

文章编号:1001-4179(2015)19-0079-04

湖库水华治理的微电流电解抑藻技术研究

林 莉^{1,2}, 李 青 云^{1,2}, 黄 茁^{1,2}

(1. 长江科学院 流域水环境研究所, 湖北 武汉 430010; 2. 长江科学院 流域水资源与生态环境科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要:相比于现有的水华末端治理方式,采用以预防为主的思路进行水华防控,避免水华发生带来的不利影响,是更为经济有效、生态友好的水华治理措施。详细阐述了控制藻类“种源”的微电流电解抑藻技术,对微电流电解抑藻技术的最佳应用时机、技术原理、应用效果等进行了分析,深入探讨了微电流电解技术抑制湖库藻类生长的机理,同时开展了技术应用研究。结果表明,移动式微电流电解对湖泊藻类生长具有良好的抑制效果,2 h 的处理可使 50 m³ 水体中 85% 的藻类失活。

关 键 词:藻类;微电流电解;四阶段理论;抑藻机理;水华治理

中图法分类号: X52

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.19.020

1 研究背景

当前我国湖泊水库富营养化问题日趋严重,水华频繁发生,引发了环境污染、水质安全等多方面问题,甚至导致了严重的饮用水危机,在国内外引起极大关注^[1]。研究水华控制技术是当前水生态文明建设、实现美丽中国、实施最严格水资源管理制度的一项重要任务。

传统的藻类治理大多是水华发生后采取措施,包括机械捕捞、超声法、化学药剂和生物法等,这些方法各有优势和不足。机械捕捞打捞的大量藻类还需后续处理^[2];超声法无持续抑藻能力^[3];化学药剂灭藻可能造成二次污染的问题制约了其推广应用^[4];生物治理对环境有一定要求,对复杂多样的藻类难以用一种或几种生物实现抑制^[5]。水华爆发后水体中藻细胞浓度高,治理难度较大,且危害已经产生,已有治理技术不能完全解决水华治理问题,而完全依靠削减氮磷营养盐来防止水华发生尚难以做到,因此,对于藻类治理还需开拓新思路和新办法。

微电流电解抑藻技术是采用微小电流,在藻类生长繁殖初期对其进行抑制,将其长势控制在一定范围

和强度内,达到控制藻类生长、避免水华暴发的目的。笔者的前期研究发现,微电流电解对蓝藻具有良好的杀灭和抑制效果^[6-9]。本文通过文献调研、室内实验、野外应用等手段,结合前期研究成果,对微电流电解抑藻技术的最佳时机、技术原理、应用效果等进行分析,深入探讨微电流电解技术抑制湖泊藻类生长的机理。

2 微电流电解抑藻最佳时机研究

长江中下游地区是我国浅水湖泊最集中的区域,多数湖泊平均水深只有 2 m^[10],是目前世界上富营养化问题最严重的地区之一^[11]。“三湖”中的太湖与巢湖都位于该地区,且均为浅水湖泊。长江流域目前修建了众多水库,许多水库支流库湾由于水力学条件改变、流速变缓,加上氮磷营养盐含量较高,极易发生水华现象。目前,对于水华发生的诱因和机理尚不完全清楚。有研究者提出蓝藻水华成因的“四阶段理论”^[12],即在四季分明、扰动剧烈的长江中下游浅水湖泊中,蓝藻的生长与水华的形成可分为越冬休眠、春季复苏、生长繁殖、聚集上浮 4 个阶段。在富营养化水体中,当温度、光照、营养物质、水力条件等都适宜时,蓝藻开始复苏生长,迁移到水中,群体繁殖迅速,形成气

收稿日期:2015-08-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51309019);中央级公益性科研院所基本科研业务项目(CKSF201514/SH)

作者简介:林 莉,女,高级工程师,博士,主要从事水环境治理和水资源保护研究。E-mail:artemis066@163.com

囊浮到水体表面,由此导致水华的形成^[13]。

蓝藻生长的阶段大体可以分为:迟滞期、对数生长期、稳定期和死亡期。细分起来可以分为:迟滞期、加速增长期、最大增长期、减速增长期、稳定期、死亡期。蓝藻的生长曲线见图 1。在自然环境条件下,水中营养盐不是无限的,因此藻类生长不会一直呈指数规律增长,当营养盐耗尽后,增长即自行停止,然后不断死亡。

通过文献调研和分析,根据蓝藻水华成因的“四阶段理论”,可以得知,采用微电流电解技术抑制湖泊蓝藻生长,控制蓝藻“种源”复苏繁殖的最佳时机是在蓝藻的对数生长前期。蓝藻通常在水下 1 m 处聚集,因此,在水下 0.5 ~ 1 m 投加微电流电解电极,可达到抑藻目的。

