

# 双季铵盐与溶藻细菌协同控藻特性研究

郭惠娟<sup>1</sup>, 孙再庆<sup>2</sup>, 沈红池<sup>1</sup>, 吴韵秋<sup>1</sup>, 张文艺<sup>1</sup>

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州市武进环境监测站, 江苏 常州 213000)

**摘要:** 针对夏季鱼塘藻类大量繁殖, 常规化学法除藻影响水生生物生长和水产品质量, 而生物控藻周期长、见效慢等难题, 利用自主研发的具有除藻作用的双十二烷基  $\gamma$ -双季铵盐 (DBAS) 和从太湖激浪鱼肠道中筛选并培育的高效溶藻细菌 G6 进行协同控藻特性研究, 考察了投加 DBAS、G6 菌产生的协同控藻效果和 DBAS 对 G6 菌溶藻活性的影响。结果表明: 单独投加 10 mg/L 的 DBAS 时, 第 5 天除藻率达到 100%; 单独投加 G6 菌 (菌藻比为 1:10), 第 3 天除藻率达到 42%; 协同控藻时 DBAS 投加量为 2 mg/L、G6 菌藻投加比为 1:8, 第 6 天除藻率为 82%, 协同控藻效果明显。DBAS、G6 协同控藻机制可能是: DBAS 先对 G6 菌产生作用, 降低了除藻效率, 当药剂与 G6 菌的作用达到平衡后, G6 菌与 DBAS 产生共同除藻作用, 侵蚀藻细胞壁, 破坏藻细胞结构, 藻细胞死亡、沉淀, 从而达到控藻目的。

**关键词:** 协同控藻; 双十二烷基  $\gamma$ -双季铵盐; 溶藻细菌

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)03-0062-06

## Synergistic Removal of Algae Using Bis-quaternary Ammonium Salt and Algicidal Bacteria

GUO Hui-juan<sup>1</sup>, SUN Zai-qing<sup>2</sup>, SHEN Hong-chi<sup>1</sup>, WU Yun-qiu<sup>1</sup>, ZHANG Wen-yi<sup>1</sup>

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Environmental Monitoring Station of Wujin District in Changzhou City, Changzhou 213000, China)

**Abstract:** In the prevention of algal bloom in summer, the conventional chemical method can remove algae but also affect the growth of aquatic organisms and the quality of aquatic products. A synergistic algae removal process using di-dodecyl  $\gamma$ -bis-quaternary ammonium salt (DBAS) and algicidal bacteria (G6) was developed. The separate and synergistic algae removal effect of DBAS and G6 were investigated. The results showed that: when 10 mg/L DBAS was added separately, the 5-day removal rate of algae reached 100%. For the G6 bacteria (G6 : algae was 1 : 10), the 3-day removal rate of algae reached 42%. When the DBAS was 2 mg/L and the G6 : algae was 1 : 8, the 6-day removal rate of algae was 82%. A possible mechanism of synergistic removal of algae was as follows: DBAS initially killed bacteria, reduced the removal efficiency of algae, until a balance was reached between the DBAS and G6 bacteria; then, G6 bacteria and DBAS worked together to kill algae, penetrated the algae cell

wall, destroyed the structure of algae cell, which resulted in algae cell death and sedimentation.

**Key words:** synergistic removal of algae; di-dodecyl  $\gamma$ -bis-quaternary ammonium salt (DBAS); algicidal bacteria

水华会造成水体恶臭、溶解氧减少,最终破坏水体生态平衡<sup>[1-2]</sup>。铜绿微囊藻是淡水体系中分布最广、生长最集中、暴发最频繁的藻类,也是造成水华的主要藻类之一<sup>[3]</sup>。铜绿微囊藻会产生对肝脏具有损害力的微囊藻毒素(MCs),它的食用量超过一定指标会致癌<sup>[4-5]</sup>。传统的除藻方法有人工打捞、曝气法、超声波灭藻、活性炭吸附等,这些物理方法成本高且除藻不彻底<sup>[6-8]</sup>。在藻类繁殖旺季,通常会投加一些化学药剂如硫酸铜、高锰酸钾或者氯<sup>[9-12]</sup>。化学试剂能快速除藻且效果显著,但是投加过多药剂会改变水体pH值,还会造成二次污染<sup>[13]</sup>。菌剂除藻近年来受到广泛关注,其价格便宜、来源广泛,是一种价廉环保的除藻方式<sup>[14-18]</sup>。

