

富营养化湖库水源地原位控藻技术研究进展

陈雪初, 孔海南, 李春杰

(上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘要 综述近年来出现的值得关注的湖库水源地原位控藻技术, 包括生态浮岛技术、改性黏土及植物浸出液控藻技术、鱼控藻技术、遮光控藻技术、扬水筒技术以及以物理-生态工程为代表的联合技术等, 认为将各项技术进行联合以达到水质修复和减灾防灾的双重目的将是重要的发展方向。

关键词 水源地; 富营养化; 原位控藻; 综述

中图分类号 X820.6 **文献标识码** A **文章编号** 1004-693X(2008)02-0010-04

In situ algae control in water source areas of eutrophicated lakes and reservoirs

CHEN Xue-chu, KONG Hai-nan, LI Chun-jie

(School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In situ algae control technologies recently developed for water source areas of lakes and reservoirs were reviewed, including the ecological floating island technique, algae control technologies using modified clay, plant extract, fish species and light shielding, lift barrel technologies and combined technologies such as physical-ecological engineering. It is suggested that combining technologies to accomplish water quality restoration and disaster prevention and control would be one of the most important directions for further research.

Key words water source area; eutrophication; in situ algae control; review

在我国, 一些以湖库为主要水源地的城市正面临着富营养化所导致的水华灾害的严峻挑战。在水华发生时每升水中多达几亿个藻细胞, COD 和 SS 等指标亦急剧升高, 导致给水厂滤池堵塞、产水量下降、出水浊度以及藻毒素含量超标等问题, 严重者将导致水厂被迫停产^[1]。另一方面, 在目前湖库普遍富营养化的形势下, 短期内已难以解决内源性营养盐过量的问题, 无法从根本上消除导致藻类异常繁殖的基础条件^[2-3], 因此, 在坚持实施控源策略的同时, 还有必要针对局部水域采取工程措施以达到减灾防灾的目的。

针对以上问题, 最近几年出现的新动向之一是原位控藻技术研究获得重视并逐步开展。此类技术专以保护取水口周边的水源水为目标, 在水源地域内直接实施控藻除藻工程, 开展前处理。它与传统给水工艺相比较最为显著的区别在于技术的应用场

所面积极大(一般在取水口周边水域), 同时为达到控藻效果所需的处理时间也相对较长, 即具有“以空间和时间赢取水质”的特点。从技术原理上看, 此类技术多着眼于破坏利于藻类增殖的生长环境, 如削减营养盐浓度、光照度, 加强水体流动性, 引入生物物种调控水生生态系统等。本文就水源地原位控藻技术值得关注的研究进展进行综述。

1 生态浮岛技术在浅水湖泊水源地的应用

生态浮岛技术即在浮体材料上种植植物, 通过植物自身的同化作用吸收水源水中氮、磷, 依靠附着于植物根系上的微生物去除一部分氨态氮、COD; 同时由于浮岛的遮光效应、接触沉淀作用等, 可在一定程度上控制有害藻类的增殖。1995 年日本研究者在霞浦湖进行一次隔离水域试验, 结果表明: 在生态浮岛占有率只有 25% 的条件下, 削减了 94% 的植物

性浮游生物^[4],宋祥甫等^[5]于1999~2000年在无锡东五里湖总面积为3600 m²的围隔试验区内开展浮岛净水研究,试验结束时旱伞草和美人蕉的生物量高达7.56 kg/m²和5.22 kg/m²,收割植物所带走的营养盐总量甚至超过了水体本底值^[5]。但实践表明,在吹程长、风浪较大的湖库水域,生态浮岛的结构设计是技术难点之一。国内目前多采用刚性的塑料泡沫板结合竹料为浮材,成本很低,但抗风浪能力不足;日本近年来开发了多样的浮岛材料,如在霞浦湖建成了由40个边长为4.5 m×4.5 m的正方形浮体所组成的长100 m、宽10 m的大型浮岛,采用不锈钢制框架,利用填充的泡沫聚苯乙烯塑料提供浮力^[6];还有一种所谓无框架浮岛的做法,一般由柔性的椰子纤维编织而成,不怕相互间的撞击,耐久性较好^[7]。在台湾地区则出现了用聚乙烯直接注塑而成的“福田板”,虽然抗风浪性能较好,但制作成本很高,目前多用于湖库及风景点的局部净化和绿化^[8]。

