富营养化水体中微藻的生物控制技术发展动态

关英红,马 军

(哈尔滨工业大学市政环境工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要:详细介绍了水体微藻的生物控制方法的发展动态。根据抑制微藻生物种类以及作用机制的不同,将生物法抑藻分为:大型藻抑制微藻、病毒抑制微藻、细菌抑制微藻、高等植物抑藻以及生态法抑制微藻。详细叙述了这 5 种抑藻方法及其国内外研究现状,并分析了这几种方法的不足。指出今后的生物抑藻技术研究方向是寻求一种控制藻类和氮磷去除相结合的方法,以取得藻类过度繁殖的短期和长期控制。

关键词:大型藻抑制微藻;病毒抑制微藻;细菌抑制微藻;生态抑藻

中图分类号:X52 文献标识码:A 文章编号:1004-6933(2008)06-0001-06

Biological methods of controlling micro-algae in eutrophic water

GUAN Ying-hong, MA Jun

(*School of Municipal and Environmental Engineering*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150090, *China*)

Abstract: Biological methods of controlling micro-algae are reviewed in detail. According to the species inhibiting the micro-algae and inhibition mechanisms, the methods are divided into micro-algae inhibited by macro-algae, by virus, by bacteria, by higher plants, and by ecological methods. The current status of the five methods as well as their disadvantages is described in detail. Further study of the biological methods will lead to the development of a method of integrating nitrogen and phosphorus removal with algae control, in order to achieve both short-term and long-term control of algal multiplication.

Key words: micro-algae inhibited by macro-algae; micro-algae inhibited by virus; micro-algae inhibited by bacteria; ecological algicidal methods

近年来,水体的富营养化程度不断加重,微藻类大量繁殖形成"水华"和"赤潮",水体的溶解氧含量降低,使得水中耗氧生物窒息而死,水质变坏。含微藻水作为水源水体不仅对制水工艺、药耗以及构筑物池壁会产生极不利影响,而且对水质也会产生严重影响。"水华"中占优势的一些蓝藻会产生毒性较强的微囊藻毒素,对人体的健康构成严重的威胁[1]。因此,水体中微藻去除已经成为水处理中急需解决的问题。

目前在水处理中,处理微藻的方法可以归纳为物理法、化学法及生物法。本文重点讨论生物法控制微藻的研究进展。生物法是利用与微藻相关的生物及其分泌物来控制微藻的方法,主要可分为大型藻抑制微藻、菌类抑制微藻、病毒抑制微藻、高等植物抑制微藻以及生态方法抑制微藻。

1 大型藻抑制微藻

大型藻是一种体积较大的藻,相对于微藻来说,很容易通过物理方法去除。很多学者认为大型藻对微藻具有抑制作用。广泛分布于中国和日本海岸的一种大型绿藻——孔石莼(*Ulva pertusa*),不仅可以减少海洋的富营养化程度,提高水产业的生产力、水生物种的存活率等,而且对微藻有明显的抑制作用[2]。

大型藻对微藻的抑制作用可以归结为:①大型藻与微藻竞争营养源从而抑制微藻生长;②浮生在

基金项目:教育部重大项目培育基金(705013)

作者简介:关英红(1983—),女(满族),辽宁盖州人,硕士研究生,研究方向为给水处理。E-mail:guanyinghong@126.com

水体表面的大型藻减弱了水体内的光照强度，抑制微藻的光合作用；③大型藻分泌或释放化感物质抑制微藻生长。

Jin 等[2] 将孔石莼（*Ulva pertusa*）的干粉投加到引起赤潮的微藻——赤潮异弯藻（*Heterosigma akashiwo*）和塔玛亚历山大藻（*Alexandrium tamarense*）培养液中，发现其干粉对两种微藻仍具有明显的抑制作用。由此可以看出，分泌释放化感物质是大型藻抑藻的一个主要因素。

