

富营养化水体原位控藻技术研究进展

张饮江,李岩,张曼曼,张乐婷,黎臻,段婷,董悦

上海海洋大学水产与生命学院,上海 201306

摘要 水体藻类过度繁殖引起水体缺氧,透明度下降,致使水生动物窒息死亡,破坏水体生态系统,影响水质,危害人体健康与安全。综述 3 藻华的危害性,通过物理法、化学法和生物法,概述原位控藻的主要技术,分析与探讨多项技术实践结果的优缺点,认为以清除过多内源营养盐为主,同时结合运用控藻技术,加强外源截污与面源有效控制等环境质量管理综合措施,是长期控藻与改善水质的重要方向。

关键词 富营养化;藻华;原位;控藻技术

中图分类号 X52

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.10.010

Progress in the Technique of *in situ* Algae Control for the Eutrophicated Water

ZHANG Yinjiang, LI Yan, ZHANG Manman, ZHANG Leting, LI Zhen, DUAN Ting, DONG Yue

College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract Algae bloom causes water hypoxia and reduces water transparency, resulting in the suffocation and death of aquatic animals, destroying water ecosystems, and endangering human life and health. The harm of algae bloom and the major techniques for *in situ* algae control by the methods involving physics, chemistry, and biology are summarized; the merit and demerit of each technique are analyzed based on the algae control practices discussed. It is suggested that by removing excessive endogenous nutrients complemented with the algae control technique, meanwhile strengthening the environment quality management by intercepting pollution; these comprehensive measures would become the important direction to accomplish the long-term control of algae and the restoration of water quality.

Keywords eutrophication; algal bloom; *in situ*; algae control technique

水体富营养化日益成为全球性的水环境污染问题。据统计,目前全球约 75% 以上的湖泊等水体存在富营养化问题^[1]。中国湖泊众多,其中面积大于 1km² 以上有 2759 个,总面积达 91019km², 占国土面积的 0.95%^[2]。目前 66% 以上的湖泊、水库处于富营养化的水平,重富营养和超富营养的占 22%,其他城市湖泊等水体富营养化也十分严重,使得富营养化成为中国目前乃至今后相当长一段时期内的重大水环境问题^[3,4]。

富营养化水体为藻类爆发提供了物质基础,且营养物的切断与去除周期长,困难大,所以控藻技术的运用显得尤为重要。原位控藻技术从作用对象上可分为直接对策和间接对策两大类。直接对策即采用物理、化学、生物等方法直接作用

于水体藻类,以期达到短期抑制、杀死或去除的目的;间接对策则较为缓慢,主要通过调控水体营养盐及减弱其他利于藻类增殖的理化条件,阻止藻类爆发。本文就目前水体污染现状和值得关注的原位控藻技术进行综述和分析,并对原位控藻技术的理论、实践与发展进行展望。

1 藻类爆发危害

近年来,全球湖泊富营养化较严重,例如,1988 年斯堪的纳维亚的 *Chrysochromulina polylepis* 水华,杀死了 75000m² 区域内的所有动物群和植物群^[5],中国大部分的主要水域都存在不同程度的富营养化状态(表 1)。太湖、巢湖、滇池及武汉东湖等主要水体藻类的频繁爆发,不仅引发水源危机,还会

收稿日期:2012-11-19;修回日期:2013-03-01

基金项目:国家水体污染控制与治理技术重大专项(08ZX07101-005-01);上海市科委资助项目(05dz05823,08dz1900408);上海市重点学科建设项目(Y1110,S30701)

作者简介:张饮江,教授,研究方向为水域环境生态学、水域景观工程学等,电子信箱:yjzhang@shou.edu.cn

导致巨大经济损失,严重危害周围居民生活。例如,2007年太湖蓝藻爆发,致使无锡市出现饮水危机。藻类爆发主要危害可归纳为:(1)藻类大量聚集于水表面降低水下光照,影响水中植物光合作用,致使鱼类等窒息死亡,并导致水体黑臭,影响水资源的合理利用^[6];(2)向水体释放有毒物质。藻类分解释放藻毒素羟胺、2-甲基异冰片等有毒物质,可造成水体生

物大量死亡。同时,水底堆积有机物质在厌氧条件下分解产生 H_2S 等有害气体危害水生生物^[7]。并且有些蓝绿藻分泌的藻毒素会损害人类神经系统,导致呼吸困难、腹泻、呕吐以及损害肝肾等器官,甚至生成“三致”物质^[8];(3)富营养化水中含有高浓度硝酸盐和亚硝酸盐,人畜长期饮用会中毒致病^[7]。

表 1 2011 年中国重点监测湖库富营养化情况

Table 1 Eutrophication situation for the key monitoring lakes and reservoirs of China in 2011

综合富营养化状态指标	26 个国控重点湖库
中度富营养化	达赉湖,滇池
轻度富营养化	太湖,巢湖,洪泽湖,于桥水库,玄武湖,南四湖,白洋淀,大伙房水库,崂山水库,东湖,松花湖,西湖
中营养	大明湖,鄱阳湖,洞庭湖,昆明湖,董铺水库,镜泊湖,门楼水库,洱海,博斯腾湖,密云水库,千岛湖,丹江口水库

