

链霉菌 WH63 的抑藻效应

刘爱民* 闪雅婷 卢存龙 张园园 昌青青 曹圆圆

(安徽师范大学生命科学学院,生态环境与生态安全安徽省高校重点实验室,
重要生物资源的保护和利用研究安徽省重点实验室,芜湖 241000)

摘要 研究链霉菌 WH63 抑藻效应。以铜绿微囊藻作为受试对象,通过平板实验、液体发酵、链霉菌 WH63 发酵产物分析、藻毒素含量测定和水培青菜,探讨链霉菌 WH63 抑藻效应。结果发现,链霉菌 WH63 活菌和过滤除菌后的发酵液均有抑制铜绿微囊藻生长的能力,第4天时接种3%过滤除菌的链霉菌 WH63 发酵液抑藻率就达到了96.7%,且WH63菌株的发酵液具有很好的热稳定性,乙酸乙酯的萃取WH63菌株发酵液抑藻效果最好,其抑藻物质为脂溶性弱极性物质。进一步分析其第15天的抑藻水样,COD含量比正常生长的铜绿微囊藻下降了61.4%,BOD下降了13.4%,藻毒素含量比其低57.9%,继续培养到第40天时都没有回绿现象,且水样清澈。用杀藻后的水样直接浇灌青菜种子,观察种子萌发数,结果表明,处理后的水样发芽率为100%,发芽势、活力指数、茎长和幼苗鲜重比水对照分别提高10.2%、147%、121%和71.6%。实验表明,用链霉菌 WH63 抑藻后的水样具有很好的促植物生长和提高植物抗性的效果,为链霉菌以后运用到水培蔬菜抑藻剂的开发提供了一定的理论基础。

关键词 链霉菌 WH63;抑藻效应;水培;促生长

中图分类号 X172 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2016)07-3931-06 DOI 10.12030/j.cjee.201501233

Inhibitory effect of *Streptomyces* WH63 on *Microcystis aeruginosa*

LIU Aimin* SHAN Yating LU Cunlong ZHANG Yuanyuan CHANG Qingqing CAO Yuanyuan

(Provincial Key Laboratories of Biotic Environment and Ecological Safety, Conservation and Utilization of Biological Resource in Anhui, College of Life Sciences, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China)

Abstract The inhibitory effect of *Streptomyces* WH63 on *Microcystis aeruginosa* was studied. A plating experiment, liquid fermentation, and water planting were used, and the fermentation products of *Streptomyces* WH63 and microcystin content were detected. The growth of *M. aeruginosa* was inhibited by a fermentation liquid that either contained live WH63 or was filtered to remove bacteria. The WH63 fermentation liquid had high thermal stability. The rate of algal inhibition reached 96.7% after inoculating 3% filtered WH63 fermentation liquid on the 4th day. The inhibitory substance extracted from *Streptomyces* WH63 was fat-soluble with weak polarity and had the strongest algal-inhibitory effect when extracted by ethyl acetate. Further analysis of water samples inhibited by WH63 at the 15th day revealed that chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD), and microcystin decreased by 61.4%, 13.4%, and 57.9%, respectively, compared with normal *M. aeruginosa*. The water sample remained clear on the 40th day and did not regreen. The seed germination rate was observed after irrigation a water sample inhibited by WH63. The germination rate was still 100% after treatment and the germination potential, vigor index, stem length, and seedling fresh weight increased by 10.2%, 147%, 121%, and 71.6%, respectively. These results suggested that water samples with *Streptomyces* WH63 have a potent effect on promoting plant growth and improving plant resistance, which provides a theoretical basis for the use of *Streptomyces* to develop hydroponic vegetable algicides.

