浒苔生物抗藻剂的研究和应用进展

刘海燕，马栋，单俊伟

（青岛海大生物集团有限公司　青岛　266071）

摘要：富营养化是指氮、磷等营养物质大量进入流动缓慢的水体，引起藻类及其他浮游生物大量繁殖和生长，使水中溶解氧含量迅速下降，最终导致鱼类和其他水生生物死亡。近年来，沿海赤潮频发，对海洋生态环境和水产养殖带来不利影响，如何有效地控制赤潮的发生已成为当前研究的热点之一。文章简要介绍水体富营养化的现状，包括引起水体富营养化的原因、富营养化防治措施，引出利用浒苔化感物质即浒苔生物抗藻剂进行生物防治赤潮的想法，治标治本，且不会对环境造成污染，为浒苔资源化利用及赤潮防治开辟新的方向。

关键词：富营养化；浒苔；化感

中图分类号：P73；X55　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1005－9857(2016)04－0035－05

On the Research and Application Progress of Bio-Algicide from Enteromorpha

LIU Haiyan，MA Dong，SHAN Junwei

（Qingdao Seawin Biotech Group Co. Ltd. ，Qingdao 266071，China）

Abstract：Eutrophication is the phenomenon that large amount of nitrogen，phosphorus and other nutrient enter into the slowly flowing water，which causes algae and other plankton to propagate and grow，and makes the dissolved oxygen content in water drops rapidly，eventually leads to the death of fish and other aquatic organisms. In recent years，red tide has occurred frequently and have brought negative impact on marine environment and aquiculture. It has become one of hot spots of research on how to effectively control the red tide. This paper briefly introduced the status of eutrophication，including the causes，the prevention and control measures，and led to the use of enteromorpha allelopathy to control the red tide with a foundation solution，which is pollution-free for environment. It had opened up a new direction of enteromorpha resource utilization and the prevention and control of red tide.

Key words：Eutrophication，Enteromorpha，Allelopathy

进入 21 世纪以来，人口数量不断增长和工农业生产迅猛发展，产生大量工业废水和生活污水排入水体；农业大量使用化肥、牲畜粪便和农药等，经雨水冲刷、渗透，其中一部分会进入水体中；水产养殖

作者简介：刘海燕，农艺师，硕士，研究方向为浒苔肥的推广应用，电子信箱：liuhy1982@163. com

过程中，人工投放的饵料以及鱼类的排泄物也会给水体带来污染；以上因素使水体中的氮、磷含量明显增多，增加水体中营养成分的负荷量，从而导致藻类大量生长繁殖，水体出现富营养化现象[1]。水体富营养化时，水中生物高度密集引起水体变色，呈现蓝色、红色、棕色、乳白色等，这种现象被称为“赤潮”[2]。

近年来，我国海洋出现比较严重的富营养化现象，赤潮发生频率较高，海水中氧气溶解量下降，导致水生动物大量窒息死亡，影响沿海渔业生产的发展；且引发赤潮的某些藻类还会产生毒素，这种毒素在贝类和鱼类体内积累还会对食用者的健康产生影响[3]。2014 年国家海洋局对我国海域生态环境监测结果显示，我国目前出现富营养化现象的海域面积约 8.5 万 km^2，局部海域中无机氮、活性磷酸盐、石油类等主要污染因子的污染状况依然严重，劣Ⅳ类水质的海域面积约 5 万 km^2；全年共发生赤潮 56 次，赤潮危害海域面积累计 7 290 km^2，与 2013 年相比，赤潮发生次数和累计面积均有所增加。频发的赤潮对海洋生态环境和养殖带来一定的负面影响，当前污染生态学研究已经将如何有效地控制赤潮的发生和发展列为热点课题之一[4]。

1 赤潮的治理办法

关于如何防治赤潮，减少其对海洋生态环境、水产养殖及人类生活的危害，研究报道已有很多。目前赤潮的治理方法主要有以下 4 种：物理方法、化学方法、生物方法[5]和低温等离子体法[6]。

