

· 学科进展与展望 ·

绿潮研究现状与问题

唐启升* 张晓雯 叶乃好 庄志猛

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

[摘要] 本文主要介绍了近年来在世界范围内频繁暴发的绿潮现象, 绿潮暴发的原因, 绿潮藻的特点及对生态和环境造成的一系列影响, 并针对我国黄海浒苔绿潮的防治及应用研究提出建议。

[关键词] 绿潮, 生态灾害, 发生机制

1 引言

绿潮是世界沿海各国普遍发生的海洋生态异常现象, 多数以石莼属和浒苔属大型绿藻种类脱离固着基形成漂浮增殖群体所致^[1]。绿潮一般发生在春夏两季, 大多数在夏季高温期结束, 有时可延续到秋季, 主要发生在河口、内湾、泻湖和城市密集海岸等富营养化程度相对严重的水域, 经常是多年连续暴发。近年来绿潮发生频率和生物量总体呈明显上升趋势。

2 国外研究现状

2.1 世界主要绿潮暴发区

20世纪70年代初, 法国布列塔尼沿海发生大规模绿潮现象, 之后发生范围遍及欧洲、美洲和亚洲

多个沿海国家, 已逐渐成为世界性的海洋环境与生态问题(图1)。例如, 上世纪80年代中期, 美国缅因州东部海域发生肠浒苔(*Enteromorpha intestinalis*)绿潮; 20世纪70年代以来在日本沿海地区暴发孔石莼(*Ulva pertusa*)绿潮; 风景如画的法国布列塔尼地区更是绿潮重灾区。上世纪80年代以来, 绿潮暴发的频率和生物量总体呈明显的上升趋势。例如, 1986年法国布列塔尼地区仅有拉尼翁一个海湾暴发石莼绿潮, 而2004年, 绿潮遍及布列塔尼地区的72个城市沿海。有关文献报道, 在1997年至2001年的4年时间里, 欧洲布里多尼海域受绿潮影响的区域由34处增加到63处, 而受绿潮影响的次数更是从60次增加到103次^[2]。



图1 世界范围内的绿潮现象

* 中国科学院院士。

本文于2009年11月10日收到。

2.2 绿潮暴发机制

绿潮暴发原因颇多,主要有海水富营养化、光照强度、温度等的环境因素以及绿潮藻本身的生物学特性。

(1) 环境因素

海水富营养化是引起赤潮、绿潮等暴发最重要的原因^[3]。富营养化是指环境中以磷和氮为主的无机营养盐超出了环境自身的调节能力而引起的水质污染现象^[1]。海水富营养化主要与现代化工农业的迅猛发展、沿海城市居民持续增多和水产养殖规模不断扩大有关。例如,在法国的布列塔尼地区,农业是造成海水富营养化的主要原因;而在挪威、日本、菲律宾等国家,海水富营养化的根源主要是其发达的水产养殖业。近海、港湾等海域富营养化程度日趋严重,已成为世界范围内近海重要环境问题之一。1992—2000年间,每年大约有 138×10^6 kg 的氮和 76×10^5 kg 的磷从芬兰排入波罗的海海湾,导致了每年一度的绿潮现象^[4]。

此外,绿潮发生最重要的环境因素有温度、光照强度和降水量等。人类活动使大气中二氧化碳的浓度不断增加,从而导致全球气温不断升高,引起海洋生态系统的异常变化,导致某些机会生物大规模死

亡或种群异常增殖。绿潮的发生与区域性环境因素密切相关,在营养充足的条件下,光照强度和温度是诱导绿潮发生的关键因素^[5];降水量增加会导致径流量上升,从而引起近海水域富营养化,例如,在美国的普吉特海峡,降水量的增加可引起海水盐度的降低和氮盐浓度的升高,从而加大了绿潮发生的可能性^[6]。

(2) 生物学机制

绿潮藻大多是机会种,主要包括石莼属(*Ulva*)和浒苔属(*Enteromorpha*)绿藻(表1)。这些藻类具有很高吸收营养盐的能力,吸收速度可达到常年生长藻种的4—6倍,使其保持对数生长速度^[7],因此与其他藻类、海草和浮游生物相比具有较强的竞争优势^[3]。绿潮藻繁殖能力强,繁殖方式多样,浒苔属和石莼属藻类典型的生活史为同形世代交替,即一个完整的生活史周期包括二倍的孢子体和单倍的配子体两个阶段,这两个时期交替发生,且两种时期的藻体形态相同;其繁殖方式包括配子结合形成合子的有性生殖、配子独自发育成配子体植株的单性繁殖、两鞭毛或四鞭毛孢子单独发育的无性繁殖和体细胞与断枝再生的营养繁殖4种方式^[8,9]。研究表明,来自欧洲、北美、日本等地的绿潮藻生活史略有不同,但它们都具有很强的繁殖能力^[8,10,13,14]。