Key words *Streptomyces* WH63; algae-inhibition effect; hydroponic vegetables; promoting growth

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(1408085MC 53);农业部农村可再生能源开发利用重点实验室开放课题(2013006);校级大学生创新创业训练计划项目(201310370095);2013年国家级大学生校外实践教育基地专业实践项目资助;2013年度校人才培育项目(2013rcpy39);省级重点实验室与省级重点学科开放基金和优秀创新团队建设计划的基金(ACLS-06)

收稿日期:2015-01-30; **修订日期:**2015-03-23

作者简介:刘爱民(1968—),女,博士,副教授,研究方向:环境微生物。E-mail: amliu9393@163.com

* 通讯联系人

随着工业化进程的加快和城市人口的快速增长,水体富营养化已成为全球范围内的普遍问题,产生的藻毒素,危害水生植物,动物及人类健康;影响水体景观和净水工艺等^[1-3]。水体富营养化造成水华现象,铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)是引起水华的主要物种,研制高效抑制其暴发技术^[4],已成为保护水体的重要问题。

工厂化管理生产无公害蔬菜多采用水培蔬菜,满足人们对蔬菜质量和卫生的要求,但是水培过程中使用的营养液容易滋生藻,藻的大量生长会与水培植物争夺养分,影响水培植物的生长发育。水培营养液中藻的去除和抑制主要可分为农药、金属离子和其他物质,包含微生物制剂、木炭、纳米材料等^[5-9],国外研究农药对藻类的抑制比较多^[10-11],大量的使用农药来灭藻会对植物生长造成很大的影响,其次也会造成农药残留,容易形成二次污染,达不到水培蔬菜无公害的目标。

链霉菌是抗生素的主要生产菌,可以产生各种各样的生物活性物质,也包括能分泌抑藻物质的菌株^[12-14]。因此,本研究采用双层平板法研究 WH63 菌株抑藻特性,为进一步应用到水培蔬菜水华现象的处理中奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* FACHB-942)来自中国科学院水生生物研究所。

WH63 菌株发酵液制备:链霉菌 WH63,实验室自主从土壤中分离保存菌种,NCBI 登录号为 KM036214。按 5% 的接种量将链霉菌 WH63 菌种液体种接于高氏 I 号培养基中,28.5 °C,180 r·min⁻¹培养 7 d,备用。

青菜种子:上海抗热 605 青菜(上海虹桥天龙种业有限公司)。

BG11 培养基^[15]。

1.2 实验方法

1.2.1 双层培养法

两种混有不同成分的 BG11 培养基采用双层培养法培养已活化的铜绿微囊藻^[16]。见表 1。

采用双层培养法得到的藻平板放入光照培养箱内培养:温度(25±1)°C,光照强度为 2 000 lx,光暗比 12 h:12 h。15 d 后观察藻的生长情况,实验重复 3 次。

1.2.2 不同浓度的链霉菌 WH63 发酵液对铜绿微囊藻生长的影响

选取 0%、1%、2%、3% 和 4% 5 个梯度的发酵液来研究对铜绿微囊藻生长的影响。具体步骤如下:在初始浓度为 4.68×10⁶ 个·mL⁻¹ 的铜绿微囊藻藻液 240 mL 中分别加入 0%、1%、2%、3% 和 4% 5 个不同体积分数的链霉菌 WH63 发酵液在人工气候培养箱中培养。培养条件:温度(25±1)°C,光照强度为 2 000 lx,光暗比 12 h:12 h,每个实验组设 3 个重复。测定培养 2、4、7 和 40 d 藻液叶绿素 a 含量。采用乙醇丙酮混合萃取法测量藻液叶绿素 a 含量^[17]。叶绿素 a 含量 M 按下式计算: $M = 12.7A_{663\text{ nm}} - 2.69A_{645\text{ nm}}$ 。

培养 40 d 后再对上述藻液进一步处理,将上述培养物在 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 后,去除上清液后放入烘箱内将其烘干测量干重。

1.2.3 链霉菌发酵液活性成分性质的初步鉴定

1) 不同温度处理后链霉菌 WH63 发酵液对抑藻的影响。将已培养好的链霉菌 WH63 发酵液经过 25、40、60、80 和 121 °C 高温灭菌处理,按照 3% 的接入量接到已培养到浓度为 4.68×10⁶ 个·mL⁻¹ 的铜绿微囊藻藻液中。接入发酵液 7 d 后测定藻的叶绿素 a 含量变化。