从环保性和价格方面考虑,菌剂除藻有一定的优势,但菌剂除藻见效慢,在蓝藻大量暴发时去除能力不够。综合化学除藻快速、高效和生物除藻周期长的特点,利用本课题组研发的具有杀藻作用的双十二烷基 $\gamma$ -双季铵盐(DBAS)<sup>[19]</sup>和从太湖激浪鱼肠道中筛选并培育的高效溶藻细菌G6<sup>[20]</sup>进行协同控藻研究,在G6菌剂除藻的基础上投加DBAS,考察DBAS和G6菌的联合控藻效果,探究二者联合控藻的特性,旨在为养殖水体夏秋季节藻类治理提供技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

选用的藻种为铜绿微囊藻(*M. aeruginosa*) FACHB-905,购于中科院武汉水生生物研究所国家淡水藻种库。将购买的藻静置于光照培养箱中培养,培养箱条件:温度为28℃、光照度为2 500 lx、光暗周期比为12 h:12 h。

溶藻细菌LB液体培养基:蛋白胨为10 g/L,氯化钠为10 g/L,酵母浸膏为5 g/L,pH值为7.2。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 DBAS溶液配制

称取1 g DBAS样品于100 mL烧杯中,加30 mL蒸馏水与DBAS搅拌至完全溶解后倒入100 mL容量瓶,清洗两次烧杯并将清洗液引入容量瓶,定容,配成质量浓度为10 g/L的溶液,备用。

#### 1.2.2 G6菌的培养

将实验室保藏的G6菌用接种环挑取一株接入已经高温灭菌且冷却后的液体培养基中。将接种过G6菌的培养液平稳放置在转速为130 r/min、温度为30℃并保持条件不变的振荡培养箱内振荡18 h。

#### 1.2.3 藻类去除率的计算

利用乙醇法提取叶绿素,测定每天的叶绿素a(Chl-a)含量并计算藻类去除率。

$$\text{藻类去除率} = \frac{\text{空白组 Chl-a} - \text{处理组 Chl-a}}{\text{空白组 Chl-a}} \times 100\% \quad (1)$$

#### 1.2.4 DBAS投加量对除藻的影响

向100 mL藻液中添加之前已经配制好的10 g/L的DBAS,使其在藻液中浓度分别为5、8、10、12 mg/L,并于温度为28℃、光照度为2 500 lx、光暗周期比为12 h:12 h的条件下在光照培养箱中静置培养,每天吸取10 mL液体测定Chl-a值,并与空白样比较,得到藻类去除率和剩余率。

#### 1.2.5 投加DBAS对藻液OD<sub>680</sub>的影响

向100 mL藻液中添加之前已配制好的10 g/L的DBAS,使其在藻液中浓度分别为5、8、10、12 mg/L,并于温度为28℃、光照度为2 500 lx、光暗周期比为12 h:12 h的条件下在光照培养箱中静置培养,每天取样测定不同DBAS浓度下藻液的OD<sub>680</sub>值。

#### 1.2.6 DBAS投加量对G6菌溶藻效果的影响

将培养18 h的菌液按照菌藻比为1:10投加在新鲜藻液中,并同时向藻液中投加DBAS,使其浓度分别为0、1、2、3、4、5 mg/L。将溶液置于光暗周期比为12 h:12 h的光照条件下进行溶藻试验,并保持光照培养箱温度为28℃、光照度为2 500 lx不变,每天吸取10 mL液体测定Chl-a值,并与空白样比较,得到藻类去除率和剩余率。

#### 1.2.7 G6菌投加量对协同控藻的影响

向新鲜藻液中投加DBAS溶液使其浓度达到2 mg/L,将培养18 h的菌液分别按照菌藻比为1:50、1:25、1:16、1:12.5、1:50投加。于光暗周期比为12 h:12 h的光照条件下进行溶藻试验,保持光照培养箱温度为28℃、光照度为2 500 lx,每天吸