表 1-a 主要绿潮藻(石莼属)种及其分布

石莼属种类	暴发地点	石莼属种类	暴发地点
<i>Ulva rigida</i>	英国 Langstone Harbour	<i>Ulva rotundata</i>	法国 Brittany
	意大利 Sacca di Goro lagoon	<i>Ulva fasciata</i>	巴西 Cabo Frio region
	巴西 Cabo Frio region	<i>Ulva ohnoi</i>	日本 Kochi bay 高知
	阿根廷 Golfo Nuevo Patagonia	<i>Ulva reticulata</i>	菲律宾 Mactan Island
	荷兰 Veerse Meer lagoon	<i>Ulva pertusa</i>	法国 Thau Lagoon
<i>Ulva lactuca</i>	英国 Ythan Estuary	<i>Ulva armoricana</i>	法国 Brittany
	荷兰 Veerse Meer lagoon	<i>Ulva curvata</i>	西班牙 Palmones River Estuary
	菲律宾 Mactan Island		荷兰 Veerse Meer lagoon
	印度 Jaleswar Reef	<i>Ulva scandinavica</i>	荷兰 Veerse Meer lagoon
<i>Ulva fenestrata</i>	美国 Nahcotta Jetty		

表 1-b 主要绿潮藻(浒苔属)种及其分布

浒苔属种类	暴发地点	浒苔属种类	暴发地点
<i>Enteromorpha intestinalis</i>	葡萄牙 Mondego estuary	<i>Enteromorpha prolifera</i>	美国 Tokeland
	美国 South California		中国 Yellow Sea
	美国 Hood Canal Belfair State Park	<i>Enteromorpha linza</i>	美国 Hood Canal Belfair State Park
	芬兰 Espoo, Haukilahti	<i>Enteromorpha flexuosa</i>	美国 Muskegon lake
	芬兰 West Coast		

2.3 绿潮的预测

绿潮往往多年连续暴发,因此对绿潮进行有效的预测预警具有十分重要的理论和现实意义。

绿潮能多年连续暴发与绿潮藻具有很强的越冬能力和多样的越冬形式有关。孢子是绿潮藻主要越

冬形式之一,外界环境的变化会促使绿潮藻叶状体释放抗逆性极强的孢子,以应对不利的外界环境,并在条件合适时再萌发。研究表明,在法国布列塔尼半岛水域,漂浮和定生状态的绿潮藻均来源于越冬的孢子^[10]。叶状体又是绿潮藻越冬的另一种形式,

绿潮发生时,体细胞生物量大,且具有抗逆能力和萌发率高等特点,能为来年种群繁殖提供足量亲本(叶状体)^[11,12],多项研究证实,埋在海底沉积物中的绿潮藻叶状体碎片完全可以越冬,来年萌发。在芬兰西海岸,处于漂浮状态的肠浒苔(*Enteromorpha intestinalis*)只存在营养繁殖方式^[13],在荷兰的威斯密尔,漂浮状的石莼 *Ulva scandinavica* 主要来源于海底沉积物中的叶状体碎片^[8],在日本高知县斗犬(Tosa)海湾漂浮的石莼 *Ulva ohnoi* 也未曾发现以孢子形态进行繁殖^[14]。

大型海藻种子库(Banks of algal microscopic forms)的概念统指在逆境条件下(通常是指冬季)存活并能在条件适宜时恢复活力的所有藻类微世代形态,包括孢子体、配子体、体细胞、叶状体和断裂的藻体碎片等^[15]。绿潮藻种子库是对绿潮进行预测预警的重要世代,也是有效控制绿潮暴发的最佳时期。迄今为止,针对绿潮灾害的预测和监测研究较少。Martins以孢子为绿潮暴发主要种子来源建立了一个数学模型,该模型力图结合当地的实际情况,通过检测到孢子数量来判断绿潮是否暴发及暴发的规模。模型包括孢子生物量、成体生物量、氮和磷内部浓度4个主要变量,每个变量又受很多因素影响,共涉及30多个参数,其中外界影响条件主要包括光照、温度、盐度和平流等环境因子等^[16]。