生态浮岛技术的难点是“较高的水力负荷与较低的氮磷去除率之间的矛盾”,即在水源地一方面所需处理的水量极大,水力负荷很高;另一方面相对于植物需求而言,营养盐浓度却过低,植物生长困难,对氮、磷的吸收能力极为有限,吸收速率较慢。因此在现有的较为成型的生态浮岛技术的基础上,研究并引入一些能够补偿其自身不足的脱氮除磷材料以及这些材料所构成的单元和结构,在富集营养盐的同时支持浮床植物生长,将有可能形成较有前景的实用关键技术。

2 新型控藻药剂的开发

在一些小城镇水源地,由于库区面积及水量相对不大,针对高含藻水源水,在实际应用中多考虑采取原位应急处理的方法,如在水华爆发时投加化学絮凝剂、黏土甚至硫酸铜进行杀藻除藻,最近则出现了对各种药剂进行改性或者复配以减少环境风险、提升效果的新研究,引起广泛关注的则为改性黏土控藻技术。黏土来源充足,天然无毒,播撒工序简单,早期采取直接投加黏土的方法,虽然效果显著但投加量较大(>0.2 g/L)^[9],邹华等^[10]采用壳聚糖对除藻能力相差甚远的各种黏土进行改性处理,在投加量仅为11 mg/L时,经2 h沉降后,藻类去除率均可达90%以上,并认为黏土表面壳聚糖的架桥网捕作用和电中和作用是主要的凝聚除藻机理,这一发现虽然解决了由于黏土投加量过高而造成的工程应用难题,但由于改性所用的壳聚糖价格昂贵,单位处理成本亦不低,因此该技术在应用上仍受到一定程度的限制,今后进一步开发价格低廉的改性材料可

能是该技术得以推广的关键点。

近来,部分研究者关注某些植物浸出液对藻类的化感作用,但多处于试验室研究阶段^[11-12];在美国国家,利用废弃的大麦秆控藻被认为是一项极为实用的技术,一般在早春时节,将大麦秆收集成垛,用塑料网包裹后投放,大约半个月之后开始发挥控藻效应,使用期为30~90 d^[13]。Barrett等^[14]自1993~1998年在苏格兰某水库中进行了麦秆控藻的工程研究。他们根据藻类的数量情况,在每年的1~3月或者9~11月投加麦秆,最高投量为28 g/m³,最低为6 g/m³,实施后2周左右开始发挥效用,水体藻细胞数可降至未处理前的1/4,监测表明,蓝藻和硅藻数量下降的同时,并没有出现新的具有特殊抗性的藻类,源水水质得到改善,水厂滤池反冲洗次数减少^[14]。这一技术可能适用国内规模较小的水源地,但必须评价是否有毒副作用产生。

3 鱼控藻技术在中小水源地的实践

自20世纪90年代初在武汉东湖围隔中证实鲢、鳙能成功控制微囊藻水华之后,鱼控藻技术在国内中小水源地有所实践。刘建康等^[15]的研究表明,鲢、鳙遏制水华的有效放养密度(亦即有效生物量)为46~50 g/m³。在水源地治理中较为典型的是陆开宏等^[16]在温州桥墩水库采取的方法,他们于1998年9月水华爆发期喷洒38.8 g/m²改性明矾浆应急除藻,之后于当年底放养尾重鲢、鳙鱼种1200尾/hm²,浮游蓝藻总量由1.04亿 cells/L下降至0.0143亿 cells/L,蓝藻个体数量比例从99.2%下降至31.5%。

鱼控藻技术存在的问题在于其不确定性,如食藻鱼类并不专门摄食蓝绿藻,还包括其他微小浮游动物,从而导致水生生态系统的巨变;另外食藻鱼类可能导致形态较大的藻类将为形态微小者所逐渐替代,而总的藻类生物量几乎不变^[13],较早在国内开展鱼控藻研究的谢平^[17]亦指出,藻毒素将会在鱼类体内积累,并通过食物链危害人类健康,这提醒着工程人员在实施该技术时应慎之又慎。