化感作用是水生态系统中普遍存在的，存在于植物之间以及植物和微生物之间，包括相互刺激作用和相互抑制作用。植物化感作用是通过向环境释放化学物质而实现的，这些起作用的化学物质称为化感物质[2]。但是，由于自然条件各种因素的影响，如营养物质和光照的竞争、温度和 pH 值的变化都会对水生植物的化感作用产生干扰[3]。

大型藻对微藻的抑制作用，按其作用方式可分为直接作用和间接作用。直接作用是指相互作用的两种藻细胞必须通过直接接触才能发生抑制作用。圆鳞异囊藻（*Heterocapsa circularisquama*）对环节环藻（*Gyrodinium instriatum*）的抑制作用就属于直接作用，通过直接细胞接触来杀死环节环藻（*Gyrodinium instriatum*）[4]。而间接作用则不需要细胞直接接触，主要通过分泌抑藻物质来体现抑藻作用。间接方式抑藻的大型藻分布较广，国内外学者对此研究也做得较多，有的学者对大型藻抑制微藻的活性物质做了提取、鉴定，见表 1。

Jin 等[2] 和 Nakai 等[5] 都分别鉴定出一种大型藻，能够通过分泌不稳定物质抑制微藻，而非直接抑藻。虽然他们证明了存在连续分泌不稳定抑藻物质这种间接抑藻作用方式，而且这种作用方式与直接抑藻有所不同，但他们都没有对这些不稳定抑藻物质进行鉴定。而 Alamsjah 等[7] 则指出绿藻（*Ulva fasciata*）的甲醇提取液分离出的 3 种聚不饱和脂肪酸，有很强的抑藻作用；而从活性组分中分离得到的饱和脂肪酸——棕榈酸的抑藻作用相当微弱。

目前，关于大型藻抑制微藻的作用机理的研究较少，笔者认为大型藻通过分泌化感物质抑制微藻生长，其作用机理与后述高等植物分泌的化感物质抑制微藻的机理基本相同。主要可归结为化感类物质对光合作用的影响、对细胞膜的破坏、对酶活性的影响以及影响细胞亚显微结构、蛋白质合成，改变核酸代谢等[9]。

2 病毒抑制微藻

溶解微藻的病毒根据其宿主藻类结构的不同，可分为原核藻病毒和真核藻病毒。原核藻病毒是以蓝藻为宿主的病毒，即蓝藻病毒，它们与噬菌体的形态、结构、分子组成以及对宿主的感染方式极为相似，被归于噬菌体。因此，也称蓝藻病毒为噬蓝藻体或者噬菌体。真核藻病毒是以真核藻类为宿主的病毒，一般为多面体的粒子，是不同于噬菌体的病毒[10]。

目前，随着感染海洋中的聚球藻和原绿藻的噬菌体被分离出来[11]，人们意识到噬菌体对藻类存在潜在的抑制作用。Fuhrman 认为，病毒是潜在的海洋生态重要调节因子。有的病毒具有“共专一宿主”的特性，能够特异性地感染相互有亲缘关系的藻类[12-13]，进而去除或抑制有害藻类。

一般认为，噬藻体的裂解可将宿主细胞内含物释放到水体中，形成可被细菌等微生物利用的可溶性有机物。在病毒裂解宿主的过程中，至少有 99% 的宿主生物量被转化成了溶解性有机物（DOM），进而被细菌利用，从而形成微生物食物环，减少有机物向食物链的更高级转化，延长营养元素在透光层的停留时间，为非宿主藻和抗性藻的生长提供了生态位[14-16]。如廖明军等[17] 在敞开环境下研究噬菌体裂解织线藻时发现，在织线藻被裂解后，随天然湖水带入的铜绿微囊藻迅速生长，成为优势种。但是在加入噬菌体的织线藻培养液中投加浮萍，浮萍数量

