

光合细菌在湖泊富营养化防治中的应用研究进展

李保珍, 谢树莲, 张肇铭

(山西大学生命科学与技术学院, 山西 太原 030006)

摘要 对湖泊富营养化的危害及其防治方法进行了总结和分析, 论述削减内源性污染的技术途径主要有营养盐控制、物理除藻、化学杀藻、生物抑藻等措施, 并在此基础上对光合细菌在湖泊富营养化防治中的作用机理及成功应用的案例进行了评述, 对其应用前景作了展望。

关键词 光合细菌 湖泊 富营养化

中图分类号 Q938.1+1

文献标识码 A

文章编号 1004-6933(2008)S1-0068-04

据报道, 我国目前有 50% 的河道和 80% 以上的湖泊受到污染, 许多湖泊已达不到地表水 III 类水质标准^[1]。有很多湖泊水域是死水或流动性很小的水体, 很容易产生富营养化问题^[2]。这类水体外观呈黑棕绿色, 有腥臭味, 藻类大量滋生并覆盖水面, 形成水华, 严重影响其生态功能。因此, 湖泊富营养化治理中最紧迫的任务之一就是水华藻类的治理。

在湖泊富营养化的治理中, 物理方法成本较高, 技术复杂, 且对于防止水体富营养化的发生只能起到延缓作用, 从根本上解决不了水体水质逐渐变坏的问题。应用除藻剂等化学法易引起二次污染, 且污泥产量较大, 运行费用极高。传统的生物处理法也因富营养化水体水量巨大、影响因素多, 不能在限定的反应器中和人为控制条件下进行, 因此, 原位修复的投菌技术逐渐受到关注^[3-6]。本文仅就国内外湖泊富营养化治理的主要措施以及光合细菌在其中的应用和发展前景进行评述。

1 湖泊富营养化及其危害

富营养化是指湖泊、水库、缓慢流动的河流以及某些近海水体中营养物质(一般指含氮和磷的化合物)过量, 从而引起水体植物(如藻类及大型水生植物)的大量生长。由于藻类在与水生植物竞争营养盐上占优势, 当湖泊水体营养盐过多后, 藻类滋生, 浮游生物大量生长, 造成对湖泊水体正常功能的危害, 如导致饮用水臭味和水色的变化。大量浮游植

物或者浅水根生植物的生长繁殖, 可能导致湖泊沼泽化, 容积大幅度减少, 植物残体的分解消耗大量溶解氧, 释放大量溶解性有机物, 导致水质急剧恶化。藻类在代谢死亡过程中能够释放各种藻毒素, 具有比较强的毒害作用, 危及整个湖泊生态系统。近几十年来, 已经发生了很多起微囊藻毒素污染致使人类、家畜、鱼类患病甚至死亡的事件^[7-8]。特别值得重视的是, 我国湖泊富营养化的趋势发展很快, 大多数湖泊的富营养化程度都有加重, “水华”频频爆发, 故对湖泊富营养化的防治已成为当务之急。

2 湖泊富营养化的主要防治措施

针对水体的富营养化, 国内外都奉行以“控制外源性污染为主, 减少内源性营养负荷为辅, 兼顾工程性措施”的原则, 力求达到对水体富营养化的全面预防和治理。近年来, 虽然在堵源、截污方面取得了很大进展, 但并未在短期内取得理想的效果, 主要是因为水体一旦形成富营养化就很难彻底恢复^[9-10]。因此, 在有效控制外源性污染的同时, 削减富营养化水体中的氮、磷及有机负荷才能从根本上解决水体的富营养化。目前, 国内外削减内源性污染的技术途径主要有营养盐控制、物理除藻、化学杀藻、生物抑藻等措施。

2.1 营养盐控制

营养盐控制是传统的富营养化控制措施, 对于外源性污染采取截污、污水改道、污水除氮除磷, 如

基金项目 山西省软科学研究(2008041033-03)。

作者简介 李保珍(1979—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向为水体污染与治理方向。E-mail: lbz1979@163.com

通讯作者 谢树莲, 教授, E-mail: xiesl@sxu.edu.cn

武汉东湖截污一期工程实施后,东湖子湖——水果湖氮磷污染物减少,溶解氧上升,水质明显改观^[11]。对于内源性污染采取清淤挖泥、营养盐钝化、底层曝气、稀释冲刷、调节湖水氮磷比、覆盖底部沉积物及营养盐絮凝沉降等一系列措施,以达到降低水体中营养盐浓度的效果。在清淤过程中,应合理确定淤泥的清除量,一般不宜将污泥全部清除,以免把大量的底栖生物、水生植物同时清出水体,破坏现有的生物链系统。

