

放线菌 JXJ 0170 对铜绿微囊藻的溶藻活性

肖瑶^{1,2}, 田宝玉^{1*}, 张炳火^{2*}¹福建师范大学生命科学学院, 福州 350000; ²九江学院药学与生命科学学院, 九江 332000

摘要: 本文利用形态学特征和 16S rRNA 基因序列, 确定了放线菌 JXJ 0170 的分类学地位; 根据溶藻圈、叶绿素 a 含量、藻细胞密度、藻细胞形态和光合作用强度等指标, 研究了菌株溶藻活性成分的发酵时间、理化性质、溶藻效率和溶藻方式; 并以彭泽鲫和田螺为指示生物, 研究了其对水生动物的急性毒性。结果显示, 菌株 JXJ 0170 是链霉菌属的成员, 发酵 6 天后其上清液溶藻活性最强, 2% 的剂量下, 3 天后对铜绿微囊藻的溶藻效率达 91% 以上; 溶藻活性成分主要是水溶性物质, 对温度和 pH 处理较稳定, 能够导致藻细胞穿孔, 抑制其光合作用; 其孢子能在藻平板上萌发, 并形成溶藻圈, 菌丝体也具有很强的溶藻活性, 且呈剂量效应, 这说明该菌除了具有分泌活性物质而发挥间接溶藻作用外, 还具有直接溶藻作用; 发酵液对彭泽鲫和田螺没有明显的急性毒性, 对野外水华的防治效率为 75.80% ~ 93.80%。因此, 放线菌 JXJ 0170 在蓝藻水华防治方面具有较大的应用潜力。

关键词: 放线菌; 链霉菌; 溶藻活性; 溶藻方式; 铜绿微囊藻

中图分类号: Q89

文献标识码: A

文章编号: 1001-6880(2020)5-0813-08

DOI: 10.16333/j.1001-6880.2020.5.013

Alga-lysing activity of actinomycete JXJ 0170 on *Microcystis aeruginosa*XIAO Yao^{1,2}, TIAN Bao-yu^{1*}, ZHANG Bing-huo^{2*}¹College of Life Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350000, China;²College of Pharmacy and Life Science, Jiujiang University, Jiujiang 332000, China

Abstract: The taxonomic status of actinomycete strain JXJ 0170 was determined on the bases of morphological characteristics and 16S rRNA gene sequences. The fermentation time, physicochemical characteristics, alga-lysing efficiency and mode of the active components produced by strain JXJ 0170 were investigated by employing the lysis zones, chlorophyll-a contents, algae cell densities, morphology and photosynthetic intensity as indexes. And the acute toxicity of strain JXJ 0170 on aquatic animals was also studied by using *Carassius auratus* var. *pengzesis* and *vivipara* as bioindicators. The results showed that strain JXJ 0170 was a member of the genus *Streptomyces*. Its fermentation supernatant exhibited the highest alga-lysing activity after six days' culture, and the alga-lysing efficiency was over 91% after *Microcystis aeruginosa* being treated with 2% fermentation supernatant for 3 days. The alga-lysing components were mainly water-soluble substances, and relatively stability to the treatments of temperature and pH, and perforated the algae cells and inhibited the photosynthesis of algae cells. Spores of JXJ 0170 could germinate on algae lawn and form lysis zone; and its mycelia also exhibited strong alga-lysing activity with dose effect. These results indicated that strain JXJ 0170 could lyse algae cells directly besides secreting active component to lyse algae cells indirectly. The culture broth of strain JXJ 0170 showed no obvious acute toxicity to *C. auratus* var. *pengzesis* and *Vivipara*, and its control efficiencies in the field were 75.80% ~ 93.80%. Actinomycete strain JXJ 0170 exhibited potential application in controlling cyanobacterial bloom.

Key words: Actinomycete; *Streptomyces*; alga-lysing activity; alga-lysing mode; *Microcystis aeruginosa*

蓝藻水华是一个突出的世界性环境问题^[1], 爆

发时产生的蓝藻毒素等有毒物质严重威胁人类健康^[1,2], 给鱼类等水产养殖业带来巨大经济损失^[3]。因此, 蓝藻水华的防治受到国内外的高度关注。

长期以来, 蓝藻水华的防治主要依赖于 CuSO₄ 等化学杀藻剂^[4]。虽然这些传统化学杀藻剂控制

收稿日期: 2019-12-18

接受日期: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金(31660096); 江西省科技厅科技支撑计划(20111121020020); 江西省教育厅科技项目(GJJ151080); 九江学院重点项目(201511)

