

水华治理方法研究进展

陈识文（长江大学生命科学学院，湖北 荆州 434025）
毛涛，袁科平（中国水产科学研究院长江水产研究所，湖北 武汉 430223）
余知和（长江大学生命科学学院，湖北 荆州 434025）

[摘要] 藻类水华现象是我国乃至全球面临的水环境问题。综述了物理、化学和生物 3 类治理方法目前的研究进展，并比较了三者的优缺点，展望了今后的研究方向。
[关键词] 藻类水华；治理；物理方法；化学方法；生物方法
[中图分类号] X52 [文献标识码] A [文章编号] 1673-1409 (2014) 35-0069-05

随着人类活动对全球水环境的影响，水体富营养化和水华现象成为世界性的环境问题。水华是水体富营养化发展到最高阶段的一种表现形式^[1]，形成的原因一方面是由于适宜的气象及水文条件、水体氮磷等营养元素含量充足引起藻类大量繁殖，另一方面是由于藻类自身具有的固氮、浮力调节、无机碳浓缩等特殊机制，使之以在与其他水体生物竞争时能占据优势并迅速增殖，从而爆发水华^[2-4]。

近年来，我国工农业生产和社会经济迅猛发展，排入江河、湖泊的废水和生活污水不断增加，五大淡水湖的太湖^[5]、巢湖^[6]及近海的大部分海域^[7]多次发生大面积水华，造成藻类大量繁殖、水体溶氧含量与透明度降低、大量水生生物死亡、水生生态系统平衡破坏。同时，多种藻类分泌的藻毒素，通过食物链在原生动物、贝类、虾、鱼等体内积累，严重威胁水产养殖业及人类生命安全^[8-9]。此外，藻类大量堆积岸边死亡后散发恶臭，大大降低水体的景观价值。

目前水华治理方法主要分为物理、化学、生物 3 类。物理方法主要是利用各种机械设备或工程改造来转移污染源，包括截污、疏浚清淤、机械打捞藻类等；化学方法是通过各类化学试剂对藻细胞的毒性作用直接灭杀或对藻细胞絮凝沉降来去除藻类的一类方法；生物方法的核心是利用生物对水华藻类的捕食或物种间的竞争性抑制来减少藻类的数量。

1 物理方法

物理方法包括机械打捞、气浮技术、超声波法、吸附法、过滤法等。使用机械打捞清除蓝藻水华，能够快速清除大量湖面蓝藻^[10]，此法可作为蓝藻大面积爆发时的应急处理措施，且没有明显负面影响。气浮技术是在待处理水中通入或产生大量高度分散的微细气泡，使其与杂质、絮粒相互粘附，形成比重小于水的浮渣，依靠浮力浮上水面，以完成固液分离的一种净水方法^[11]。气浮技术目前已较为成熟，多用于城市污水的处理。在太湖水华区域，使用特定功率的超声波作用 1h 后，水表层的藻细胞由 10⁷ 个/ml 降低到 10⁵ 个/ml 以下，水体透明度上升，叶绿素 a 含量显著下降，水质得到明显改善^[12]。活性炭等吸附剂在水体中不但能对藻类有较高的去除率，还对藻毒素有一定的吸附作用，但后期处理成本较高，限制了其大范围的使用。普通的过滤法一般效率较低，而一些新型材料如微絮凝纤维球等应用于过滤法除藻，取得了较为理想的效果^[13]，如德国 Wahnback 工厂采用独特的三层滤料设计，直接过滤除藻效率高达 99.9%^[14]。此外，对一些养殖水体进行光源调控，用工程方法对一些河流湖泊进行清淤、换水等方法也取得了一定的效果。

这些物理除藻方法具有方法简单、不引进二次污染、可防止外域生物入侵等优点，适合作为应急处

[收稿日期] 2014-09-28
[基金项目] 湖北省科技支撑计划（公益性科技研究类）项目（2013BCB009）；科技部科研院所开发资金项目（2013EG134238）。
[作者简介] 陈识文（1989-），男，硕士生，研究方向为水体微生物。
[通讯作者] 余知和，E-mail: zhiheyu@hotmail.com。