取 10 mL 液体测定 Chl-a 值,并与空白样比较,得到藻类去除率和剩余率。

### 1.2.8 DBAS 投加时间对协同控藻的影响

分别在第 1、3、5 天添加 2 mg/L 的 DBAS,于光暗周期比为 12 h : 12 h 的条件下进行溶藻试验,保持光照培养箱温度为 28 ℃、光照度为 2 500 lx,每天吸取 10 mL 液体测定 Chl-a 值,并与空白样比较,得到藻类去除率和剩余率。

### 1.2.9 显微镜观察 DBAS 与 G6 菌感染的藻细胞

在新鲜藻液中分别投加 3 mg/L 的 DBAS 与 10% 的 G6 菌液,反应 3 d 后分别在新鲜藻液、投加 DBAS 与 G6 菌液的溶液中滴加鲁哥氏液,24 h 后取一滴样品液滴在载玻片上用显微镜观察。

## 2 结果与讨论

### 2.1 DBAS 的投加量对除藻的影响

试验结果表明,投加的 DBAS 浓度越高,对铜绿微囊藻的去除速率越快,去除率越大(见图 1)。藻液中 DBAS 浓度介于 5 ~ 12 mg/L,均能起到除藻作用。在第 1 天,5 mg/L 的 DBAS 对藻的去除率就达到 56.5%,随着药剂作用时间的增加,去除率呈先直线上升后趋于平缓的趋势,随着藻的死亡量剧增,消耗的 DBAS 也增加,在第 7 天时剩余药剂只能杀死新增长的藻,无法再进行进一步的去除。当加入浓度为 8 mg/L 的 DBAS 时,初始去除率高于 DBAS 为 5 mg/L 时的去除率,第 8 天藻全部死亡,并且随着时间的增加,藻没有重新生长的趋势,说明 DBAS 的除藻效果很彻底。当 DBAS 浓度为 10、12 mg/L 时,除藻能力相同,所以 10 mg/L 是 DBAS 的最佳浓度,比 DBAS 浓度为 8 mg/L 时去除速率更快,在第 5 天对藻类的去除率就达到 100%,并且能够保持这种效果。

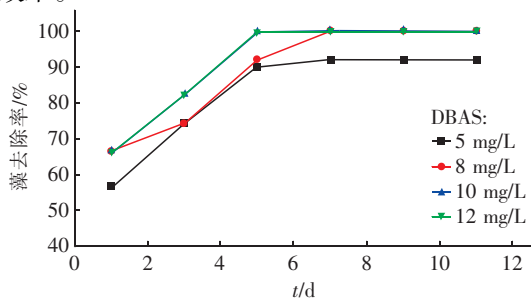


图 1 不同 DBAS 浓度的除藻效果

Fig. 1 Removal effect of algae under different DBAS concentrations

### 2.2 投加 DBAS 对 OD<sub>680</sub> 的影响

图 2 是投加不同浓度 DBAS 后藻液的 OD<sub>680</sub> 值。可以看出,未投加药剂的藻液其 OD<sub>680</sub> 值随着时间变化越来越大,可能是因为没有药剂的抑制,藻生长较快,观察到藻液颜色随着时间变化也越来越绿。投加 DBAS 后藻液 OD<sub>680</sub> 值均比未加 DBAS 时的初始值低,并且在 12 d 时仍比空白样的 OD<sub>680</sub> 值要低。加药后藻液绿色随时间变化慢慢消退,说明 OD<sub>680</sub> 值减小的原因是藻在药剂作用下被抑制或杀死,并且效果比较持久。