1.1 物理方法

赤潮生物一般存在于水体 3 m 以内的表层，表层以下很少出现赤潮生物，所以海水表层受赤潮生物危害最大。物理方法就是据此特性进行的，目前治理赤潮国内外常用的物理法有过滤法、气幕法、隔离法、回收法、网箱与台筏沉降法、增（充）氧法、超声波法等。物理法适用于赤潮生物密度较高的表层区域，对赤潮生物低密度区或发生在底层的赤潮生物防治效果不理想，外界条件对除率影响较大，且需要有专门的仪器设备和材料，耗费大量的人力物力，特别是大面积发生赤潮时，此方法更是显得既不经济也不方便，且治理效果未必理想。

1.2 化学方法

化学法是使用最早且目前仍是处理赤潮藻和藻毒素最常用的方法，主要有混凝法、预氯化法、化学药剂法、$KMnO_4$ 预氧化法、臭氧法、ClO_2 法、深度氧化法等[6]。化学法操作起来比较简单，费用低，见效快，而且杀藻效率较高；但不能从根本上去除藻类，且使用的药品会带来二次污染，所以不宜长期使用[7]。

1.3 生物方法

生物法主要是利用生物间的营养竞争、相生相克和摄食作用来达到去除赤潮藻类的目的，主要通过生物膜法、水生植物控制法、高效微生物法等途径来实现。生物法具有很多优点，首先由于生物间相互作用具有选择性，所以不会对其他生物产生影响；其次对环境没有什么危害，不会造成二次污染，因此生物法符合当前提倡的修复环境、改善生境的理念。而利用植物化感作用控制赤潮藻也是生物法的一种，目前已成为生物法防治赤潮藻类暴发的研究热点[8]。

1.4 低温等离子体法[6]

低温等离子体法是近年来新兴起的一项高级氧化技术，综合化学、生物学、物理学和环境科学四大学科的技术，主要利用等离子体产生的高能电子辐射、臭氧、自由基等活性粒子和污染分子碰撞结合，在外加电场作用下分子会处于激发态。当激发态分子获得的能量超过其分子键能的结合能时，化学键就会断裂，进而分解成单质原子或由单一原子构成的无害分子。具有适合大范围操作、降解快、效率高、能耗低、没有二次污染、在常温常压下可进行等优点。

综合来看，化学法和物理法都不能从根本上治理赤潮，只能将水体中的赤潮生物暂时杀死或除掉，赤潮可能会再次发生。等离子体技术尚不成熟，其中化学反应的方向可控性差，工业化应用尚少。生物法由于操作起来比较复杂，且目前技术本身还不够成熟，与实际应用还有一定的距离[9]，但是却是目前修复环境、改善生境比较理想的方法。近年来人们颇为青睐的治理赤潮藻类的方法是利用植物间的化感作用，此法兼具化学法快捷、生物法

相对安全的优点[4]。

2　浒苔生物抗藻剂研究进展

浒苔为浒苔属海藻的总称、绿藻的一种，隶属于石莼科，别名海菜、苔条、苔菜等，全球约有 40 余种，中国约有 11 种[10]，常见种为肠浒苔、条浒苔、扁浒苔和缘管浒苔等。

浒苔作为生物抗藻剂出现主要是应用其与赤潮藻间的化感抑制作用，最近十几年我国对浒苔与赤潮藻化感抑制作用已有较多报道，如浒苔与塔玛亚历山大藻、浒苔与米氏凯伦藻、浒苔与前沟藻、条浒苔与三角褐指藻、浒苔与球等鞭金藻、浒苔与异弯藻、肠浒苔与中肋骨条藻、缘管浒苔和微小原甲藻、肠浒苔与海洋原甲藻和异弯藻间均存在化感作用[11－20]，浒苔化感物质的存在为浒苔资源化应用及在赤潮防治上的应用开辟了新的方向。

2.1　浒苔中化感物质的特点

2.1.1　基本特点

浒苔化感物质除具有化感物质通性（选择性、低促高抑、协同效应等[4]）外还存在以下特点：浒苔分泌的化感物质不稳定、容易分解、具有较高极性，并且浒苔化感物质的连续供给是保证抑藻效果的前提。

侯俊妮等[21]使用浒苔新鲜组织和干粉未进行抑制异弯藻试验，发现浒苔新鲜组织抑藻作用持续有效，浒苔干粉的抑制作用随着时间延长而变弱，说明浒苔新鲜组织可以不断产生化感物质，而浒苔干粉产生的化感物质会随时间推移逐渐分解失效。许妍等[17]通过半连续添加缘管浒苔培养水过滤液来抑制异弯藻，证明环境中化感物质保持在一定的浓度水平是有效抑制异弯藻的关键。