表 1 大型藻类抑制微藻的作用方式及抑藻活性物质

大型藻名称	抑制的微藻	作用方式	抑藻活性物质	参考文献
孔石莼（*Ulva pertusa*）	赤潮异弯藻（*Heterosigma akashiwo*） 塔玛亚历山大藻（*Alexandrium tamarense*）	间接作用	未鉴定 不稳定物质	[2]
狐尾藻（*Myriophyllum spicatum*）	铜绿微囊藻（*Microcystis aeruginosa*）	间接作用	未鉴定 不稳定物质	[5]
大型褐藻（*Ecklonia kurome*）	微藻（*Karenia mikimotoi*、*Cochlodinium polykrikoides*、*Chattonella antiqua*）	未指出	类单宁酸（Phlorotannins） 其组分中间苯三酚的五聚物（phlorofucofuroeckl）抑藻活性最强	[6]
绿藻（*Ulva fasciata*）	赤潮异弯藻（*Heterosigma akashiwo*）	未指出	十六碳四烯酸（HDTA）、十八碳四烯酸（ODTA）、α－亚麻酸	[7]
黑藻（*Hydrilla verticillata*）	铜绿微囊藻（*Microcystis aeruginosa*）	未指出	黑藻（*Hydrilla verticillata*）乙醚提取物	[8]

迅速增加，几乎没有藻类生长。浮萍的投加控制了由于噬菌体裂解宿主藻类而引起微藻种类的转换，成为水体中的优势群体。因此，由于噬菌体“共专一宿主”的特异性，仅依靠噬菌体来治理“水华”和“赤潮”是不可能的，噬菌体裂解的宿主藻类的生态位很可能被其他藻类所代替，并形成更剧烈的“水华”和“赤潮”。而在裂解后加入易控制、竞争营养源强的高等水生植物，则可有效防止这种情况的发生。

3 细菌抑制微藻

近年来，细菌对微藻生长影响的研究已逐渐被人们所关注。细菌溶藻一般有两种方式：一是直接溶藻（direct attack），需要菌体与藻细胞直接接触，通过分泌溶解纤维素的酶来消化掉微藻的细胞壁，进而溶解整个藻细胞[18]，或者细菌进入藻细胞溶藻[19]；二是间接溶藻（Indirect attack），即通过分泌细胞外物质溶藻，非选择性地杀伤藻细胞[20]，或者通过竞争有限营养物质抑制微藻生长[10]。

3.1 直接溶藻

3.1.1 细菌接触溶藻

Shilo 等[21]从水塘中分离出几种黏细菌对试验所采用的 8 种蓝藻具有溶藻效果。在电子显微镜下观察这几种菌对蓝藻的溶解过程发现，黏细菌很快向宿主移动，并用极端末梢（Polar tip）与藻细胞接触，在 20 min 后被攻击的藻类溶解。随后细菌移向附近的藻细胞，藻细胞相继被溶解。Shilo 认为黏细菌是通过与宿主藻细胞接触并分泌一些能溶解纤维素的酶来溶解藻细胞的。

3.1.2 细菌进入藻细胞溶藻

Caiola 等[19]从产生“水华”的铜绿微囊藻中分离出 1 种类似蛭弧菌的细菌。这种菌能够进入到宿主铜绿微囊藻细胞内并溶解之。Caiola 认为这种细菌首先分泌一种可溶解黏肽层的胞外毒素，溶解掉宿主藻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，把细菌黏合到藻细胞壁被溶解的部位，再经由“桥”进入到藻细胞内。细菌细胞膜中的管状构造与宿主藻类细胞膜黏附，藻细胞外胞质空间膨胀，原生质收缩，质膜变薄断裂，藻细胞中原生质中只剩下伪空泡，不久之后也破裂。Caiola 推测，铜绿微囊藻引起的“水华”快速消失，可能与这类细菌的专一性感染有关。

3.2 间接溶藻

相对于直接抑藻，间接抑藻的菌株不需要进入藻细胞内部或者与藻细胞接触，即可产生抑藻效果，这主要是由于抑藻菌株的分泌物具有抑藻作用。席宇等[22]分离出 1 株欧文氏溶藻菌株，对鱼腥藻等 6 种丝状蓝藻具有很强的溶解作用。经研究发现，细菌培养液经 0.2 μm 滤膜过滤的过滤液对微藻仍具有明显的溶解作用，表明该菌对蓝藻的溶解方式为间接溶藻[22]。许多国内外的学者也分离出了多种间接抑藻菌株，见表 2。