综上所述,绿潮的频繁发生及规模的不断扩大已经成为世界范围海洋生态灾害问题。对暴发机制的研究发现,通过控制陆源营养盐排放、建立健康的海水养殖模式等方式可以逐步改善水体环境,减少绿潮暴发频率。加强对绿潮藻越冬种子库的研究,可以对绿潮进行预测、预警和有效控制^[12,17]。此外,欧美等国对绿潮藻资源化综合利用已有十多年的历史,如利用绿潮藻生产海水养殖饲料、绿藻有机肥、沼气以及污水处理等^[1],值得我们借鉴。

3 黄海浒苔绿潮研究现状

2007年以前,我国沿海曾出现零星的大型绿藻集聚现象,但规模和影响范围都很小。2007年首次暴发较大范围的浒苔绿潮,主要影响范围为黄海沿岸,其中青岛地区打捞浒苔数量达6000多吨。2008年,黄海海域暴发迄今为止世界范围内有文献记录的最大规模绿潮,影响了整个黄海海域,仅青岛地区打捞的浒苔量高达100万吨。据有关专家估计,2008年黄海浒苔绿潮生物量可能突破1000万吨^[18]。

3.1 浒苔基础生物学研究

采用形态学观察与分子鉴定相结合的方法,对黄海海域发生的绿潮种类鉴定结果表明,2007年以来发生在黄海的绿潮为隶属于绿藻门、绿藻纲、石莼目、石莼科、浒苔属的浒苔(*Enteromorpha prolifera*)^[19],是一种有经济价值的、有生态功能的大型藻类。在实验室条件下观察到黄海浒苔有单性、无性和营养繁殖方式,同时其叶状体具有潜在的越冬能力^[12]。当时测算,2008年约有200万吨的浒苔(鲜重)沉入海底^[18],可能成为来年暴发的种子来源。

3.2 暴发机制研究

海水富营养化是黄海浒苔暴发的重要原因。在我国过去的几十年里,城市化、工业化和农业的快速发展以及人口的快速膨胀,工业废水、生活污水入海量剧增,加上地表径流带来的农田化肥、农药和其他污染物中的氮磷等营养盐,海水的富营养化程度迅速升高^[20],为浒苔暴发提供了充足的外部营养条件。2008年春夏以来,江苏地区降水量同比明显增大,南通、盐城和连云港3个沿海城市4—6月份月平均降雨量同比增加130.9%、140.0%和115.4%。大量降水将陆源营养盐冲刷入海,加剧了海水富营养化程度,成为浒苔如此大面积暴发的一个重要原因。

绿潮暴发后,受海洋风场和表层流场的作用在青岛近海出现大规模浒苔漂浮聚集现象。黄海东部海洋环流主要是受东亚季风的影响,2008年5—7月为东南季风和西南季风。根据卫星光学遥感结果,最早在江苏盐城以北,连云港以东海面发现漂浮浒苔,此后漂浮浒苔逐渐向黄海中部缓慢移动,逐渐靠近山东半岛南岸附件海域,并在漂移过程中迅速生长,最终在当年6月29日大量的漂浮浒苔覆盖了青岛约600 km²海域。从浒苔从南向北的漂移路径来看,与季风的方向基本一致^[20]。

4 目前存在的问题及建议

自黄海浒苔爆发以来,各科研单位做了大量的工作,取得一系列的成果,为浒苔灾害处置提供了坚实的科技支撑,但是很多相关的基本科学问题尚不能很好回答。近年来,我国近海生态系统异常现象日趋严重,并呈多样化的发展趋势,例如,赤潮、海水酸化现象、缺氧区形成与范围扩大,浒苔、水母、海星等海洋生物种群异常生长等,严重威胁了我国近海生态系统安全。下一步急需要加强以下几个方面的工作。

研究,以便改变对海洋生态灾害的危害严重性认识不足和应对灾害科学准备不足的现状。

(1) 海洋致灾生物基础生物学特征

由于对于致灾海洋生物如浒苔、水母、海星、赤潮藻等地理分布、繁殖生长特征、生活史等基本科学问题尚不能很好回答,因此,大规模海洋生态灾害形成和演变的生物学基础将是研究重点之一。主要包括:(i) 致灾生物遗传多样性、分子生物学及其地理种群特征;(ii) 致灾生物个体与种群的发生与发育过程;(iii) 致灾生物对生态环境变化的响应及其种群兴衰的关键生理生态学特征;(iv) 致灾藻类生活史及其种子库的存在形式、越冬、繁育及其上浮机制。

