

溶藻菌 CZBC1 在氯化物型盐碱水中对铜绿微囊藻的溶藻效果研究

胡晓娟¹, 杨 铿^{1,2,3}, 文国樑¹, 苏浩昌¹, 许云娜¹, 徐创文^{1,2}, 徐 煜¹, 徐武杰¹, 曹煜成¹

1. 中国水产科学研究院南海水产研究所/农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室/广东省渔业生态环境重点实验室, 广东广州 510300

2. 广州市欣海利生物科技有限公司, 广东广州 510300

3. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090

摘要: 为研发氯化物型盐碱水体溶藻菌菌剂, 选取溶藻菌菌株 CZBC1, 探讨了滤液组、菌体组、菌液组在初始铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 密度分别为 10^5 和 10^6 个·mL⁻¹ 的氯化物型盐碱水中对铜绿微囊藻的溶藻效果。结果发现, 菌株 CZBC1 同时具有直接和间接 2 种溶藻方式, 菌株 CZBC1 的滤液组、菌体组、菌液组作用于铜绿微囊藻时能使藻细胞变形、褪色或破裂, 在氯化物型盐碱水体中可以发挥良好的溶藻效果。当初始藻密度为 10^5 个·mL⁻¹ 时, 第 6 天菌液组的铜绿微囊藻密度可降至 2.30×10 个·mL⁻¹, 菌体组降至 1.27×10^2 个·mL⁻¹, 对照组为 3.67×10^5 个·mL⁻¹, 菌液组和菌体组极显著低于对照组 ($p < 0.01$), 2 组的最高溶藻率可达 99% 以上。当初始藻密度为 10^6 个·mL⁻¹ 时, 第 6 天菌液组的铜绿微囊藻密度可降至 8.30×10^5 个·mL⁻¹, 对照组为 3.17×10^6 个·mL⁻¹, 菌液组显著低于对照组 ($p < 0.05$), 最高溶藻率为 78.8%。从溶藻效果来看, 菌液组 > 菌体组 > 滤液组。研究表明, 溶藻菌 CZBC1 在氯化物型盐碱水中对铜绿微囊藻具有良好的溶藻效果, 可用于氯化物型盐碱池塘中的微囊藻水华防控。

关键词: 溶藻菌; 铜绿微囊藻; 蜡样芽胞杆菌; 氯化物型盐碱水

中图分类号: Q 939.96

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Algicidal effect of bacteria CZBC1 on *Microcystis aeruginosa* in chloride type saline-alkali water

HU Xiaojuan¹, YANG Keng^{1,2,3}, WEN Guoliang¹, SU Haochang¹, XU Yunna¹, XU Chuangwen^{1,2}, XU Yu¹, XU Wujie¹, CAO Yucheng¹

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Provincial Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangzhou 510300, China

2. Guangzhou Xinhailisheng Biotechnology Co., Ltd., Guangzhou 510300, China

3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China

Abstract: In order to develop the algaolytic bacterial agent for chloride type saline-alkali water, we selected the algaolytic bacterial strain *Bacillus cereus* CZBC1, and investigated the algaolytic effects of the filtrate group (FG), the bacterium group (BG),

收稿日期: 2024-06-24; 修回日期: 2024-08-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2401002); 广东省重点领域研发计划 (2021B0202040001); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2023TD57); 中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2024XT01); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-48)

作者简介: 胡晓娟 (1984—), 女, 副研究员, 博士, 研究方向为养殖水环境与微生物调控。E-mail: xinr129@163.com

通信作者: 曹煜成 (1979—), 男, 研究员, 博士, 研究方向为水产健康养殖和养殖生态环境调控与修复。E-mail: cyc_715@163.com

and the bacterial solution group (BSG) in the chloride type saline-alkali water with the initial density of *Microcystis aeruginosa* of 10^5 and 10^6 cell·mL⁻¹, respectively. The results show that the strain CZBC1 had both direct and indirect ways of dissolving microalgae. When strain CZBC1 in FG, BG and BSG acted on *M. aeruginosa*, their microalgal cells could deform, fade or rupture, playing a good role in dissolving algae in chloride type saline-alkali water. When the initial microalgal density was 10^5 cell·mL⁻¹, the microalgal density could be reduced to 2.30×10^4 cell·mL⁻¹ in BSG and 1.27×10^2 cell·mL⁻¹ in BG on the 6th day, which were extremely significantly lower than that in the control group (CG) (3.65×10^5 cell·mL⁻¹, $p < 0.01$), and the highest algicidal rates in both groups could reach over 99%. When the initial microalgal density was 10^6 cell·mL⁻¹, the microalgal density could be reduced to 8.30×10^5 cell·mL⁻¹ in BSG on the 6th day, which was significantly lower than that in CG (3.17×10^6 cell·mL⁻¹, $p < 0.05$), and its highest algicidal rate could reach over 78.8%. The algicidal effect of BSG was better than that of BG and FG. The results indicate that in order to prevent and control microcystis blooms in chloride type saline alkali ponds, it is recommended to prioritize prevention and regularly apply algicidal bacteria CZBC1 to prevent and control the formation of harmful algal blooms.