侯俊妮[21]和许妍[17]发现含有浒苔化感物质的水煮沸后对异弯藻的生长无抑制作用，说明化感物质遇高温易分解。韩秀荣[18]发现浒苔的有机相提取物的化感作用强于水相提取物，且甲醇和乙酸乙酯相提取物的抑藻效果优于正己烷相提取物，根据相似相溶原理，可以推测浒苔中起作用的化感物质应具有相对较高的极性；同时韩秀荣发现浒苔化感提取物具有低促高抑的特性。冯朝[9]通过研究缘管浒苔的水相提取物和 4 种不同的有机相提取物对东海原甲藻的生长抑制作用，也证明浒苔化感物质具有相对较高的极性。

2.1.2　新鲜浒苔组织分泌化感物质受环境因素影响

植物化感物质的产生情况与其所处的环境有非常大的关系，逆境会刺激植物化感物质的分泌。杨善元等研究发现，若暴露在强光下，凤眼莲根系的化感物质产生会受到抑制；同时植株的营养状况对化感物质的形成也会产生一定的影响，如当缺乏营养元素氮、磷、硼、镁、钙等时，植物之间会表现出较强的化感效应。大量的研究证明，植物在逆境中化感物质分泌会明显增多，化感作用也会显著增强[22]。

许妍[17]研究发现缘管浒苔化感物质的分泌与所处的环境关系密切，当缘管浒苔接种密度为 0.45 g/L时，其在温度为 25℃、光照强度为 3 000 lx、盐度为 30 的条件下所分泌化感物质最多。

2.1.3　浒苔化感物质的提取分离

化感物质大部分是次生代谢产物，具有结构简单、相对分子质量小的特点，一般分为以下 14 类：直链醇、水溶性有机酸、长链脂肪酸和多炔，脂肪族醛和酮，简单不饱和内酯，醌类，香豆素类，苯甲酸及其衍生物，肉桂酸及其衍生物，氨基酸和多肽，内黄酮类，嘌呤和核苷，单宁，硫化物和芥子油苷，内砧，生物碱和氰醇等[23]。化感物质中常见的是低分子量有机酸、酚类和内帖类化合物[24]。

从植物中提取化感物质的方法主要有常温吸附法、浸提法或腐解法、夹层法、疏水性根浸出液连续收集法（CRETS）等[25]；分离方法主要有树脂法、萃取法和层析法；结构鉴定方法主要有 GC-MS、LC-MS、质谱（MS）、红外（IR）和紫外（UV）、LC-NMR 和核磁共振（NMR）等[26]。

利用常用的提取分离鉴定技术初步确定浒苔化感物质含有 α-亚麻酸[4]、内酯、香豆素类化合物[12]、15-乙氧基-(6z，9z，12z)-十六碳三烯酸、棕榈酸、(6E，9E，12E)-(2-乙酸酯基-β-D-葡萄糖)-十八碳三烯酸酯[27]等。

2.1.4　浒苔化感物质起作用方式及机理

化感物质起作用的机理国内外已有大量报道，

主要是破坏细胞膜、降低酶类活性、影响营养物质的吸收、降低光合效率、抑制或促进光合吸收、抑制细胞分裂和伸长、影响蛋白合成和基因表达、破坏细胞结构等[28]。

而关于浒苔化感物质的抑藻机理，通过检测被抑赤潮藻的各项生理生化指标发现：细胞内蛋白质含量下降；多糖含量降低；超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性和丙二醛含量则先上升后下降；细胞内 Na^+、K^+、Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 的浓度明显下降；光合放氧量下降；细胞结构受损出现空洞、破碎，细胞运动性降低；叶绿体片层肿胀；高尔基体片层模糊[4,8,29]。

由以上推测，浒苔化感物质可能是先破坏藻细胞膜的通透性，影响细胞内金属离子的渗出率，从而使细胞结构（细胞核、拟核、叶绿体、线粒体等）受损，特别是光合作用和呼吸作用相关的细胞器（叶绿体和高尔基体）受到严重破坏，同时细胞内的抗氧化酶系活性降低，抗氧化系统破坏，藻细胞内叶绿素荧光特性发生改变，致使藻细胞的光合作用受到影响，光合放氧量明显下降，导致赤潮藻生长受到抑制甚至死亡[4]。

