

# 利用海洋微生物防治赤潮的初探

张 亮<sup>1,2</sup>, 张栋梁<sup>1,2</sup>, 王尽文<sup>1,2</sup>, 任荣珠<sup>1,2</sup>, 张绍萍<sup>1,2</sup>, 孙 滨<sup>1,2</sup>

(1. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室 青岛 266061;

2. 国家海洋局北海预报中心 青岛海洋环境监测中心站 青岛 266061)

**摘 要:** 受海洋水体富营养化的影响, 近海赤潮灾害频繁暴发, 给海洋生态环境带来严重的破坏并造成巨大的经济损失, 赤潮同时也影响了人类自身的生活、经济发展, 甚至威胁到人类的身体健康和生命安全。赤潮已经成为世界上公认的海洋灾害之一, 如何有效防治赤潮, 成为亟待解决的重大问题, 目前治理赤潮的方法主要是物理法、化学法和生物法, 其中生物法具有更广阔的应用前景和巨大的潜力。文章综述了生物防治赤潮中微生物防治赤潮的微生物种类, 并对微生物防治赤潮的作用方式及机理进行了探讨。

**关 键 词:** 赤潮; 海洋微生物; 防治

赤潮是近岸海水中某些浮游藻类、原生物和细菌等在富营养条件下迅猛增殖或迅速聚集引起水体缺氧和变色的一种有危害的生态异常现象<sup>[1]</sup>。近年来随着人类活动的增加, 海洋污染的加剧, 沿海海域的赤潮发生日益频繁, 发生区域扩大, 危害加剧, 对海洋水产和整个海洋环境造成严重的负面影响, 赤潮作为一种严重的全球性海洋灾害, 它的频发使海区生态系统失去平衡, 海洋生物资源遭到破坏, 并且某些赤潮生物能产生毒素, 使得海洋贝类和鱼类中毒死亡, 给近海养殖业带来严重的危害。另外赤潮毒素能通过鱼和贝类传递而危害食用者, 给海洋环境和人民生活造成重大危害<sup>[1]</sup>, 可见, 赤潮直接或间接地影响了人类自身的生活、经济发展, 甚至威胁到人类的身体健康和生命安全<sup>[2]</sup>。

根据国家海洋局公布的《2012 年中国海洋灾害公报》可知, 2012 年, 我国沿海共发现赤潮 73 次, 12 次造成灾害, 直接经济损失 20.15 亿元, 其中, 福建省赤潮灾害直接经济损失最大, 为 20.11 亿元<sup>[3]</sup>。赤潮已成为我国乃至全世界一种不可忽视的海洋灾害, 如何减少赤潮带来的危害, 做好防灾减灾准备, 意义十分重大, 如何有效防治赤潮成为亟待解决的重大问题。本文综述了国内外防治赤潮微生物的种类, 并对微生物防治赤潮的作用方式及机理进行了探讨, 为将来利用海洋微生物进行赤潮的微生物防治

提供一定的理论基础。

## 1 防治赤潮的方法

由于赤潮已经成为世界上公认的海洋灾害之一, 其造成的环境和经济问题日益严重, 因此寻求有效的赤潮防治途径势在必行。目前对赤潮的防治, 主要是采用物理方法, 如利用黄土<sup>[4]</sup>、黏土<sup>[5]</sup>, 虽然这种方法有一定的效果, 但是黄土和黏土会对底栖生物造成二次影响<sup>[6]</sup>; 或采用化学方法, 如利用硫酸铜<sup>[7]</sup>、过氧化氢<sup>[8]</sup>, 虽这种方法可以短时间内控制赤潮, 但是化学试剂会对海洋生态系统造成潜在的威胁<sup>[2]</sup>。与之相比, 采用生物法对环境无二次污染, 是最有发展前途, 也是目前研究最为热门的一种赤潮治理方法<sup>[9]</sup>, 利用生物, 特别是微生物防治赤潮得到了许多研究者的关注, 利用溶赤潮藻或抑赤潮藻微生物来防治赤潮, “以菌治藻”在赤潮治理中具有巨大的潜力与广阔的应用前景。海洋微生物资源丰富, 其中还有许多未被研究和发现, 其中必有对赤潮具有防治作用的微生物, 这些需要去探索。这种防治赤潮的微生物“来于海洋用于海洋”避免了外来生物入侵, 可以实现海洋环境的可持续发展。筛选鉴定防治赤潮的微生物, 对其防治特性和效果进行初步研究, 可为赤潮的微生物治理提供一定的科学依据及数据支持, 促进海洋经济实现健康、良性的可持续发展。

