

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2020020602

许明宸, 张文艺, 毛林强. 太湖土著田螺消化道中溶藻菌 XMC 溶藻进程与叶绿素 a 降解动力学研究[J]. 环境化学, 2021, 40(6): 1855-1861.

XU Mingchen, ZHANG Wenyi, MAO Linqiang. Study on algae-lysing process and chlorophyll-a degradation kinetics of algicidal bacteria XMC in the digestive tract of indigenous field snails of Taihu Lake[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40 (6): 1855-1861.

太湖土著田螺消化道中溶藻菌 XMC 溶藻进程与 叶绿素 a 降解动力学研究*

许明宸 张文艺** 毛林强

(常州大学环境与安全工程学院, 常州, 213164)

摘要 在蓝藻爆发区域的太湖土著田螺消化道内, 筛选出 1 株高效溶藻菌, 命名为 XMC. 以铜绿微囊藻为受试对象, 以叶绿素 a 含量检验溶藻菌 XMC 溶藻效果, 考察了菌株溶藻能力、溶藻过程及其溶藻产物等. 实验结果表明, 溶藻菌 XMC 具有较强的溶藻能力, 其生长曲线呈“S”型增长, 符合 Logistic 动力学模型. 菌藻共生环境中, 藻液叶绿素 a 含量与溶藻时间两者之间符合一级动力学模型 $[Chla]=4831.82071 \times e^{-0.0241t}$, 该模型可用于预测铜绿微囊藻溶藻过程的降解效果; 溶藻菌 XMC 的溶藻进程以间接溶藻为主, 通过分泌耐高温的非蛋白类溶藻物质来裂解藻细胞, 菌液处理完的铜绿微囊藻液中, 产物主要为藻细胞破裂分解出的芳环结构的氨基酸、酰胺类等物质.

关键词 溶藻菌, 铜绿微囊藻, 动力学模型, 叶绿素 a.

Study on algae-lysing process and chlorophyll-a degradation kinetics of algicidal bacteria XMC in the digestive tract of indigenous field snails of Taihu Lake

XU Mingchen ZHANG Wenyi** MAO Linqiang

(Changzhou University, School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou, 213164, China)

Abstract A high-efficiency algicidal bacteria named XMC was selected from the native snails of Taihu Lake, which lived in the area of cyanobacteria outbreak for a long time. *Microcystis aeruginosa* was used as the test object, and the chlorophyll-a content was used to test the algae-lysing effect of the algicidal bacteria XMC, and the algae dissolving ability, process and products of the bacteria were investigated. The experimental results showed that the algicidal bacteria XMC had strong algicidal ability, and the growth curve of algicidal bacteria XMC showed an “S” shape which accords with the Logistic dynamic model. The relationship between chlorophyll-a content and algae lysis time in the symbiotic environment of bacteria and algae conformed to the first-order kinetic model ($[Chla] = 4831.82071 \times e^{-0.0241t}$), which could be used to predict the degradation effect of *Microcystis aeruginosa*. The algicidal bacteria XMC was mainly an indirect algae lysate, which could lyse algal cells by secreting heat-resistant nonprotein lysates. In the treated *Microcystis aeruginosa*, the products were mainly amino acids and amides with aromatic ring structure broken down by algal cells.

2020 年 2 月 6 日收稿(Received: February 6, 2020).

* 水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202-004)资助.

Supported by Major Science and Technology Projects for Water Pollution Control and Treatment (2017ZX07202-004).

** 通讯联系人 Corresponding author, E-mail: zhangwenyi888@sina.com

Keywords algicidal bacteria, *Microcystis aeruginosa*, dynamic model, chlorophyll-a.

近年来,许多环境工作者的研究成果表明水华的突然消亡可能与溶藻细菌的感染有关联^[1],溶藻细菌具有种类多、繁殖快、分布广、代谢类型多样等特点,作为维持水生生态系统生物种群功能以及结构的重要组成部分,在维持藻的生物量平衡方面具有相当重要的作用;同时溶藻细菌高效、专一性强、二次污染低、对环境友好、制取成本低廉,把溶藻细菌当作水华的防治生物,已经引起许多环境工作者的关注^[2].