2) 不同萃取剂萃取后链霉菌 WH63 发酵液对抑藻的影响。将培养好的 3 L 发酵液 4 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,取上清。分别取 1 L 用等体积的乙酸乙酯、甲醇和氯仿各萃取 2 h,反复 3 次,收取脂溶性成分合并,并用 55 °C 旋转蒸发至干。分别将

表 1 双层培养法
Table 1 Double layer culture

实验组别	底层培养基	上层培养基
对照	1% BG11 固体琼脂培养基	5% BG11 固体琼脂培养基 90 mL + 4.68×10 ⁷ 个·mL ⁻¹ 藻液 10 mL
处理组 1	1% BG11 固体琼脂培养基	5% BG11 固体琼脂培养基 90 mL + 4.68×10 ⁷ 个·mL ⁻¹ 藻液 10 mL + 链霉菌活菌一环
处理组 2	1% BG11 固体琼脂培养基	5% BG11 固体琼脂培养基 90 mL + 4.68×10 ⁷ 个·mL ⁻¹ 藻液 10 mL + 链霉菌发酵原液 5 mL

3种水相浓缩物和3种脂溶性萃取物以1%体积比加入初始浓度为 4.68×10^6 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 的铜绿微囊藻液中,培养条件如前所述,7 d后测定叶绿素a含量。

1.2.4 链霉菌 WH63 发酵液抑藻后对水质的影响

链霉菌 WH63 发酵液按3%体积比接入初始浓度为 4.68×10^6 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 的铜绿微囊藻藻液中,抑藻处理7 d后进行藻液理化性质(COD, BOD)和藻毒素含量测定:化学需氧量(COD)的测定采用催化快速法;生物需氧量(BOD)的测定采用微生物电极法^[18];藻毒素含量测定采用 Beacon 微囊藻毒素试剂盒来测定^[19]。

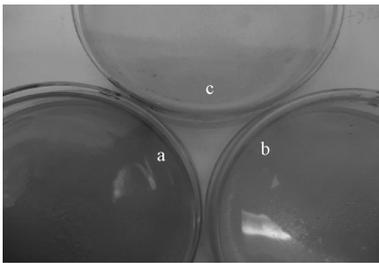
1.2.5 链霉菌 WH63 发酵液处理后的藻液对上海青种子发芽及对幼苗生长的影响

取使用3%链霉菌 WH63 发酵液抑藻后7 d的水样和正常生长的藻液进行青菜种子浸种,去离子水为空白对照组。确定链霉菌 WH63 发酵液抑藻后的水样对青菜发芽和幼苗的影响^[20-21]。

2 结果与分析

2.1 链霉菌 WH63 发酵液对铜绿微囊藻生长的影响

采用双层培养法15 d后观察铜绿微囊藻生长状况,见图1所示。



a 为对照组;b 为处理组2(含过滤除菌滤液的平板);
c 为处理组1(含活菌的平板)。

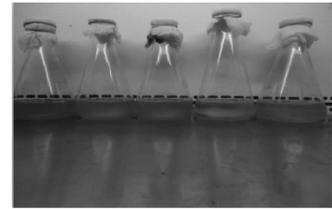
图1 链霉菌 WH63 发酵液对铜绿微囊藻生长的影响
Fig. 1 Effects of *Streptomyces* WH63 fermentation liquid on growth of *Microcystis aeruginosa*

活体菌及其发酵液对铜绿微囊藻的生长均有抑制效果,加入链霉菌 WH63 活菌的平板(图1(c)处理组1)仍有铜绿微囊藻生长,而加入过滤除菌后的发酵液的藻平板抑制效果明显(图1(b)处理组2),叶绿素破坏,溶藻现象明显。说明链霉菌 WH63 过滤除菌后的发酵液具有很好的抑制效果,对比活菌处理组效果更加显著。