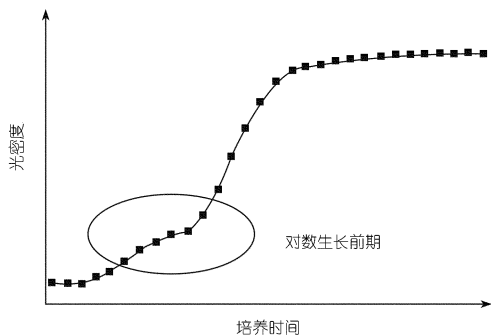


图 1 蓝藻的生长曲线

3 电解条件研究和设备开发

笔者前期通过室内小型试验研究,探讨了微电流电解技术有效抑制典型蓝藻铜绿微囊藻的最优电解条件^[6]。研究表明,最优的电极材料组合为:以钎钛合金作为阳极,不锈钢作为阴极;电解抑藻效率随电流密度和电流时间的增加而有所提高;微电流电解的电流密度达到 10 mA/cm² 及以上时抑藻效果较为明显,电解时间应达到 10 min 以上;对于体积 100 mL、初始浓度为 5 × 10⁵ 个/mL 的藻液,以 10 mA/cm² 的电流密度电解处理 15 min 即可实现对藻细胞的完全持续抑制。

基于微电流电解有效抑藻的电解条件,设计并制作了移动式微电流电解设备。移动式微电流电解设备(见图 2)为船体结构,由船型平台、太阳能电池板、蓄电池、电极探头、水质在线检测单元、水质净化控制单元和推进器组成。船型平台用于搭载设备及在湖库水面移动;电极探头安装在船体底部,与水体接触;太阳能电池板和蓄电池用于电源的供给。移动式微电流电解设备运行原理见图 3,水质在线检测单元检测水体藻类叶绿素含量,水质净化控制单元控制微电流电

单元的开启和关闭;设备在水域表面移动过程中,通过微电流电解释放活性物质,对藻类进行杀灭和抑制;指令显示单元用于水质检测数据的显示和指令控制。

除移动式设备外,微电流电解抑藻装置还可采用浮标式。浮标式设备适用于小型景观水体、湖库型饮用水源地取水口、大型湖泊岸边带等面积较小的区域。

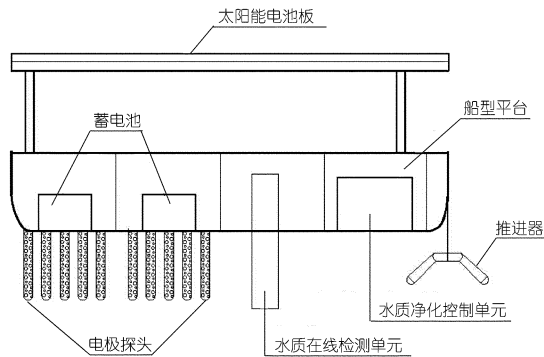


图 2 移动式微电流电解设备示意

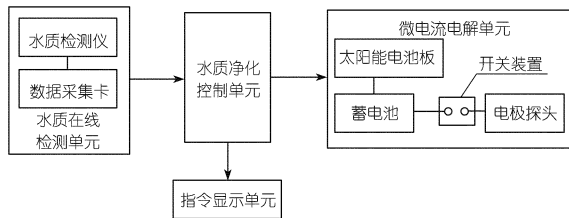


图 3 移动式微电流电解设备运行原理

4 微电流电解抑藻机理

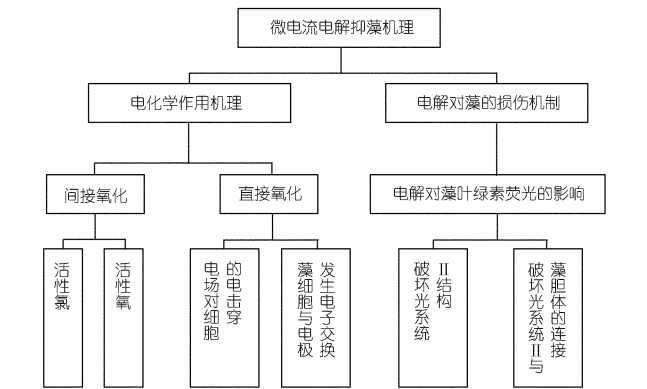
以铜绿微囊藻为代表性藻类,在体积为 100 mL 的烧杯中采用板状电极材料进行电解,采用钎钛合金电极作为阳极、不锈钢电极作为阴极。电极有效工作面积为 2.5 cm × 5.5 cm,极板间距为 4 cm。电解过程中使用磁力搅拌器匀速搅拌。电解采用直流稳压电源(30 V/5A)供电。从微电流电解间接氧化作用的抑藻机理,以及微电流电解对藻类生理生态特征的影响两个方面,探索微电流电解抑藻的作用机理。