* 通信作者 E-mail: tianby@fjnu.edu.cn, binghuozh@126.com

水华快速高效^[5],但它们选择性差,抑制整个浮游生物,毒害水生动物,并导致重金属富集^[5,6],造成二次污染,对水体生态系统具有潜在危害^[7]。因此,寻找环境友好的新型杀藻剂具有重要的意义。

放线菌以代谢产物种类极为丰富而著称。研究表明,水陆环境中均存在大量溶藻放线菌,目前报道的主要是其中的链霉菌属,诸如不产色链霉菌(*Streptomyces achromogenes*)^[8]、生暗链霉菌(*S. phaeofaciens*)^[9]、脱叶链霉菌(*S. exfoliatus*)^[10]、寝屋川链霉菌(*S. neyagawaensis*)^[11]、灰霉素链霉菌(*S. griseinus*)^[12]、九江链霉菌(*S. jiujiangensis*)^[13]、庐山链霉菌(*S. lushanensis*)^[14]和*S. eurocidicus*^[15]等,它们对水华蓝藻具有较好的特异性,可分泌包括蛋白质^[11]、氨基酸^[9,13]、抗生素^[16,17]和其他多种活性成分^[15,18],产生溶藻作用。因此,从放线菌及其代谢产物中筛选高效环保的蓝藻水华防治剂具有很大前景。本文研究了放线菌 JXJ 0170 溶藻活性成分的发醇时间、孢子、胞外产物和菌丝体的溶藻效率、溶藻活性成分的部分理化性质和作用机制、发醇液对水生动物的毒性以及该菌在野外对水华的防治效果等,以评价该菌在研制蓝藻水华防治剂方面的潜力。

1 材料与方法

1.1 研究菌株、铜绿微囊藻和培养基

放线菌 JXJ 0170,为本实验室从庐山土样中分离获得。铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa* FACHB-905),购自中国科学院武汉水生生物研究所淡水藻种库。

放线菌 JXJ 0170 发醇培养基和藻培养基见参考文献^[19]。

1.2 溶藻菌株初步鉴定

采用插片法观察菌丝形态特征。采用溶菌酶法提取菌株基因组 DNA,并扩增其 16S rRNA 基因序列,从数据库 EzBioCloud's Identify Service (<http://www.ezbiocloud.net/identify>) 中调出相似性高的菌株序列,用软件 CLUSTAL_X1.83 进行多重序列比对,软件 MEGA 5 构建 16S rRNA 基因序列系统进化树。

1.3 菌株发醇

用无菌水洗下菌株斜面上的孢子,将孢子悬液接入液体发醇培养基中,使孢子终密度为 1.0×10^5 CFU/mL,于 28 °C、160 rpm 条件下培养,每 24 h 取样 1 次,样品置于无菌离心管内离心(4 500 rpm,20 min),取上清液 2 mL,加入 100 mL 藻液(5.0×10^6

CFU/mL)中,空白对照组加入 2 mL 无菌水,培养基对照组加入 2 mL 无菌发醇培养基,于 25 °C、光照强度为 3 000 lx 的人工气候箱中静置培养,光暗比为 12:12,每天摇动 4 次,每次约 30 s,3 天后镜检藻细胞数量,每组试验做 3 个平行。

1.4 溶藻活性成分的理化性质

1.4.1 对热和酸碱处理的稳定性

将发醇 6 天的放线菌发醇上清液进行以下处理:(1)分别置于 40、50、60、70、80、90 和 100 °C 的水浴处理 2 h 后,冷却至室温;(2)用 1.0 mol/L 的 NaOH 和 HCl 溶液,将样品 pH 值分别调至 3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0、11.0 和 12.0,静置 24 h 后再将 pH 值调至原始值。取各处理样品 2 mL 加入 100 mL 藻液(5.0×10^6 CFU/mL)中,对照组加入 2 mL 无菌水,培养 3 天后镜检藻细胞密度,每组试验做 3 个平行。

1.4.2 发醇产物溶藻活性

将发醇上清液减压蒸馏浓缩至原体积的 1/3,用乙酸乙酯充分萃取,除去乙酸乙酯即得极性较小的脂溶性组分;萃余相减压蒸馏至膏状物后,分别先后用丙酮、甲醇和无菌水充分溶解,除去各溶剂后即分别得到丙酮、甲醇和水溶解的组分,重新减压蒸馏、称重;再将 4 个组分用相应溶剂重新溶解,使各组分样品浓度相同,取一定体积的样品溶液于无菌滤纸片上,使每张滤纸片含 1 mg 样品,待溶剂完全挥发后,再将滤纸片置于藻平板上,3 天后观察溶藻圈的产生情况。