目前,国内外不乏利用溶藻细菌进行生物控藻的研究成果,其重点大多聚焦于对高效溶藻菌的获取以及对菌株特性的研究与溶藻条件优化上,对溶藻细菌生长以及在溶藻细菌作用下溶藻动力学的研究相对较少,通过建立菌株生长与铜绿微囊藻降解二者相应的生长模型及动力学机制,可为控制太湖水华提供理论支撑和技术支持^[3-4].同时,工程措施上应用于太湖蓝藻治理的高效溶藻菌鲜见报道,因此仍需对相关溶藻菌株的水体环境适应性及其溶藻过程中的进程调控作进一步深入研究^[5-6].从太湖土著水生动物体内筛选出能够有效溶藻并适应水体环境的菌株,可以起到有效溶藻、保护水体环境安全的作用^[7-8].

本文从太湖土著田螺消化道中筛选具备溶藻能力的微生物菌群,并通过系列溶藻条件对比优选出高效溶藻菌株,对菌株生长动力学、溶藻动力学进行实验分析,进而采用红外光谱分析技术研究溶藻菌的溶藻进程,从而了解溶藻产物的构成,以期同类菌株的溶藻进程分析提供理论参考^[9-10].

1 材料与方法(Materials and Methods)

1.1 材料

1.1.1 实验样品

实验菌种:筛选自太湖土著田螺消化道中,置于4℃冰箱中保存.

实验藻种:铜绿微囊藻购自中国科学院武汉水生生物研究所(FACHB-Collection, CAS),藻种编号为FACHB-905.设定铜绿微囊藻培养条件为光照周期比12 h:12 h、光照强度3000 Lux、温度25℃^[11].

1.1.2 主要实验仪器

净化工作台,立式压力蒸汽灭菌器,数显光照培养箱,恒温振荡培养箱,台式大型离心机等.

1.1.3 培养基

牛肉膏蛋白胨培养基:依次称取NaCl 1.25 g、鱼粉蛋白胨 2.5 g、牛肉膏 1.25 g、加入250 mL蒸馏水,调节pH值至7.0—7.2(固体培养基另加琼脂粉5 g);

培养基须经高温灭菌(121℃、20 min),冷却至室温后使用.

1.2 实验方法

1.2.1 溶藻计算方式

利用乙醇法提取藻液叶绿素a^[12],测定并计算出每天的叶绿素a含量,叶绿素a(式1)以及溶藻率(式2)测定公式如下:

$$\text{叶绿素a}(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) = V_2 \cdot \frac{[11.64 \cdot (D_{663} - D_{750}) - 2.16 \cdot (D_{645} - D_{750}) + 0.10 \cdot (D_{630} - D_{750})]}{V_1 \cdot \delta} \quad (1)$$

式(1)中, V_2 表示提取液体积(mL),即90%乙醇的体积,8 mL; D 表示吸光度; V_1 表示藻液体积(L); δ 比色皿光程,1 cm.

$$\text{溶藻率} = \frac{\text{空白组Chla} - \text{试验组Chla}}{\text{空白组Chla}} \times 100\% \quad (2)$$

1.2.2 生长曲线绘制

生长曲线的测定采用比浊法,具体操作详见文献[13].

1.2.3 不同处理方式对溶藻效果的探究

设置以下6种方式处理菌液:(1)培养18—24 h处于对数增长期菌液(以下皆简称为发酵液);(2)牛

肉膏蛋白胨液体培养基(以下皆简称为液培);(3)将(1)中发酵液经 $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 处理 10 min 后的上清液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜两次,过滤除菌(用牛肉膏蛋白胨固体培养基检测上清液是否除菌完全),即为上清液;(4)收集(3)中滤膜,用新鲜无菌水洗菌 3 遍,最后等体积重悬制备菌悬液;(5)将菌液(1)经高温高压(设定 $121 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$)灭活处理 25 min;(6)将菌液(1)经超声波破碎(设定 10 W、20 min).将上述 6 种菌液按照菌藻比 1:10 的比例投加到 100 mL 新鲜铜绿微囊藻液中,每组样做 3 个平行样,连续测定 7 d,每间隔 24 h 测 1 次藻液叶绿素 a 并计算溶藻率.