理措施。但对许多水体来说治标不治本，且需要专门的仪器设备，治理大面积的水华问题时会耗费大量的人力物力资源。

2 化学方法

化学方法主要是指用化学杀藻剂及絮凝剂来达到除藻、抑藻的效果。美国科学家在 20 世纪 70 年代开始先后使用硫酸铜等多达数千种化学药剂进行海洋水华生物的灭杀试验，结果表明，符合各个方面要求的较少^[15]，大多存在起作用剂量较大，对非水华生物有影响，不能在水体中短时间消散等问题。

目前，我国杀藻剂多用铜盐，硫酸铜是最早用于杀藻的化学试剂之一，其主要原理是铜离子能抑制藻细胞内藻胆体光合作用，一定浓度的铜离子会抑制藻细胞生长最终导致藻细胞死亡。但铜类试剂具有毒性，对其他动植物的生长发育有影响，会产生二次污染，破坏近岸生态系统，对藻类水华的控制也只能起到短期的效果^[16]。高锰酸钾、氯气、过氧化氢、二氧化氯等氧化物多用于给水处理中的藻类去除，但易产生有毒害的副产物，应用受到一定的限制^[17]。

利用絮凝剂加入水体，可将水华生物凝聚，形成沉淀并将其除去。使用较多的絮凝剂以铁盐和铝盐为主，并取得了一定的效果。但由于某些藻类细胞体积较小，且自身呈负电性，不易被普通的絮凝剂吸附沉降。目前，许多研究都致力于使用一些天然矿物作为助凝剂或对一些矿物进行化学改性来加强絮凝效果。付军等^[18]采用滑石等作为聚铝絮凝铜绿微囊藻的助凝剂，起到了较好的增效作用。罗岳平等^[19]发现投加粘土作为助凝剂有助于改善絮凝体结构，提高其沉降性能。吴萍等^[20]发现以新型阳离子表面活性剂双烷基聚氧乙烯基三季铵盐改性后的粘土用量为 0.03 g/L 时，24h 内对某种赤潮藻类的去除率达 100%，而未经改性的同样用量的粘土并没有对赤潮异弯藻表现出去除作用，表明改性后的粘土能显著地提高对赤潮异弯藻的去除能力。利用粘土矿物絮凝水华生物对环境无毒无害，操作简便，适宜于大面积使用，是目前水华治理中较为可行的办法。

3 生物方法

物理和化学的防治方法在许多特定的环境下发挥了一定的作用，但相比较生物防治方法而言，物理和化学方法成本高、效率低且容易破坏生态环境。在目前对环保要求越来越高的大背景下，生物法抑制水华成为研究的热点，生物防治方法大致分为以下几类。

3.1 水生植物治理

水生植物是水生生态系统的主要初级生产者，对调节水体及维护水体营养物质的平衡起着重要作用。植物主要是通过群落释放的特殊化学物质抑制其他种群即生物化感作用来抑制藻类生长。早在 1949 年，Hasler 等^[21]就发现了水生植物对藻类具有抑制作用。李修岭等^[22]利用几种漂浮水生经济作物即水龙、凤眼莲、水禾、竹叶菜对东湖富营养水进行氮磷吸附效果研究及抑藻试验，26d 后浮游藻类的生物量依次下降 90%、85%、83%、81%，抑制效果明显。水葫芦是 20 世纪初作为家禽饲料引入中国进行推广种植的，带来了牲畜饲料、改良水质、抑制藻类、供作绿肥、沤制沼气、栽培草菇等积极正面的生态环境效应。俞子文等^[23]研究表明，水葫芦对藻的克制效应强于水花生、水浮莲、满江红等水生植物，但外来物种水葫芦的过度繁殖同时带来了航道阻塞、破坏水体生物多样性和加剧水体富营养化等生态负效应^[24]。所以，对外来物种应进行合理、有效的综合利用，防止其过度繁殖。