1.5 溶藻机制

1.5.1 对藻细胞形态的影响

在藻液(1.0×10^7 /mL)中加入 2% (V/V) 的放线菌发醇上清液(空白对照不加),培养 3 天后按照参考文献^[20]制样并观察藻细胞形态变化。(1)将藻液离心,收集沉淀,加入 2.5% 的戊二醛(用 0.1 mol、pH7.0 的磷酸缓冲液配制)固定藻细胞样品 1 h;(2)先后采用 50%、70%、80%、90%、100% 的乙醇溶液对藻细胞脱水(每次脱水时间不超过 5 min);(3)将样品置于盖玻片上自然干燥;(4)用扫描电镜(VEGA II LSU, TESCAN)对藻细胞形态进行观察。

1.5.2 对藻细胞光合作用的影响

采用密封培养装置(上有导管可通气体或加入液体样品)培养藻液,藻液(1.0×10^7 CFU/mL)中加入 2% 的放线菌发醇上清液,光照条件下培养,产生

的氧气通入装满液体的密闭装置(上有一根内径 1 mm 的两端开口的玻璃管),记录玻璃管中的水柱高度。对照组不加代谢产物。根据水柱高度判断放线菌代谢产物抑制藻细胞光合作用的效率。

1.6 孢子、发酵上清液和菌丝体的溶藻活性

根据文献^[19]制造藻平板,将放线菌孢子接种于藻平板上,25 ℃、3 000 lx 光照强度下静置培养,每天观察孢子萌发、菌丝生长和藻平板颜色变化情况。采用 1.4 中的条件培养菌株 JXJ 0170,6 天后离心,分别收集上清液和菌丝体备用。在藻液(5.0×10^6 CFU/mL)中加入 1%、2% 和 3% (V/V) 的上清液,培养 3 天后镜检藻细胞密度。将菌丝体用无菌水洗涤 3 次,除去胞外产物,再在无菌条件下称取 0.5、1.0、1.5 和 2.0 g 菌丝体(湿重)分别加入 100 mL 藻液(5.0×10^6 CFU/mL)中,培养 3 天后镜检藻细胞密度,每组试验做 3 个平行。以不加菌藻液为对照组。

1.7 发酵液对水生动物的毒性

取 20 条生长良好的彭泽鲫鱼(平均重量约 50 g/条),放入 45 L 自来水中,并加入 1% (V/V) 的放线菌发酵液和 100 g 大米,每天换水一次,同时加入 1% (V/V) 的发酵液和 100 g 大米,连续饲喂 7 天,观察鱼有无中毒死亡现象,并计算死亡率。取生长良好的田螺 120 个(平均重量约 2.87 g/个),放入 5 L 自来水中,并加入 1% (V/V) 的发酵液和 50 g 小白菜叶,每天换水一次,同时加入 1% (V/V) 的发酵液和 50 g 小白菜叶,连续饲喂 7 天,观察田螺有无中毒死亡,并计算死亡率。对照组以无菌液体发酵培养基代替放线菌发酵液,其他条件相同。试验时室温 15 ℃,所有试验重复 3 次。

1.8 野外水华防治试验

试验池塘位于九江市郊区农村,面积约为 1 660 m²,平均水深约为 1.5 m,试验前在池塘中间筑坝,将池塘一分为二。两个分区水中分别于 6 月 1 日和 9 月 1 日投放硝酸钠和复合肥各 50 kg,增加水中氮磷元素含量,试验组投放 20 L 溶藻放线菌发酵液,对照组投放 20 L 无菌发酵培养基,每月 1 号和 15 号于水面 15~20 cm 处取样一次,取样点 3 个,采用热乙醇法^[15]测样品的叶绿素 a (Chlorophyll a, Chl-a) 含量。试验时间,2018 年 6 月 1 日至 2018 年 10 月 30 日。

1.9 数据统计与分析

采用软件 SPSS19.0 对数据进行统计处理。确定 3 次重复实验的平均值(mean value)和标准偏差

(standard deviation, SD),绘图数据取 3 次试验的平均值,试验组与对照组数据采用单因素方差分析, $P \leq 0.05$ 为差异显著, $P \leq 0.01$ 为差异极显著。溶藻效率 = (1 - 试验组藻细胞密度或 Chl-a 含量 / 对照组藻细胞密度或 Chl-a 含量) $\times 100\%$ 。