1.2.4 红外光谱分析

经过溶藻菌 XMC 处理后的铜绿微囊藻液与对照组铜绿微囊藻液分别离心后,取离心沉淀物用蒸馏水洗,重复 3 次,放入冷冻干燥机中过夜处理,用 KBr 固定后在红外光谱分析仪上(Nicolet iS50)进行红外光谱扫描并用 origin9.0 作出红外光谱图.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 菌株形态及其溶藻能力

显微镜观察培养 3 d 左右菌株形态,筛选出 5 株性状明显的菌株.各菌株特征如表 1 所示.溶藻实验结果表明,1 # 在 7 d 内的溶藻率远高于其他菌株,达到 48.91%,因此选取 1 # 作为研究对象并命名为 XMC.图 1 为溶藻菌 XMC 作用下 7 d 内藻液叶绿素 a 含量变化.

表 1 系列菌株形态特征

Table 1 Morphological characteristics of strains

菌株编号 Strain number	大小/mm Size	形状 Shape	颜色 Color	表面形态 Surface morphology	溶藻率/% Algae lysing rate
1#	1—3	圆形 Circular	乳白 Milky white	表面及边缘都光滑凸起 Surface and edges are smooth and raised	48.91
2#	1—2	圆形 Circular	白 White	中间干瘪,凹 The middle is shriveled and sunken	25.18
3#	3—4	圆形 Circular	白 White	表面及边缘都光滑凸起 Smooth and convex surface and edge	9.73
4#	1—3	圆形 Circular	橙黄 Orange yellow	表面及边缘都光滑凸起 Smooth and convex surface and edge	39.65
5#	1—2	圆形 Circular	粉 Pink	表面光滑 smooth surface	4.52

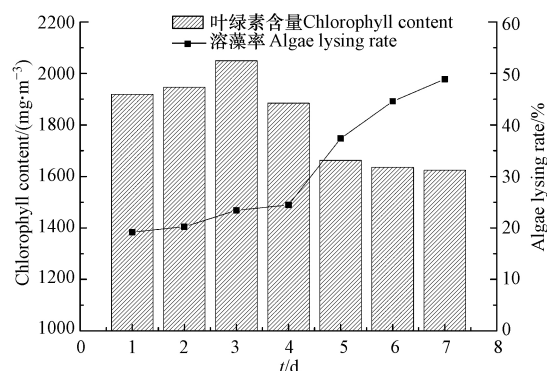


图 1 7 d 内藻液叶绿素 a 含量变化

Fig.1 The change of chlorophyll-a content in algal fluid in 7 days

2.2 生长曲线测定

溶藻菌 XMC 生长曲线如图 2 所示,在理想条件下,溶藻菌 XMC 可破碎并利用藻细胞释放的物质作为自身生长的氮、碳源,进行生长代谢,但是在实验室规模下,溶藻菌并不能完全利用营养物质,因此有必要对菌株生长过程进行分析.

由实验结果可知,溶藻菌 XMC 的生长方式呈“S”型增长,与 Logistic 模型类似,因此采用该模型对菌株生长曲线进行拟合^[14],如公式(3)所示:

$$N_t = \frac{K}{1 + e^{a-rt}} \quad (3)$$

式(3)中, N_t 表示生长时间为 t 时的细菌细胞密度; K 表示菌株生长的环境承载量; a 是生长过程中一个参数; r 表示溶藻菌 XMC 生长平均速率 (h^{-1}); t 表示细菌生长时间 (h). 由实验结果可知: $K=0.66702$, $a=3.04675$, $r=0.08598$. 溶藻菌 XMC 生长 Logistic 模型如公式(4)所示:

$$N_t = \frac{0.66702}{1 + e^{3.04675 - 0.08598t}} \quad (4)$$

溶藻菌 XMC 生长拟合曲线如图 2 所示, 菌株在液培中培养 5 d, 其生长曲线与 Logistic 模型的相关性达到 0.99551, 处于对数增长期时, 菌株增长略低于 Logistic 拟合方程, 而处于停滞期、稳定期时, 其增长则略高于理想条件下的数值. 通过比对菌株生长曲线, 控制实验期间溶藻菌处于对数增长期, 从而使后续溶藻实验达到最佳溶藻效果^[15].