2.2 物理除藻

目前在许多饮用水水域(如水库)应用物理除藻的比较多,主要包括黏土絮凝除藻、微滤膜和活性炭除藻、机械法和挖泥法除藻等。利用活性炭去除MC也是目前各自来水公司比较常用的方法。为防治我国密云水库的富营养化问题,董悦安等^[12]曾应用部分物理技术(吸附性材料净水和表底层水体交换试验)进行现场试验,结果表明试验区内水中氮和磷的含量比对照区都有所下降,机械除藻试验后,水中的叶绿素含量比除藻前下降 60% ~ 100% ;表底层水体交换试验后,试验区内表、中层水体的温度有所下降,温度降低抑制了表、中层水体中藻细胞的繁殖速率,对水华的发生也起到了一定的抑制作用。另外,舒天阁等^[13]利用超声波在水中的机械效应和空化效应产生的高压、冲击波、声流和剪切等力学作用,研究不同超声频率、超声功率、超声时间对铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)的去除影响,结果表明,当超声频率为 500 kHz,超声功率为 80 W 时,藻类的去除效果最好,超声 5 min 后,除藻率可达到 94%,而且通过二次超声可进一步抑制残余藻类的生长,稳定除藻效果。黄斌等^[14]进行了沸石去除铜绿微囊藻的试验。王翠华等^[15]研究了多根高压电极型填充床放电等离子体反应器对铜绿微囊藻光密度的去除。物理除藻虽然效果尚可,但工作量较大,时间周期较长,成本也较高。

2.3 化学除藻

采用毒性较低的化学药剂 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 或 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 FeSO_4 络合剂等可以快速杀死藻类。南京和上海的研究者使用以醋酸为主要成分的除藻剂,于 2005 年 9 月对玄武湖进行了除藻实验,收到了一定的效果^[16]。但是化学除藻的方法通常不能从根本上解决水体富营养化的问题。藻类死亡所产生的二次污染及化学药品的生物富集放大对整个生态系统的污染问题也不容忽视^[17]。

2.4 生物方法除藻

2.4.1 通过种群竞争抑藻

可在水体中人工培植有益性藻类或高等水生植

物来抑制水华藻类。一方面利用它们之间对环境生长因子(光、氧、水等)的竞争,有益水生植物吸收氮磷等营养盐,使微囊藻缺乏赖以爆发性增殖的营养条件,另一方面利用有些植物可以向环境释放化学物质抑制其他生物的生长,以达到控制水华藻类生长的目的。马为民等^[18]研究了 3 种高等水生植物对铜绿微囊藻的增殖抑制,发现高等水生植物对水华藻类都有不同程度的抑制作用。汤仲恩等^[19]的研究表明观赏型沉水植物杉叶藻(*Hippuris vulgaris*)种植水对铜绿微囊藻滤食性生长具有明显的抑制作用。但人为地增加任何一个物种的生物量都有可能带来生态健康问题。如果利用外来种,则更应重视其生态安全性。

2.4.2 通过水生生物吞噬除藻

有些和杂食性鱼类可以通过吞噬作用进而消化微囊藻,从而达到去除水华藻类的效果。2000 ~ 2003 年期间,中科院水生生物研究所在滇池进行了养殖鲢鱼和鳙鱼治理蓝藻的实验,结果表明,1 条 1 kg 左右的鲢鱼 1 个月能吃掉 2 kg 蓝藻,同样大小的 1 条鳙鱼,则 1 个月能消耗更多的蓝藻。

2.4.3 微生物除藻

微生物作为除藻剂的主要原理是利用其和藻类争夺水体中的营养,吸收、分解、转化水体中的营养物质,使水中的藻类由藻类,直至消灭,使水体变清,从而达到除藻及净化水质的目的。微生物除藻剂主要以光合细菌、芽孢杆菌、硝化细菌、反硝化细菌、放线菌、乳酸菌、酵母菌等微生物作为除藻剂。另外水体恢复功能菌(RB)、AEM、PSB 光合细菌,都有较好的除藻效果^[20]。张青等^[21]应用微生物净化水质,对陶然亭公园湖水的蓝藻水华进行了治理,效果明显。也有不少学者研究了利用病毒、细菌等控制微囊藻的生长^[22-23]。其中,光合细菌因其特殊的生理生化特性,在湖泊富营养化的防治中受到广泛的关注。