2 原位控藻主要技术

2.1 物理调控

2.1.1 光控技术

光是影响藻类生长繁殖的最重要生态因子之一,也是其生长的主要能量来源^[9]。在自然水体中,光照比 pH 值、温度和氮磷等更易被人为控制,以影响藻类增殖。在富营养化水体中,爆发水华的水体藻类密度一般在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 左右^[9],当有足够的光照和适宜的水温、风、流速等条件时,藻类大量增殖爆发,但藻类泛滥也会随某一条件的缺乏而迅速褪去^[10]。据此,小岛贞男在 20 世纪 90 年代末提出局部遮光控藻思路,并在日本某水源地通过铺设面积高达上千平方米的六边形聚乙烯板材遮盖约 1/3 水面,抑制藻类增殖效果显著^[11]。国内,陈初雪等^[12]的遮阳网遮光实验发现:遮光 9d 之后叶绿素 a 浓度、浊度、化学需氧量(COD)都显著下降,去除率分别达到 80.1%、68.0%、93.8%。梁瑜等^[13]遮光实验得出,遮光 7d 铜绿微囊藻叶绿素 a 浓度由 $107.1\mu\text{g}/\text{L}$ 下降至 $44.5\mu\text{g}/\text{L}$,控藻效果显著。万蕾等^[10]实验表明,不同遮光面积,遮光周期及遮光率对实验水体藻类均有较好的去除效果。张雪等^[14]通过有色薄膜过滤入射光的实验发现:透过绿光对青苔增长抑制率为 33%~93%,限制作用明显。

研究表明,调控入射光对控制水体藻类生长效果明显,但需投入大量施工成本,又影响水体美观,而遮光控藻却不失为入水口或水源地控藻的一种有效技术。所以,如何根据水体特点设计低成本的大水面遮光结构,以及制定相应的施工法成为该技术在国内外应用推广的关键点^[15]。

2.1.2 絮凝沉降

利用一些具有吸附特性的天然物质如海泡石、黏土、膨润土、蒙脱石、活性炭吸附和壳聚糖等进行吸附沉淀藻类。具有天然无毒、使用方便、吸附效果明显和廉价等特点。孙石等^[16]将黏土用于滇池藻类治理中,取得较好的控藻效果。邹华等^[17]在太湖梅梁弯水域利用当地黏土进行原位围隔除藻实

验,为降低除藻成本和防止底泥过度淤积提供了思路。但这类吸附剂主要以絮凝沉降藻类的方式起到减少水面藻体的目的,并不能杀死藻体和防止浅水湖泊藻类的再次泛起。

近年来,通过络合有机物,金属离子或杀藻化合物形成的改性吸附剂表现出较好的除藻效果。潘纲等^[18]通过对黏土改性使黏土的投放量从 $200\text{mg}/\text{L}$ 降到了 $10\text{mg}/\text{L}$,且藻细胞去除率达到 95% 以上。例如,吴春笃等^[19]将壳聚糖改性的膨润土和海泡石应用于绿藻爆发的景观水体中,使浊度降至 5NTU 以下,叶绿素 a 的去除率达 93% 以上。另外,季铵盐改性黏土对铜铝微囊藻的去除也有较好的实验效果^[20]。改性吸附剂虽表现出较好的除藻效果,但对于大面积水体,施工成本较大,有可能造成底泥污染等,并且实际运用中利用黏土技术大面积清除淡水湖泊藻华的尝试很少有成功^[21]。

2.1.3 捞藻捕藻

通过打捞、过滤和吸引等方法直接捕捞和富集水面藻类。该法是一种有效的应急控制措施,而适时地对富营养化水体中的藻类打捞和清除,不仅能有效地防止水体二次污染,为后期引进修复植物创造良好的生长环境,同时还可对打捞的藻类进行资源化利用^[22]。如云南程海的螺旋藻水华,通过收集螺旋藻还能带来一定的经济收入^[23]。捞藻捕藻可在短期内快速有效地去除藻类,避免水体的进一步恶化。在滇池“水华”爆发期进行捞藻,共清除蓝藻干重 360.83t ^[24]。但由于藻体本身的特性,如能动性高、表面负电荷等,打捞会造成藻密度的降低而解除藻类之间的密度制约,可能导致藻类种群增长^[25]。并且打捞中可能留下植物残骸引起藻类二次复发,所以要及时对打捞藻类进行处理,否则易造成环境污染。

2.1.4 曝气充氧

通过跌水或造流等方法增强水体流动,促进水体上下层的混合干扰温度分层,并将水面藻类驱赶至深水层,限制浮游藻类生长;另外,溶解氧的增加能有效抑制底层氮、磷的释放,避免水体黑臭等。例如,近年来在北京清河、上海苏州河和

张家洪河等城市河道进行了一定规模的人工曝气复氧试验和工程实践,均取得了较好的效果^[29];宫磊等^[26]利用气浮设备和组合絮凝剂处理滇池藻类,使含藻量去除率达 99%。曝气既能抑制水体藻类滋生,又可通过增氧改善水体的生态环境,但曝气经济成本较高,有可能造成底泥污染物的二次释放,增加水体浊度,可作为辅助处理手段。