4 扬水筒技术的引进并在深水水库应用

扬水筒技术在欧美及日本等国已有30余年的应用历史,早期用于深水港口防冻,在水库应用后发现具有极好控藻效果,并能显著降低水库底层铁、锰浓度。其工作原理在于通过高能空压机在扬水筒底部生成“气弹”,带动水流循环,造成库区表层水体与底层水体的剧烈交换,破坏夏季水华高发期在水库表层形成的温度跃层,使得积聚于该层的藻类被驱

赶至水库底层,由于光照极低以及温度骤降等原因,藻类失去活性而逐渐消亡;同时因为水体交换而带来的“均一效应”,可使得原本在底层浓度较高的铁、锰得到稀释,沿水深方向上浓度逐渐趋于一致,并由于造流扬水所带来的复氧效应使污染物浓度得到进一步降低。Jungo 等^[18]在荷兰阿姆斯特丹的 Nieuwe Meer 水库中开展了为期 7 年的扬水技术应用研究(1993~2000 年),实施结果表明,库内叶绿素 a 浓度和总藻类生物量显著下降,有毒微囊藻得到极为有效的控制,其生物量降低为未处理前的 1/20,藻类种群结构也由原先的以蓝藻为主转变为硅藻、绿藻为主,此外整个水体中的溶解氧质量浓度还能够一直维持在 5 mg/L 左右,从而扩充了鱼类的生存空间。1999~2000 年,上海交通大学联合日本国立环境研究所等单位引进日本设备,在贵阳市小关水库现场进行了应用性研究,结果表明,运行 1d 后表层叶绿素 a 质量浓度即由 22.8 $\mu\text{g/L}$ 下降至 3 $\mu\text{g/L}$,底层铁、锰质量浓度则分别由 0.6 mg/L 和 2.4 mg/L 下降至 0.1 mg/L 和 0.05 mg/L,效果颇为显著^[19]。扬水筒技术的局限性在于仅仅针对水深 10 m 以上的深水水库效果较好,而不适用于浅水湖泊。今后,扬水筒设备的国产化开发将有可能成为极具吸引力的热点之一。

5 遮光控藻技术的出现

在直接影响蓝绿藻增殖的诸多环境因素中,相对于温度、营养盐、pH 值等而言,光照度是较为容易实施人为干预的因素,尹澄清等^[20]于 20 世纪 90 年代初在巢湖现场实验中观测到在有风天气时湖水透明度降至 10~16 cm,1 m 深处光照度仅有 70 lux,这导致整个水层的净生产量为负值,由此提出巢湖是光限制型水体的观点;20 世纪 90 年代末接触氧化法的发明人小岛贞男博士提出局部遮光法控藻的思路,即通过遮盖水源地的约 1/3 左右的水面,可以抑制藻类增殖,他们针对日本九州某城镇的水库(水面面积为 20 000 m^2)开展了示范研究,结果表明:实施之后水源水中藻类的数量大为减少,给水厂的混凝药剂投量降低 1/2,滤池反冲洗次数亦明显减少^[21]。在此观点启发下,上海交通大学河湖环境工程技术研究中心开展了有关遮光控藻技术的人工气候室内摇瓶研究、自然水域人工围隔研究以及人工水池中试研究^[22-23],结果表明:在富营养化水体藻类异常增殖,叶绿素 a 质量浓度高达 100 $\mu\text{g/L}$ 以上时,实施遮光处理 7~9 d,叶绿素 a 浓度可下降至 30 $\mu\text{g/L}$ 以下。根据这一系列研究结果提出遮光控藻技术新思路,即为保护水厂日常取用的水源水,在取水口附近

水域建设遮光工程区,使水源水在该区域内停留一定时间从而促使有害藻类消亡。在日本,实际工程中采用由聚乙烯中空板材拼接而成的单块面积高达上千平方米六边形工程结构,虽然较为稳定,遮光控藻效果颇佳,但成本过高。未来该技术在国内应用推广的关键点在于如何针对水源地的特点设计低成本的大水面遮光结构以及相应的工程实施方法。