3 光合细菌在湖泊富营养化水体防治中的作用与应用

光合细菌在厌氧环境中以 H_2S 为营养源,具有这种特征的生物极少。光合细菌中的紫色硫细菌和绿色硫细菌生存于水体中的厌氧层上部,以下层的 H_2S 和 CO_2 为营养源进行光合作用,转换成自身化合物。可以说光合细菌起着生物过滤器的作用,可阻止厌氧层生成的毒性物质 H_2S 扩散到好氧层。光合细菌中的紫色非硫细菌可以在厌氧光照或好氧黑暗条件下利用有机物作供氢体兼碳源,进行不放氧光合作用,减少水体中的有害物质,起到改善水质,相对提高溶解氧的作用^[24]。同时,纤毛虫耐 H_2S ,可

长时间滞留于厌氧层捕食光合细菌,大型水蚤在厌氧层捕食光合细菌后移向好氧层,而这些浮游生物被更高级的生物捕食,这样就形成生态的良性循环。浮游生物的增多,产生的一些代谢物质会抑制藻类生长。有报道称,水体中投放光合细菌之后,蓝藻类的过量增殖受到抑制,鱼类适口性的藻类种类增加^[25]。藻类生物量的减少,可增加水体透明度,这有利于沉水植物进行光合作用。沉水植物大量生长和存活,就能吸收 N、P 等营养,因为 H_2S 对其他生物的生长起抑制作用。光合细菌与硫酸还原菌及其他细菌共生,有利于分解水体和底泥中的碳酸盐和硫酸盐,消耗 H_2S ,减少水体的恶臭,改善水质^[26]。由于天然水体中光合细菌数量有限,人为地加入光合细菌可加速系统中的物流和能流循环转化,而达到对富营养化水体的防治。

3.1 直接投放光合细菌菌剂

定期向水中投加光合细菌菌剂来净化水体,目前已在日本、韩国、澳大利亚等国有研究报道^[27]。近年来,我国在这方面也作了大量的工作。庄惠如等^[25]的试验表明,鱼塘泼施光合细菌后浮游植物种类组成及生物量均发生变化。泼施光合细菌之后,夏季鱼塘中蓝藻类的过量增殖受限制,绿藻、硅藻等的种类数及生物量明显增加。优势种群中,鱼类适口性的藻类种类增加,有害种类减少。可见光合细菌在严重富营养化的鱼塘中,具有明显优化水体环境质量的作用。于明等^[28]利用光合细菌治理北京动物园严重富营养化的水禽湖,以浮游植物的种类组成、细胞密度、优势种及叶绿素 a 的质量浓度变化等几项参数,对水质进行了监测评价,结果显示光合细菌对于富营养化水体中浮游植物的数量和形成水华的铜绿微囊藻有一定的调控作用。王鸿良等^[26]以光合细菌净水剂对滇池草海进行了投放试验,结果对蓝藻有较好的清除效果。在滇池草海约 800 m³ 围栏水域的现场试验中,叶绿素 a 去除率在 75% 以上,藻类生物量去除率在 90% 以上,平均透明度从 0.3 m 增加到 1.06 m,而且操作简便,无二次污染。

3.2 光合细菌与其他菌群复合使用

利用光合细菌与硝化细菌、芽孢杆菌等组成的复合菌群来净化水体,陆续见有研究报道。季民等^[29]向湖水中投加以光合细菌为主的复合细菌群,能够有效地降低湖水浊度,并能维持较长时间,可以有效地降低湖水藻类生物量和湖水中氨氮及总磷的浓度。韩士群等^[30]利用固定化微生物(含有光合细菌、芽孢杆菌、硝化细菌以及反硝化细菌)对养殖水体中藻类和浮游动物的种类、数量、生物量以及水体氮素等理化环境的影响进行了研究,结果表明,固定