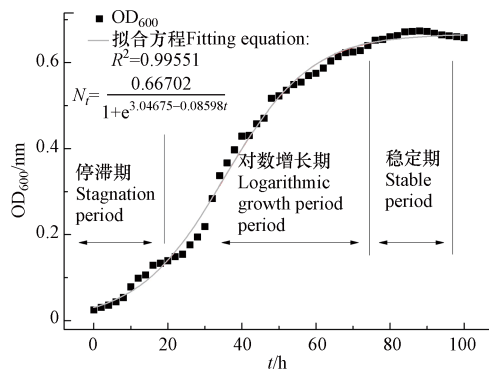


图 2 溶藻菌 XMC 生长曲线及 Logistic 拟合曲线

Fig.2 Growth curve and Logistic fit curve of algicidal bacteria XMC

2.3 溶藻过程动力学分析

取发酵液混入藻液中, 控制菌藻比 1 : 10、藻初始浓度为 $3338.26 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在此基础上研究溶藻菌 XMC 溶解铜绿微囊藻过程动力学, 发现该菌株对铜绿微囊藻的降解过程与一级动力学模型相似, 因此采用一级动力学模型进行拟合^[16-18], 如公式(5)所示:

$$[\text{Chla}] = [\text{Chla}_0] \times e^{-wt} \quad (5)$$

式(5)中, Chl-a 表示在时间为 t 时的藻液叶绿素 a 含量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); Chl-a_0 表示藻溶液初始叶绿素 a 含量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); w 是一级动力学常数 (d^{-1}); t 表示溶藻发生的时间 (d). 由实验结果可知: $[\text{Chl-a}_0]=4831.82071$, $w=0.0241$. 藻液叶绿素 a 降解方程如公式(6)所示:

$$[\text{Chla}] = 4831.82071 \times e^{-0.0241t} \quad (6)$$

由图 3 可知, 在溶藻菌 XMC 溶解铜绿微囊藻过程中, 藻液叶绿素 a 含量变化与动力学拟合方程之间相关性达 0.92729, 其中藻液浓度与拟合方程中藻细胞浓度相差不大, 溶藻完成藻液叶绿素 a 含量与溶藻时间呈反比关系.

对比溶藻菌 XMC 的生长曲线与叶绿素 a 降解方程可知: 处于对数增长期时, 溶藻菌表现出对不良环境的优秀抵抗能力, 其细胞代谢活力最强, 合成新物质的速度最快, 藻液叶绿素 a 减少量最大, 当菌株处于稳定期时, 溶藻菌 XMC 的种间竞争关系会逐步降低其溶藻能力.

由实验结果可知, 在溶藻过程中, 处于对数期的溶藻菌溶藻能力最强, 溶藻完成藻液叶绿素 a 含量与溶藻时间符合一级动力学模型 $[\text{Chla}]=4831.82071 \times e^{-0.0241t}$, 这与李小彩等^[19]在红球菌的溶藻特性及应用研究中的结论一致, 此结论为溶藻菌 XMC 在实际工程应用中提供理论支持, 该动力学模型可用于预测铜绿微囊藻溶藻过程的降解效果^[20].