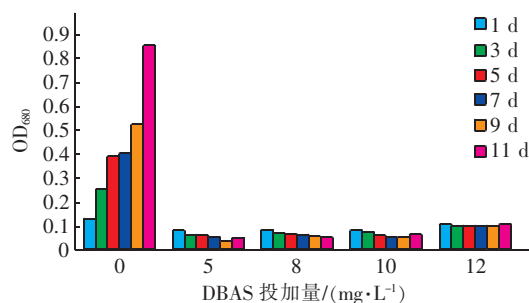


图 2 不同 DBAS 浓度下的藻液 OD<sub>680</sub>

Fig. 2 OD<sub>680</sub> of algae under different DBAS concentrations

### 2.3 DBAS 浓度对协同控藻效果的影响

单独投加 G6 菌,第 3 天去除率达到 42%<sup>[20]</sup>,但是随着时间的增加,菌的生长会导致水体变浑浊,而药剂既可杀藻又可杀菌。所以本试验向菌藻比为 1 : 10 的藻液中投加浓度为 1 ~ 5 mg/L 的 DBAS,试验结果见图 3。

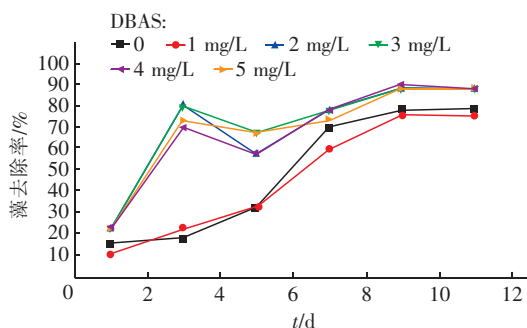


图 3 DBAS 浓度对 G6 菌和 DBAS 协同控藻效果的影响  
Fig. 3 Effect of DBAS concentrations on synergistic removal of algae by strain G6 and DBAS

由图 3 可以看出,未加 DBAS 时,G6 菌溶藻效果比较缓慢,到第 9 天时去除率为 77.5%,较投加 DBAS 的去除效果略低。投加 1 mg/L 的 DBAS 以后,第 1 天的除藻效果反而比只加菌时更差,可能是



因为 DBAS 浓度较低时先选择杀灭量少的 G6 菌,从而导致菌对藻的去除效果下降,而随着 G6 菌的增加,菌对藻的去除作用增强,导致藻的生长速率低于藻的去除速率,藻含量越来越少;G6 菌由于受到 DBAS 的影响,生长速率相应变慢,最后的去除效果要比只加菌时差。继续增加 DBAS 的浓度,可以很明显的看到藻的去除速率加快,当投加 2~5 mg/L 的 DBAS 时,菌药联用对藻的去除作用更加显著,第 3 天时去除率就能达到 70%,但在第 5 天时去除率都有所下降,原因可能是第 1 天所加的 DBAS 先与藻液中含有更高的藻作用,使得去除率急剧上升,随着藻含量的减少以及 G6 菌的增加,DBAS 开始对 G6 菌产生作用,菌与药剂相互作用,使得藻又得以生长;在第 5 天之后藻的去除率又平稳增加,可能是 DBAS 与 G6 菌之间的作用达到一个平衡,这个平衡使得 G6 菌能够正常繁殖,而不作用于 G6 菌的 DBAS 和 G6 菌能够一起对藻进行降解。

#### 2.4 G6 菌投加量对协同控藻效果的影响

单独投加菌液时,为了防止菌生长过度造成水体浑浊,菌藻比为 1:10 时除藻效果最佳。本试验投加的 DBAS 既能杀藻也能杀死一定量的菌,在确定 DBAS 浓度为 2 mg/L 时,投加不同量的 G6 菌观察溶藻效果,结果见图 4。

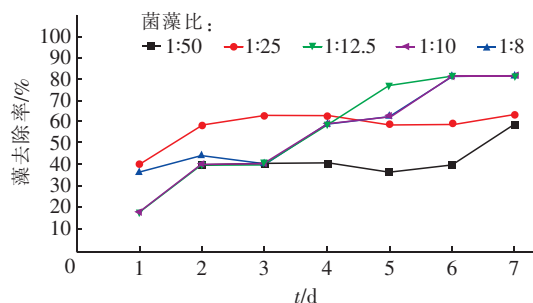


图4 G6 菌投加量对 G6 菌和 DBAS 协同控藻效果的影响

Fig.4 Effect of G6 dosage on synergistic removal of algae by strain G6 and DBAS

由图 4 可以看出,当菌藻比为 1:50 时,第 1 天的去除率较高,可能是因为菌浓度过低时 DBAS 优先选择与藻反应,而当菌繁殖到一定浓度后,DBAS 开始杀菌;菌的初始浓度较低导致菌繁殖量不多,DBAS 杀死了大量菌而消耗了药剂量,因此最终溶藻效果不佳。当菌藻比为 1:25 时,前 4 d 的溶藻效果较好,但是到第 4 天后藻的浓度又增加了,说明此后药剂和菌的溶藻效果减弱了,因为在第 4 天后