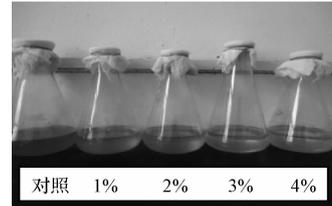
2.2 不同浓度发酵液对藻生长的抑制效果

在铜绿微囊藻中接入不同浓度的发酵液,观察溶藻效果。第4天时3%和4%处理的铜绿微囊藻液出现明显的溶藻现象,藻液开始变黄(见图2(a))。在第7天时,1%和2%浓度也有一定的溶藻现象,颜色相比对照开始变淡(见图2(b))。在第40天时,3%和4%处理的水样很清,没有回绿现象(见图2(c));1%和2%的处理效果不佳(见图2)。

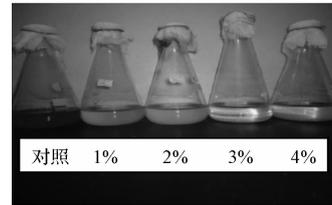
由图3可知,经过链霉菌 WH63 发酵液处理后



(a) 共培养4 d



(b) 共培养7 d



(c) 共培养40 d

图2 不同浓度发酵液与藻共培养不同时间后的抑藻效果

Fig. 2 Algae-inhibition effect of fermentation medium with algae co-cultured at different concentrations and times

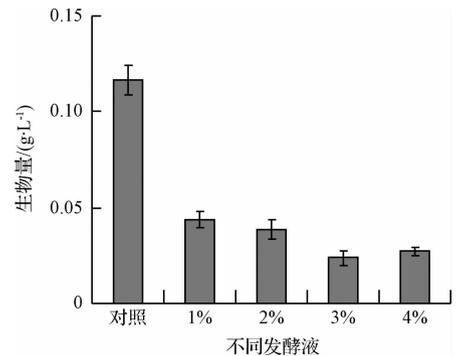


图3 不同浓度链霉菌 WH63 发酵液对铜绿微囊藻生物量的影响

Fig. 3 Effect of *Streptomyces* WH63 fermentation liquid at different concentrations on biomass of *Microcystis aeruginosa*

的铜绿微囊藻的生物量都有下降,其中链霉菌 WH63 发酵液接种量为 3% 的处理组三角瓶中铜绿微囊藻生物量下降幅度最大为 80%,而接种量分别为 1%、2% 和 4% 的铜绿微囊藻生物量下降幅度为 63%、67% 和 77%。

由图 4 可知,在第 4 天时,3% 和 4% 的链霉菌 WH63 发酵液处理后的铜绿微囊藻水样叶绿素 a 含量最低,除藻率就达到了 95.2%。在第 7 天时 3% 和 4% 链霉菌 WH63 发酵液处理后的铜绿微囊藻的除藻率达到 96.8%。在第 40 天时 3% 的链霉菌 WH63 发酵液处理后的铜绿微囊藻的除藻率达到 100%,说明随着时间的增加抑藻的效果更佳明显,并且不会造成藻液再次回绿生长。

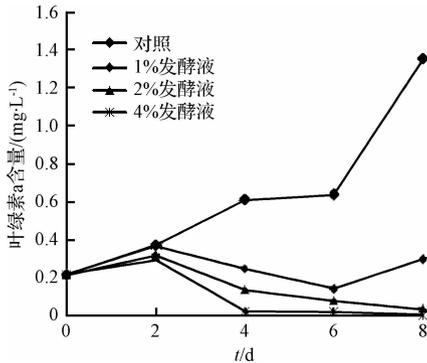


图 4 不同浓度链霉菌 WH63 发酵液对铜绿微囊藻叶绿素 a 的影响

Fig. 4 Effect of *Streptomyces* WH63 fermentation liquid at different concentrations on chlorophyll a of *Microcystis aeruginosa*