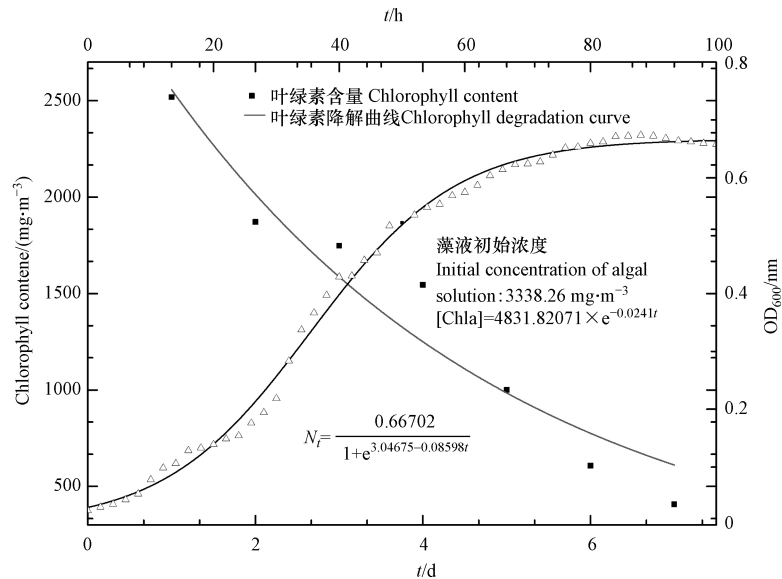


图3 溶藻菌 XMC 溶藻过程的动力学曲线与生长动力学曲线

Fig.3 Kinetic Curve and growth kinetics curve of algalicidal bacteria XMC

2.4 不同处理方式对溶藻效果的影响

菌液处理方式不同,可能造成溶藻菌 XMC 的溶藻效果不同,为此设计了不同菌液处理方式研究对溶藻效果的影响,测定结果如图 4 所示.发酵液溶藻能力高于其它实验样本,液培本身具有一定的溶藻能力;经超声波粉碎处理与菌悬液溶藻效果显著,可见溶藻物质可能来源于菌株胞内物质;离心上清液中不含菌体但仍表现出溶藻能力,可能是菌株分泌与破碎物中的某些胞外非蛋白类物质具有溶藻作用,进行间接溶藻;经高温处理的菌液并不会丧失溶藻活性,说明这种溶藻物质可能具有耐高温的特性^[21],或者是菌株通过自身特性在高温条件下分泌某种物质直接溶藻;

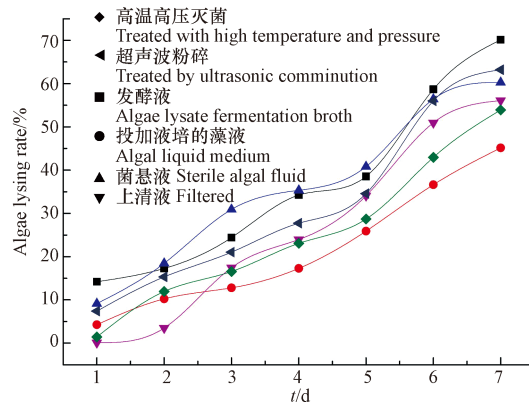


图4 不同菌液处理方式对溶藻效果的影响

Fig.4 Effect of different bacterial solution treatment on the algae-dissolving effect

结合以上 6 种菌液处理方式的溶藻效果推测,溶藻菌 XMC 以间接溶藻为主,通过分泌耐高温的非蛋白类溶藻物质来裂解藻细胞,同时在特定情况下也能通过自身直接裂解藻细胞。

2.5 溶藻产物的红外光谱分析

采用红外光谱对发酵液处理前后的铜绿微囊藻溶藻产物进行分析,结果如图 5 所示.空白对照组与经发酵液处理后的实验组溶藻产物在红外光谱图中吸收峰所在位置类似,吸收曲线形状趋同,但各吸收峰的相对强度之间存在差异。

从吸收峰的归属看, 3452.56 cm^{-1} 处的吸收峰是铜绿微囊藻细胞壁壳聚糖和蛋白质中 O—H 键所在位置,表明细胞壁与蛋白质结构被破坏,藻细胞破裂^[22]; 1637.49 cm^{-1} 处吸收峰处于酰胺 I 带,代表 C=O 键的伸缩振动,而 1545.22 cm^{-1} 处吸收峰位于酰胺 II 带,是 C—N 的伸缩振动和 N—H 的弯曲振

动,表明藻液中可能存在酰胺类物质,蛋白质中的酰胺类物质在溶藻过程中被破坏;波数在 1400.42 cm^{-1} 处 COO^- 键对称伸缩,表明藻液中可能有芳香族氨基酸存在,藻细胞结构遭到破坏,溢出的细胞质被吸收.这与孔赞等对 HJC-D1 溶藻过程光谱学特征研究结果基本一致^[23].