对于深水水体国内外发展了扬水筒技术,如 Jungo 等^[27]通过在荷兰 Nieuwe Meer 水库长达 7a 的扬水技术应用研究表明,库内叶绿素 a 浓度和总藻类生物量显著下降,有毒微囊藻生物量降低了 95%。国内在扬水筒技术基础上,创新研发出扬水曝气技术及生物氧化组合技术等,在控藻过程中进一步改善水质,并取得较好的实践效果。马越等^[28]对黑河金盆水库利用扬水筒曝气系统研究发现,藻类叶绿素 a 含量较 2008 年削减 53.6%。周真明等^[29]发现扬水曝气与生物接触氧化组合工艺对藻类的平均去除率为 41.7%。据报道,利用太阳能动力循环可以对水深>200m 的水体充氧曝气^[30],但这些技术往往局限于水深超过 10m 的大型湖库等深水水源地和海洋,且运行时间长,见效慢,以及维护成本较高。

2.1.5 引水换水

通过引水导流,调节湖库等水体出入水量和加速换水周期,稀释或冲刷带走部分藻类及营养物质。水体交换能缩短污染物在水体中的滞留时间,限制藻类生长和改善水质,还能依靠冲刷补给水增加水体下层溶解氧含量,对底泥污染物的释放有一定抑制作用,有助于水体生态系统的恢复^[2]。如 2007 年“引江济太”和梅梁湖泵站联合调水使蓝藻密度降 40%~50%,较快化解供水危机,且通过 3 年调水降低梅梁湖槽蓄水总氮(TN)含量约 930t^[31]。该种工程调控性措施,能显著改善藻类爆发水体。但采用时要考虑对周围水环境的影响,避免扩大污染面积,并且稀释水体可能会解除藻类的密度限制,从而导致其大量增殖,如刘文杰等从望虞河引水补给尚湖,导致蓝藻种类增多,营养盐浓度上升 2~3 倍^[32]。

2.1.6 其他新型物理控藻技术

除藻新技术的研究大部分可归于直接对策,如 UV、超声波、微波、光催化、电解、微电解、银离子、高强磁和纳米等技术,其中有些技术已取得较好的实践效果。Hong 等^[33]发现日光灯和紫外线相结合对藻类的生长具有长时间的抑制作用,且太阳能 UV-C 浮动装置已用于控制东京 Kutama 湖藻类的爆发^[34];依据强氧化性和还原性损伤细胞的原理,光催化和纳米技术在控藻方面也取得一定进展,如 Julie 等^[35]分别使用汞灯和太阳光对纳米二氧化钛进行照射,能明显抑制藻类的生长。熊勤等^[36]利用纳米布控制无锡五里湖藻华时,发现 1d 可使水体叶绿素 a 浓度下降 76%,且该技术对斑马鱼无毒。超声波则是通过破裂蓝藻内伪空胞导致藻体下沉,降低藻细胞的光合作用,增强底栖动物的捕食,从而达到控藻的效果^[37]。Ahn 等^[38]研究发现,超声波还能抑制细胞分裂,但超声结束后藻细胞又很快恢复生长。这些新型技术,虽在实验室或围格内对藻类表现出较好控制效果,但自然水体环境因素复杂,

光线和声波等衰减明显,扩大试验及对自然水体的作用效果有待检验。

2.2 化学处理

2.2.1 化学钝化

利用化学反应的作用来改变水体营养浓度和其他藻类生长的理化条件,从而间接抑制藻类增殖。如,通过向水体添加铁、铝等絮凝剂来钝化和沉淀水体中的氮和磷,限制藻类增殖。例如,在美国 Green 湖投放 181t 明矾和 76.5t 铝酸钠钝化水体营养盐,使湖水透明度由 1.9m 升至 6.1m,明显消减水体磷浓度,抑制藻类生长^[39]。不过,钝化剂(如铝盐)在美国的 Liberty 湖对控制湖水富营养化却没有成功。不管是否有效,长期使用此类絮凝剂会造成水体铁、铝等金属离子的富集,危害生态安全。

在美国运用的碳酸钠过氧水化合物、茵多杀胺盐、敌草快、遮光产品等化学产品,大部分低毒甚至无毒,例如碳酸钠过氧水化合物被美国批准用在湖泊、池塘、水源,甚至饮用水源中。遮光产品是将食品或药品色素络合后溶入水体,通过遮蔽藻类生长所需要的光线来抑制藻类生长,如 Aquashade, Jet Black 等。并且可根据色素的颜色美化水景,但遮光产品需在春季或藻类爆发之前使用^[40]。所以,开发影响藻类增殖理化因子的新型安全无毒的化学试剂,可能在抑藻除藻方面具有较好的发展前景。

2.2.2 化学灭藻

化学除藻剂一般分为氧化型和非氧化型。非氧化型主要为无机金属化合物及重金属制剂。如铜剂、汞剂、锡剂、季磷盐、有机硫系、有机氯系、铜化合物和螯合铜类物质等;氧化型主要为卤素及其化合物和臭氧,高锰酸盐等^[21]。周律等^[41]发现投加 1mg/L 以上络合铜对铜绿微囊藻有很好的杀灭作用,浓度升至 5mg/L 时能有效抑制普通小球藻的生长。缪柳等^[42]采用硫酸铜处理水华水体,使叶绿素 a 浓度从 298.98 $\mu\text{g/L}$ 下降至 40.71 $\mu\text{g/L}$,但停药 10d 后叶绿素 a 浓度从 40.71 $\mu\text{g/L}$ 上升至 125.29 $\mu\text{g/L}$,且对鱼类具有一定毒害,易造成铜离子富集。