目前，国内外所分离的抑藻菌株大部分为间接抑藻菌株，因此对间接抑藻作用方式相关内容研究的比较多。国内对菌类抑藻的研究刚刚起步，主要侧重于抑藻菌株的分离、鉴定，以及溶藻效果、抑藻

表 2 间接抑制微藻的主要菌株

菌株名称	抑制的微藻	作用方式	抑藻活性物质	参考文献
链霉菌属菌株 *Streptomyces neyagawaensis*	小球藻（*Chlorella sp.*）、硅藻（*Aulacoseira granulate*、*Stephanodiscus hantzschii*）、蓝藻（*Microcystis aeruginosa*、*Anabaena cylindrica*、*Oscillatoria sancta*）	间接作用	未鉴定，位于细胞周质	[23]
假单孢菌属细菌 *Pseudomonas sp.* K44-1	蓝藻（*Anabaena cylindrica*、*Anabaena. variabilis*、*Oscillatoria agardhii*、*Anacystis marina*、*Microcystis aeruginosa*）	间接作用	1-甲基-β-咔啉（1-methyl-β-carboline）	[24]
假交替单胞菌属细菌 *Pseudoalteromonas tunicate*	绿藻（*Ulva lactuca*）、赤藻（*Polysiphonia sp.*）孢子	间接作用	热敏感性、分子量在 3～10 kDa 的极性分子物质	[25]
铜绿假单胞菌（*Pseudomonas aeruginosa*）	小球藻（*Chlorella vulgaris*）、斜生栅藻（*Scenedesmus obliquus*）、蓝藻（*Oscillatoria agardhii*）项圈藻（*Anabaena sp.*）等	间接作用	1-羟基吩嗪（1-hydroxyphenazine）氧绿菌素（oxychlororaphine）	[26]
珊瑚褪色弧菌（*Vibrioshiloi*）	虫黄藻（*Zooxanthellae*）	间接作用	胞外多肽毒素 P	[27]
深海菌株 MS-02-063	赤潮异弯藻（*Heterosigma akashiwo*）、圆鳞异囊藻（*Heterocapsa circularisquama*）、多环旋沟藻（*Cochlodinium polykrikoides*）、塔玛亚历山大藻（*Alexandrium tamarense*）	间接作用	红色素 PG-L-1	[28]
球拟酵母菌属（*Torulopsis*）	塔玛亚历山大藻（*Alexandrium tamarense*）赤潮异弯藻（*Heterosigma akashiwo*）、多环旋沟藻（*Cochlodinium polykrikoides*）	间接作用	醣脂类生物表面活性剂槐糖脂（sophorolipid）	[29] [30]
芽孢杆属	铜绿微囊藻、栅藻、小球藻	间接作用	非蛋白质、热稳定性物质	[31]

作用方式的研究，如彭超等[32]分离出能溶解鲍氏织线藻等多种蓝藻的 3 株溶藻细菌，并对这 3 株细菌的生理生化特性进行了鉴定。但对间接抑藻物质的鉴定研究较少，吴为中等[33]将所分离的抑藻菌株分泌的活性抑藻物质分类至热稳定性物质。国外对菌类抑藻的活性物质鉴定研究有所报道，但大部分只鉴定到活性组分属于某一物种，Banin 等[27]指出珊瑚褪色弧菌（*Vibrioshiloi*）分泌的抑藻活性物质为胞外多肽，但并未指出具体物质名称。也有学者指出了某些抑藻活性物质的产生位点，Choi 等[23]试验发现链霉菌属菌株（*Streptomyces neyagawaensis*）的抑藻活性组分位于细胞周质；少数学者鉴定出了活性组分的具体物质，相关报道总结列于表 2 中。并且 Nakashima 等[28]还指出由深海菌株 MS-02-063 分泌的抑藻活性物质——类似灵菌红素的红色素 PG-L-1，是受高丝氨酸内脂群体感应控制的。