化微生物处理可以显著降低水体的总氮、氨态氮和硝态氮的含量,其含量分别是对照的 40.8%、36.5% 和 45.9%。目前,国内开发的环境生物制剂不少,但是处理效果较好的鲜见报道。国外在这方面的研究已经取得了一些进展,如美国的 Clear-Flo 系列微生物制剂、利蒙 LIMO 以及日本的 EM 制剂等^[31]。也有一些学者将其引进国内用于富营养化水体的治理。王平等^[32]通过细胞液体培养,系统地研究了有效微生物群(主要含有光合细菌)对 3 种常见“水华”藻类生长的抑制作用。实验结果表明,EM 能显著抑制衣藻(*Chlamydomonas* sp.)、四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)和盘星藻(*Pediastrum* sp.)的生长,培养 7 d 后,3 种藻类生物量平均降低率分别达 46.80%、99.07% 和 97.17%,培养温度、培养时间、EM 投加量及培养基 pH 等对 EM 的抑藻作用均有不同程度的影响。EM 发挥良好抑藻作用(绿藻)的最适条件为培养温度为 30℃,培养时间 ≤ 5 d,EM 投加量($V(EM):V(\text{源水})$)为 1:1 000 ~ 1:10 000,培养基 pH 为 6.0 ~ 8.0。在上述试验结果的基础上,王平等^[33]又系统地考察了有效微生物群(EM)处理藻型富营养化源水的效果,结果表明,在容器中按 $V(EM):V(\text{源水})$ 为 1:10 000 的比例投加 EM 菌液并辅以低速间歇式曝气处理 8 ~ 9 d,藻类生物量得到明显控制,水样叶绿素 a、TN、TP 及 COD 去除率分别达到 90.49%、45.25%、55.48% 及 82.37%,出水水质接近国家地表 IV 类水质标准。李雪梅等^[34]的研究表明,将一定量的有效微生物群液体菌剂(主要含有光合细菌)和有效微生物群固体泥球投入人工湖后,水体的透明度、叶绿素 a 含量有明显的改善,而且可以有效抑制藻类的生长,在一定时期内可以防止水华的发生,改善景观。

4 应用前景

水体富营养化问题是一个典型的生态问题,生态问题只有用生态学的方法才能很好地解决,而水体生态恢复是个漫长的过程,富营养化治理也不是一朝一夕的事情,不会一蹴而就,需要一个长期的认识和实施过程^[35]。一个湖泊的富营养化源于其生态系统已完全破坏,不能期望在短期内能看到明显效果^[36]。在湖泊富营养化的防治中,光合细菌虽然还没有大规模付诸于实施,但从它本身具有的特点和已报道的研究结果看,无疑具有广阔的应用前景。首先,利用光合细菌防治“水华”,花费成本低,虽然在研究阶段需要不少投资,但利用光合细菌繁殖快的特点就可低成本、高效益的大规模应用。其次,不会带来负面效应,因为该方法主要是利用 PSB 的特

殊生理代谢及其在生物圈内所起的作用,并没有另外使用化学试剂,所以不会在除去氮、磷的同时又引起其他元素的过量增加。显而易见,利用光合细菌治理湖泊富营养化,应用前景光明,有可能成为富营养化治理的重要手段。

参考文献：

[1] 杨鲁豫,王琳,王宝贞. 我国水资源污染治理的技术策略[J]. 给水排水,2001,27(1) 94-101.

[2] 于忠民. 污水生物处理应用微生物研究与进展[J]. 污染防治技术,1998,11(4) 246-249.

[3] MORIATY D J W. The role of microorganisms in pond aquaculture[J]. Aquaculture,1997,151 333-349.

[4] GATESOUE F J. The use of probiotics in aquaculture[J]. Aquaculture,1999,180 147-165.

[5] GROMMEN R, HAUTEGHEM I V, WAMBEKE M V, et al. An improved nitrifying enrichment to remove ammonium and nitrite from freshwater aquaria systems[J]. Aquaculture,2002,211 115-124.

[6] VEZZULLI L, PRUZZO C, FABIANO M. Response of the bacterial community to in situ bioremediation of organic-rich sediments[J]. Marine Pollution Bulletin,2004,49 740-751.

[7] DUSCHNER B, GALEY F D, JOHNSON B. Blue-green algae toxicosis in cattle[J]. J Am Vet Med Assoc,1998,231 1605-1607.

[8] JOCHIMSEN E M, CARMICHAEL W W, AN J S. Liver failure and death after exposure to microcystins at a hemodialysis center in Brazil[J]. N Engl J Med,1998,338 873-878.

[9] KAIRESALO T, LAINE S, LUOKKANEN E, et al. Direct and indirect mechanism behind successful biomanipulation[J]. Hydrobiologia,1999,395/396 99-106.

[10] 王国祥,濮培民. 若干人工调控措施对富营养化湖泊藻类种群的影响[J]. 环境科学,1999,20(2) 71-74.