研究还表明，湿地景观中常见的几种水生植物如美人蕉、鸢尾、香蒲等有抑制常见水华蓝藻的能力，且相互间有一定的加合作用。从它们当中提取的化感物质在实验室阶段取得了较好的抑藻效果，这种利用化学方法提取植物化感物质抑藻成为研究热点^[25-26]。

作物秸秆被发现也有抑制藻类的生理功能。张玲等^[27]以盐京九号水稻（*Oryza sativa* L. Yanjing 9）为材料，分别研究水稻种植水和水稻秸秆水浸液对铜绿微囊藻的抑制现象及机理，从中提取出了多种不同成分的抑藻物质。同时，宋样甫等^[28]的水稻浮床试验结果表明，水稻浮床对水体的氮、磷有较高的去除率，有利于富营养化水体的净化。利用大型植物来抑制藻类有一定的应用前景，但 Jin 等^[29]认为此种方法只适用于淡水生态系统。

3.2 生物滤食治理

关于藻类与滤食性浮游动物之间的相互关系已有大量研究。藻类在生态环境中属于生产者，大多数水华藻类通常是浮游动物的直接饵料，也是其他水生动物的直接或间接食物。在湖泊和海洋水生态系统中，藻类生物量的下降往往伴随着原生动物数量的急剧增加^[30-31]。研究发现，变形虫能快速吞噬大量的单细胞微藻，1 个变形虫能同时吞噬多达 20 多个藻细胞，虫体内含有对藻细胞有裂解作用的类似溶菌酶物质^[32]。很多原生动物在藻类食物耗尽时会形成孢囊以度过食物缺乏期，当藻类数量重新增多时，孢囊又会复苏成为食藻体，同时孢囊结构具有抗逆性，便于包装和运输^[33]，该结果与 Takamura 等^[34]的蓝环虫在蓝藻水华消失后形成孢囊沉入湖泊底部的研究报道一致。

鱼类的食性多样，刘建康等^[35]曾在武汉东湖大量放养鲢、鳙等鱼类，通过摄食控制藻类密度，起到了很好防治蓝藻水华的效果。罗非鱼具有发达的胃腺，被认为在蓝藻治理方面比鲢、鳙等鱼类更高效^[36]。徐海军等^[37]研究褶纹冠蚌、三角帆蚌和河蚬等 3 种淡水贝类 24h 内对藻类的消除作用，去除率分别达 74.3%、75.6% 和 88.4%。生物滤食便于实施、费用低、前期效果良好，但滤食生物对藻类的捕食和消化能力有限，实际应用受到一定的限制。

3.3 藻类治理

利用微藻间的化感拮抗作用调节水体中的微藻种类，使各种微藻的数量保持稳定，也能起到预防及治理水华的作用。Nakai 等^[38]将水华蓝藻与 9 种不同大型藻类分别混合培养，发现水盾草 (*Cabomba caroliniana*) 和穗花狐尾藻 (*Myriophyllum spicatum*) 对所选用的蓝藻有一定的抑制作用。Singh 等^[39]研究发现，铜绿微囊藻能释放一种活性肝毒素 (hepatotoxin)，该物质能抑制某些特定绿藻和蓝藻等微藻的生长。胡威等^[40]研究穗花狐尾藻对淡水水华藻类的化感效应，结果表明，穗花狐尾藻不但对铜绿微囊藻有明显抑制效应，其培养液还可导致池塘混合藻叶绿素 a 含量下降，藻细胞还原能力降低。张婷等^[41]报道，土生席藻 (*Phormidium mucicola*) 细胞滤出液对铜绿微囊藻的生长起着显著抑制作用，浓度越高，抑制作用越明显，而铜绿微囊藻细胞滤出液也对席藻有微弱的抑制作用。

3.4 微生物治理

微生物是水体生态系统的重要组成部分。病毒被认为是浮游生物群落的演替中重要的动态因子，在水体中的生物量远高于细菌^[42]。病毒的专性寄生，能对宿主的种群密度起到调控作用。据报道，蓝藻病毒对蓝藻的致死率高达 72%^[43]。许多研究^[44-45]还发现，水华的消长过程中病毒的浓度及其他指标都会发生相应变化。