2.3 不同温度处理对链霉菌 WH63 抑藻的影响

由图 5 可知,不同温度处理后的链霉菌 WH63 发酵液都具有很好的抑藻作用,在 25、40 和 60 °C 处理时抑藻的活性基本不变。随着温度的升高抑藻的能力略有下降,灭菌后的发酵液也具有很好的抑藻

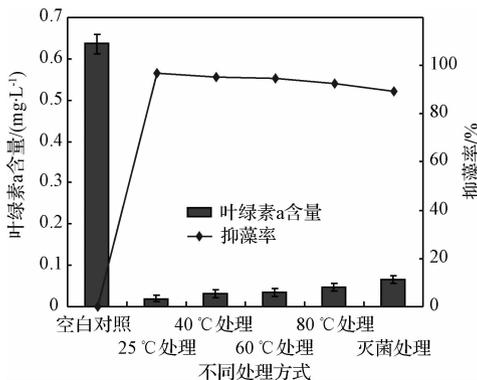


图 5 不同温度处理对链霉菌 WH63 抑藻率的影响

Fig. 5 Effect of *Streptomyces* WH63 on algae-inhibiting rate at different temperature treatment

效果,仍能达到 89.5% 以上的抑藻率,说明链霉菌 WH63 发酵液抑藻具有很好的热稳定性,推测链霉菌 WH63 可能是通过分泌胞外次级代谢产物进行抑藻。这与余甜甜等^[22]从庐山土样中筛选得到一株放线菌 JXJ0071 发现其代谢产物在高温下具有较好的稳定性,在 100 °C 水浴 2 h 后,溶藻效率仅下降 39.9% 的结果类似。

由图 6 可知,用乙酸乙酯、甲醇和氯仿萃取后的 WH63 菌株的脂溶性成分对铜绿微囊藻有较强的抑制作用,萃取后的水相对铜绿微囊藻有一定程度的抑制作用,而直接用 1% 乙酸乙酯做对照,对铜绿微囊藻生长没有抑制作用。究其原因因为乙酸乙酯萃取链霉菌 WH63 发酵液的有机相中有机物含有抑菌的成分,这种有机成分被乙酸乙酯从发酵液中萃取分离于水相(相似相溶原理),故水相中不含或者含少量该抑菌有机成分,故水相抑菌效果弱化。与对照相比,处理铜绿微囊藻 7 d 后的叶绿素 a 含量分别下降了 89.9%、85.5% 和 80.1%。通过比较可以看出,乙酸乙酯萃取可以更好地将 WH63 菌株的有效成分从发酵液中提取出来。这与崔妍等^[23]发现放线菌 YC0412 的发酵液产物采用 1/100 体积的乙酸乙酯萃取杀藻率可达到 85.5%,推测其是一种极性较小的脂溶性物质的结果一致;而唐水水^[24]的研究则发现,有机溶剂萃取后的水相具有一定的杀藻效果,因此,推测杀藻物质是一种极性较大的物质。通过对 WH63 菌株发酵液活性物质的初步研究发现,其可耐 121 °C 高温,因此推测发酵液中的抑藻物质应该不是蛋白质,因为其乙酸乙酯的萃取效果最好,推测其应该是一种或多种脂溶性弱极性物质。

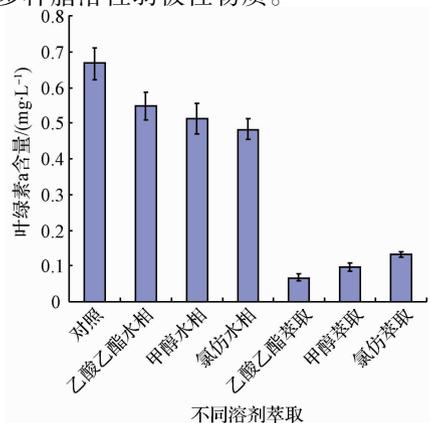


图 6 乙酸乙酯、甲醇和氯仿萃取 *Streptomyces* WH63 提取物的活性比较

Fig. 6 Comparison of active factors extracted from *Streptomyces* WH63 by ethyl acetate, methyl alcohol and chloroform