此外，藻类和细菌的生长阶段对细菌抑藻的作用效果的影响也有报道。如 Choi 等[23]指出链霉菌属菌株对微藻的抑制作用强弱还受微藻的生长阶段影响，对处于延缓期的藻类抑制作用最强，对处于对数生长期的藻类抑制作用次之，对处于稳定期的藻类不具有抑制作用，但菌株对藻的抑制作用不受细菌生长阶段的影响。

国内外对细菌抑藻的机理虽然也有报道，但是并没有学者对抑藻菌株的筛选、抑藻活性物质鉴定做出系统的阐述，并对活性物质抑制微藻的机理进行深入的探讨。目前，提出的机理可总结为：①抑藻活性物质作用于微藻的细胞膜，导致细胞膜的不可逆破坏，从而去除微藻；②抑藻活性物质进入藻细胞内部，作用于微藻细胞内的功能单位，抑制光合作用或者电子传递体系。

3.2.1 抑藻活性物质作用于微藻的细胞膜

Hu 等[29]指出球拟酵母菌属（*Torulopsis*）能够产生一种糖脂类生物表面活性剂槐糖脂（sophorolipid），这种生物表面活性剂对微藻具有很强的抑制作用[30]。由于细胞内成分的释放量是细胞膜完整性的一个指示，当细胞核苷的释放量超过正常情况的 15% 时，认为细胞膜发生不可逆破坏[34]。Sun 等[30]通过测定微藻液的核苷浓度，检验微藻细胞膜的完整性。实验表明，加入一定量的这种表面活性剂后，微藻细胞的核苷释放量超过正常情况的 15%。这表明该抑藻物质主要作用于微藻的生物膜，导致藻细胞内物质大量流出，藻细胞被不可逆破坏。

3.2.2 抑藻活性物质抑制微藻光合作用

Banin 等[27]在珊瑚褪色弧菌分泌的毒素 P 抑制虫黄藻的试验中发现，当虫黄藻培养液中有氯化铵和毒素 P 时，毒素 P 能够促进氨（NH_3）转入细胞内。而氨（NH_3）进入细胞内能破坏 pH 梯度并阻断光合作用，从而导致光合量子产量的下降。毒素 P 的这种作用模式有助于解释珊瑚褪色的机制。

3.2.3 抑藻活性物质抑制微藻细胞内电子传递体系

Dakhama[26]发现，对试验的绿藻和蓝藻生长有强烈抑制作用的铜绿假单胞菌（*Pseudomonas aeruginosa*）分泌的抑藻物质为抗生素类色素物质——1-羟基吩嗪（1-hydroxyphenazine）和氧绿菌素（oxychlororaphine）。而 Miiller 等[35]证明了还原态的吩嗪衍生物能够穿越细胞膜[35]。还原态 1-羟基吩嗪在细胞内的存在，由于细胞成分还原状态的改变，可能产生不同的细胞反应。如绿皮菌素（pyocyanin）通过减少细胞 NADPH 的浓度，阻止细胞的氧化酶活性[35]，从而影响 NADPH 氧化酶联合体产生具有细胞防御功能的过氧化物的能力。

综上所述，目前所给出的抑藻机理都是根据抑藻菌株分泌的抑藻活性物质以及试验中微藻死亡的现象推测的，并没有通过试验手段从正面证明机理的正确性。因此，对于细菌抑藻的机理还有待于进一步研究。并且细菌溶藻后也会向水体中释放有机物，存在着与病毒溶藻相同的缺点。