2 结果与分析

2.1 菌丝形态特征和 16S rRNA 基因序列分析

放线菌 JXJ 0170 气生菌丝灰白色,孢子丝链状,孢子卵圆形(图 1)。16S rRNA 基因序列(1535 bp, GenBank 登录号: KY613504) 分析表明,该菌是链霉菌属(*Streptomyces*)的成员,且与 *S. anulatus* NRRL B-2000^T、*S. cyaneofuscatus* NRRL B-2570^T、*S. fulvissimus* DSM 40593^T 和 *S. luridiscabiei* NRRL B-24455^T 的亲缘关系最近,相似性均为 99.93%,然而该菌仅与 *S. cyaneofuscatus* 和 *S. griseus* subsp. *griseus* KCTC 9080^T 聚在一大支上(图 2),而与其它三株菌聚在不同分支上,因此,该菌的确切分类学地位尚需要进一步的试验数据。

2.2 菌株溶藻发酵时间

如图 3 所示,试验条件下培养 3 天后,空白对照组藻细胞密度由 5.0×10^6 CFU/mL 增加到 1.41×10^7 CFU/mL,发酵培养基对照组(即未接菌的培养基)藻细胞密度只有空白对照组的 78.51%,溶藻效率为 21.49% ($P < 0.01$),这说明发酵培养基中的一些成分对藻细胞生长有抑制作用,但这些物质随着孢子的萌发与菌丝生长而被消耗。因此,接种培养 1 天后的发酵上清液对藻细胞基本没有溶藻活性,2 天后的发酵上清液甚至促进了藻细胞的生长,但此后发酵液的溶藻活性迅速增加,5 天后到达 91.85% ($P < 0.01$),6 天后变化不大,8 天后略有下降。因此,确定该菌发酵时间为 6 天。

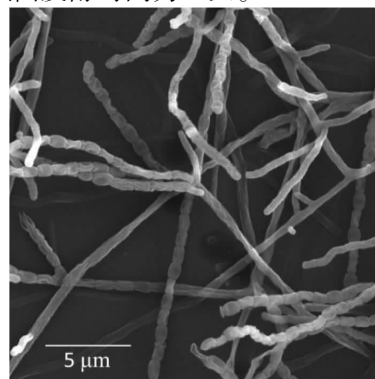


图 1 放线菌 JXJ 0170 培养 4 天后的孢子丝扫描电镜照片

Fig. 1 Scanning electron micrograph of spore chains of actinomycete JXJ 0170 after culturing for four days

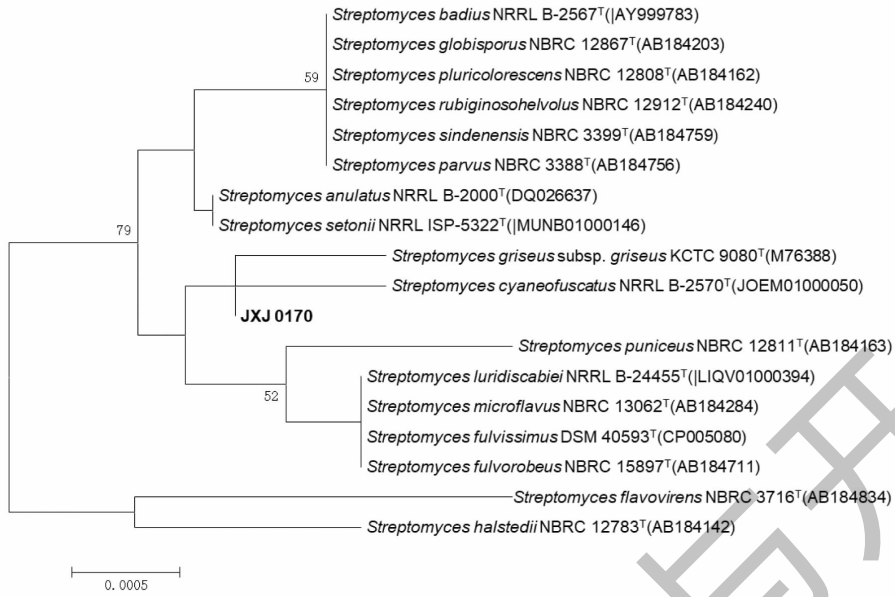


图2 以邻接法构建菌株 JXJ 0170 系统进化树

Fig. 2 Neighbour-joining phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequences of strain JXJ 0170

注: >50% 的步长值(以重复 1 000 次的百分率表示)在节点处标注;标尺:0.05% 的序列分歧度。Note: Bootstrap values (expressed as percentages of 1 000 replications) > 50 % are shown at the nodes. Bar, 0.05% sequence divergence.