Keywords: Algicidal bacteria; *Microcystis aeruginosa*; *Bacillus cereus*; Chloride type saline-alkali water

铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 是一种典型的微囊藻属单细胞蓝藻。在高温季节, 水体营养物质丰富的养殖池塘中极易形成以微囊藻为代表的蓝藻水华^[1]。铜绿微囊藻属于有毒藻类, 其在生长代谢过程中会产生微囊藻毒素^[2], 所以微囊藻水华不仅会抑制其他有益藻类的生长, 使养殖池塘水质恶化, 还会危及养殖动物的生命健康, 对水产养殖造成严重影响^[3-4]。

盐碱水属于咸水范畴, 有别于海水, 由于其成因与地理环境、地质土壤、气候等有关^[5], 其水化学组成复杂, 类型繁多; 在华东地区多为氯化物型盐碱水土, 华北和华中地区多为复合型盐碱水土^[6]。盐碱水体因高 pH、高碱度、高离子系数等特点^[7], 水质调控成为盐碱养殖的要点和难点。研究表明, 铜绿微囊藻较蛋白核小球藻 (*Chlorella pyrenoidosa*) 和条纹小环藻 (*Cyclotella striata*) 更适应 8.5~10.0 的高 pH 池塘环境^[8]。苏发文等^[9] 研究认为, 与小球藻相比, 同等藻密度的铜绿微囊藻更易使水环境 pH 显著上升, 这是养殖池塘水体 pH 偏高的主要原因之一。夏季因为温度高、日照时间长、养殖中后期水体有机质高等原因, 微囊藻等有害蓝藻在养殖池塘尤其是氯化物型盐碱池塘易大量繁殖。

溶藻菌是指一类以直接或间接方式抑制藻类生长, 或杀死藻类、溶解藻细胞细菌的统称^[10-11]。以菌治藻因具有廉价安全、特异性强、维持水体生态平衡等优点, 是极具应用前景的净化富营养化水体的方法^[12-13]。蜡样芽胞杆菌 (*Bacillus cereus*) CZBC1 是由曹煜成等^[14] 筛选获得的一株养殖池塘蓝藻溶藻菌, 该菌株具有广温、广盐、耐高 pH、低耗

氧、专一性强的特性。研究证实, 菌株 CZBC1 可在海水养殖环境中通过直接或间接的方式溶解浮游颤藻 (*Oscillatoria planctonica*)、绿色颤藻 (*O. chlorine*)、小颤藻 (*O. tenuis*) 等有害蓝藻, 且对养殖对虾无不良影响^[15-17]。合理使用益生菌可有效改良盐碱水体环境, 提高水产养殖效益^[18], 但溶藻菌在盐碱环境对微囊藻等有害微藻的作用效果的报道尚少^[19]。因此, 本研究选取溶藻菌菌株 CZBC1, 探讨其在氯化物型盐碱水中对铜绿微囊藻的溶藻效果, 以期为氯化物型盐碱水体溶藻菌菌剂的研发提供菌种资源和数据支持。

1 材料与方法

1.1 实验水体

氯化物型盐碱水体采自河北省唐山市曹妃甸某农场的养殖池塘, 主要离子成分为 (mg·L⁻¹): Na⁺ 373.82、K⁺ 28.09、Ca²⁺ 55.46、Mg²⁺ 91.60、Cl⁻ 585.67、SO₄²⁻ 215.71、CO₃²⁻ 33.13、HCO₃⁻ 319.37, pH 8.8, 盐度 4‰, 碱度 6.0 mmol·L⁻¹。

1.2 实验藻种

实验所用铜绿微囊藻由中国水产科学研究院南海水产研究所海水池塘养殖生态环境调控创新团队藻种保藏室提供。将铜绿微囊藻接种于灭菌的 BG11 营养液中, 以温度 28 °C、光照 2500 lx、光暗周期 12 h : 12 h 的条件扩大培养, 培养期间不断振荡防止藻细胞贴壁, 培养至对数期备用。

1.3 实验菌株

蜡样芽胞杆菌 CZBC1 由中国水产科学研究院南海水产研究所海水池塘养殖生态环境调控创新团队提供。实验开始前, 活化菌株 CZBC1, 转接于

灭菌的营养肉汤培养基中并置于摇床内 30 ℃、200 r·min⁻¹ 恒温振荡培养 24 h 备用。

1.4 实验设置

将氯化物型盐碱水与加入少量饲料浸出液的 BG11 营养液按 1:1 的比例混合, 作为藻、菌共培养体系的实验水体。每个共培养体系加入藻液、菌液后总体积为 100 mL, 置于 250 mL 锥形瓶内。