## 2 防治赤潮的微生物

目前防治赤潮的微生物主要是指溶藻细菌，溶藻细菌 (algicidal bacteria) 是一类以直接或间接方式抑制藻类生长，或杀死藻类、溶解藻细胞的细菌的统称。目前已经有许多溶藻细菌被分离出来，它们作为一种可能的赤潮终结者而备受关注<sup>[10]</sup>。

有关溶藻细菌报道最早的是黏细菌属 (*Myxobacter*)<sup>[11]</sup>；假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 是研究较多的一种溶藻细菌<sup>[12]</sup>；Skerratt 等发现弧菌 (*Vibrio*) 也是一种可以杀死赤潮藻的微生物<sup>[13]</sup>；Sohn 等从日本海域和韩国海域分离出具有溶藻效应的黄杆菌属 (*Flavobacterium* sp.)<sup>[14]</sup>；对有毒赤潮藻类塔马亚历山大藻 (*Alexandrium tamarense*) 有明显不同的抑制作用的鞘氯醇单胞菌属 (*Shplngomonas*)、巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megateriura*) 和盐敏芽孢杆菌 (*Bacillus halmopalus*) 也有相关报道<sup>[15]</sup>；汪辉等发现能强烈抑制铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 生长的黄单胞菌 (*Xanthomonas* sp.)<sup>[16]</sup>；另外，具有溶藻作用的还有噬纤维菌 (*Cytophaga*)、屈挠杆菌 (*Flexibacter*) 和类杆菌 (*Bacteroides*)<sup>[10]</sup>等。

这些研究主要集中在细菌方面，但海洋微生物极其丰富，其中还有很多种类未被研究和发现，且对赤潮藻有抑制作用的海洋真菌的研究较少<sup>[9]</sup>，对真菌防治赤潮研究报道只有很少的资料。海洋面积占到地球总面积的 71%，是一个巨大的资源宝库，海洋微生物是海洋中重要的生物资源，这些微生物因生存在海洋高盐、高压、低温、低营养和无光照等极端环境条件下而具有特殊的生理性状和遗传背景，具有许多特殊功能，那么海洋环境中是否存在能够防治赤潮的真菌？它们的作用机理如何？在防治赤潮方面是否比细菌更具有优势？这些都需要我们去探索和研究。

## 3 微生物防治赤潮的作用方式及机理

微生物防治赤潮主要指溶藻菌对赤潮藻的抑制作用以及产生生物絮凝剂去除赤潮生物，溶藻菌对赤潮藻的抑制作用方式和可能机理主

要有：释放杀死藻的物质、释放酶类溶解藻、进入藻细胞内杀死藻细胞、微生物与赤潮藻类竞争营养物质、形成菌胶膜。

### 3.1 利用微生物絮凝剂去除赤潮生物

龚良玉等利用一株假单胞菌 (*Pseudomonas* sp.) 的发酵液研究了该细菌产絮凝剂对东海原甲藻和裸甲藻的絮凝去除作用，结果表明，该微生物絮凝剂可有效絮凝去除实验所选两种赤潮生物，并且随絮凝剂用量的增加以及作用时间的延长，去除效果逐渐增加至最大，然后基本保持恒定，该菌株产絮凝剂的周期短 (大约 72 h)，絮凝活性较好，其培养条件以及所用的原料简单易得，且微生物絮凝剂本身具有生物可降解性，是一种新型、高效、安全、无二次污染的絮凝剂，展现了其在赤潮治理中具有一定的应用前景<sup>[17]</sup>。

### 3.2 释放杀死藻的物质

细菌可以通过释放特异性或非特异性的胞外物质杀死藻细胞，目前报道的细菌杀藻物质主要有蛋白质、多肽类物质，如 Mitsutani 等发现静止培养的一株海洋细菌交替假单胞菌 (*Pseudoalteromonas*) A25 可以产生杀死骨条藻的蛋白酶<sup>[12]</sup>；抗生素类物质，如铜绿假单胞菌 (*Pseudomonas aeruginosa*) 可产生大量的抗生素类物质如扩散性吩嗪色素物质，对藻类的生长都有抑制作用<sup>[18]</sup>；很多微生物的溶藻和杀藻物质还没有确定，Mitsutani 等研究表明，噬胞菌 (*Cytophaga* sp.) 菌株 A5Y 的培养物对中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 的生长有抑制作用<sup>[12]</sup>；郑天凌等从厦门西海域表层海底沉积物分离筛选到三株细菌，分别为鞘氯醇单胞菌属 (*Shplngomonas*) 的一新种，巨大芽孢杆菌 (*Bacillus megateriura*) 和盐敏芽孢杆菌 (*Bacillus halmopalus*)，其培养上清液对有毒赤潮藻类塔马亚历山大藻 (*Alexandrium tamarense*) 有明显不同的抑制作用<sup>[19]</sup>。