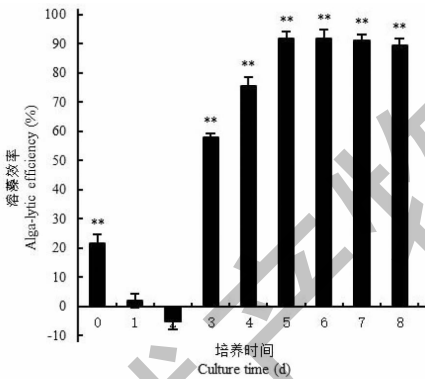


图3 菌株 JXJ 0170 不同发酵时间上清液的溶藻效率

Fig. 3 Alga-lytic efficiency of fermentation broth supernatant of strain JXJ 0170 at different culture time

注: ** 表示试验组与对照组在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

Note: ** indicated the significant differences between the controls and the tests at the level $P < 0.01$.

2.3 溶藻活性成分的理化性质

2.3.1 对热和酸碱处理的稳定性

如图 4 所示,未进行热处理的试验组(28 °C)藻细胞密度为 1.20×10^6 CFU/mL,为对照组 1.43×10^7 CFU/mL 的 8.49%,即溶藻效率为 91.51%;处理温度 ≤ 70 °C 时,发酵上清液的溶藻活性没有显著变化,溶藻效率在 90.23% 以上,达到未处理组溶藻效率的 98.60% 以上;但处理温度分别为 80 ~ 100

°C 时,发酵上清液的溶藻活性比未处理组降低了 4.38% ~ 31.78% ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。如图 4 所示,在 pH 7.0 ~ 8.0 时发酵上清液溶藻效率最高,约为 91.37%,当处理 $\text{pH} \leq 7.0$ 时,发酵上清液的溶藻效率随 pH 值的增加而增加,当处理 $\text{pH} \geq 8.0$ 时,发酵上清液的溶藻效率随 pH 值的增加而降低。

2.3.2 发酵产物溶藻活性

试验结果显示,乙酸乙酯和丙酮溶解的样品没有形成溶藻圈,甲醇溶解的样品形成的溶藻圈直径约为 1.7 cm(图 5 C),而水溶性成分形成的溶藻圈直径约为 3.5 cm(图 5 D),这说明菌株 JXJ 0170 产生的溶藻活性成分主要是水溶性物质。

2.4 溶藻机制

2.4.1 对藻细胞形态的影响

扫描电镜观察结果(图 6)显示,空白对照组的藻细胞球形,表面有黏液,且有大量细胞正在分裂繁殖;而加了菌株 JXJ 0170 发酵产物的试验组藻细胞变形,且其表面粘性物质丧失,细胞壁和细胞膜穿孔,最终藻细胞裂解死亡。

2.4.2 对藻细胞光合作用的影响

试验结果显示,培养 6 h 后,空白对照组的藻细胞培养装置壁上有大量气泡,其玻璃管中的液柱高度为 27.58 ± 0.85 cm;而加了菌株 JXJ 0170 发酵产

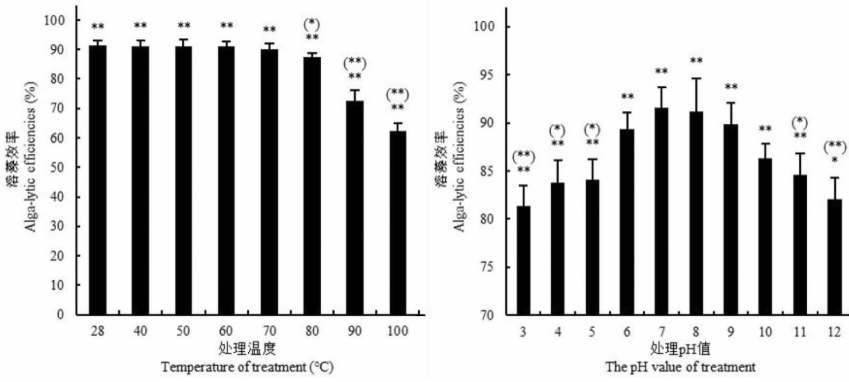


图 4 不同温度和 pH 处理后的发酵上清液的溶藻效率

Fig. 4 Alga-lysing efficiencies of fermentation broth supernatant treated with different temperatures and pH values

注: ** 表示试验组与对照组在 $P < 0.01$ 水平上差异显著, * 和 ** 分别表示未处理组与处理组在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

Note: ** indicated the significant differences between the controls and the tests at the level $P < 0.01$; * and ** indicated the significant differences between the untreated groups and the treated groups.