共培养体系中根据初始藻密度不同, 设置 10⁵ 和 10⁶ 个·mL⁻¹ 2 种密度, 每种藻密度各设置

4 组, 分别为对照组 (CG)、滤液组 (FG)、菌体组 (BG) 和菌液组 (BSG), 每组 3 个平行。其中, 对照组不加菌; 滤液组为菌株 CZBC1 的菌液经离心获得的上清液, 再经 0.22 μm 滤膜过滤得到的滤液; 菌体组为菌株 CZBC1 的菌液经离心后获得的菌体沉淀, 再加入无菌水所制成的菌悬液; 菌液组为菌株 CZBC1 的菌液。菌液组和菌体组的初始菌量介于 3.83×10⁶~5.07×10⁶ CFU·mL⁻¹。各组设置详见表 1。

表1 不同处理组的实验设计
Table 1 Experimental designs for different treatment groups

组别 Group	菌处理组 Bacterial treatment group	初始菌量 Initial bacterial quantity/ (CFU·mL ⁻¹)	初始微藻密度 Initial microalgal density/ (个·mL ⁻¹)
10 ⁵ 组 10 ⁵ group	对照组 CG	0	4.17×10 ⁵
	滤液组 FG	0	3.00×10 ⁵
	菌体组 BG	4.47×10 ⁶	2.87×10 ⁵
	菌液组 BSG	4.55×10 ⁶	2.17×10 ⁵
10 ⁶ 组 10 ⁶ group	对照组 CG	0	3.48×10 ⁶
	滤液组 FG	0	4.52×10 ⁶
	菌体组 BG	3.83×10 ⁶	3.87×10 ⁶
	菌液组 BSG	5.07×10 ⁶	4.55×10 ⁶

1.5 藻细胞观察与计数

在实验第 0、第 1、第 2、第 3、第 4 和第 6 天取样, 用显微镜观察藻细胞变化情况, 以 4% (φ) 甲醛固定后用浮游植物计数框对藻密度进行显微计数。

1.6 蜡样芽胞杆菌数量计数

在实验第 0、第 2、第 4 和第 6 天取样, 以甘露醇多黏菌素卵黄培养基平板法 (GB/T 4789.14—2003) 检测蜡样芽胞杆菌的数量。

1.7 数据分析

溶藻率按以下公式计算: 溶藻率 = (初始藻密度 - 终末藻密度) / 初始藻密度 × 100%。

采用 SPSS 26.0 软件中的单因素方差分析 (One-way ANOVA) 对溶藻实验第 6 天对照组、滤液组、菌体组、菌液组的铜绿微囊藻密度和滤液组、菌体组、菌液组的蜡样芽胞杆菌数量进行组间差异分析, 显著性水平 α 设为 0.05。

2 结果

2.1 铜绿微囊藻细胞形态变化

初始藻密度为 10⁵ 个·mL⁻¹ 时, 对照组铜绿微

囊藻的藻细胞形态始终保持完整的球形或椭圆形, 原生质体呈深绿色 (图 1-a)。滤液组在第 0 天时铜绿微囊藻藻细胞形态完整健康, 第 2 天部分藻细胞开始出现褪色、变形、破裂现象, 第 6 天被溶解的藻细胞数量进一步增多 (图 1-b)。菌体组第 0 天时铜绿微囊藻藻细胞形态完整健康, 第 2 天时部分藻细胞出现褪色、变形、破裂现象, 蜡样芽胞杆菌聚集在藻细胞周围并与其直接接触, 第 6 天大量藻细胞被溶解 (图 1-c), 几乎看不到形态完整的藻细胞。菌液组第 0 天时铜绿微囊藻藻细胞形态完整健康, 第 2 天时部分藻细胞出现褪色、变形、破裂现象, 蜡样芽胞杆菌聚集在藻细胞周围, 第 6 天绝大部分藻细胞被溶解 (图 1-d), 看不到形态完整的藻细胞。

初始藻密度为 10⁶ 个·mL⁻¹ 时, 对照组铜绿微囊藻藻细胞形态始终保持完整的球形或椭圆形, 原生质体呈深绿色 (图 2-a)。滤液组第 0 天时铜绿微囊藻藻细胞形态完整健康, 第 2 天时部分藻细胞开始出现褪色、变形、破裂现象, 第 6 天被溶解的藻细胞数量进一步增多 (图 2-b), 但与 10⁵ 个·mL⁻¹ 初始藻密度组相比, 在一个视野中被溶解的藻细胞占比更少。菌体组第 0 天时铜绿微囊藻藻细胞形态完