如图 5 所示,波数在 $1000\text{--}1700\text{ cm}^{-1}$ 的区域内,实验组面积相对对照组面积下降约 12%,表明溶藻菌导致藻细胞破裂,藻蛋白分解,结合不同峰位置来看,溶藻产物中存在芳环结构的氨基酸、酰胺类等物质.综合以上结论推测溶藻进程中,溶藻菌 XMC 分泌胞外物质(含有羟基、羧基基团的酸性物质)破坏铜绿微囊藻细胞壁,导致藻细胞内物质(蛋白质等)释放并失活,最终造成藻细胞的死亡.

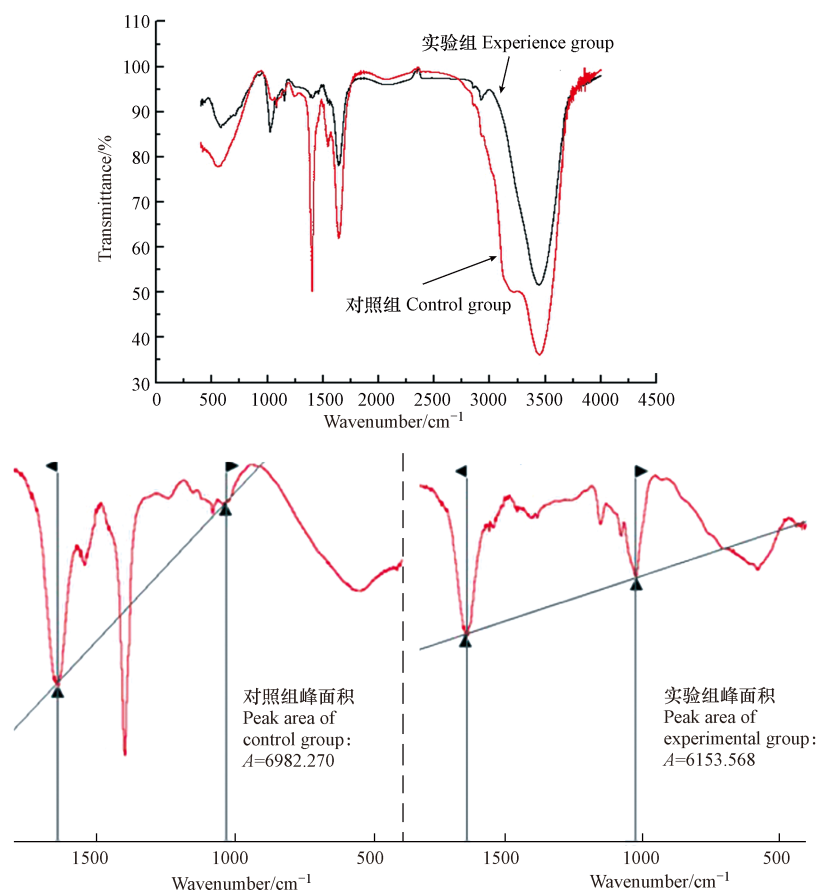


图 5 溶藻前后菌藻共生红外光谱及峰面积图

Fig.5 Infrared spectrum peak area of symbiosis of bacteria and algae before and after algae dissolution

3 结论(Conclusion)

(1) 所筛选出的高效溶藻菌 XMC 取自太湖土著田螺消化道中,不会对太湖产生二次污染,其生长曲线符合 Logistic 模型,处对数增长期的菌株溶藻能力最强.在溶藻进程中,溶藻完成藻液叶绿素 a 含量与溶藻时间之间呈反比关系,该一级动力学模型 $[\text{Chla}] = 4831.82071 \times e^{-0.0241t}$ 可用于预测溶藻过程中溶藻菌对铜绿微囊藻液叶绿素 a 的降解效果.

(2) 经实验结果测定,溶藻菌 XMC 的溶藻进程是间接溶藻与直接溶藻相结合的方式,菌株通过分泌某些耐高温的溶藻物质或者自身直接裂解藻细胞进行溶藻.藻细胞破裂后分解出芳环结构的氨基酸、酰胺类等物质.