(2) 海洋生态灾害暴发条件与形成机制

近年来,我国近海频发的一系列海洋生态灾害不是孤立的现象,而是存在着复杂的相互关系。因此,需要从生态系统水平上,开展整体、系统的关键过程和相互作用研究,探寻海洋生态灾害的暴发条件和形成机制。主要包括:(i) 海洋生态灾害发生的重要海洋学过程(如关键物理、化学、生物过程)及其耦合;(ii) 富营养化、酸化、缺氧区与生态灾害演变的关系;(iii) 各种海洋生态灾害(如绿潮、赤潮、缺氧区以及水母和海星等)爆发的驱动机制与关联;(iv) 多重压力因素作用下的生态系统响应与海洋生态灾害;(v) 致灾藻类聚集与漂移的动力学机制。

(3) 海洋生态灾害危害及其对生态系统安全的影响

海洋生态灾害的危害机制十分复杂,且其次生灾害对生态系统的影响深远。要特别关注:(i) 近海生态系统生态环境(重点为富营养化、酸化和缺氧区)的变化趋势及其预测;(ii) 生物种群(绿藻、水母、海星等)极端变化诱发的次生灾害的时空分布规律和致灾机理机制;(iii) 海洋生态灾害对生态系统结构和服务与产出功能的影响及其资源环境效应;(iv) 海洋生态灾害对社会经济和人类健康的影响与评估及其调控机理。

(4) 海洋生态灾害预警预测新技术、新方法

在鼓励开展海洋生态灾害前瞻性和多学科交叉研究的同时,需要重视基础研究手段和预警预测新技术、新方法的应用。主要包括:(i) 分子技术(包括基因组学和蛋白组学技术)在绿潮、赤潮、水母与海星爆发等生态灾害预警预测以及生物量评估中的开发与应用;(ii) 生物标志物和缺氧敏感元素的示踪以及同步辐射等缺氧历史反演的新技术;(iii) 激

光遥感、多传感器遥感等物理新技术在生态灾害预警预测中的开发与应用。

参 考 文 献

- [1] Fletcher R L. The occurrence of "green tides": a review. In: Schramm W, Nienhuis P H, editors. Marine benthic vegetation: recent changes and the effects of eutrophication. Berlin: Springer-Verlag, 1996, 7—43.
- [2] Charlier R H, Morand P, Finkl C W et al. Green tides on the Brittany Coasts. *Aplinkos tyrimai inžinerija ir vadyba* 2007, 3(41): 52—59.
- [3] Pedersen M F, Borum J. Nutrient control of estuarine macroalgae: growth strategy and the balance between nitrogen requirements and uptake. *Mar Ecol-Prog Ser*, 1997, 161: 155—163.
- [4] Lappalainen A, Pönni J. Eutrophication and recreational fishing on the Finnish coast of the Gulf of Finland: a mail survey. *Fisheries Manag Ecol*, 2000, 7: 323—335.
- [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. *Bot Mar*, 2001, 44: 327—336.
- [6] Puget Sound Water Quality Action Team. Blooms of ulvoids in Puget Sound. Puget Sound Water Quality Team, Office of the Governor Olympia, WA. 2000, p. 50.
- [7] Raffaelli D G, Raven J A, Poole L J. Ecological impact of green macroalgal blooms. *Oceanogr Mar Biol*, 1998, 36: 97—125.
- [8] Malta E, Draisma S A, Kamermans P. Free-floating *Ulva* in the southwest Netherlands: species or morphotypes? A morphological, molecular and ecological comparison. *Eur J Phycol*, 1999, 34: 443—454.
- [9] Lin A, Shen S, Wang J et al. Reproduction diversity of 528 *Enteromorpha prolifera*. *J Integr Plant Biol*, 2008, 50: 622—629.
- [10] Coat G P, Dion M C, Noailles B et al. *Ulva armoricana* (Ulvales, Chlorophyta) from the coasts of Brittany (France). II. Nuclear rDNA ITS sequence analysis. *European Journal of Phycology*, 1998, 33: 81—86.
- [11] Ye N, Zhuang Z, Jin X et al. China is on the track tacking *Enteromorpha* spp forming green tide. *Nature Precedings*: hdl:10101/npre.2008.2352.1; Posted 2 Oct 2008.
- [12] Zhang X, Wang H, Mao Y et al. Somatic cells serve as a potential propagule bank of *Enteromorpha prolifera* forming a green tide in the Yellow Sea, China. *J Appl Phycol*, 2009, DOI 10.1007/s10811-009-9437-6.
- [13] Blomster J, Back S, Fewer D P et al. Novel morphology in *Enteromorpha* (Ulvophyceae) forming green tides. *American Journal of Botany*, 2002, 89: 1756—1763.
- [14] Hiraoka M, Shimada S, Uenosono M et al. A new green-tide-forming alga, *Ulva ohnoi* Hiraoka et Shimada sp. Nov. (Ulvales, Ulvophyceae) from Japan. *Phycol Res*, 2003, 51: 17—29.