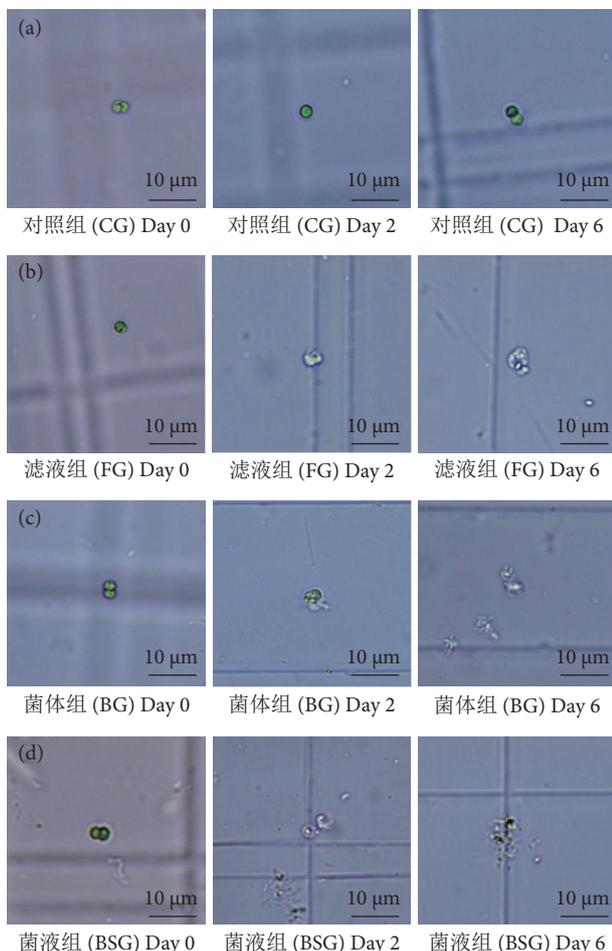


图1 初始藻密度为 10^5 个·mL⁻¹ 时各处理组中铜绿微囊藻藻细胞形态变化 (400×)

Fig. 1 Changes in cell morphology of *M. aeruginosa* in different treatment groups at initial microalgal density of 10^5 cell·mL⁻¹ (400×)

整健康,第2天部分藻细胞出现褪色、变形、破裂现象,可看到蜡样芽胞杆菌聚集在藻细胞周围并与其直接接触的现象,第6天大量藻细胞被溶解(图2-c),但仍存在一定数量的形态完整的藻细胞。菌液组第0天时铜绿微囊藻藻细胞形态完整健康,第2天部分藻细胞出现褪色、变形、破裂现象,蜡样芽胞杆菌聚集在藻细胞周围,第6天绝大部分藻细胞被溶解(图2-d),但仍存在极少数的形态完整的藻细胞。

2.2 铜绿微囊藻细胞数量变动

当共培养体系初始藻密度为 10^5 个·mL⁻¹ 时,对照组的藻密度在实验期间基本维持稳定,在第4天达到最高值 5.67×10^5 个·mL⁻¹,到第6天为 3.67×10^5 个·mL⁻¹。其余各实验组藻密度均呈下降趋势,以菌体组和菌液组最为明显。滤液组藻密度呈下降趋势,第4—第6天趋于平稳且达到最低密

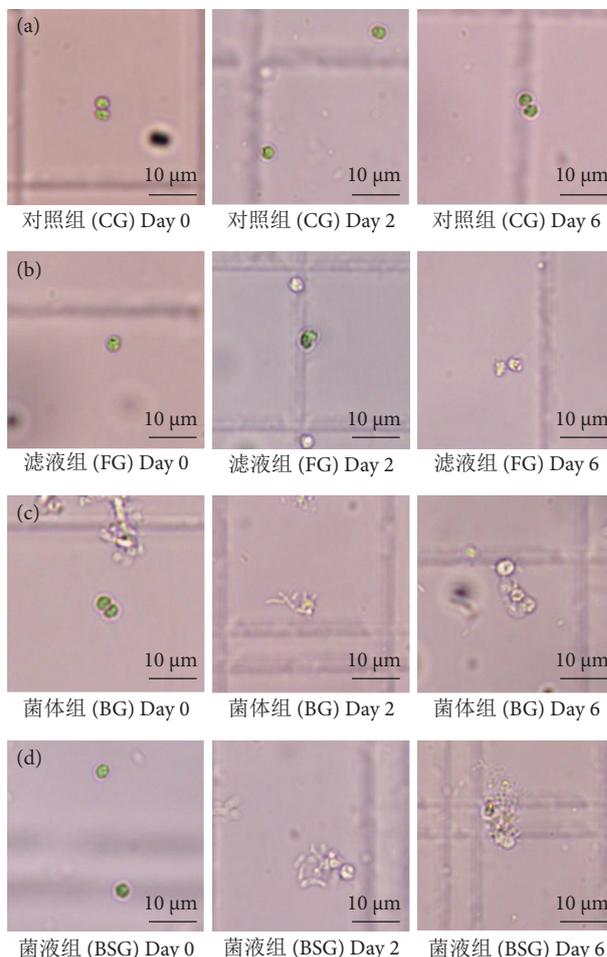


图2 初始藻密度为 10^6 个·mL⁻¹ 时各处理组中铜绿微囊藻藻细胞形态变化 (400×)