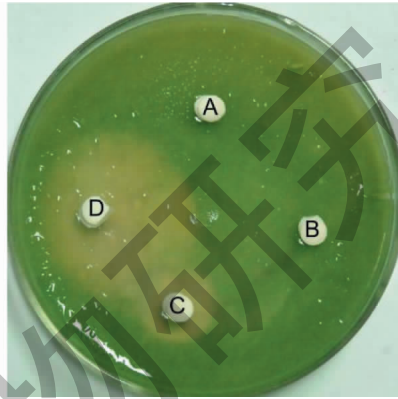


图 5 菌株 JXJ 0170 发酵产物的溶藻活性

Fig. 5 Alga-lysing activities of fermentation substances of strain JXJ 0170

注: A、B、C 和 D 分别为乙酸乙酯、丙酮、甲醇和水的提取物。Note: A, B, C and D, extracted by acetic ether, acetone, methanol and H_2O , respectively.

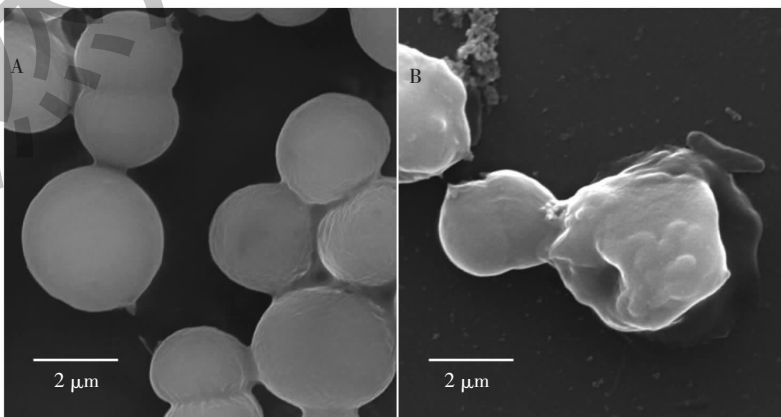


图 6 菌株 JXJ 0170 代谢产物对藻细胞形态的影响

Fig. 6 The influences of metabolites produced by strain JXJ 0170 on the morphology of algae cells

注: A 和 B 分别为对照组和试验组的藻细胞。Note: A and B are the cells in control and test groups, respectively.

物的试验组藻培养装置的壁上没有气泡,其玻璃管中的液柱高度仅为 8.18 ± 0.37 cm,仅为空白对照组的 29.66% ($P < 0.01$),即 6 h 内菌株 JXJ 0170 发酵产物对藻细胞光合作用的抑制率达到 70.34%,这说明该菌发酵产物对铜绿微囊藻的光合作用具有较强的抑制作用。

2.5 孢子、发酵上清液和菌丝体的溶藻活性

2.5.1 孢子的溶藻活性

菌株 JXJ 0170 的孢子在藻平板上能够萌发生长,并形成溶藻圈,随后其生长范围和溶藻圈直径均逐渐扩大,15 天后单菌落溶藻圈直径为 12.71 mm,25 天后溶藻圈直径达到 29.42 mm,这说明该菌株孢子在缺乏有机碳源的组合培养基中能够正常萌发、直接杀死藻细胞,并利用藻细胞裂解后释放的有机物作为营养成分继续生长,再产生溶藻活性成分,进而发挥活性成分溶藻作用。

2.5.2 发酵上清液和菌丝体的溶藻活性

如图 7 所示,发酵上清液和菌丝体均有良好的溶藻活性,且呈剂量效应。当上清液剂量为 1.0% (V/V),3 天后藻细胞密度为 2.8×10^6 CFU/mL,是对照组 1.31×10^7 CFU/mL 的 21.37%,即溶藻效率为 78.63%,当剂量为 3.0% 时,溶藻效率达到 96.70%;在藻液中加入 0.5 g 菌丝体,3 天后溶藻效率为 50.51%,当使用剂量增到 2.0 g 时,溶藻效率达到 93.39%。

2.6 发酵液对水生动物的毒性

试验结果显示,试验组和对照组的鲫鱼生长均正常,未出现死亡,这说明菌株 JXJ 0170 及其代谢产物对鲫鱼的生长没有不利影响,不会导致鱼类中毒死亡。田螺试验结果表明,试验组和对照组的田