2.2 浒苔化感物质作用的适宜浓度

对于浒苔对赤潮藻的抑制情况，专家学者进行大量研究，掌握其对赤潮藻适宜的强抑制或致死浓度，为浒苔作为生物除藻剂应用奠定了较好的基础（表 1）。

表 1 浒苔对赤潮藻类的强抑制或致死情况统计

赤潮藻类	浒苔新鲜组织		浒苔干粉末		水相提取液		甲醇提取液		备注
	浓度	抑制情况	浓度	抑制情况	浓度	抑制情况	浓度	抑制情况	
异弯藻[4]	16 mg/mL	接近死亡			0.03 mg/mL	接近死亡			肠浒苔
海洋原甲藻[4]	16 mg/mL	抑制率 89.2%			0.03 mg/mL	抑制率 84.3%			肠浒苔
米氏凯伦藻[11,12,13]							2 g/L	4 天全部死亡	浒苔
三角褐指藻[14]					0.7 g/L	8 天抑制 84.8%			条浒苔
球等鞭金藻[15,16]	5.0 g/L	全部死亡	1.2 g/L	6 天全部死亡	1.0 g/L	6 天全部死亡			缘管浒苔
异弯藻[17]	5.0 g/L	5 天全部死亡	1.2 g/L	3 天全部死亡					缘管浒苔
中肋骨条藻[18,19]	5.0 g/L	8 天全部死亡	1.2 g/L	4 天抑制 80%			2 g/L	4 天全部死亡	浒苔
微小原甲藻[20]	5.0 g/L	全部死亡	10 g/L	全部死亡					缘管浒苔
异弯藻[21]			2.4 g/L	短期全部死亡	1 g/L	1 天全部死亡	2.5 g/L	1 天全部死亡	缘管浒苔
中肋骨条藻[21]					20 g/L	1 天全部死亡	1.25 g/L	3 天全部死亡	缘管浒苔
东海原甲藻[21]	2.5 g/L	7 天全部死亡	0.3 g/L	2 天死亡	5 g/L	3 天全部死亡	0.5 g/L	3 天全部死亡	缘管浒苔
异弯藻[27]			1.2 g/L	2 天全部死亡					肠浒苔
海洋原甲藻[27]					0.96 g/L	3 天全部死亡			肠浒苔

从表 1 可以看出，浒苔对不同的赤潮藻的强抑制或致死浓度各异，实际应用中要因地制宜。如果使用浒苔新鲜组织，考虑到化感作用效果的产生与化感植物的密度有关，达不到一定的覆盖范围就起不到应有的作用；但覆盖范围过大会使水体透光率过低，影响其他生物的生长，而且可能会形成绿潮危害。因此，从浒苔中提纯化感物质制作浒苔生物抗藻剂是今后应用的主要方向。

3 结论与建议

对于化感物质的研究应用国内外已有不少研究报道，但对于浒苔化感物质在赤潮治理上的应用大部分停留在实验室研究的水平，尚缺乏实际应用，从浒苔中提纯化感物质即浒苔生物抗藻剂将是今后浒苔研究应用的一个新的方向。近 5 年的中国海洋环境状况公报显示，东海原甲藻为赤潮藻第一优势种，引发的赤潮次数最多，造成巨大损失，其次为夜光藻和中肋骨条藻，所以研究浒苔化感物质对

东海原甲藻、中肋骨条藻和夜光藻的抑制作用意义重大。浒苔中提取出的化感物质具有高效、低毒或无毒、能迅速控制赤潮生物生长等特点，且避免使用新鲜浒苔组织形成绿潮灾害。因此，在近海沿岸推广浒苔中提纯化感物质即浒苔生物抗藻剂治理赤潮藻具有可行性和重要意义。

参考文献

[1] 马经安，李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境，2002，11(6)：575－578.

[2] 赵亮. 锰铜复合除藻剂制备及其灭藻效能研究[D]. 北京：北京工业大学，2007.

[3] 时文博. 我国近岸海水富营养化现状及评价方法的研究探讨[J]. 河北渔业，2012，34(4)：42－46.