Fig. 2 Changes in cell morphology of *M. aeruginosa* in different treatment groups at initial microalgal density of 10^6 cell·mL⁻¹ (400×)

度 4.00×10^4 个·mL⁻¹,显著低于对照组 ($p < 0.05$)。菌体组藻密度在第4—第6天内显著下降,第6天藻密度最低,仅为 1.27×10^2 个·mL⁻¹,极显著低于对照组 ($p < 0.01$)。菌液组在第4—第6天内的下降趋势最为显著,第6天密度仅为 2.30×10 个·mL⁻¹,极显著低于对照组 ($p < 0.01$,图3-a)。

当共培养体系初始藻密度为 10^6 个·mL⁻¹ 时,实验期间,对照组的藻密度无显著性变化,从初始的 3.48×10^6 个·mL⁻¹ 稳定到第6天的 3.17×10^6 个·mL⁻¹。滤液组的藻密度略微减少,从 4.52×10^6 个·mL⁻¹ 降至 2.88×10^6 个·mL⁻¹。菌体组藻密度在第3—第6天内显著下降,第6天藻密度最低,为 1.32×10^6 个·mL⁻¹,显著低于对照组 ($p < 0.05$)。菌液组藻密度在第4—第6天内显著下降,第6天藻密度最低 (8.33×10^5 个·mL⁻¹),显著低于对照组 ($p < 0.05$,图3-b)。

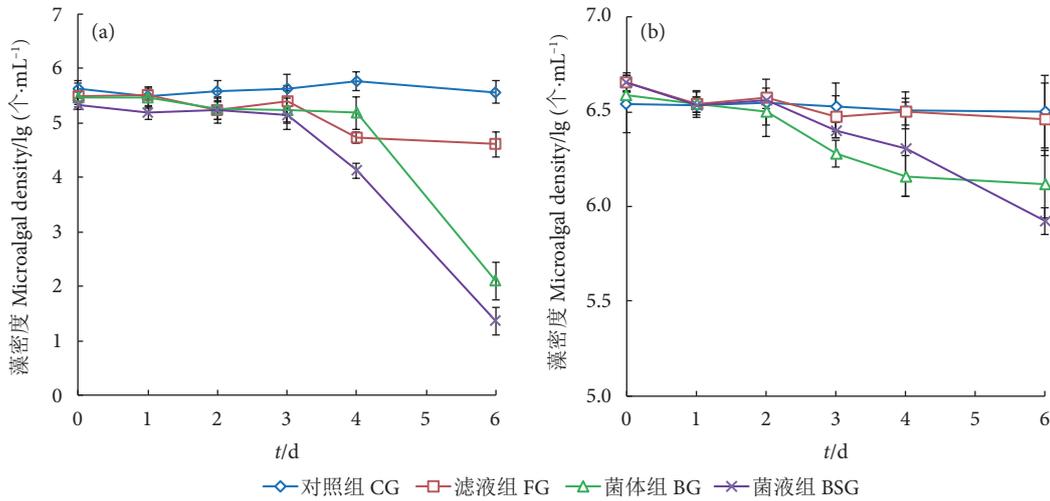


图3 2种初始藻密度下各组藻密度变化

注: a为初始藻密度 10⁵ 个·mL⁻¹; b为初始藻密度 10⁶ 个·mL⁻¹。

Fig. 3 Variation of microalgal density in each group at two initial microalgal densities

Note: a shows the variation at the initial microalgal density of 10⁵ cell·mL⁻¹, while b shows the variation at the initial microalgal density of 10⁶ cell·mL⁻¹.

2.3 各组蜡样芽胞杆菌数量变动

在初始藻密度为 10⁵ 个·mL⁻¹ 的共培养体系中, 菌体组初始菌量平均值为 4.47×10⁶ CFU·mL⁻¹, 此后缓慢下降, 到第 6 天降至 1.97×10⁶ CFU·mL⁻¹。

菌液组初始菌量平均值为 4.55×10⁶ CFU·mL⁻¹, 在第 0—第 2 天内呈上升趋势, 第 2 天达到最高菌量 (5.82×10⁶ CFU·mL⁻¹), 之后缓慢下降, 第 6 天菌量为 4.04×10⁶ CFU·mL⁻¹ (图 4-a)。

