellow Sea for 12 years since 2007, posed significant impacts on the scenery, environment and mariculture industry along the west coast of the southern Yellow Sea. Green tides have been considered as a routine marine ecological disaster in the Yellow Sea, and regional governments of Jiangsu and Shandong provinces have to put huge manpower and resources every year to collect and manage the green algae accumulated along the coastline. Targeting on the green tides in the Yellow Sea, Chinese government organized scientists to work together intensively on the origin, mechanisms, impacts, monitoring and control of green tides during the last decade, and significant progresses have been made on the bloom-forming species, origin of green tides, and key factors affecting the green tides. The major bloom-forming green alga has been identified as *Ulva prolifera*, and the origin of green tides have been traced back to the Subei Shoal along the west coast of the southern Yellow Sea. Major processes related to the early development of green tides in Subei Shoal have been elucidated. The biological characteristics, unique environmental features of Subei Shoal, as well as the intensive mariculture activities in Subei Shoal are key factors leading to the formation of green tides. Some questions, however, still need to be answered in future studies, such as the origin of unique bloom-forming *U. prolifera*, the long-term trend of green tides in the Yellow Sea, the ecological consequences of recurrent green tides, and the prevention and control strategies against green tides etc. Focusing on the green tide issue in the Yellow Sea, a project "mechanisms and prevention strategies on marine ecological disasters" was supported recently by the Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology to test the ideas on the formation of green tides, and to offer knowledge and techniques on the monitoring and prevention strategies on green tides.

Key words Yellow Sea; green tide; mechanism; prevention