4 高等水生植物抑藻

抑藻高等水生植物普遍存在于水体中，数量丰富且容易获得。该类水生植物与大型藻都属于水生植物，抑制微藻的作用相似，不但可以分泌化感类物质抑制微藻生长，而且可以通过竞争水体中的氮、磷等营养源控制微藻生长，减轻水体的富营养化程度。如大麦秆的可溶性木质素氧化后产生的多酚类物质具有抑藻效果[9]。在用大麦秆处理含藻高度富营养化水的实验中发现，大麦秆的投入对水体中藻的抑制率达到了 90%[36]。但是一般在向水体投入大麦秆 3～6 个月后，才能产生明显的抑藻现象，时间比较长。并且在大麦秆投放一定时间（一般为 6～12 个月）后就不再具有抑藻效应[37]。大麦秆在水体中腐烂，使水体中溶解氧浓度下降，引起水质腐败发臭，因此后期处置是非常必要的。

大部分高等水生植物的根系发达，适合微生物的生长繁殖，根系部分容易形成物种丰富的生物群落，从而构成了一个生态系统。自然水体中，高等生物的抑制微藻作用也可以看作是一种生态方式抑藻。

5 生态抑藻

与细菌、病毒等抑藻有所不同，生态抑藻主要是利用水生环境中各生物之间的食物链关系或营养源竞争来控制藻类生长。而细菌、病毒的抑藻一般是在微藻大量繁殖后，通过其分泌抑藻物质来控制藻类。一般表现为水体中藻类大量繁殖产生的水华或赤潮现象突然消失，因此水华和赤潮过后，水体里都会存在抑藻菌株或病毒。而生态抑藻则是通过其他植物的营养竞争和食物链中的浮游动物等来控制藻类，使之不成为水体中的优势种群，从而避免水华或赤潮的产生，或者在产生水华或赤潮后，由多种生物共同作用抑藻、净化水体。

生态抑藻是一种以水体富营养化产生、发展并逐渐恶化的生态机理为基础的抑藻方法。富营养化的水体中，藻类大量繁殖，降低水体的复氧速率，导致水体中其他需氧类生物的大量死亡，生化需氧量(BOD)及氮、磷浓度继续增加，而水中溶解氧浓度降低。藻类随着氮、磷浓度的增加而加速繁殖，而轮虫等食藻生物以上各级需氧生物的生长，受水体中溶解氧的限制，造成藻类越来越多，很快就会形成优势物种。从而形成恶性循环，加速富营养化的进程，导致原来的生态平衡被破坏。

陈鸣钊等[38]从防止藻类成为水体中的优势物种角度出发，根据食物链金字塔原理研制了浮游生物滤清器。在该设备内部为轮虫类生物创造一个生长、发育、繁殖和栖息良好的环境，以增加轮虫类生物的数量，从而控制藻类数量[39]。Datta 等[40]采用食藻鱼类银鲤、大头鱼和罗非鱼抑制微囊藻(*Microcystis*)的生长。

李先宁等[41]则是采用一种水培植物与藻类竞争营养源，来控制藻类生长并通过植物茎秆或根系过滤去除藻类。水中的微生物对形成的污泥堆积物中的有机物及藻类进行生物降解。利用植物吸收去除水中及积泥中的部分氮和磷等营养元素，并通过定期清淤，将大部分有机物及营养物移出水体，形成一个由水生植物、水生动物及微生物构成的高效生态净化系统。

6 结 语

藻类的大量繁殖主要是由于水体中氮、磷浓度超标，因此控制水体“水华”、“赤潮”的发生，最有效的措施就是去除或利用水中过剩的氮、磷，使得水体的氮、磷浓度降到引起水体富营养化极限浓度以下，显然在近几年内是很难实现的，因此需要将脱氮除磷工艺与目前的除藻措施相结合，既能满足近期的水质要求，又能逐渐从根本上解决水体富营养化的问题。

生物法控制微藻生长，是“水华”或“赤潮”现象突然消失的一个人工模拟，是自然界生物抑制微藻的强化。相对于物理方法和化学方法抑藻，对环境的危害更少，是一种环境友好的抑制微藻的方法。但是有关生物方法抑制微藻的机理及其影响因素还不是很清楚。应用到实际水体中时，具有抑制微藻作用的细菌、病毒等以及分泌的化学物质的抑藻效果、生态安全都有待进一步研究。

参考文献：

[1] CODD G A, MORRISON L F, METCALF J S. Cyanobacterial toxins: risk management for health protection[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2005, 203(3): 264-272.