- [15] Hoffmann A J, Santelices B. Banks of algal microscopic forms: hypotheses on their functioning and comparisons with seed banks. *Mar Ecol Prog Ser*, 1991, 79: 185—194.
- [16] Martins I, Lopes R J, Lilleb A I et al. Significant variation in the productivity of green macroalgae in a mesotidal estuary: Implications to the nutrient loading of the system and the adjacent coastal area. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54: 678—690.
- [17] KAMERMANS P, MALTA E J, VERSCHUURE J M et al. Role of cold resistance and burial for winter survival and spring initiation of an *Ulva* spp. (Chlorophyta) bloom in a eutrophic lagoon (Veerse Meer lagoon, The Netherlands). *Marine Biology*, 1998, 131: 45—51.
- [18] Sun S, Wang F, Li C et al. Emerging challenges: Massive green algae blooms in the Yellow Sea. *Nature Precedings*, Sep, 2008, 7.
- [19] 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. *中国水产科学*, 2008, 15: 822—829.
- [20] Liu D Y, Bai J, Song S Q et al. The impact of Sewage discharge on the macroalgae community in the Yellow Sea Coastal Area around Qingdao, China. *Water Air Soil Pollut*, 2007, 7: 683—692.

REVIEW ON THE RESEARCH PROGRESS ON MARINE GREEN TIDE

Tang Qisheng Zhang Xiaowen Ye Naihao Zhuang Zhimeng

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

Abstract A brief introduction to the green tide algae blooming in the worldwide coast waters during recent years was reviewed in this paper, focusing on the key causes of green tide algae and its impact on the ecosystem. Some proposals for studies on the prevention and treatment of the green tide, together with the utilization of green algae were discussed.

Key words green tide, ecological disaster, causative factors

· 资料 · 信息 ·

中国科学院化学研究所在苯酚加氢制环己酮方面取得重大进展

2009年11月27日美国《科学》(*Science*, 2009, 326: 1250—1252)期刊刊登了中国科学院化学研究所在苯酚加氢制环己酮方面取得的重大进展。

环己酮是具有许多用途的化工原料,主要用于制备合成纤维尼龙6及尼龙66,还可用作医药、涂料、染料等精细化学品的重要中间体。苯酚加氢是制备环己酮的一条重要的途径。由于一般催化剂在温和条件下活性低,并且环己酮容易进一步加氢生成环己醇等副产物,因此,在温和条件下高效、高选择性地合成环己酮一直是挑战性难题。

韩布兴和姜涛等研究人员发现路易斯酸和普通商业负载型钨催化剂对于催化该反应具有良好的协同作用,并在分子间相互作用和动力学研究的基础上提出了协同作用机理。路易斯酸本身不能催化苯

酚加氢生成环己酮的反应,但可以大幅度提高钨催化此反应的速度,同时可以有效地抑制产物环己酮被进一步加氢生成副产物的反应。因此,在温和条件下钨-路易斯酸体系可高效地将苯酚转化为环己酮,苯酚转化率和环己酮选择性可同时接近100%。这不仅将反应物全部转化为产品,提高了原料的利用率,而且简化了后续分离过程。进一步研究发现,在超临界CO₂中进行此反应,不仅反应速度可加快,反应过程更清洁,产物分离更简单,而且反应效率可以通过反应体系的相行为进行调控。这一工作得到国家自然科学基金面上和重点项目等的资助。

(化学科学部 杨俊林 高飞雪 梁文平 供稿)