微电流电解间接氧化作用的抑藻效能研究结果表明^[7]:微电流电解过程中确实产生了具有抑藻效果的活性物质,足量的活性物质对铜绿微囊藻具有良好的抑制效果,可导致已受电解破坏的藻细胞不能进行自身修复而彻底死亡。检测比较电解产生的活性物质中活性氯与过氧化氢的生成量,发现活性氯与过氧化氢都具有一定的抑藻能力,但活性氯的抑藻能力高于过氧化氢,在活性物质抑藻过程中起主导作用。

微电流电解对铜绿微囊藻叶绿素荧光参数的影响试验结果表明^[8-9]:对于其他条件一定的藻液,微电流电解抑藻存在相应的临界电流阈值;当电流密度小于

临界值时,电解对藻细胞的胁迫未超过藻的耐受能力,藻液可在后期培养中恢复光合活性;若电流密度大于临界值,电解对藻的胁迫会超过藻的耐受能力,破坏藻细胞光系统Ⅱ结构,并阻断光系统Ⅱ和捕光天线藻胆体之间的连接,使其无法进行光合作用,最终导致藻细胞死亡。

考虑微电流电解氧化作用机理和微电流电解对藻类叶绿素荧光特征的影响,并结合相关文献^[14]进行分析,初步得出微电流电解抑藻机理如图 4 所示。微电流电解具有直接氧化和间接氧化两种作用;间接氧化作用通过电解产生活性氯和活性氧,对藻类进行氧化处理,间接氧化产生的活性氯起主要作用;直接氧化作用包括电场对细胞的电击穿影响细胞代谢功能,以及吸附到电极表面的藻细胞与电极发生电子交换,导致细胞内酶被氧化,使细胞失去活性等^[14]。微电流电解对藻的损伤包括对藻细胞结构、酶活等多方面的损伤。从电解对藻类叶绿素荧光的影响方面分析发现,微电流电解破坏了藻细胞光系统Ⅱ与捕光天线藻胆体之间的连接,以及藻细胞光系统Ⅱ结构,最终导致了藻细胞的死亡。



5 应用实例

5.1 野外围隔试验

采用微电流电解抑藻技术在野外实际湖泊中开展了围隔试验。向尺寸为 1 m×2 m×1 m 的围隔中注入 1.2 t 自然湖泊水,电解前围隔中水体的初始条件为:总磷浓度为 0.3 mg/L,总氮浓度为 3 mg/L,藻细胞浓度为 5×10⁴ 个/L。采用板状电极材料,以钎钛合金和不锈钢分别作为阳极和阴极。电极有效工作尺寸为 50 cm×15 cm,极板间距 2 cm。微电流电解在电流密度为 9 mA/cm² 的条件下进行,电解时间为 2 h。电解处理后,将围隔水体放置 5 d。

5 d 后 2 个围隔中藻类生长情况见图 5。由图 5 可以看出,未电解组藻液已变成绿色,藻细胞密度经检

测达到 5 亿个/mL 以上;而电解组水体清澈透明,藻细胞密度为 1 万个/L 以下,藻类生长得到了有效抑制。

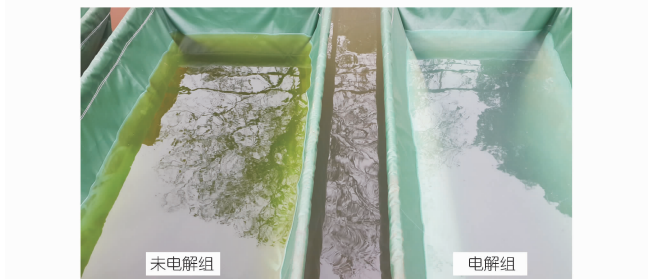


图 5 围隔试验中电解组与不电解组水样放置 5 d 后的抑藻效果对比

5.2 应用示范

采用移动式微电流电解设备在武汉市后官湖开展了应用研究(见图 6),考察了微电流电解设备对富营养化水体中藻类生长的抑制效果。研究结果表明,微电流电解对湖泊藻类具有较强的抑制和杀灭效果,2 h 的处理使 50 m³ 水域中藻类叶绿素 a 值从 68 μg/L 降至 10 μg/L 以下,藻类失活率达 85%。