[2] JIN Q, DONG S L. Comparative studies on the allelopathic effects of two different strains of Ulva pertusa on Heterosigma akashiwo and Alexandrium tamarense [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2003, 293: 41-55.

[3] KEATING K I. Allelopathic influence on blue-green bloom sequence in a eutrophic lake[J]. Science, 1977, 196: 885-887.

[4] UCHIDA T, YAMAGUCHI M, MATSUYAMA Y, et al. The red-tide dinoflagellate *Heterocapsa sp*. Kills *Gyrodinium instriatum* by cell contact[J]. Marine Ecology Progress Series, 1995, 118: 301-303.

[5] NAKAI S, INOUE Y, HOSOMI M, et al. Growth inhibition of blue-green algae by allelopathic effects of macrophytes[J]. Water Science and Technology, 1999, 39(8): 47-53.

[6] NAGAYAMA K, SHIBATA T, FUJIMOTO K, et al. Algicidal effect of phlorotannins from the brown alga *Ecklonia kurome* on red tide microalgae[J]. Aquaculture, 2003, 218: 601-611.

[7] ALAMSJAH M A, HIRAO S, ISHIBASHI F, et al. Isolation and Structure Determination of Algicidal Compounds from *Ulva fasciata*[J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2005, 69(11): 2186-2192.

[8] 王立新，吴国荣，王建安，等. 黑藻(*Hydrilla verticillata*)对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)抑制作用[J]. 湖泊科学，2004，16(4)：337-342.

[9] BALL A S, WILLIAMS M, VINCENT D, et al. Algal growth control by a barley straw extract[J]. Bioresource Technology, 2001, 77: 177-181.

[10] 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.

[11] SULLIVAN M B, WATERBURY J B, CHISHOLM S W. Cyanophages infecting the oceanic cyanobacterium [J]. Prochlorococcus Nature, 2003, 424: 1047-1051.

[12] MOLLER D G. Intergeneric transmission of a marine plant

DNA virus[J]. Naturwissenschaften,1992,79(1):37-39.

[13] MOLLER D G,FRENZER K. Virus infections in three marine brown algae: *Feldmannia irregularis*, *F. simplex*, and *Ectocarpus siliculosus*[J]. Hydrobiologia,1993,260:37-44.

[14] FUHRMAN J A. Marine viruses and their biogeochemial and ecological effects[J]. Nature,1999,399:541-548.

[15] WOMMACK K E,RAVEL J,HILL R T,et al. Hybridization analysis of Chesapeake Bay virioplankton[J]. Applied and Environmental Microbiology,1999,65(1):241-250.

[16] SHORT S M,SUTTLE C A. Sequence analysis of marine virus communities reveals that groups of related algal viruses are widely distributed in nature[J]. Applied and Environmental Microbiology,2002,68(3):1290-1296.

[17] 廖明军,程凯,赵以军,等,模拟生态系统中噬菌体裂解蓝藻宿主的生态学效应[J]. 生态学报,2006,26(6):1745-1749.

[18] YAMAMOTO Y,SUZUKI K. Ultrastructural studies on lysis of blue-green algae by a bacterium[J]. Faculty of Agriculture,1977,23(3):285-295.

[19] CAIOLA M G, PELLEGRINI S. Lysis of *Microcystis aeruginosa* by *Bdellovibrio-like* Bacteria[J]. Journal of Phycology,1984,20(4):471-475.

[20] LOVEJOY C,BOWMAN J P,HALLEGRAEFF G M. Algicidal effects of a novel marine *Pseudoalteromonas* isolate (class Proteobacteria, gamma subdivision) on harmful Algal blooms pecies of the Genera *Chattonella*, *Gymnodinium* and *Heterosigma*[J]. Applied and Environmental Microbiology,1998,64(8):2806-2813.