[11] 邵林广,游映玖,曾明秀,等. 武汉东湖水体富营养化现状及其控磷对策[J]. 武汉科技大学学报:自然科学版,1999,22(2) 139-141.

[12] 董悦安,孟庆义,顾华,等. 物理及生物技术在密云水库富营养化防治中的应用[J]. 地学前缘,2005,12(S1) 77-83.

[13] 舒天阁,苑宝玲,王少蓉,等. 低功率超声波去除铜绿微囊藻技术[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(1) 72-75.

[14] 黄斌,余国忠,栗印环. 沸石去除铜绿微囊藻的试验研究[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版,2004,17(4) 433-436.

[15] 王翠华,李国锋,吴彦,等. 填充床放电等离子体反应器对铜绿微囊藻的生长抑制[J]. 环境科学,2008,29(2) 368-374.

[16] 李静会,高伟,张衡,等. 除藻剂应急治理玄武湖蓝藻水华实验研究[J]. 环境污染与防治,2007,29(1) 60-62.

[17] 王扬才,陆开宏. 蓝藻水华的危害及治理动态[J]. 水

产学杂志,2004,17(1) 90-94.

[18] 马为民,孙莉,钱志萍,等. 3种高等水生植物对铜绿微囊藻生长的影响[J]. 上海师范大学学报:自然科学版,2003,32(1) 101-102.

[19] 汤仲恩,种云霄,朱文玲,等. 几种观赏型沉水植物对富营养化蓝绿藻类的抑制作用[J]. 生态环境,2007,16(6) 1637-1642.

[20] 陈静,郭慧光,王鸿良,等. 滇池草海蓝藻清除应急药剂筛选现场实验研究[J]. 云南环境科学,1999,18(2) 30-33.

[21] 张青,李东娟. 陶然亭公园湖水的蓝藻治理初探[J]. 中国园林,2004,18(2) 54-56.

[22] 汤显春,宋立荣,沈银武,等. 滇池微囊藻病毒溶藻的研究[J]. 微生物学杂志,2003,23(3) 50-52.

[23] 闫海,邓义敏,邹华,等. 降解微囊藻毒素菌种的筛选和活性研究[J]. 环境科学,2004,25(6) 49-53.

[24] RAINA M M, IAN L P, CHARLES P G. 环境微生物学[M]. 张甲耀,宋碧玉,郑连爽,译. 北京:科学出版社,2004.

[25] 庄惠如,曾焕泰,陈惠年,等. 鱼塘施放光合细菌条件下浮游植物的变动[J]. 福建师范大学学报:自然科学版,1997,13(1) 86-93.

[26] 王鸿良,韩永峰,林春. 光合细菌净水剂清除滇池草海蓝藻的试验研究[J]. 云南环境科学,1998,17(3) 1-3.

[27] 曾宇,秦松. 光合细菌法在水处理中的应用[J]. 城市环境与城市生态,2000,13(6) 29-31.

[28] 于明,周云龙. 从浮游植物的变化看光合细菌在治理富营养化水体中的作用[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,2001,37(5) 680-684.

[29] 季民,卢燕玲,庞金钊,等. 人工复合细菌对水体污染净化效果的实验研究[J]. 天津城市建设学院学报,2002,8(1) 1-4.

[30] 韩士群,范成新,严少华,等. 固定化微生物对养殖水体浮游生物的影响及生物除氮研究[J]. 应用与环境生物学报,2006,12(2) 251-254.

[31] DEVARAJA T N, YUSOFF F M, SHARIFF M. Changes in bacterial populations and shrimp production in ponds treated with commercial microbial products[J]. Aquaculture,2002,206 245-256.

[32] 王平,吴晓芙,李科林,等. 有效微生物群(EM)抑藻效应研究[J]. 环境科学研究,2004,17(3) 34-38.

[33] 王平,吴晓芙,李科林,等. 应用有效微生物群(EM)处理富营养化源水试验研究[J]. 环境科学研究,2004,17(3) 39-43.

[34] 李雪梅,杨中艺,简曙光,等. 有效微生物群控制富营养化湖泊蓝藻的效应[J]. 中山大学学报:自然科学版,2000,39(1) 81-85.

[35] 王鹏. 富营养化湖泊营养盐的来源及治理[J]. 水资源保护,2004,20(2) 9-12.

[36] 陈雪初,孔海南,李春杰. 富营养化湖库水源地原位控藻技术研究进展[J]. 水资源保护,2008,24(2) 10-13.

(收稿日期 2008-08-13 编辑 高渭文)