### 3.3 释放酶类溶解藻类

某些溶藻菌直接与藻细胞接触，释放可溶解纤维素的酶类，如纤维素酶等，进而消化藻类细胞的细胞壁，逐渐溶解整个藻细胞，从而杀死藻细胞。噬胞菌属 (J18. M01) 和腐生螺旋

体属 (SS98.5) 能够特异性地与横裂甲藻和硅藻接触溶解藻细胞<sup>[20]</sup>。日本学者从 Kagoshima 海湾分离到一株海洋细菌 (*Saprospira* sp.) 菌株 SS98-5 能杀死和溶解硅藻 (*Chaetoceros ceratosporem*), 这种丝状的细胞能捕获藻细胞, 形成细胞团聚体, 并溶解藻细胞<sup>[21]</sup>。

### 3.4 进入藻细胞内杀死藻细胞

这种溶藻方式极其少见, 有研究者从铜绿微囊藻中分离出一种类似蛭弧菌的细菌, 这种细菌能够进入铜绿微囊藻的细胞并使藻细胞溶解, 它首先分泌一种可溶解粘肤层的外毒素, 消化掉宿主细胞壁的某些特定部位, 随后细菌的纤维多糖蛋白质复合体向外延伸, 形成一种功能类似“桥”的结构, 把细菌黏合到被消化掉的细胞壁部位上, 细菌再经由这种“桥”结构进入到宿主细胞内, 进而使宿主细胞的周质空间膨胀, 质膜增厚, 原生质收缩, 细胞结构崩溃, 质膜变薄断裂。溶解细胞的原生质中只剩下伪空泡, 但不久也破裂, 有的收缩为薄膜状物质, 最后仅残存破碎的细胞壁, 伪空泡及质膜碎片。宿主被溶解的过程中, 细菌立刻以多价裂殖方式在其周质空间繁殖大量的后代细菌, 释放出来迅速感染其他健康细胞。其侵染过程与噬菌体感染细菌在某种程度上有相似之处<sup>[22]</sup>。

### 3.5 微生物与赤潮藻类竞争营养物质

已有不少研究表明, 细菌对维持藻类生物量的平衡有着非常重要的作用, 它能与藻竞争营养物质<sup>[23]</sup>。有些细菌通过与赤潮藻类竞争 C、N、P、K 等物质, 从而达到抑制赤潮藻类生长, 乃至死亡的目的。有报导在养殖区内投入光合细菌进行繁殖, 消耗水中营养盐, 可控制富营养化和赤潮的发生<sup>[24]</sup>, 如芽孢杆菌的生长需要氮磷等物质的营养支持, 从而会使水体中的氮磷含量下降, 进而使水体无法满足微囊藻的生长需要。另外部分真菌和放线菌也会同藻类抢夺有限的营养物质, 抑制藻类的生长<sup>[25]</sup>。

### 3.6 形成菌胶膜

腐败菌、亚硝酸菌、大肠杆菌、枯草杆菌等大量出现时, 可在静止的水面集结形成菌胶膜, 有碍气体交换和光线的透射, 导致水环境

恶化, 致使藻类死亡。

## 4 防治赤潮藻效果评价

研究防治赤潮的微生物, 那么如何对防治效果进行评价呢, 对于防治赤潮藻效果的评价, 目前主要的参考指标有: 固体培养溶藻试验中检测溶藻斑的大小, 液体溶藻试验中检测藻类数目和藻细胞形态的改变、叶绿素含量的变化以及加菌前后藻种丙二醛含量的变化等<sup>[26]</sup>。

## 5 结束语

从海洋环境中分离出对赤潮藻类有特殊抑制作用或能够溶解、杀死赤潮藻的微生物, 特别是海洋真菌, 并通过形态、生理生化实验和分子生物学分析对其进行鉴定, 一方面可以丰富海洋环境中杀藻或抑藻微生物的种类, 为将来防治赤潮的微生物储备宝贵的菌种资源; 另一方面对微生物溶藻特性的研究为研究微生物防除赤潮灾害提供科学依据和数据支持, 为其应用到实践当中提供有力的理论依据。利用海洋微生物防治赤潮, 可使海洋环境保持生态平衡, 具有很高的潜在利用价值, 但在以菌治藻的工程实施之前还需要大量的研究工作。

## 参考文献

- [1] 廉双喜. 赤潮监测和预报的构想[J]. 海洋技术, 2002, 21(2): 74—77.
- [2] JEONG J H, JIN H J, SOHN C H, et al. Algicidal activity of the seaweed *Corallina pilulifera* against red tide microalgae[J]. J Appl Phycol, 2000, 12: 37—43.
- [3] 国家海洋局. 2012 年中国海洋灾害公报. 2013.
- [4] CHOI H G, KIM P J, LEE W C, et al. Removal efficiency of *Cochlodinium polykrikoides* by yellow loess[J]. J. Kor. Fish. Soc, 1998, 31: 109—113.
- [5] SUN X X, CHOI J K, KIM E K. A preliminary study on the mechanism of harmful algal bloom mitigation by use of sophorolipid treatment[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2004, 304: 35—49.
- [6] BRICELJ V M, MALOUF R E. Influence of algal and suspended sediment concentrations on the feeding physiology of the hard clam *Mercenaria mercenaria*. Mar Biol, 1984, 84: 155—165.