细菌通过直接接触溶藻和间接溶藻 2 种方式对藻类起作用。溶藻细菌多为革兰氏阴性菌，主要有粘细菌 (*Mysobacter*)、噬胞菌属 (*Cytophaga*)、杆菌 (*Bacillus*) 等。有些种类的粘细菌可直接与藻细胞接触，通过分泌溶解纤维素的酶来消化宿主的细胞壁，进而溶解整个藻细胞^[46]。间接溶藻是细菌通过分泌蛋白质、多肽类及氨基酸等胞外物质或通过对氮、磷等营养物质的竞争来达到抑藻目的。Imamura 等^[47]从含微囊藻的水样中分离 1 株鞘氨醇单胞菌属 (*Sphingomonas* sp.) 细菌，该菌株分泌一种活性五肽对几种微囊藻有灭杀能力。

由于自然水体中细菌浓度较低，许多研究通过人工介质固定化溶藻菌来提高溶藻效率。人工介质固定能提高细菌与藻接触面积，菌类的大量聚集也有利于其对悬浮物的沉降作用，还对溶藻菌的重复利用有帮助^[48]。多种新型材料如聚己内酯纳米纤维膜、氧化铁纳米颗粒等在固定化方面的应用，大大提高了溶藻菌的实际应用^[49-50]。

4 结语

随着工业的发展，各种污水大量排放，有害藻类水华发生频率逐渐增高，已经成为危害环境和人类健康的世界性问题，水华的预防和治理成为当务之急。由于藻类水华的主要成因水体富营养化问题短时间内难以得到根本解决，水华爆发成了一个周期性的过程。物理、化学方法大多能从短期内抑制水华藻类的生长，却难以从根本上解决水华问题。生物方法相对于物理、化学方法有一定的优势，在作用过程中往往对水质或水体环境有改善作用，但同时存在生物污染及作用时间相对较长等问题，有待进一步研究解决。

总的来看,应对水华问题要以防为主,防治结合。首先要减少水华形成的诱因,如减少污水的排放等来达到预防目的;其次,在水华大规模发生前,应建立预警系统,做到早发现、早治理;最后,一旦发生水华问题,应立即采取合理的措施进行治理,减少损失。

[参考文献]

[1] Reynolds C S, Walsby A E. Water blooms [J]. Biological Reviews, 1975, 50: 437-481.

[2] 贾晓会, 施定基, 史绵红, 等. 巢湖蓝藻水华形成原因探索及“优势种光合假说” [J]. 生态学报, 2011, 31 (11): 2968-2977.

[3] 邱保胜, 高坤山. 蓝藻浓缩二氧化碳的机制 [J]. 植物生理学通讯, 2001, 37 (5): 385-392.

[4] 夏珊珊, 常学秀, 吴牛争, 等. 蓝藻化感抑制作用研究进展 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28: 3927-3936.

[5] 方爱红, 黄银芝, 钱瑾. 浅谈太湖蓝藻暴发的原因、危害及其预防治理 [J]. 净水技术, 2008, 27 (3): 70-72.

[6] 刘伟. 巢湖蓝藻重度发生时的水质特征分析 [J]. 中国环境监测, 2008, 23 (4): 101-102.

[7] 易晓蕾. 我国海洋赤潮管理与减灾——加强赤潮管理, 保障海洋经济可持续发展 [J]. 海洋通报, 2003, 22 (4): 55-59.

[8] 周云龙, 于明. 水华的发生, 危害和防治 [J]. 生物学通报, 2004, 39 (6): 11-14.

[9] 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.

[10] 黄维, 裴毅, 陈飞勇. 水体蓝藻清除的研究及其新型机械除藻初探 [J]. 企业技术开发, 2008, 27 (4): 29-31.

[11] 徐振华, 赵红卫, 方为茂. 气浮净水技术的理论及应用 [J]. 四川化工, 2005, 8 (4): 49-51.

[12] 丁暘, 浦跃朴, 尹立红, 等. 超声除藻的参数优化及其在太湖除藻中的应用 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2009, 39 (2): 354-358.