化学制剂可能会限制水体的运用:游泳,食用和灌溉等,且药效可能受到天气和水流的影响,还有可能杀死鱼类等生物,造成有毒物质富集危害人类健康。并且藻类死亡后,藻体不及时清理会腐烂分解释放出氮、磷及其他有机物,容易引起二次污染。虽灭藻效果显著,适用范围广,但往往用作应急处理措施。

2.3 生物克藻

2.3.1 生物滤食

生物滤食的基本原理是通过调控鱼类、底栖动物、浮游动物、噬藻体等生物滤食和牧食水体藻类来控制 and 去除藻类,进而促进水体生态结构的恢复^[8]。可利用具有食性偏好的生物滤食水体藻类,如,利用草鱼以水生植物和丝状藻为食的特点等。刘建康等^[43]研究表明,鲢、鳙鱼对蓝藻消化率为 30%~40%,鲢、鳙鱼每增加 1kg 生物量,就有 50kg 蓝藻被除掉。而

利用大型贝类净化水体方面,欧洲和北美对斑马贻贝的研究较多,国内对三角帆蚌有较多报道^[44]。徐海军等^[45]比较了褶纹冠蚌,三角帆蚌与河蚬3种淡水贝类对水族箱中藻类的消除效果,表明褶纹冠蚌,三角帆蚌和河蚬24h对藻类的去除率分别达到74.3%,75.6%和88.4%,除藻效果显著。此外,夏哲韬等^[46]实验发现,食藻虫对浮游藻类具有较好的滤食作用,叶绿素a浓度与对照区相比减少了55.3%。

生物滤食技术优点是便于实施、费用低和前期除藻效果好,亦可通过捕捞鱼贝获得一定经济效益。缺点是滤食动物对藻类的滤食和消化能力有限,不适合藻类大规模暴发时使用,也有可能促进小型藻类的生长^[47]。同时投放滤食生物后,要避免某些滤食动物过度增长,以致出现一些不可食,不可消化,高生长率,具有防御机制及有毒的藻类。不同的生境下,为了形成稳定的生物链,关键是对滤食生物的筛选、群落和数量的合理搭配。

2.3.2 化感抑藻

Hasler等在1949年首次发现水生植物对藻类的化感抑制作用,Fitzgerald等通过研究也证明水生植物的代谢产物可控制藻类的生长,在有害藻类频繁爆发的情况下,可通过化感作用抑制藻类增殖^[48]。现已发现苦草、菹草、金鱼藻、水浮莲、穗花狐尾藻、石菖蒲和灯芯草等几十种水生植物能够释放化感物质,抑制藻类的生长,且部分植物对蓝藻、绿藻和衣藻具有较好的抑制效应^[49-54]。李小路等^[51]研究发现,金鱼藻对铜绿微囊藻有明显的抑制作用,作用96h后藻细胞完全死亡。水网藻种植水能够破坏铜绿微囊藻的叶绿素a,诱导产生活性氧,从而刺激超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性升高,同时还能降低铜绿微囊藻的抗氧化酶活性,抑制其生长^[52]。Dziga等^[53]研究得出,化感物质焦栲酸和对苯二酚通过破坏铜绿微囊藻光合系统和碱性磷酸酶来抑制其增殖。Wu等^[54]发现,粉绿狐尾藻对铜绿微囊藻的化感抑制作用是通过降低后者的藻胆蛋白而实现。总结发现植物抑藻途径主要有:抑制藻细胞生长,影响藻细胞光合作用;破坏细胞膜,影响某些酶的活性,抑制营养吸收和影响呼吸代谢等^[55]。

近年来,陆生植物对藻类的化感作用也受到较多关注,如松树、柳树、榕树、韭菜、大麦、艾蒿和作物秸秆等^[56]。其中,作物秸秆具有来源广泛,成本低廉,抑藻效果好,对水体影响较小等优点而备受关注。例如,在苏格兰一个经常爆发硅藻和蓝藻的25000m²水域投放大麦秆发现,藻体生物量减少50%,富营养化现象得到了有效控制^[57]。且不同植物的秸秆对藻类的影响作用不同^[58];有研究表明,大麦、水稻和小麦秸秆对铜绿微囊藻抑制作用显著,72h-EC₅₀由大到小依次是大麦>水稻>小麦,分别为248、334和1943mg/L。秸秆对藻类生长抑制的主要机制是秸秆在好氧条件下腐分解所产生的有机酸、含甲基的酚类物质、醇类和酮类物质通过化感作用

抑制藻类生长^[59]。

水生植物在控藻和修复水体中具有重要作用,富营养化水体中水生植物的恢复及构建具有重要意义。但水生植物的生长要具备相应的生境条件,同时注重不同水生植物的配置结构,构建初期稳定性脆弱,维护复杂,如沉水植物种植技术要求较高,难以存活,并且沉水植物过度滋长,会影响其他水生生物生长,又破坏水体景观,需对其进行矮化与收割,费时费力,还有可能造成二次污染^[60]。而利用化感物质控藻,特别是作物秸秆可以直接扎捆投放,操作简单,效果显著,但高浓度化感物质的留存及生态毒性需深入研究。