2.4 链霉菌 WH63 发酵液抑藻后对水质的影响

由表 2 可知,实验组的 COD 与对照组相比减少了 61.4%,COD 是化学需氧量,往往作为衡量水中有机物含量多少的指标,COD 越大说明水体有机物的污染越严重,COD 的减少说明水体中的有机物含量大大减少;而 BOD 与对照组相比减少了 13.4%。藻毒素含量实验组比对照组要低 57.9%,说明发酵液处理后的水样对水体安全的影响较少,且其 EMC-LR 的质量浓度远低于我国生活饮用水卫生规范和世界卫生组织(WHO)规定的 $<1.0 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的卫生标准。使用链霉菌 WH63 发酵液进行抑藻可以降低水体污染和减少水体藻毒素的含量,为用水安全提供支持^[25]。

表 2 链霉菌 WH63 发酵液抑藻后的水质检测

Table 2 Water quality measurements after algae-inhibition by *Streptomyces* WH63

测量项	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	BOD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	藻毒素浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
对照组	304	9.7	1.9
实验组	117.4	8.4	0.8

2.5 发酵液抑藻后对青菜发芽的影响

由表 3 可知,抑藻后的水样在鲜重和茎长上明显要优于直接藻液,分别提高了 35.9% 和 30.1%。直接藻液后期也具有一定的促生长作用,可能是因为藻液培养基中的营养元素促进了植物生长。与对照组相比,抑藻后水样的鲜重和茎长比其提高 121% 和 71.6%。说明抑藻后的水样可以促进青菜幼苗的生长,抑藻后的水样可用于农田灌溉。

表 3 WH63 发酵液抑藻后水样对青菜种子幼根和幼芽的影响

Table 3 Effect of water sample after algae-inhibition by *Streptomyces* WH63 on green vegetables seed root and bud

处理组	幼苗鲜重/mg	茎长/cm
水(对照)	21.83 ± 5.31c	3.77 ± 0.20c
直接藻液	35.51 ± 3.51b	4.97 ± 0.28b
抑藻后水样	48.25 ± 4.34a	6.47 ± 0.05a

注:表中数据为平均值 ± 标准差。同列数据后不同小写字母表示经检验在 $p < 0.05$ 水平差异显著;大写字母表示经检验在 $p < 0.01$ 水平差异显著。

浸种,其发芽势是 3 种处理组中最高的,为 68.67%,比对照组用水和直接藻液浸种提高了 10.2% 和 17.7%,活力指数比用水和直接藻液组提高了 147% 和 60.6%,说明种子的活力很强,抑藻后的水样不会对植物生长造成抑制作用,而具有明显促进上海青种子发芽的作用。直接藻液组处理青菜的发芽势、发芽率和发芽指数都低于水对照组。

表 4 WH63 发酵液抑藻后水样对青菜种子发芽的影响

Table 4 Effect of water sample after algae-inhibition by *Streptomyces* WH63 on green vegetables seed germination

处理组	发芽势/%	发芽率/%	发芽指数	活力指数
水(对照)	62.33 ± 2.51b	100	31.23 ± 0.49b	1.34 ± 0.14c
直接藻液	58.33 ± 2.51b	98	30.33 ± 0.30c	2.06 ± 0.16b
抑藻后水样	68.67 ± 2.08a	100	31.98 ± 0.39a	3.31 ± 0.15a

注:表中数据为平均值 ± 标准差。同列数据后不同小写字母表示经检验在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

3 结 论

1)链霉菌 WH63 发酵液和活菌都具有明显的抑藻效果,当链霉菌 WH63 发酵液的浓度为 3% 时,对藻的去除率在第 4 天时就可达到 95%,并且发酵液具有很好的热稳定性。

2)使用链霉菌 WH63 发酵液进行抑藻可以降低水体污染和减少水体藻毒素的含量。与对照组相比 COD 降低了 61.4%,藻毒素降低了 57.9%,种子的活力指数比对照组要高 147%,表明链霉菌 WH63 抑藻后的水样具有很好的促植物生长和提高植物抗性的效果,为链霉菌以后运用到水培蔬菜抑藻剂的开发提供了一定的理论基础。