螺死亡率分别为 $7.22\% \pm 1.92\%$ 和 $6.67\% \pm 3.00\%$,没有显著差异 ($P > 0.05$),因此,菌株 JXJ 0170 及其发酵产物对软体动物田螺也没有显著性致死作用。

2.7 野外防治试验

如图 8 所示,在试验期间,试验组池塘中的水没有出现明显颜色变化,水面水样虽然有悬浮颗粒存在,但基本无色,且透明(图 8 A);对照组池塘水的颜色逐渐变绿,其水面水样深蓝绿色,不透明,水面漂浮一层蓝绿色的浮膜(图 8 B)。水面 15 ~ 20 cm 下的水样,对照组叶绿素 a 含量在试验期间,由起始 0.0088 ± 0.0016 mg/L 逐渐增加到 0.1260 ± 0.0081 mg/L,而试验组叶绿素 a 含量为 $0.0058 \pm$

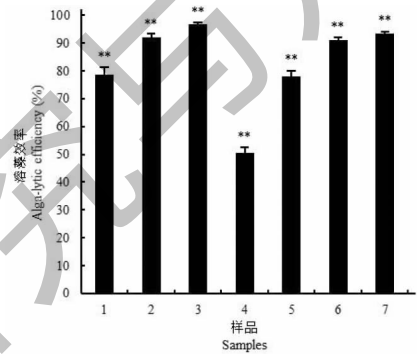


图 7 菌株 JXJ 0170 发酵上清液和菌丝体的溶藻效率

Fig. 7 Alga-lysing efficiencies of fermentation broth supernatant and mycelia of actinomycete strain JXJ 0170
注:1~3 分别为 1%、2% 和 3% 的发酵上清液;4~7 分别是湿重为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 g 的菌丝体。* * 表示试验组与对照组在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。Note:1-3 were the fermentation broth supernatant of 1%, 2% and 3%, respectively;4-7 were mycelia of wet weight 0.5, 1.0, 1.5 g and 2.0 g, respectively. * * indicated the significant differences between the test and control at the level $P < 0.01$.

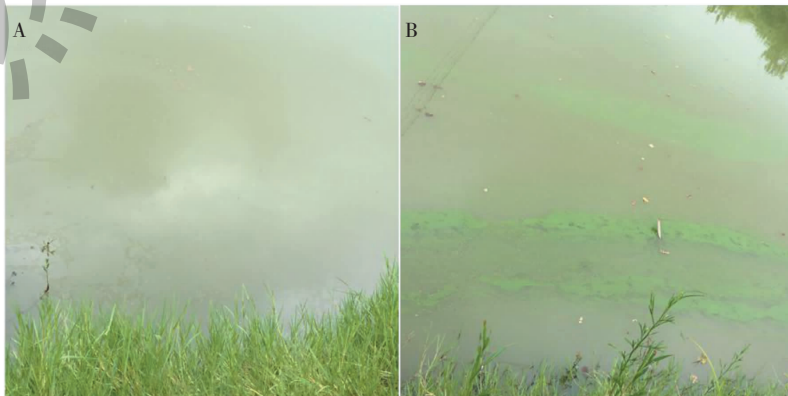


图 8 试验组和对照组池塘的表面水样颜色

Fig. 8 Surface water color of the ponds of the experimental group and control group

注:A 和 B 分别为试验组和对照组的池塘水面。Note:A and B and the surfaces of test and control ponds, respectively.

0.000 3 ~ 0.023 7 ± 0.000 5 mg/L(图 9), 只有对照组的 6.20% ~ 24.20%, 对水华的防治效率为 75.80% ~ 93.80%。

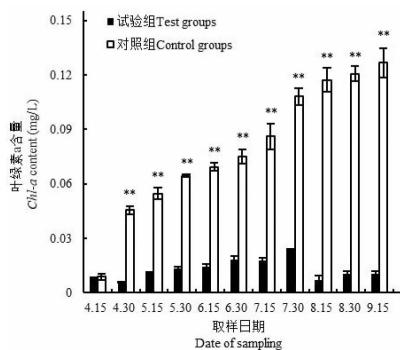


图 9 野外水华防治的试验组和对照组叶绿素 a 含量

Fig. 9 The chlorophyll a contents of the experimental group and control group of water bloom prevention and cure in the wild

注: ** 表示试验组与对照组在 $P < 0.01$ 水平上差异显著。

Note: ** indicated the significant differences between the test and the control at the level $P < 0.01$.