2.3.3 浮体控藻

在浮体上种植水生植物,景观植物或农作物等,利用浮体的遮光效应和栽培植物的化感作用等,控制藻类的增殖;并且通过植物吸收、微生物降解等途径去除水体中的污染物,改善水质。浮体不仅能美化水景且占地面积小,利用生态浮岛覆盖日本霞浦湖25%水面发现,能削减94%的浮游植物^[61];邴旭文等^[62]用美人蕉做浮体植物净化养殖水体实验发现,浮岛覆盖面积为20%时,对总氮、总磷、化学需氧量及叶绿素a的净化率分别达72%、82%、31%和56%。

但植物的吸收率和生物量成为限制传统浮岛净化效果的主要原因,目前越来越多的新型浮床逐渐被设计并实际运用到水体中^[63],特别是能为微生物生长提供更多附着面以增强浮体的控藻去污能力的浮体^[64,65]。生态浮体的结构设计是技术难点之一,浮体不适合风浪较大,水流较强等水域。采用塑料、泡沫板、竹料等浮材,虽成本低,但抗风浪能力较差;还应注意浮体植物构建和收割,浮体材料发生腐烂等二次污染的问题。

2.3.4 其他生物处理技术

微生物和酶技术等控藻中也有一定研究。主要是通过病毒、细菌、真菌、放线菌和原生动物等释放酶或胞外的抗生素作用于藻类,从而达到裂解藻类的目的^[66]。如在澳大利亚Moreton湾发现一种噬藻体,可导致鞘丝藻水华崩溃^[6],在Huon河口分离到一种能够造成某些藻华爆发后浮游植物细胞的迅速溶解和死亡的细菌^[67]。基于这些现象与理论,人们致力于微生物控制藻类水华研究,如美国推出Spectrum、Devour、Precise Pond等微生物菌剂、酶制剂及酶菌混合剂等产品,吕乐等^[68]向围格水体投加环境有效微生物菌剂,使蓝藻生物量减少55%以上并降低水体氨氮、亚硝酸氮、总氮和磷酸盐浓度等。另外还有复合酶激活剂,以期激活水体底栖微生物,加速对水体污染物的吸收和代谢,达到去除营养盐和控制藻类大量增殖的目的^[69]。这些方法在局部范围具有一定的可行性,但自然环境中微生物和酶制剂效果的发挥受到区域、温度、pH值、盐度、水压等众多环境因素影响。并且微生物的投放可能会引起生物入侵,导致投放区微生物群落失调,藻类病毒扩散或破坏生态结构等危险,特别是病毒和细菌。而对应用于大水面、开放性水体、流动水体,以及长期效果有待深入研究。

3 结论

原位控藻技术的运用,主要集中在与人们生活接触密切的城市景观水体、湖库与水源地等。城市景观水体多为易污染、小水体、生态结构脆弱等封闭或半封闭性缓流水体,藻类易滋生并导致水体黑臭,限制水体景观和娱乐功能,影响居民日常生活;而湖库等水源地具有水域面积大、生态结构和环境因素复杂等特点,藻类爆发往往造成人们用水危机,破坏生态环境。单一控藻技术各有优缺点,难以全面解决具体问题。

针对富营养化水体的特征,因地制宜,将多种技术集成,发挥协同作用是较好的长期控藻与改善水质的途径。如直接对策中的光控技术,打捞藻体及化学灭藻等均能在短时间内明显降低水体藻浓度。而植物化感作用及浮岛技术等措施虽见效慢,但亦能通过生物进一步改善水体,预防藻类再次泛起,达到治水控藻之效。如2007年太湖蓝藻爆发导致无锡水源危机后,机械打捞、“引江济太”工程、生态浮岛以及生态修复工程等措施不断运用在太湖治藻中,同时政府不断加强控源截污力度。虽然太湖尚有蓝藻爆发现象,但蓝藻爆发规模有所减弱,爆发时间有所延缓。而美国加州等地区则加强对非点源污染的法律约束力度,制定完善的法律监督制度,能有效控制非点源污染。水体藻类爆发受很多环境因素影响,是水体污染物长期积累的结果,往往具有突发性。并且水体高浓度营养盐是藻类大量增殖的物质基础,所以,以清除水体过多内源营养盐为主,同时结合控藻集成技术,加强外源截污,面源有效控制,以及环境质量管理的综合措施是治藻除藻的发展方向。

参考文献(References)

- [1] Freedman B. Environmental Ecology[M]. London: Academic Press, 2002.
- [2] 刘建秋, 郑铁荣, 付翠彦. 湖泊藻类的控制与治理[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(S1): 143-148.
Liu Jianqiu, Zheng Yirong, Fu Cuiyan. Environmental Science & Technology, 2009, 32(S1): 143-148.
- [3] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 589-595.
Kong Fanxiang, Gao Guang. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (3): 589-595.
- [4] 梁鸣. 我国城市湖泊富营养化现状及外源控制技术[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(8): 194-197.
Liang Ming. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29 (8): 194-197.
- [5] Granéli E, Hansen P J. Allelopathy in harmful algae: A mechanism to compete for resources?[J]. Ecology of Harmful Algae, 2006, 189: 189-201.
- [6] 汪小雄, 姜成春, 朱佳, 等. 微生物在除藻方面的应用研究 [J]. 工业水处理, 2011, 31(2): 1-4.
Wang Xiaoxiong, Jiang Chengchun, Zhu Jia, et al. Industrial Water Treatment, 2011, 31(2): 1-4.
- [7] 胡芳, 许杰. 水源地原位控藻技术的比较与选择 [J]. 环境科学与管理, 2010, 35(5): 56-58.