[13] 薛罡, 马钟瑛, 孟幼平, 等. 微絮凝/涤纶高弹丝纤维球过滤工艺除藻试验研究 [J]. 中国给水排水, 2009, 25 (7): 52-54.

[14] 王占生, 刘文君. 微污染源饮用水处理 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[15] Anderson D M. Turning back the harmful red tide [J]. Nature, 1997, 388: 513-514.

[16] 汪小雄. 化学方法在除藻方面的应用 [J]. 广东化工, 2011, 38 (4): 24-26.

[17] 刘广奇, 刘杰, 宋兰合. 给水处理除藻技术最新进展 [J]. 净水技术, 2008, 27 (2): 27-31.

[18] 付军, 闫海, 王东升, 等. 聚铝及其加载粘土矿物高效絮凝沉降铜绿微囊藻的研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7 (1): 76-79.

[19] 罗岳平, 施周, 王仕汇, 等. 用粘土作助凝剂提高聚合氯化铝除藻效果的研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23 (17): 61-65.

[20] 吴萍, 俞志明, 杨桂朋, 等. 新型表面活性剂改性粘土去除赤潮藻研究 [J]. 海洋与湖沼, 2006, 37 (6): 511-516.

[21] Hasler A D, Jones E. Demonstration of the antagonistic action of large aquatic plants on algae and rotifers [J]. Ecology, 1949, 30: 359-364.

[22] 李修岭, 李伟, 李夜光, 等. 几种植物去除高度富营养化湖水中氮磷及抑藻效果的初步研究 [J]. 武汉植物学研究, 2005, 23 (17): 53-57.

[23] 俞子文, 孙文浩, 郭克勤, 等. 几种高等水生植物的克藻效应 [J]. 水生生物学报, 1992, 16 (1): 1-7.

[24] 吴虹玥, 包维楷, 王安, 等. 外来物种水葫芦的生态环境效应 [J]. 世界科技研究与发展, 2004, 24 (2): 25-29.

[25] 洪喻, 胡洪营. 水生植物化感抑藻作用研究与应用 [J]. 科学通报, 2009, 54 (3): 287-293.

[26] 侯明. 高等水生景观植物化感抑藻作用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

[27] 张玲. 盐京九号水稻抑制铜绿微囊藻生长作用及其机制的研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2008.

[28] 宋祥甫, 邹国燕, 吴伟明, 等. 浮床水稻对富营养化水体中氮、磷的去除效果及规律研究 [J]. 环境科学学报, 1998, 18 (5): 489-494.

[29] Jin Q, Dong S. 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.

[30] Landsberg J H. The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms [J]. Reviews in Fisheries Science, 2002, 10: 113-390.

[31] Canter H M, Heaney S, Lund J. The ecological significance of grazing on planktonic populations of cyanobacteria by the ciliate *Nassella* [J]. New phytologist, 1990, 114: 247-263.

[32] Ho T S S, Alexander M. The feeding of amebae on algae in culture [J]. Journal of Phycology, 1974, 10: 95-100.

[33] 刘新尧, 石苗, 廖永红, 等. 食藻原生动物及其在治理蓝藻水华中的应用前景 [J]. 水生生物学报, 2005, 29 (4): 456-461.

[34] Takamura N, Yasuno M. Food selection of the ciliated protozoa, *Condylostoma vorticella* (Ehrenberg) in Lake Kasumigaura [J]. Rikusuigaku Zasshi, 1983, 44: 184-189.

[35] 刘建康, 谢平. 揭开武汉东湖蓝藻水华消失之谜 [J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8 (3): 312-319.

[36] 陆开宏, 金春华, 王扬才. 罗非鱼对蓝藻的摄食消化及对富营养化水体水华的控制 [J]. 水产学报, 2006, 29 (6): 811-818.

[37] 徐海军, 凌去非, 杨彩根, 等. 3 种淡水贝类对藻类消除作用的初步研究 [J]. 水生态学杂志, 2010, 3 (1): 72-73.