参 考 文 献

[1] SU Wen, HAGSTÖM J. A., JIA Yuhong, et al. Effects of rice straw on the cell viability, photosynthesis and growth of *Microcystis aeruginosa*. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(1):120-129

[2] 赵不凋,刘柏朱,卢晓芳,等. 水体富营养化的形成,危害和防治. 安徽农学通报, 2007, 13(17):51-53

ZHAO Budiao, LIU Baizhu, LU Xiaofang, et al. Formation, hazard and prevention of eutrophication in water body. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, 13(17):51-53 (in Chinese)

[3] 李静会,高伟,张衡,等. 除藻剂应急治理玄武湖蓝藻水华实验研究. 环境污染与防治, 2007, 29(1):60-62

通过表 4 可知,用抑藻后的水样对小青菜进行

- LI Jinghui, GAO Wei, ZHANG Heng, et al. Emergency control of blue algal bloom by algacide: Experimental study in Xuanwu Lake. *Environmental Pollution and Control*, **2007**, 29(1):60-62 (in Chinese)
- [4] 张勇, 席宇, 吴刚. 溶藻细菌杀藻物质的研究进展. *微生物学通报*, **2004**, 31(1):127-131
ZHANG Yong, XI Yu, WU Gang. Advances on algicidal substances produced by algicidal bacteria. *Microbiology China*, **2004**, 31(1):127-131 (in Chinese)
- [5] LU Yaping, WANG Jin, YU Yang, et al. Inhibition of *Camellia sinensis* (L.) O. Kuntze on *Microcystis aeruginosa* and isolation of the inhibition factors. *Biotechnology Letters*, **2013**, 35(7):1029-1034
- [6] SOMDEE T., SUMALAI N., SOMDEE A. A novel actinomycete *Streptomyces aurantiogriseus* with algicidal activity against the toxic cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Applied Phycology*, **2013**, 25(5):1587-1594
- [7] CHEN Huirong, FU Lixian, LUO Lingxi, et al. Induction and resuscitation of the viable but nonculturable state in a cyanobacteria-lysing bacterium isolated from cyanobacterial bloom. *Microbial Ecology*, **2012**, 63(1):64-73
- [8] LEE Y. K., AHN C. Y., KIM H. S., et al. Cyanobactericidal effect of *Rhodococcus* sp. Isolated from eutrophic lake on *Microcystis* sp. *Biotechnology Letters*, **2010**, 32(11):1673-1678.
- [9] PARK M. H., KIM K. H., LEE H. H., et al. Selective inhibitory potential of silver nanoparticles on the harmful cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Biotechnology Letters*, **2010**, 32(3):423-428
- [10] LOHMANN E., HAGEDORN H. The effect of parathion on green algae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **1985**, 22(4):268-272
- [11] SÁENE M. E., ALBERDI J. L., DI Marzio W. D., et al. Paraquat toxicity to different green algae. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, **1997**, 58(6):922-928
- [12] HUA Xiuhong, LI Jianhong, LI Jujiao, et al. Selective inhibition of the cyanobacterium, *Microcystis*, by a *Streptomyces* sp. *Biotechnology Letters*, **2009**, 31(10):1531-1535.
- [13] KONG Yun, ZOU Pei, YANG Qi, et al. Physiological responses of *Microcystis aeruginosa* under the stress of anti-algal actinomycetes. *Journal of Hazardous Materials*, **2013**, 262:274-280
- [14] 郑小伟, 黄丽萍, 张帮周, 等. 一株高效抑藻放线菌的分离筛选及鉴定. *厦门大学学报(自然科学版)*, **2012**, 51(5):923-928