- Hu Fang, Xu Jie. Environmental Science and Management, 2010, 35(5): 56-58.
- [8] Fawell J K, Hart J, James H A, et al. Blue-green algae and their toxins—analysis, toxicity, treatment and environment control [J]. Water Supply, 1993, 11(3/4): 109-115.
- [9] 施丰华, 刘光照, 朱月华. 光照对微藻水华的影响 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(16): 9801-9803.
Shi Fenghua, Liu Guangzhao, Zhu Yuehua. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(16): 9801-9803.
- [10] 万蕾, 朱伟. 不同遮光方式的抑藻效果比较研究 [J]. 环境工程学报, 2009, 10(3): 1749-1754.
Wan Lei, Zhu Wei. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, 10(3): 1749-1754.
- [11] Kojima S. Corroborating study on algal control by partial shading of lake surface[J]. Main-Water and Wastewater, 2000, 42(5): 5-12.
- [12] 陈雪初, 孙扬才, 张海春, 等. 遮光法控藻的中试研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(11): 1830-1834.
Chen Xuechu, Sun Yangcai, Zhang Haichun, et al. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(11): 1830-1834.
- [13] 梁瑜, 陈雪初, 孔海南, 等. 遮光围隔中铜绿微囊藻的时空分布特征 [J]. 中国环境科学, 2007, 27(6): 821-825.
Liang Yu, Chen Xuechu, Kong Hainan, et al. China Environmental Science, 2007, 27(6): 821-825.
- [14] 张雪, 蒋福春, 李琴, 等. 光干扰法抑制净水构筑物上青苔的效果与机理研究[J]. 给水排水, 2010, 36(10): 53-55.
Zhang Xue, Jiang Fuchun, Li Qin, et al. Water & Wastewater Engineering, 2010, 36(10): 53-55.
- [15] 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.
Chen Xuechu, Kong Hainan, Li Chunjie. Water Resources Protection, 2008, 24(2): 10-13.
- [16] 孙石, 许晓毅, 毕晓伊, 等. 滇池水体除藻材料的除藻作用试验研究 [J]. 安全与环境学报, 2004, 4(6): 3-6.
Sun Shi, Xu Xiaoyi, Bi Xiaoyi, et al. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(6): 3-6.
- [17] Zou H, Pan G. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils II. Effective removal of microcystis aeruginosa using local soils and sediments modified by ehitosan [J]. Environmental Pollution, 2006, 141(2): 201-205.
- [18] 潘纲, 张明明, 闫海, 等. 黏土絮凝沉降铜绿微囊藻的动力学及其作用机理[J]. 环境科学, 2003, 24(5): 1-10.
Pan Gang, Zhang Haiming, Yan Hai, et al. Environmental Science, 2003, 24(5): 1-10.
- [19] 吴春筠, 侯纯莉, 杨峰, 等. 海泡石、膨润土改性壳聚糖对景观水絮凝效果的研究[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 50-54.
Wu Chundu, Hou Chunli, Yang Feng, et al. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 50-54.
- [20] 樊平, 杨维东, 李宏业, 等. 季铵盐改性黏土对铜绿微囊藻的去除研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 91-94.
Fan Ping, Yang Weidong, Li Hongye, et al. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11): 91-94.
- [21] 过龙根. 除藻与控藻技术[J]. 中国水利, 2006, (17): 34-36.
Guo Longgen. China Water Resources, 2006, (17): 34-36.
- [22] 周贝贝, 王国祥, 杨飞, 等. 人工打捞对铜绿微囊藻生长影响的模拟试验[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(3): 260-265.
Zhou Beibei, Wang Guoxiang, Yang Fei, et al. Journal of Ecology and