3 讨论与结论

放线菌 JXJ 0170 是链霉菌属的成员, 与该菌 16S rRNA 基因序列亲缘关系最近的链霉菌均未见溶藻活性的报道, 这说明该菌是一株新的溶藻链霉菌。

微生物一般可通过两种作用方式溶藻: 微生物细胞接触藻细胞后导致藻细胞溶解, 即直接溶藻^[21]、通过分泌活性成分而导致藻细胞溶解, 即间接溶藻^[9]。目前文献报道的放线菌一般通过分泌活性成分而发挥溶藻作用^[9,11,15-18]。本研究表明, 菌株 JXJ 0170 发酵上清液具有很强的溶藻活性, 且具有一定的剂量效应, 这说明该菌能通过分泌活性成分而发挥间接溶藻作用; 同时, 该菌的菌丝体和孢子也具有强烈的溶藻活性, 特别是其孢子在藻平板上能够萌发, 并表现出良好的溶藻活性, 这说明该菌亦具有直接溶藻作用。

目前文献报道的链霉菌分泌的溶藻活性成分, 多是热稳定性和酸碱稳定性较好的非蛋白质物质^[9,15-18]。菌株 JXJ 0170 分泌的溶藻活性成分对高温和酸碱处理相对较稳定, 这说明该活性成分也是非蛋白质性质的, 但具体是何种物质还需要进一步的研究。

链霉菌产生的溶藻活性化合物能够促进藻细胞活性氧的产生, 抑制其抗氧化剂的合成, 破坏叶绿素 a、细胞膜和细胞壁^[15], 最终导致藻细胞死亡, 本研究结果也证明了这一点。

Sigee 等^[10] 研究表明, 脱叶链霉菌 (*S. exfoliatum*) RG12 在实验室可控条件下具有很强的溶藻活性, 但在野外条件下, 其溶藻活性大大降低, 因而难以用来防治蓝藻水华。本研究表明, 菌株 JXJ 0170 无论在实验室可控条件下, 还是在野外全开放条件下, 均具有较好的溶藻效果, 且该菌的溶藻作用方式多样, 对鱼类和软体动物等水生经济动物生长没有不良影响, 因此, 该菌在研制高效、环保的放线菌源蓝藻水华防治剂方面具有较大的潜力。

参考文献

- 1 Žegura B, Štraser A, Filipić M. Genotoxicity and potential carcinogenicity of cyanobacterial toxins—a review [J]. *Mutat Res-Rev Mutat*, 2011, 727 (1-2): 16-41.
- 2 Azevedo SM, Carmichael WW, Jochimsen EM, et al. Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru-Brazil [J]. *Toxicology*, 2002, 181-182: 441-446.
- 3 Tucker CS. Off-flavor problems in aquaculture [J]. *Rev Fish Sci*, 2000, 8(1): 45-88.
- 4 Guo QG, Li HQ, Zhang BH. Research progress of phytogetic algicidal compounds [J]. *Nat Prod Res Dev* (天然产物研究与开发), 2017, 29: 1230-1239.
- 5 Ryu HY, Shim JM, Bang JD, et al. Experimental chemical treatments for the control of dinoflagellate, *Cochlodinium polykrikoides* in the land-based culture of olive flounder *Paralichthys olivaceus* [J]. *J Aquacul*, 1998, 11: 285-294.
- 6 Park MH, Chung IM, Ahmad A, et al. Growth inhibition of unicellular and colonial *Microcystis* strains (*Cyanophyceae*) by compounds isolated from rice (*Oryza sativa*) hulls [J]. *Aquat Bot*, 2009, 90: 309-314.
- 7 Jeong JH, Jin HJ, Sohn CH, et al. Algicidal activity of the seaweed *Corallina pilulifera* against red tide microalgae [J]. *J Appl Phycol*, 2000, 12(1): 37-43.
- 8 Whyte LG, Maule A, Cullimore D. Method for isolating cyanobacterial-lysing *Streptomyces* from soil [J]. *J Appl Bacteriol*, 1985, 58: 195-197.
- 9 Yamamoto Y, Kouchiwa T, Hodoki Y, et al. Distribution and identification of actinomycetes lysing cyanobacteria in a eutrophic lake [J]. *J Appl Phycol*, 1998, 10: 391-397.
- 10 Sigee DC, Glenn R, Andrews MJ, et al. Biological control of cyanobacteria: principles and possibilities [J]. *Hydrobiologia*, 1999, 395: 161-172.
- 11 Choi HJ, Kim BH, Kim JD, et al. *Streptomyces neyagawaensis* as a control for the hazardous biomass of *Microcystis aeruginosa* (Cyanobacteria) in eutrophic freshwaters [J]. *Biol Control*, 2005, 33: 335-343.