[21] SHILO M. Lysis of blue-green algae by myxobacter[J]. Journal of Bacteriology,1970,104(1):453-461.

[22] 席宇,吴刚,张勇,等. 一株淡水溶藻细菌的分离及初步研究[J]. 华中师范大学学报:自然科学版,2003,37(2):222-226.

[23] CHOI H L, KIM B H, KIM J D, et al. Streptomyces neyagawaensis as a control for the hazardous biomass of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) in eutrophic freshwaters[J]. Biological Control,2005,33:335-343.

[24] KODANI S,IMOTO A,MITSUTANI A,et al. Isolation and identification of the antialgal compound,harmane(1-methyi-β-carboline),produced by the algicidal bacterium,*Pseudomonas sp*.K44-1[J]. Journal of Applied Phycology,2002,14(2):109-114.

[25] EGAN S,JAMES S,HOLMSTROM C,et al. Inhibition of algal spore germination by the marine bacterium *Pseudoalteromonas tunicate*[J]. FEMS Microbiology Ecology,2001,35:67-73.

[26] DAKHAMA A, NOUE J D, LAVOIE M C. Isolation and identification of anti-algal substances produced by *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Journal of Applied Phycology,1993,5(3):297-306.

[27] BANIN E, KHARE S K, NAIDER F, et al. Proline-rich peptide from the coral pathogen Vibrio shiloi that inhibits photosynthesis of zooxanthellae [J]. Applied and Environmental Microbiology,2001,67(4):1536-1541.

[28] NAKASHIMA T, MIYAZAKI Y, MATSUYAMA Y, et al. Producing mechanism of an algicidal compound against red tide phytoplankton in a marine bacterium γ-proteobacterium [J]. Applied microbiology and biotechnology,2006,73(3):684-690.

[29] HU Y M,JU L K. Purification of lactonic sophorolipids by crystallization[J]. Journal of Biotechnology,2001,87(3):263-272.

[30] 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]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology,2004,304:35-49.

[31] 裴海燕,胡文容,曲音波,等. 一株溶藻细菌的分离鉴定及其溶藻特性[J]. 环境科学学报,2005,25(6):796-802.

[32] 彭超,吴刚,席宇,等. 3 株溶藻细菌的分离鉴定及其溶藻效应[J]. 环境科学研究,2003,16(1):37-40.

[33] 吴为中,安成才,刘新尧,等. 溶藻细菌(B5)的溶藻效果与溶藻特性的初步研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2003,39(4):489-493.

[34] CHEN C Z.,COOPER S L. Interactions between dendrimer biocides and bacterial membranes[J]. Biomaterials,2002,23(16):3359-3368.

[35] MILLER P K, KROHN K, MIIHLRADT P F. Effects of pyocyanine,a phenazine dye from Pseudomonas aeruginosa,on oxidative burst and bacterial killing in human neutrophils[J]. Infection and Immunity,1989,57(9):2591-2596.

[36] WELCH I M,BARRETT P R F,GIBSON M T,et al. Barley straw as an inhibitor of algal growth I: studies in the Chesterfield Canal[J]. Journal of Applied Phycology,1990,2:231-239.

[37] 吴为中,芮克俭,刘永. 大麦秆控藻研究进展[J]. 生态环境,2005,14(6):972-975.

[38] 陈鸣钊,丁训静,许京怀. 用生态环境再改变理论研究湖泊富营养化治理方法[J]. 水科学进展,2003,14(3):323-327.

[39] 陈鸣钊,王沛芳,许京怀. 应用浮动生物滤清器除藻研究[J]. 上海环境科学,2000,19(8):385-387.

[40] DATTA S,JANA B B. Control of bloom in a tropical lake: grazing efficiency of some herbivorous fishes[J]. Journal of Fish Biology,1998,53(1):12-24.

[41] 李先宁,吕锡武,宋海亮,等. 一种水培植物过滤法的除藻性能[J]. 中国环境科学,2004,24(6):697-701.

(收稿日期:2007-04-19 编辑:高渭文)