- Rural Environment, 2012, 28(3): 260-265.
- [23] 王国祥, 成小英, 濮培民. 湖泊藻型富营养化控制—技术、理论及应用[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 273-282.
Wang Guoxiang, Cheng Xiaoying, Pu Peimin. Journal of Lake Science, 2002, 14(3): 273-282.
- [24] 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]. 企业技术与开发, 2008, 27(4): 29-31.
Huang Wei, Pei Yi, Chen Feiyong. Technological Development of Enterprise, 2008, 27(4): 29-31.
- [25] 夏邦天, 郑广宏, 徐杭军, 等. 城市景观水体治理技术研究进展[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(6): 67-72.
Xia Bangtian, Zheng Guanghong, Xu Hangjun, et al. Environmental Science & Technology, 2008, 31(6): 67-72.
- [26] 宫磊, 徐晓军, 魏在山, 等. 小型CAF气浮设备处理滇池含藻水的试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(2): 88-91.
Gong Lei, Xu Xiaojun, Wei Zaishan, et al. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2005, 6(2): 88-91.
- [27] Jungo E, Visser P M, Stroom J, et al. Artificial mixing to reduce growth of the blue-green alga microcystis in Lake Nieuwe Meer, Amsterdam: An evaluation of 7 years of experience[J]. Water Science and Technology: Water Supply, 2001, 1(1): 17-23.
- [28] 马越, 黄廷, 丛海兵, 等. 扬水曝气技术在河道型深水水库水质原位修复中的应用[J]. 给水排水, 2012, 38(4): 7-12.
Ma Yue, Huang Ting, Cong Haibing, et al. Water & Wastewater Engineering, 2012, 38(4): 7-12.
- [29] 周真明, 黄廷林, 丛海兵. 扬水曝气/生物接触氧化工艺的除藻效果研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(15): 13-16.
Zhou Zhenming, Huang Tinglin, Cong Haibing. China Water & Wastewater, 2007, 23(15): 13-16.
- [30] Hudnell H K, Jones C, Labisi B, et al. Freshwater harmful algal bloom (FHAB) suppression with solar powered circulation (SPC)[J]. Harmful Algae, 2010, 9(2): 208-217.
- [31] 朱喜. 治理太湖富营养化和蓝藻爆发[C]//2010年水环境污染控制与生态修复高层技术论坛论文集. 合肥, 2010: 107-115.
Zhu Xi. Control Eutrophication and Algae Bloom in Taihu Lake[C]//Forum for Pollution Control and Ecological Restoration Techniques of Water Environment. Hefei, 2010: 107-115.
- [32] 刘文杰, 宋立荣, 许璞, 等. 引水对尚湖浮游植物群落结构和营养盐浓度的影响[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(1): 37-41.
Liu Wenjie, Song Lirong, Xu Pu, et al. Journal of Hydroecology, 2012, 33(1): 37-41.
- [33] Hong J, Otaki M. Association of photosynthesis and photocatalytic inhibition of algal growth by TiO₂ [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2006, 101(2): 185-189.
- [34] Alam M Z, Otaki M, Furumai H, et al. Direct and Indirect Inactivation of Microcystis Aeruginosa by UV-Radiation [J]. Water Research, 2001, 35(4): 1008-1014.
- [35] Peller J R, Whitman R L, Griffith S, et al. TiO₂ as a photocatalyst for control of the aquatic invasive alga, Cladophora, under natural and artificial light[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A-Chemistry, 2007, 186(2): 212-217.
- [36] 熊勤, 刘治华, 张一卉, 等. 纳米杀藻布杀藻效果研究 [J]. 环境科学, 2006, 27(4): 715-719.
Xiong Qin, Liu Zhihua, Zhang Yihui, et al. Environmental Science, 2006, 27(4): 715-719.
- [37] Hao H W, Wu M S, Chen Y F, et al. Cavitation mechanism in cyanobacterial growth inhibition by ultrasonic irradiation [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2004, 33(3): 151-156.
- [38] Ahn C Y, Park M H, Joung S H, et al. Growth inhibition of cyanobacteria by ultrasonic radiation: Laboratory and enclosure studies [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(13): 3031-3037.
- [39] Jacoby J M, Gibbons H L, Stoops K B. Response of a shallow, polymictic lake to buffered alum treatment[J]. Lake Reservoir Manage, 1994, 10(2): 103-112.
- [40] 卫之奇. 美国加州等湖泊流域管理及蓝藻治理 [J]. 全球科技经济瞭望, 2008, 23(3): 5-13.
Wei Zhiqi. Global Science, Technology and Economy Outlook, 2008, 23(3): 5-13.
- [41] 周律, 邢丽贞, 陈华东, 等. 利用络合铜控制水华优势藻的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(8): 13-15.
Zhou Lü, Xing Lizhen, Chen Huadong, et al. Environmental Science & Technology, 2009, 32(8): 13-15.
- [42] 缪柳, 洪俊明, 林冰. 络合硫酸铜除藻剂应急治理水华对水质及鱼类的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(5): 63-66.
Miao Liu, Hong Junming, Lin Bing. Journal of Ecology and Rural Environment, 2011, 27(5): 63-66.
- [43] 刘建康, 谢平. 用鲢鳙直接控制微囊藻水华的围隔试验和湖泊实践[J]. 生态科学, 2003, 22(3): 193-196.
Liu Jiankang, Xie Ping. Ecologic Science, 2003, 22(3): 193-196.
- [44] 活建林, 徐在宽, 店建清, 等. 湖泊大型贝类控藻与净化水质的研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007, 2: 69-79.
Huo Jianlin, Xu Zaikuan, Dian Jianqing, et al. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007, 2: 69-79.
- [45] 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.
Xu Haijun, Lin Qufei, Yang Caigen, et al. Journal of Hydroecology, 2010, 3(1): 72-73.
- [46] 夏哲韬, 史惠祥, 李遥. 食藻虫引导的沉水植被修复景观水体的应用研究[J]. 中国给水排水, 2011, 27(17): 26-30.
Xia Zhetao, Shi Huixiang, Li Yao. China Water & Wastewater, 2011, 27(17): 26-30.
- [47] 张国华, 曹文宣, 陈宜瑜. 湖泊放养渔业对我国湖泊生态系统的影响[J]. 水生生物学报, 1997, 21(3): 271-280.
Zhang Guohua, Cao Wenxuan, Chen Yiyu. Acta hydrobiologica sinica, 1997, 21(3): 271-280.
- [48] 张艳丽, 芦鹏, 吴晓英. 植物化感作用在抑藻方面的研究进展 [J]. 环境科学与管理, 2006, 31(7): 50-53.
Zhang Yanli, Lu Peng, Wu Xiaofu. Environmental Science and Management, 2006, 31(7): 50-53.
- [49] 李锋民, 胡洪营, 门玉洁, 等. 化感物质对小球藻抗氧化体系酶活性的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(10): 2091-2094.
Li Fengmin, Hu Hongying, Men Yujie, et al. Environmental Science, 2006, 27(10): 2091-2094.
- [50] Li F M, Hu H Y. Isolation and characterization of a novel anti-algal allelochemical from Phragmites communis [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2005, 71(11): 6545-6553.
- [51] 李小路, 潘慧云, 徐洁, 等. 金鱼藻与铜绿微囊藻共生情况下的化感作用[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11): 2243-2249.
Li Xiaolu, Pan Huiyun, Xu Jie, et al. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(11): 2243-2249.
- [52] 傅海燕, 柴天, 赵坤, 等. 水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究[J]. 环境科学, 2012, 35(5): 1563-1569.