图 6 移动式微电流电解设备野外示范应用

6 结论与展望

(1) 根据蓝藻水华成因的“四阶段理论”,结合文献调研和分析,确定了采用微电流电解技术抑制湖泊蓝藻生长,控制蓝藻“种源”复苏繁殖的最佳时机是蓝藻的对数生长前期。

(2) 微电流电解具有直接氧化和间接氧化两种作用,间接氧化作用中电解产生的活性氯起主要作用,活性氧起辅助作用。微电流电解破坏了藻细胞光系统Ⅱ和捕光天线藻胆体之间的连接,以及藻细胞光系统Ⅱ结构,最终导致了藻细胞的死亡。

(3) 野外围隔试验和应用研究表明,微电流电解对湖泊藻类的生长具有良好的抑制效果。移动式微电流电解设备经过 2 h 的处理可使 50 m³ 湖泊水体藻类失活率达 85%。

本技术适用于湖库型饮用水源地取水口,大型湖泊岸边带,以及小型湖泊、池塘、景观水体等的治理中,

具有广阔的应用前景,今后应进一步开展微电流电解抑藻技术推广应用,为长江流域湖库水华治理提供技术支撑。

参考文献:

[1] 谢平.太湖蓝藻的历史发展与水华灾害[M].北京:科学出版社,2008.

[2] 陈前,杨春和,苏璐璐.国内蓝藻治理中末端处置方法研究进展[J].安徽农业科学,2009,37(36):18027-18029.

[3] 乔俊莲,董磊,董敏殷,等.高频超声波对微囊藻毒素释放及降解的特性研究[J].中国给水排水,2009,25(17):94-96.

[4] 王家齐,郑宾国,刘群,等.介质阻挡放电对湖泊水华蓝藻的去除[J].环境工程学报,2012,6(8):2477-2482.

[5] 陆貽超,王国祥,李仁辉.超声波和改性粘土集成技术在去除蓝藻水华上的应用[J].湖泊科学,2010,22(3):421-429.

[6] 林莉,李青云,黄苗,等.微电流电解对铜绿微囊藻的持续抑制研究[J].华中科技大学学报:自然科学版,2012,40(10):87-90.

[7] 冯隽,林莉,李青云.氯离子浓度与电流密度对电解抑制铜绿微囊藻生长的影响[J].长江科学院院报,2015,32(6):53-58.

[8] Lin L,Feng C,Li QY,et al. Effects of electrolysis by low - amperage electric current on the chlorophyll fluorescence characteristics of *Microcystis aeruginosa* [J]. Environmental Science and Pollution Research,2015, DOI 10. 1007 /s11356 - 015 - 4708 - z.

[9] 林莉,冯隽,李青云,等.微电流电解对铜绿微囊藻叶绿素荧光特性的影响[J].湖泊科学,2015,27(5):873-879.

[10] 王苏民,窦鸿身.中国湖泊志[M].北京:科学出版社,1998.

[11] 秦伯强.长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J].湖泊科学,2002,14(3):193-202.

[12] 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.

[13] 郑宾国,罗兴章,张继彪,等.湖泊底泥中蓝藻越冬和复苏行为研究进展[J].环境污染与防治,2011,33(2):85-89.

[14] Xu Y,Yang J,Ou M,et al. Study of microcystis aeruginosa inhibition by electrochemical method [J]. Biochemical Engineering Journal, 2007,36(3):215-220.

(编辑:常汉生)

Inhibition of cyanobacteria by low - amperage electric current electrolysis in water bloom control of lake and reservoir

LIN Li^{1,2}, LI Qingyun^{1,2}, HUANG Zhuo^{1,2}

(1. Basin Water Environmental Research Department, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. Key Lab of Basin Water Resource and Eco - environmental Science in Hubei Province, Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Compared with the traditional algae treatment mode that is conducted after the bloom, the treatment measure that prevents the algae bloom from its occurring can avoid the unfavorable influence, which is more economic, effective, and environmental friendly. The inhibition of cyanobacteria species sources by low - amperage electric current electrolysis is introduced, and the best application time, mechanisms and effects of the technology are analyzed. The inhibition mechanism of cyanobacteria in lake and reservoir by low - amperage electric current electrolysis are further discussed and the application study was carried out. The result shows that the inhibition of algae by the mobile equipment of low - amperage electric current electrolysis for water bloom control was effective, 85% of the algae in the water area of 50m3 was inactivated by 2h treatment.

Key words: algae; low - amperage electric current electrolysis; four - stage theory; cyanobacteria; inhibition; mechanism; water bloom control