DBAS 主要作用是抑制并杀死溶藻细菌 G6,抑制藻生长的力量削弱了,藻的生长速率加快。当菌藻比为 1:8、1:12.5 和 1:10 时,去除率整体呈上升趋势,药剂和菌同时对藻产生抑制作用,在第 6 天时去除率达到了 82%。从图 4 还可知,当菌藻比为 1:12.5 和 1:10 时,在前几天溶藻效果比菌浓度低的试验组差,说明投加的菌达到一定浓度后,DBAS 先对菌产生作用,降低了其除藻率,等到药剂与菌的作用保持平衡后,菌与药剂共同杀藻。综上,当 DBAS 浓度为 2 mg/L 时,最适菌藻比为 1:8。

#### 2.5 DBAS 投加时间对协同控藻的影响

向新鲜藻液中按照菌藻比为 1:8 投加 G6 菌液后,分别在第 1、3、5 天添加 2 mg/L 的 DBAS,考察 DBAS 投加时间对协同控藻的影响,结果见图 5。可以看出,最初未加药的试验组由于所加菌剂较少,在第 1 天的去除率为零,而既加菌又加药的试验组在初始阶段主要由药剂进行除藻。随着菌的增殖,去除率也得到提高,比较单独加菌和第 5 天投加药剂的去除率,前 4 d 的溶藻效果相同,但第 5 天加入 DBAS 后除藻效果反而被削弱,说明此时投加的 DBAS 主要与菌发生反应,并没有起到除藻效果,而大量菌被 DBAS 杀死,导致菌对藻的去除效果减弱。第 3 天投加 DBAS,此时溶液中菌含量不高,少量菌被 DBAS 杀死,之后菌与药剂协同控藻。第 1 天加入 DBAS,除藻效果除在第 3 天受到 DBAS 的抑制,其余时间均呈直线上升趋势,相较于单独投菌,去除率增加了 21%。所以在藻类暴发时可以先加药控制再投加菌剂。

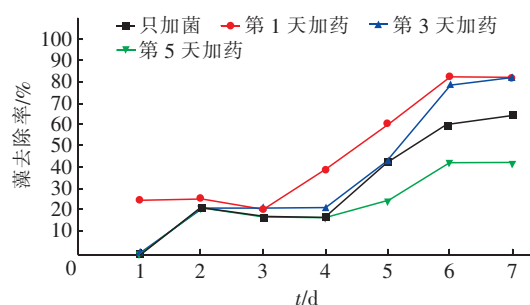


图5 DBAS 投加时间对 G6 菌和 DBAS 协同控藻效果的影响

Fig.5 Effect of DBAS dosing time on synergistic removal of algae by strain G6 and DBAS