6 针对实际水源地的联合技术

随着工程实践的不断深入,许多研究者逐渐认识到,必须针对水源地的水环境特点将某几项单一技术进行组合形成联合技术才有可能实现水源水保护的目标。较为典型的联合技术是濮培民等^[24-25]提出的物理-生态工程,其核心在于依靠物理工程,应用人工围隔技术在取水口周边建立软隔离带,阻隔藻类、其他悬浮物质及高浓度水团进入取水口,在软隔离带内恢复包括沉水植物、浮水植物、着生细菌及藻类在内的稳定健康的水生态系统,吸收水中营养盐,降低取水口藻类现存量。“十五”期间,秦伯强等^[26-27]采用与之类似的设计思路,在取水量为 30~40 万 t/d 的太湖梅梁湾牵龙口水厂周边建成了总面积近 10 km^2 的水源地水生态修复示范区。示范区采用了 PVC 围隔挡藻,围隔围绕牵龙口水厂取水口组成 2 道隔离,分别形成生态净化区和强化净化区。内圈围隔所围区域即强化净化区,主要通过恢复水生植物发挥生态效应而控藻除藻,净化水质,其面积为 2.1 km^2 ,可计算得停留时间约为 10 d 左右。该示范工程运行后,水源水水质得到了一定程度的改善,但是就藻类污染而言,情况没有显著好转,有关研究者分析认为可能是盛行风向的作用,导致夏季蓝藻水华富集堆积于示范区,造成控藻效果不佳;另外王洪君等^[28]的观察也证实,水华暴发期太湖植被型岸边区的叶绿素 a 质量浓度可高达 $3.2 \times 10^5 \mu\text{g/L}$,是开阔水体的 3 000~4 500 倍,这为未来的湖库水源地原位控藻及生态修复工程的设计和实践提供了重要借鉴。

7 结 语

在湖库水源地,由于水华发生的空间上的大范围性和时间上的不确定性,以及藻类数量和增殖速度极高的特点^[29],今后所研究开发的原位控藻技术,必须有针对性地解决以下两大难题:①如何提升藻类的去除速率而使之高于藻类增殖速率。②如何在极低成本条件下维持控藻效果。鉴于单一技术往往难以解决具体问题,特征不同、互有优劣的各类技术的联合和交叉将越来越受到重视,如生态浮岛技术、鱼控藻技术等生物生态技术在水源地水质保

持与恢复方面具有优势,而扬水筒技术、遮光技术等物理技术以及其他一些物化技术针对高含藻的水源水则具有立竿见影的效果,互相联合可望达到水质修复和减灾防灾的双重目的,这将是原位控藻技术发展的重要方向。

参考文献：

[1] 彭海清,谭章荣,高乃云,等. 给水处理中藻类的去除 [J]. 中国给水排水, 2002, 18(2) 29-31.

[2] 孔海南. 关于湖泊富营养化治理工程中应采用深度处理和生态工程技术的初浅建议:从日本湖泊富营养化治理中的经验教训谈起 [C]//中国环境科学学会水环境分会. 中国湖泊富营养化及其防治国际学术研讨会专家论文集. 昆明:中国环境科学学会水环境分会, 2000 301-304.

[3] 濮培民,李正魁,王国祥. 提高水体净化能力控制湖泊富营养化 [J]. 生态学报, 2005, 25(10) 2757-2763.

[4] 中村圭吾,岛谷幸宏. 人工浮岛的机能与技术的现状 [J]. 土木技术资料(日本),1999 41(7) 26-31.

[5] 宋祥甫,陈荷生,邹国燕. 利用生态浮床技术治理污染水体 [J]. 水文水资源, 2005(5) 50-53.

[6] 日本河道整治中心. 多自然型河流建设的施工方法及要点 [M]. 周怀东译. 北京:中国水利水电出版社, 2003.

[7] 李树华. 一种新型的园林绿地 [J]. 花卉园艺, 2005(12) : 8-9.

[8] 尚农. 花飞碟生态景观浮岛技术与水上绿化 [J]. 花卉园艺, 2006(1) 46-47.

[9] 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 [J]. 环境科学, 2003, 24(5) 1-10.

[10] 邹华,潘纲,陈灏. 壳聚糖改性黏土对水华优势藻铜绿微囊藻的絮凝去除 [J]. 环境科学, 2004, 25(6) 40-43.