- Fu Haiyan, Chai Tian, Zhao Kun, et al. Environmental Science, 2012, 35(5): 1563-1569.
- [53] Dziga D, Suda M, Bialczyk J, et al. The alteration of *Microcystis aeruginosa* biomass and dissolved Microcystin-LR concentration following exposure to plant-producing phenols [J]. Environmental Toxicology, 2007, 22(4): 341-346.
- [54] Wu C X, Chang X X, Dong H J, et al. Allelopathic inhibitory effect of *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verdc. on *Microcystis aeruginosa* and its physiological mechanism [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2595-2603.
- [55] 邓平. 三种沉水植物对浮游植物的化感效应研究[D]. 北京: 中国科学院, 2007.
Deng Ping. Studies on allelopathic effects of three submerged macrophytes on phytoplankton [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2007: 3-12.
- [56] 张饮江, 王聪, 李岩, 等. 陆生植物化感作用抑制有害藻应用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(1): 115-128.
Zhang Yinjiang, Wang Cong, Li Yan, et al. Environmental Science & Technology, 2012, 35(1): 115-128.
- [57] 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.
Wu Weizhong, Bing Kejian, Liu Yong. Ecological Environment, 2005, 14(6): 972-975.
- [58] Barrett P R F, Littlejohn J W, Cumow J. Long-term algal control in a reservoir using barley straw[J] Hydrobiologia, 1999, 415: 309-313.
- [59] 刘涛, 杨文杰, 王茹静. 作物秸秆对铜绿微囊藻的抑制作用 [J]. 环境工程学报, 2012, 6(4): 1154-1160.
Liu Tao, Yang Wenjie, Wang Rujing. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(4): 1154-1160.
- [60] 张饮江, 刘晓培, 金晶, 等. 沉水植物对水体净化的研究进展[J]. 科技导报, 2012, 30(27): 72-79.
Zhang Yinjiang, Liu Xiaopei, Jin Jing, et al. Science & Technology Review, 2012, 30(27): 72-79.
- [61] Nakamura K, Shimatani Y. The state-of-the-art of the artificial floating islands[J]. Civil Engineering Journal, 1999, 41(7): 26-31.
- [62] 邴旭文, 陈家长. 浮床无土栽培植物控制池塘富营养化水质[J]. 湛江海洋大学学报, 2001, 21(3): 29-34.
Bing Xuwen, Chen Jiazhang. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2001, 21(3): 29-34.
- [63] 马强, 高明瑜, 谭伟, 等. 新型生态浮岛在改善水质中的作用及生物膜载体微生物特征研究[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1596-1601.
Ma Qiang, Gao Mingyu, Tan Wei, et al. Environmental Science, 2011, 32(6): 1596-1601.
- [64] 李海英, 杨海华, 柯凡, 等. 微曝气生态浮床的净化效果与生物膜特性研究[J]. 中国给水排水, 2009, 25(7): 35-40.
Li Haiying, Yang Haihua, Ke Fan, et al. China Water & Wastewater, 2009, 25(7): 35-40.
- [65] Sun L, Liu Y, Jin H. Nitrogen removal from polluted river by enhanced floating bed grown canna[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(1): 135-140.
- [66] 李雪梅, 简曙光. 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.
Li Xuemei, Jian Shuguang. Acta Scientiarum Naturalum Universitatis Sunyatseni, 2000, 39(1): 81-85.
- [67] Lovejoy C, Bow J P, Hallegraef G M. Algicidal effects of a novel marine pseudoalteromonas isolate (Class Proteobacteria, Gammaproteobacteria, Subdivision) on harmful algal bloom species of the Genera *Chattonella*, *Gymnodinium*, and *Heterosigma* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(8): 2806-2813.
- [68] 吕乐, 尹春华, 许倩倩, 等. 环境有效微生物菌剂治理蓝藻水华研究 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(8): 1-3.
Lü Le, Yin Chunhua, Xu Qianqian, et al. Environmental Science & Technology, 2010, 33(8): 1-3.
- [69] 蔡娟, 操家顺, 吴蓓, 等. 复合酶制剂处理城市景观水体的试验研究 [J]. 水资源保护, 2006, 22(2): 31-33.
Cai Juan, Cao Jiashun, Wu Bei, et al. Water Resources Protection, 2006, 22(2): 31-33.

(责任编辑 吴晓丽)



《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿: www.kjdb.org。