#### 2.6 藻细胞形态破坏的显微镜分析

利用倒置生物显微镜在 1 000 倍下可以观察到未加药或加菌前的铜绿微囊藻细胞是完整的藻细胞

形态,加了 DBAS 或 G6 菌之后藻细胞明显破碎(见图6),说明加药和加菌都能侵蚀藻的细胞壁,破坏藻细胞的结构。

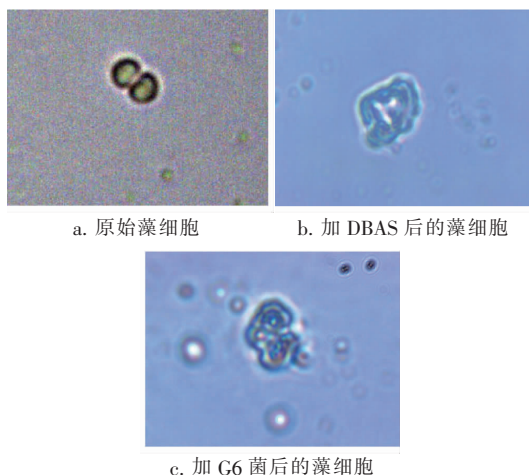


图6 加 G6 菌和 DBAS 前后藻细胞形态

Fig.6 Morphology of algal cells before and after adding strain G6 and DBAS

## 2.7 DBAS 与 G6 菌的除藻效果

在新鲜藻液中分别投加 DBAS 溶液和 G6 菌液,随反应时间的增加,藻液中绿色减少,同时测得叶绿素 a 含量降低。观察发现藻死亡率升高,瓶底的白色絮状物质增多,加入 G6 菌的瓶内沉积物更多,一部分为杀死的藻,另一部分则是生长过多的细菌。第6天时,两锥形瓶中的叶绿素 a 含量几乎为零,此时已完全看不到绿色。加入 DBAS 的藻液呈白色且较透明,而加入 G6 菌的锥形瓶内溶液较黄且较加入 DBAS 的溶液浑浊,生长的菌体大部分沉于瓶底。

## 3 结论

① 投加 DBAS 与 G6 菌协同控藻,当 DBAS 投加量为 2 mg/L 时,菌药联用对藻的去除作用更显著,但去除率先下降后平稳增加,可能是因为药剂 DBAS 与 G6 菌之间的作用达到平衡。

② DBAS 与 G6 菌协同控藻机制可能是:DBAS 先对 G6 菌产生作用,降低了其除藻效率;DBAS 与 G6 菌的作用达到平衡后,二者共同灭藻,侵蚀藻细胞壁,破坏藻细胞结构,使得藻细胞死亡、沉淀。

## 参考文献:

[1] 葛仙梅,朱铁才. 饮用水源地的水华对人体健康风险评估[J]. 环境与发展,2014,26(3):166-167.

Ge Xianmei, Zhu Tiecai. Drinking water bloom evaluation of risks to human health [J]. Environment and Development, 2014, 26 (3): 166 - 167 (in Chinese).

[2] 黄奕龙,王仰麟,谭启宇,等. 城市饮用水源地水环境健康风险评价及风险管理[J]. 地学前缘,2006,13(3):162-167.

Huang Yilong, Wang Yanglin, Tan Qiyu, et al. Environmental health risk assessment and management for urban water supply sources [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 162 - 167 (in Chinese).

[3] Chen Y Y, Li J, Wei J, et al. Vitamin C modulates *Microcystis aeruginosa* death and toxin release by induced Fenton reaction [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 321(5): 888 - 895.

[4] 张庭廷,张胜娟. 微囊藻毒素的危害及其分析方法研究进展[J]. 安徽师范大学学报:自然科学版,2014,37(1):53-57.

Zhang Tingting, Zhang Shengjuan. The research progress of microcystins' s harm and its analysis techniques [J]. Journal of Anhui Normal University: Natural Science, 2014, 37(1): 53 - 57 (in Chinese).

[5] Park J A, Yang B, Park C, et al. Oxidation of microcystin-LR by the Fenton process: Kinetics, degradation intermediates, water quality and toxicity assessment [J]. Chem Eng J, 2017, 309: 339 - 348.

[6] Biplob K P, Felicity A R, Fan L H. Treatment of secondary effluent with biological activated carbon to reduce fouling of microfiltration membrane caused by algal organic matter from *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Membrane Science, 2015, 496 (15): 125 - 131.

[7] 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. Algae removal effect by combined process of water-lifting aeration and biological contact oxidation [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23 (15): 13 - 16 (in Chinese).

[8] 胡冬雯. 超声波对3种水华爆发主因蓝藻的控制[J]. 农业环境科学学报,2013,32(7):1432-1436.

Hu Dongwen. The control of three species of blue algae causing algae bloom by ultrasonic [J]. Journal of Agro - Environment Science, 2013, 32(7): 1432 - 1436 (in Chinese).