[11] ALIOTTA G ,GRECA N D ,MONACO P ,et al. In vitro algal growth inhibition by phytotoxins of typha latifolia [J]. Journal of Chemical Ecology, 1990(16) 2637-2646.

[12] 李锋民,胡洪营. 大型水生植物浸出液对藻类的化感抑制作用 [J]. 中国给水排水, 2004, 20(11) 18-21.

[13] STEVE M. Lake and pond management guidebook [M]. New York :CR Cnet BASE, 2003.

[14] BARRETT P R F ,LITTLEJOHN J W ,CURNOW J. Long-term algal control in a reservoir using barley straw [J]. Hydrobiologia, 1999 415 309-313.

[15] 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.

[16] 陆开宏,晏维金,苏尚安. 富营养化水体治理与修复的环境生态工程:利用明矾浆和鱼类控制桥墩水库蓝藻水华 [J]. 环境科学学报, 2002, 22(6) 732-737.

[17] 谢平. 水生动物体内的微囊藻毒素及其对人类健康的潜在威胁 [M]. 北京:科学出版社, 2006.

[18] 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 1, 2001(1) :17-23.

[19] 孔海南. 应用扬水筒技术控制饮用水源水库富营养化的工程规模实验研究 [C]//中国环境科学学会水环境分会. 2005 中国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集. 宜昌:中国环境科学学会水环境分会, 2005 27-32.

[20] 尹澄清,兰智文. 富营养化水体中藻类生长限制因素的确定及其应用 [J]. 环境化学, 1993, 13(5) 380-386.

[21] 小岛贞男,饭田稻作,滑川明夫. 局部遮光控制藻类(微囊藻属)的验证研究 [J]. 用水与废水(日本), 2000, 42(5) 5-12.

[22] 孙扬才,陈雪初,孔海南,等. 遮光法控藻的人工围隔试验研究 [C]//中国环境科学学会水环境分会. 2006 中国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集. 上海:中国环境科学学会水环境分会, 2006 393-397.

[23] 陈雪初,孙扬才,孔海南,等. 消光处理对源水中铜绿微囊藻增殖的影响 [C]//中国环境科学学会水环境分会. 2006 中国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集. 上海:中国环境科学学会水环境分会, 2006 608-614.

[24] 濮培民,胡维平,逢勇,等. 净化湖泊饮用水源的物理-生态工程实验研究 [J]. 湖泊科学, 1997, 9(2) 159-167.

[25] 濮培民,王国祥,李正魁,等. 健康水生系统的退化及其修复:理论、技术及应用 [J]. 湖泊科学, 2001, 13(3) 193-203.

[26] 秦伯强,杨柳燕,陈非洲,等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用 [J]. 科学通报, 2006, 51(16) :1857-1866.

[27] 秦伯强,胡维平,刘正文. 太湖梅梁湾水源地通过生态修复净化水质的试验 [J]. 中国水利, 2006(17) 23-29.

[28] 王洪君,王为东,卢金伟,等. 植被型岸带对藻类的捕获与水源保护研究 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(7) 1-8.

[29] 郑建军,钟成华,邓春光. 试论水华的定义 [J]. 水资源保护, 2006, 22(5) 45-47.

(收稿日期 2006-12-14 编辑:高渭文)

+++++

(上接第 9 页)

[14] 喻寿益,郭观七. 一种改善遗传算法全局搜索性能的小生境技术 [J]. 信息与控制, 2001(6) 526-530.

[15] 周北岳,邓斌,郭观七. 基于小生境技术的改进遗传算法研究 [J]. 机械强度, 2002, 24(1) 13-16.

[16] 张兆中,张问银. 一种可实现精确优化的微小生境遗传算法 [J]. 计算机应用, 2005, 29(8) 1903-1905.

[17] 孙才志,潘俊. 水资源的模糊优化调度研究 [J]. 勘察科学技术, 2000(4) 3-6.

[18] 赵得军,洪林,李远华,等. 效益系数年际动态变化的水资源合理配置 [J]. 中国农村水利水电, 2004(9) 34-36.

(收稿日期 2006-12-26 编辑:高渭文)