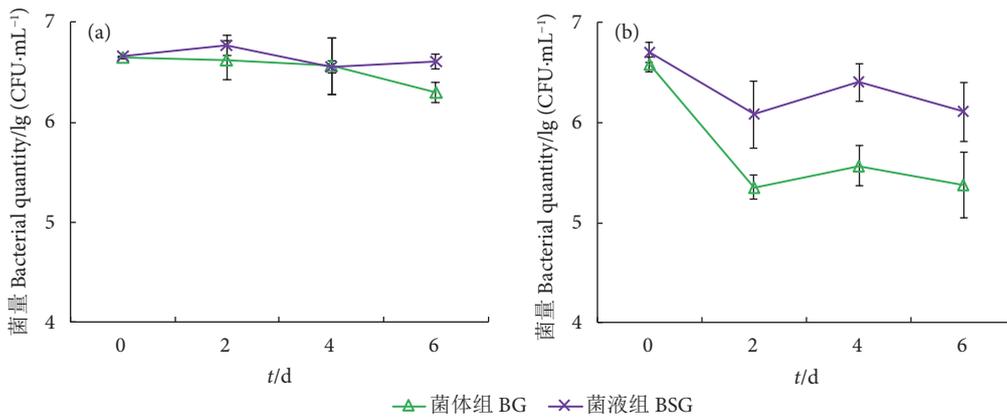


图4 2种初始藻密度下蜡样芽胞杆菌的数量变动趋势

注: a为初始藻密度 10⁵ 个·mL⁻¹; b为初始藻密度 10⁶ 个·mL⁻¹。

Fig. 4 Quantity variation trend of *B. cereus* at two initial microalgal densities

Note: a shows the variation at the initial microalgal density of 10⁵ cell·mL⁻¹, while b shows the variation at the initial microalgal density of 10⁶ cell·mL⁻¹.

在初始藻密度为 10⁶ 个·mL⁻¹ 的共培养体系中, 菌体组初始菌量平均值为 3.83×10⁶ CFU·mL⁻¹, 在第 2—第 6 天内菌量下降至 2.30×10⁵~3.70×10⁵ CFU·mL⁻¹。菌液组初始菌量为 5.07×10⁶ CFU·mL⁻¹, 在第 2—第 6 天内菌量下降至 1.21×10⁶~2.54×10⁶ CFU·mL⁻¹ (图 4-b)。

2.4 2种初始藻密度下不同处理组 CZBC1 的溶藻率

2种初始铜绿微囊藻密度下滤液组、菌体组、

菌液组 CZBC1 的溶藻率见表 2。初始藻密度为 10⁵ 个·mL⁻¹ 时, 菌体组和菌液组均达 99.9% 以上, 溶藻效果极为显著; 滤液组溶藻率虽相对较低, 仍为 86% 以上。初始藻密度为 10⁶ 个·mL⁻¹ 时, 菌液组溶藻率为 81% 以上, 滤液组和菌体组的溶藻率相比于菌液组明显变低, 分别仅为 36.2% 和 66.0%。总体来看, 初始藻密度为 10⁵ 个·mL⁻¹ 时, CZBC1 的溶藻率较初始藻密度为 10⁶ 个·mL⁻¹

表2 2种初始藻密度下不同处理组的溶藻率比较

Table 2 Comparison of dissolved algae rates of different treatment groups at two initial microalgal densities

初始藻密度 Initial microalgal density/(个·mL ⁻¹)	滤液组 Filtrate group (FG)/%	菌体组 Bacterial group (BG)/%	菌液组 Bacterial solution group (BSG)/%
10 ⁵	86.7±8.82 ^b	99.9±0.04 ^a	99.9±0.01 ^a
10 ⁶	36.2±9.71 ^c	66.0±4.43 ^b	81.7±2.77 ^a

注：同行不同上标字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: The values with different superscript letters within the same line are significantly different ($p < 0.05$).

时更高；同一初始藻密度下，菌液组的溶藻率最高，在初始藻密度为 10^6 个·mL⁻¹ 时菌液组与其他处理组的差异尤为明显。

3 讨论

3.1 溶藻菌菌株 CZBC1 在氯化物型盐碱水体中对铜绿微囊藻的溶藻效果

菌株 CZBC1 是一株分离自海水养殖池塘的蓝藻溶藻菌，以 10^6 CFU·mL⁻¹ 的初始菌量施用菌株 CZBC1，在第 3—第 9 天内其对绿色颤藻、小颤藻、浮游颤藻等 3 种颤藻的溶藻率可达 100%^[16]。王善龙等^[17] 在水体 pH 6.4~8.1、盐度 4.5‰~6.0‰ 的对虾养殖土池中分别以菌量 3×10^3 和 3×10^5 CFU·mL⁻¹ 施用 CZBC1，均可有效抑制有害蓝藻绿色颤藻的生长，为有益绿藻波吉卵囊藻 (*Oocystis borgei*) 占据生态优势提供有利空间，从而为对虾养殖营造良好的水生态环境。