[38] Nakai S, Inoue Y, Hosomi M, et al. Myriophyllum spicatum-released allelopathic polyphenols inhibiting growth of blue-green algae *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Research, 2000, 34: 3026-3032.

[39] Singh D P, Tyagi M, Kumar A., et al. Antialgal activity of a hepatotoxin-producing cyanobacterium, *Microcystis aeruginosa* [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2001, 17: 15-22.

[40] 胡威, 章典, 冉颖霞, 等. 穗花狐尾藻对淡水水华藻类的化感效应 [J]. 安徽师范大学学报 (自然科学版), 2011, 34 (4): 359-364.

[41] 张婷, 宋立荣. 铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 与三种丝状蓝藻间的相互作用 [J]. 湖泊科学, 2006, 18 (2): 150-156.

[42] 赵以军, 石正丽, 黄国锦, 等. 蓝藻病毒 (噬藻体) 的研究进展 [J]. 中国病毒学, 1999, 14 (2): 100-105.

[43] Proctor L M, Fuhrman J A. Viral mortality of marine bacteria and cyanobacteria [J]. Nature, 1990, 343: 60-62.

[44] Suttle C. Viruses as biological control agents for blooms of marine phytoplankton [J]. Proceedings of the Brown Tide Summit, 1996, 71-76.

[45] Suttle C A, Chan A M. Dynamics and distribution of cyanophages and their effect on marine *Synechococcus* spp. [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60: 3167-3174.

[46] Shilo M. Lysis of blue-green algae by myxobacter [J]. Journal of Bacteriology, 1970, 140: 453-461.

[47] Imamura N, Motoike I, Noda M, et al. Argimicin A, a novel anti-cyanobacterial compound produced by an algae-lysing bacterium [J]. Journal of Antibiotics, 2000, 53: 1317-1319.

[48] 金黎, 高效溶藻菌的选育及其溶藻机理研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.

[49] 于光, 李云晖, 姚琛, 等. 聚己内酯纳米纤维膜固定化溶藻菌对藻类和藻毒素的生物降解作用 [J]. 东南大学学报, 2008, 38 (3): 483-487.

[50] 李云晖, 浦跃朴, 尹立红, 等. 氧化铁纳米颗粒固定化溶藻菌的除藻作用 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2006, 36 (6): 986-990.



(上接第 58 页)

[24] 李环, 韦萍, 顾海红, 等. D-苯丙氨酸产生菌的诱变育种 [J]. 工业微生物, 2003, 33 (3): 6-9.

[25] 夏江, 梅乐和, 黄俊, 等. 产 γ -氨基丁酸的乳酸菌株筛选及诱变 [J]. 核农学报, 2006, 20 (5): 379-382.

[26] 潘涛, 周剑, 虞龙. 外诱变柠檬酸生产菌黑曲霉的选育 [J]. 化学与生物工程, 2007, 24 (1): 50-52.

[27] 张昆. 复合诱变筛选丙烯醇抗性的富马酸高产米根霉菌株 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36 (23): 9823-9825.

[28] 刘连碧, 朱春宝, 朱宝泉. 离子注入诱变育种技术在柔红霉素高产菌选育中的应用 [J]. 中国医药工业杂志, 2001, 6 (7): 296-299.

[29] 韩建荣, 董仙芳. 激光诱变青霉 PT95 原生质体选育类胡萝卜素高产菌株 [J]. 微生物学通报, 2002, 29 (2): 31-34.

[30] 陈德刚. 重离子注入法诱变维生素 B₁₂ 高产菌株 [J]. 中国兽药杂志, 2012, 46 (2): 39-41.

[31] 揣玉多, 马志刚, 王德培. 费氏丙酸菌维生素 B₁ 营养缺陷型菌株的诱变选育 [J]. 生物技术进展, 2014, (4): 207-210.

[32] 王丽红, 郭爱莲. 苏云金杆菌 NU-2 原生质体复合诱变的研究 [J]. 微生物学杂志, 2006, 26 (4): 23-26.

[33] 乔广军, 汪晨, 张凯, 等. 多杀菌素高产菌株的诱变选育 [J]. 食品与发酵科技, 2012, (5): 31-34.