- [7] STEIDINGER K A. A re-evaluation of toxic dino-flagellate biology and ecology[J]. Prog Phycol Res, 1983, 2: 147—188.
- [8] RYU H Y, SHIM J M, BANG J D, et al. Experimental chemical treatments for the control of dino-flagellate, *Cochlodinium polykrikoides* in the land-based culture of olive flounder *Paralichthys olivaceus*[J]. Kor J Aquacult, 1998, 11: 285—294.
- [9] 黄姿, 李春强, 彭明. 赤潮藻拮抗微生物研究进展[J]. 广西农业科学, 2008, 39(5): 623—627.
- [10] MAYALI X, AZAM F. Algicidal bacteria in the sea and their impact on algal blooms [J]. Eukaryot Microbiol, 2004, 51: 139—144.
- [11] SHILO M, Lysis of blue-green algae by myxobacter [J]. J Bacteriol, 1970, 104 (1): 453—461.
- [12] MITSUTANI A, YAMASAKI I, KITAGUCHI H, et al. Analysis of algicidal proteins of a diatom-lytic marine bacterium *Pseudoaeromonas* sp. Strain A25 by two-dimensional electrophoresis [J]. Phycologia, 2001, 40: 286—291.
- [13] SKERRATT J H, BOWMAN J P, HALLEGRAEFF G M, et al. Algicidal bacteria associated with blooms of a toxic dinoflagellate in a temperate Australian estuary[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2002, 244: 1—15.
- [14] SOHN J H, LEE J H, YI H, et al. *Kordia algicida* gen. nov., sp. nov., an algicidal bacterium isolated from red tide[J]. Int J Syst Evol Microbiol, 2004, 54(3): 675—680.
- [15] 郑天凌, 苏建强. 海洋微生物在赤潮生消过程中的作用 [J]. 水生生物学报, 2003, 27 (3): 291—295.
- [16] 汪辉, 刘兆普, 苏莹, 等. 两株溶藻细菌的分离、鉴定及其溶藻特性的初步研究[J]. 环境污染与防治: 网络版, 2008(4): 1—4.
- [17] 龚良玉, 梁生康, 李雁宾, 等. 一株海洋假单胞菌产生生物絮凝剂去除赤潮生物的实验研究[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(3): 247—250.
- [18] MIDDLEBOE M, SONDERGARD M, LETARTE Y, Attached and free-living bacteria: Production and polymer hydrolysis during a diatom bloom[J]. Microbial Ecology, 1995, 29: 231—248.
- [19] 郑天凌, 徐金森, 徐美珠, 等. 微生物调控赤潮原因种塔玛亚历山大藻的实验研究[J]. 海洋学报, 2003, 25(增刊 2): 221—225.
- [20] IMAI I, ISHIDA Y, SAWAYAMA S, et al. Isolation of a marine gliding bacterium that kills *Chattonella antiqua* (Raphidophyceae)[J]. Nippon Suisan Gakkaishi, 1991, 57: 1409.
- [21] FURUSAWA G, YOSHIKAWA T, YASUDA A, et al. Algicidal activity and gliding motility of *Saprospira* sp. SS98-5. Can [J]. Microbiol, 2003, 49: 92—100.
- [22] CAIOLA M G, PELLEGRINI S. Lysis of *Microcystis aeruginosa* (Kolz.) by *Bdellovibrio*-like bacteria[J]. J phycol, 1984, 20: 471—475.
- [23] 赵以军, 刘永定. 有害藻类及其微生物防治的基础: 藻菌关系的研究动态[J]. 水生生物学报, 1996, 20(2): 173—181.
- [24] 刁洪成, 江建华. 浅谈赤潮的危害及防治[J]. 山东环境, 1998(5): 52—53.
- [25] 瞿建宏, 刘韶斌. 水体中芽孢杆菌和微囊藻的生长及其资源竞争[J]. 湛江海洋大学学报, 2002, 22(3): 13—18.
- [26] 史顺玉, 刘永定, 沈银武. 细菌溶藻的初步研究[J]. 水生生物学报, 2004, 28(2): 218—221.