ZHENG Xiaowei, HUANG Liping, ZHANG Bangzhou, et al. Isolation and identification of a high algicidal actinomycete. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, **2012**, 51(5):923-928 (in Chinese)
- [15] 张庭廷, 郑春艳, 何梅, 等. 亚油酸对铜绿微囊藻的抑制机理. *中国环境科学*, **2009**, 29(4):419-424
ZHANG Tingting, ZHENG Chunyan, HE Mei, et al. The inhibitory mechanism of linoleic acid on *Microcystis aeruginosa*. *China Environmental Science*, **2009**, 29(4):419-424 (in Chinese)
- [16] 邓建明. 溶藻菌群对铜绿微囊藻的溶藻效应及其作用机理研究. 成都: 中国科学院成都生物研究所硕士学位论文, **2009**
DENG Jianming. Studies on the algicidal effects and mechanisms of an algae-lysing bacterial culture against *Microcystis Aeruginosa*. Chengdu: Master Dissertation of Chengdu Biological China Academy of Sciences, **2009** (in Chinese)
- [17] 张宪政. 植物叶绿素含量测定-丙酮乙醇混合液法. *辽宁农业科学*, **1986**(3):26-28
ZHANG Xianzheng. Determination of chlorophyll content in plants by acetone ethanol mixed solution method. *Liaoning Agricultural Science*, **1986**(3):26-28 (in Chinese)
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, **2002**
- [19] 顾丽丽. ELISA试剂盒法测定水中LR型微囊藻毒素. *化学分析计量*, **2013**, 22(1):97-99
GU Lili. Determination of microcystin-LR in water by ELISA kit. *Chemical Analysis and Meterage*, **2013**, 22(1):97-99 (in Chinese)
- [20] 李慧明, 干晓宇, 邓蕾, 等. 微囊藻毒素(MC-LR)在黑麦草幼苗体内的积累及其生长的影响. *农业环境科学学报*, **2010**, 29(1):49-53
LI Huiming, GAN Xiaoyu, DENG Lei, et al. The accumulation of MC-LR in Ryegrass (*Lolium perenne* L.) seedlings and effects of MC-LR on the growth of seedlings. *Journal of Agro-Environment Science*, **2010**, 29(1):49-53 (in Chinese)
- [21] 耿志明, 顾迎迎, 王澎. 微囊藻毒素对小白菜、番茄生长发育影响及其在它们体内积累的研究. *江西农业学报*, **2011**, 23(9):21-24
GENG Zhiming, GU Yingying, WANG Peng. Effects of microcystin on growth and development of Pakchoi cabbage and Tomato and its accumulation in them. *Acta Agriculturae Jiangxi*, **2011**, 23(9):21-24 (in Chinese)
- [22] 余甜甜, 张炳火, 李汉全, 等. 一株放线菌对铜绿微囊藻的溶藻活性. *生态与农村环境学报*, **2011**, 27(2):58-63
YU Tiantian, ZHANG Binghuo, LI Hanquan, et al. Alga-lysing activity of a strain of actinomycete to *Microcystis aeruginosa*. *Journal of Ecology and Rural Environment*, **2011**, 27(2):58-63 (in Chinese)
- [23] 崔妍, 李建宏, 汪燕, 等. 高效抑藻放线菌的筛选和活性. *生态学报*, **2008**, 28(11):5691-5697
CUI Yan, LI Jianhong, WANG Yan, et al. Isolation of a strong anti-algal *Streptomyces* strain and study on its anti-algal activities. *Acta Ecologica Sinica*, **2008**, 28(11):5691-5697 (in Chinese)
- [24] 唐水水, 林炜铁, 李敬源, 等. 放线菌L74溶藻物质的分离及其溶藻特性. *微生物学通报*, **2011**, 38(5):654-659
TANG Shuishui, LIN Weitie, LI Jingyuan, et al. Isolation and algicidal characteristics of the algicidal components from actinomycete strain L74. *Microbiology China*, **2011**, 38(5):654-659 (in Chinese)
- [25] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB 5749-2006 生活饮用水卫生标准. 北京: 中国标准出版社, **2007**