[4] 夏钰妹. 大型绿藻浒苔对赤潮藻的抑制作用及其机理研究[D]. 宁波：宁波大学，2012.

[5] 张珩. 快速、灵敏控制赤潮生物生长的方法和机理研究[D]. 广州：暨南大学，2004.

[6] 王刚，陈杰瑢. 水体藻类污染去除方法研究进展[J]. 水处理技术，2010，36(9)：16－21.

[7] 邓辅唐，卿小燕，张洪铭，等. 几种除藻剂除藻效果实验的研究[C]//环境保护与资源综合利用技术研讨会，2009：74－79.

[8] 边归国. 浮水植物化感作用抑制藻类的机理与应用[J]. 水生生物学报，2012，36(5)：978－982.

[9] 冯朝. 缘管浒苔、蜈蚣藻和鼠尾藻对东海原甲藻克生效应的初步研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2007.

[10] 禹海文，苏秀榕，张丽媛，等. 气—质联用和电子鼻对浒苔苦味的研究[J]. 中国食品学报，2012，12(7)：212－215.

[11] 孙颖颖，刘筱潇，王长海. 浒苔提取物对 4 种赤潮微藻生长的抑制作用[J]. 环境科学，2010，31(6)：1662－1669.

[12] 孙颖颖，董晓柯，李光成，等. 浒苔抑藻物质的分离及其对赤潮微藻的抑制作用[J]. 水产学报，2014，38(6)：813－819.

[13] 孙颖颖，李灿，张静，等. 浒苔对 4 种赤潮微藻生长的影响[J]. 淮海工学院学报：自然科学版，2010，19(3)：75－78.

[14] 王兰刚，徐姗楠，何文辉，等. 海洋大型绿藻条浒苔与微藻三角褐指藻相生相克作用的研究[J]. 海洋渔业，2007，29(2)：103－108.

[15] 霍元子，田晓玲，王阳阳，等. 缘管浒苔与球等鞭金藻生长的克生作用[J]. 水产学报，2010，34(11)：1776－1782.

[16] 张建恒，霍元子，王阳阳，等. 浒苔与球等鞭金藻相互抑制的实验验证[J]. 上海海洋大学学报，2011，20(2)：211－216.

[17] 许妍. 大型海藻缘管浒苔(*Enteromorpha linza*)对微藻赤潮异弯藻(*Heterosigma akaskiwo*)克生作用的实验研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2005.

[18] 韩秀荣，高嵩，侯俊妮，等. 浒苔干粉末提取物对东海原甲藻和中肋骨条藻的克生作用[J]. 生态学报，2013，33(23)：7417－7430.

[19] 崔峰，涂文斌，王亦冰，等. 绿潮藻浒苔对赤潮藻中肋骨条藻化感抑制作用初探[J]. 热带海洋学报，2014，33(5)：28－34.

[20] 赵妍. 大型海藻缘管浒苔(*Enteromorpha linza*)对两种海洋微藻克生效应的初步研究及克生物质的分离与鉴定[D]. 青岛：中国海洋大学，2010.

[21] 侯俊妮. 浒苔对三种赤潮藻的克生作用初探[D]. 青岛：中国海洋大学，2011.

[22] 房立翠，汤峰. 化感物质释放机制研究进展[J]. 安徽农业科学，2010，38(31)：17380－17381.

[23] 王大力，祝心如. 三裂叶豚草的化感作用研究[J]. 植物生态学报，1996，20(4)：330－337.

[24] 孙文浩，余叔文. 相生相克作用及其应用[J]. 植物生理学通讯，1992，28(2)：81－87.

[25] 阎飞，杨振明，韩丽梅. 植物化感作用(Allelopathy)及其作用物的研究方法[J]. 生态学报，2000，20(4)：692－695.

[26] 李寿田，周健民，王火焰，等. 植物化感作用研究概况[J]. 中国生态农业学报，2002，10(4)：68－70.

[27] 金浩良. 肠浒苔中抑藻活性物质的分离鉴定及其对赤潮藻的影响[D]. 青岛：中国海洋大学，2011.

[28] 张男男. 水生植物化感物质对噬菌体的抑制作用[D]. 青岛：中国海洋大学，2009.

[29] 张彬，郭劲松，方芳，等. 植物化感抑藻的作用机理[J]. 生态学杂志，2010，29(9)：1846－1851.