- [9] 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.  
Wang Xiaoxiong. Application of chemical method in algae removal technology [J]. Guangdong Chemical Industry, 2011, 38(4): 24-26 (in Chinese).
- [10] 江敏, 王婧, 许慧. 蓝藻毒素去除方法研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(12): 3455-3462.  
Jiang Min, Wang Jing, Xu Hui. Research progress on the methods of cyanobacterial toxin removal [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(12): 3455-3462 (in Chinese).
- [11] Carvalho M S, Alves B R R, Silva M F, et al. CaCl<sub>2</sub> applied to the extraction of *Moringa oleifera* seeds and the use for *Microcystis aeruginosa* removal [J]. Chem Eng J, 2016, 304(15): 469-475.
- [12] 柴仕淦, 贾钊, 李欣怡, 等. 季铵盐型 Gemini 表面活性剂去除铜绿微囊藻[J]. 环境科学技术学报, 2016, 6(1): 5-15.  
Chai Shigan, Jia Chai, Li Xinyi, et al. Removal of *Microcystis aeruginosa* by using quaternary ammonium salt of Gemini surfactant [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(1): 5-15 (in Chinese).
- [13] 徐大伟, 施永生, 柳伟, 等. 除藻技术的研究进展[J]. 云南化工, 2007, 34(3): 76-78.  
Xu Dawei, Shi Yongsheng, Liu Wei, et al. Research progress on algae removal technology [J]. Yunnan Chemical Technology, 2007, 34(3): 76-78 (in Chinese).
- [14] 黄现恩, 谷青, 史全良. 一株具有藻毒素降解和溶藻功能细菌的分离鉴定[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3919-3924.  
Huang Xian'en, Gu Qing, Shi Quanliang. Isolation and identification of a microcystins biodegrading and algae-lysing bacterial strain [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3919-3924 (in Chinese).
- [15] 刘萍. 溶藻细菌及其溶藻活性物研究进展[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(9): 86-92.  
Liu Ping. Progress of research on algicidal bacteria and their algicidal bioactive substance [J]. Environmental Pollution and Control, 2016, 38(9): 86-92 (in Chinese).
- [16] Somdee T, Sumalai N, Somdee A. A novel actinomycete *Streptomyces aurantiogriseus* with algicidal activity against the toxic cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* [J]. J Appl Phycol, 2013, 25(5): 1587-1594.
- [17] Jung S W, Kim B H, Katano T, et al. *Pseudomonas fluorescens* HYK0210-SK09 offers species-specific biological control of winter algal blooms caused by freshwater diatom *Stephanodiscus hantzschii* [J]. J Appl Microbiol, 2008, 105(1): 186-195.
- [18] 张安妮, 沈红池, 陈雪珍, 等. 溶藻细菌 F8 与藻毒素降解菌 T1 的原生质体融合研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(6): 1033-1036.  
Zhang Anni, Shen Hongchi, Chen Xuezheng, et al. The study of protoplast fusion with algae-lysing bacteria F8 and microcystin degrading bacteria T1 [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2017, 56(6): 1033-1036 (in Chinese).
- [19] 陈萍, 李文昱, 姚立荣, 等. 双十二烷基  $\gamma$ -双季铵盐杀菌剂的制备及其性能[J]. 过程工程学报, 2015, 15(3): 506-510.  
Chen Ping, Li Wenyu, Yao Lirong, et al. Synthesis and antibacterial performance of didodecyl  $\gamma$ -biquaternary ammonium salt [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2015, 15(3): 506-510 (in Chinese).
- [20] 沈红池, 潘瑞松, 吴旭鹏, 等. 太湖芦苇根系中溶藻菌的分离鉴定及溶藻效果[J]. 土木建筑与环境工程, 2017, 39(5): 123-128.  
Shen Hongchi, Pan Ruisong, Wu Xupeng, et al. Isolation and identification of algicidal bacteria from reed roots in Baidu Port of Taihu Lake and its lytic effect [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2017, 39(5): 123-128 (in Chinese).



作者简介: 郭惠娟(1993-), 女, 江苏连云港人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制与生态修复。

E-mail: 1143861808@qq.com

收稿日期: 2019-06-12