盐碱水有别于海水，具有高 pH、高碱度、高离子系数等特点^[7]。本研究中所用的氯化物型盐碱水的 pH 为 8.8，盐度为 4‰，碱度为 6.0 mmol·L⁻¹。在此水体中，菌株 CZBC1 对有害蓝藻铜绿微囊藻具有良好的溶藻效果，优于周成夷等^[19] 研究的地衣芽孢杆菌 (*B. licheniformis*) 对铜绿微囊藻的溶藻效果。对比初始菌量为 10^6 CFU·mL⁻¹ 的菌株 CZBC1 对初始藻密度分别为 10^3 、 10^4 、 10^5 个·mL⁻¹ 的浮游颤藻、绿色颤藻、小颤藻在 1 d 内就有显著的溶藻效果^[16]，菌株 CZBC1 在氯化物型盐碱水环境中对铜绿微囊藻的溶藻作用时间更长。这可能与菌株的分离和最适生长环境有一定的关系。因此，后续可考虑从盐碱池塘环境中分离筛选对铜绿微囊藻具有溶藻效果的土著有益菌株。

从溶藻方式来看，CZBC1 的菌液组、菌体组和滤液组在氯化物型盐碱水中均对铜绿微囊藻表现出一定的溶藻效果，且菌液组 > 菌体组 > 滤液组。这说明溶藻菌 CZBC1 在氯化物型盐碱水中对铜绿微囊藻的溶藻方式是以直接溶藻为主，间接溶藻为

辅。直接作用的溶藻方式为溶藻菌直接接触到藻细胞，释放酶溶解藻细胞壁，入侵到藻细胞内，最终使藻细胞死亡^[20]。Gumbo 和 Cloete 等^[21] 揭示了蕈状芽孢杆菌 (*B. mycooides*) B16 杀死铜绿微囊藻的 2 种机制，即细胞膜裂解和藻细胞的阴影化导致光抑制。仅添加菌体悬液时，2 种初始藻密度下的藻密度均有不同程度的下降，说明溶藻菌 CZBC1 具有直接溶藻的作用方式。而间接作用的溶藻方式包括分泌胞外溶藻活性物质、与藻类竞争营养物质和溶藻细菌的絮凝作用^[22-24]。仅添加滤液时，2 种初始藻密度下的藻密度均有不同程度的下降，即菌株 CZBC1 的代谢产物中含有一定的溶藻物质，该菌株具有间接溶藻的作用方式。添加菌液时，藻密度下降幅度最大，即在直接和间接 2 种溶藻方式的共同作用下，溶藻效果最佳。因此，在溶藻菌 CZBC1 的菌剂生产和养殖应用时，可采用粉剂产品的剂型，以菌剂活化的方式应用效果最佳。

3.2 溶藻菌菌株 CZBC1 在不同初始藻密度下对铜绿微囊藻的溶藻效果

由于溶藻机制的不同，初始藻密度对不同菌株的溶藻效应产生的影响也不同。王佳等^[25] 通过对初始藻的叶绿素 *a* 浓度梯度稀释，发现寡养单胞菌 (*Stenotrophomonas* sp.) 溶藻菌 H1 对铜绿微囊藻的溶藻率随藻密度的升高而下降，藻密度越低则溶藻效果越好。黄现恩^[26] 研究表明，蜡样芽孢杆菌 G-2 对铜绿微囊藻的溶藻率随初始藻密度的升高而增加，而溶血不动杆菌 (*Acinetobacter haemolyticus*) A-8 的溶藻率不受初始藻密度的影响。周成夷等^[19] 的研究表明，指数生长期的地衣芽孢杆菌对 1.0×10^6 、 6.0×10^6 、 2.0×10^7 个·mL⁻¹ 的铜绿微囊藻均表现出抑制作用，抑制率分别为 51.8%、71.1%、65.7%。本研究中，无论是初始藻密度为 10^5 个·mL⁻¹ 还是 10^6 个·mL⁻¹，菌株 CZBC1 对铜绿微囊藻均表现出良好的溶藻效果。

池塘中藻类暴发时，通常以水体中藻细胞密度达到 10^7 个·L⁻¹ 作为藻华发生的标准^[27]。微囊藻水

华是微囊藻细胞群体上浮到水面形成的聚集体, 在自然水体中以成团的形式存在, 水面藻细胞密度更高。根据本研究结果, 溶藻菌 CZBC1 在氯化物型盐碱水中对铜绿微囊藻具有良好的溶藻效果, 可用于氯化物型盐碱池塘中的微囊藻水华防控。在实际养殖生产中, 建议以预防为主, 通过定期施用溶藻菌 CZBC1, 防控有害藻华的形成。

参考文献:

- [1] 李媛, 张家卫, 魏杰, 等. 我国蓝藻水华的发生机理、危害及防控利用研究进展[J]. *微生物学杂志*, 2015, 35(4): 93-97.
- [2] 徐煜, 徐武杰, 文国樑, 等. 颤藻浓度和水温对凡纳滨对虾相应颤藻粗提液毒性的影响[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(1): 26-32.
- [3] DUAN Y F, XIONG D L, WANG Y, et al. Effects of *Microcystis aeruginosa* and microcystin-LR on intestinal histology, immune response, and microbial community in *Litopenaeus vannamei*[J]. *Environ Pollut*, 2020, 265: 114774.
- [4] GAO J F, ZUO H L, YANG L W, et al. Long-term influence of cyanobacterial bloom on the immune system of *Litopenaeus vannamei*[J]. *Fish Shellfish Immunol*, 2017, 61: 79-85.
- [5] 朱润唐, 陶红, 来琦芳, 等. 盐碱水养殖固体废物生物炭对硫酸盐型盐碱土的改良效果评价[J]. *海洋渔业*, 2024, 46(2): 195-205.
- [6] 来琦芳, 玄宗利, 高鹏程, 等. 盐碱水环境与增养殖种类[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 2-3.
- [7] 胡红浪, 来琦芳, 玄宗利, 等. 盐碱水绿色养殖技术模式[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021: 3.
- [8] 曹煜成. 虾池微藻优势种群调控机理[D]. 广州: 中山大学, 2014: 54-56.
- [9] 苏发文, 高鹏程, 来琦芳, 等. 铜绿微囊藻和小球藻对水环境 pH 的影响[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(6): 1380-1388.
- [10] YANG Y F, HU X J, ZHANG J, et al. Community level physiological study of algicidal bacteria in the phycosphere of *Skeletonema costatum* and *Scrippsiella trochoidea*[J]. *Harmful Algae*, 2013, 28: 88-96.
- [11] LIU F, ZHU S N, QIN L, et al. Isolation, identification of algicidal bacteria and contrastive study on algicidal properties against *Microcystis aeruginosa*[J]. *Biochem Eng J*, 2022, 185: 108525.
- [12] 黄洪辉, 韩贝贝, 张书飞, 等. 海洋溶藻菌的研究进展[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(5): 126-132.
- [13] GENG Y Q, XING R L, ZHANG H X, et al. Inhibitory effect and mechanism of algicidal bacteria on *Chaetomorpha valida*[J]. *Sci Total Environ*, 2024, 914: 169850.
- [14] 曹煜成, 王丽花, 文国樑, 等. 一株溶解池塘颤藻的蜡样芽胞杆菌菌株 CZBC1 及其应用: CN201310203745.3[P]. 2014-12-17.
- [15] HU X J, WEN G L, XU W J, et al. Effects of the algicidal bacterium CZBC1 on microalgal and bacterial communities in shrimp culture[J]. *Aquac Env Interac*, 2019, 11: 279-290.
- [16] HU X J, XU Y, SU H C, et al. Algicidal bacterium CZBC1 inhibits the growth of *Oscillatoria chlorina*, *Oscillatoria tenuis*, and *Oscillatoria planctonica*[J]. *AMB Express*, 2019, 9: 144.
- [17] 王善龙, 曹煜成, 徐煜, 等. 蜡样芽胞杆菌对对虾养殖水体微藻群落的调控研究[J]. *南方水产科学*, 2016, 12(1): 9-16.
- [18] 赵度宾, 李月红, 来琦芳, 等. 益生菌在盐碱养殖水体中调控作用的研究进展[J]. *水产科技情报*, 2023, 50(1): 53-58.
- [19] 周成夷, 玄宗利, 来琦芳, 等. 盐碱水中地衣芽孢杆菌抑制铜绿微囊藻生长研究[J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(6): 136-141.
- [20] ZENG Y D, WANG J Y, YANG C Y, et al. A *Streptomyces globisporus* strain kills *Microcystis aeruginosa* via cell-to-cell contact[J]. *Sci Total Environ*, 2021, 769: 144489.
- [21] GUMBO J R, CLOETE T E. The mechanism of *Microcystis aeruginosa* death upon exposure to *Bacillus mycoides*[J]. *Phys Chem Earth*, 2011, 36(14): 881-886.
- [22] KO S R, JEONG Y J, CHO S H, et al. Functional role of a novel algicidal compound produced by *Pseudoruegeria* sp. M32A2M on the harmful algae *Alexandrium catenella*[J]. *Chemosphere*, 2022, 300: 134535.
- [23] JIA Y, LU J Z, WANG M, et al. Algicidal bacteria in phycosphere regulate free-living Symbiodinium fate via triggering oxidative stress and photosynthetic system damage[J]. *Ecotox Environ Safe*, 2023, 263: 115369.
- [24] SU J F, MA M, WEI L, et al. Algicidal and denitrification characterization of *Acinetobacter* sp. J25 against *Microcystis aeruginosa* and microbial community in eutrophic landscape water[J]. *Mar Pollut Bull*, 2016, 107(1): 233-239.
- [25] 王佳, 洪桂云, 张瑾. 一株铜绿微囊藻溶藻菌的分离鉴定和溶藻特性[J]. *安徽农业大学学报*, 2016, 43(5): 768-773.
- [26] 黄现恩. 几株微囊藻毒素降解菌和溶藻菌的分离鉴定及作用效果[D]. 苏州: 苏州大学, 2015: 35-37.
- [27] IRIARTE A, PURDIE D A. Factors controlling the timing of major spring bloom events in an UK south coast estuary[J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2004, 61(4): 679-690.