参考文献 (References)

- [1] 景澄茗,林涵,陈庆丽,等.微生物控制水华藻的研究进展[J].环境保护科学,2014,40(6):34-37,67.
JING C M, LIN H, CHEN Q L, et al. Progress in microbial control of water bloom [J]. Environmental Protection Science, 2014, 40(6): 34-37, 67(in Chinese).

- [2] 谢静,潘伟斌,曾嘉韞.溶藻细菌L7代谢物对水华鱼腥藻的溶藻效应 [J]. *环境保护科学*, 2014, 40(1): 36-40.
XIE J, PAN W B, ZENG J Y. Algicidal Effect of Metabolites of Algicidal Bacteria Strain L7 on *Anabaena Flosaquae* [J]. *Environmental Protection Science*, 2014, 40(1): 36-40 (in Chinese).
- [3] WANG L, WANG X, JIN X, et al. Analysis on algae growth mechanism and water blooms prediction under effect of multi-factor [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2017, 24(3): 556-562.
- [4] DANIEL J, JANA G, BLAHOSLAV M. Algicidal and cyanocidal effects of selected isoquinoline alkaloids [J]. *Aquaculture Research*, 2010, 41(5): 598-601.
- [5] LI Y, ZHU H, LEI X Q, et al. The first evidence of deinoxanthin from *Deinococcus* sp. Y35 with strong algicidal effect on the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 290: 87-95.
- [6] SHU W, LING Z, HOU S, et al. Toxic effect on the membrane system and cell proliferation of *Prorocentrum donghaiense* caused by the novel algicidal fungus *Talaromyces purpurogenus* YL13 [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2017, 29(1): 275-284.
- [7] GUO P Y, LIU Y, WEN X, et al. Effects of algicide on the growth of *Microcystis flos-aquae* and adsorption capacity to heavy metals [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2015, 12(7): 2339-2348.
- [8] SON M, BAEK S H, SHIN K, et al. Effects of the algicide, thiazolidinedione derivative TD49, on microbial communities in a mesocosm experiment [J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, 187(4): 162-171.
- [9] 程新,李昆太,黄林.一株枯草芽孢杆菌的生长特性及抑藻效果研究 [J]. *生物技术通报*, 2017, 33(7): 120-125.
CHENG X, LI K T, HUANG L. Study on the growth characteristics and algal inhibition of a *Bacillus subtilis* [J]. *Biotechnology Bulletin*, 2017, 33(7): 120-125 (in Chinese).
- [10] 王志勇,石春芳,曹菊梅. RZ1溶藻菌溶藻特性研究 [J]. *现代农业科技*, 2016(1): 229-230.
WANG Z Y, SHI C F, CAO J M. Study on the characteristics of RZ1 alginolytic bacteria [J]. *Modern agricultural science and technology*, 2016(1): 229-230 (in Chinese).
- [11] 董小娜,陈泽慧,毛林强,等.太湖土著激浪鱼内脏中溶藻菌R1的筛选及其特性研究 [J]. *工业安全与环保*, 2018, 44(8): 73-76.
DONG X N, CHEN Z H, MAO L Q, et al. Screening and characterization of alginolytic bacteria R1 from the viscera of native surf fish in Taihu Lake [J]. *Industrial safety and environmental protection*, 2018, 44(8): 73-76 (in Chinese).
- [12] 张志良.植物生理学实验指导(第二版)[M].北京:高等教育出版社,1990.
ZHANG Z L. Experimental guidance of plant physiology (second edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1990 (in Chinese).
- [13] 全桂静,雷晓燕,李辉.微生物学实验指导[M].北京:化学工业出版社,2010.
QUAN G J, LEI X Y, LI H. Experimental guidance of Microbiology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010 (in Chinese).
- [14] 杨益民,付必谦.关于Logistic增长模型参数估计方法的再探讨 [J]. *统计与决策*, 2015(13): 30-34.
YANG Y M, FU B Q. Further discussion on the parameter estimation method of logistic growth model [J]. *Statistics and decision making*, 2015(13): 30-34 (in Chinese).
- [15] YAN R, JI H, WU Y, et al. An Investigation into the Kinetics and Mechanism of the removal of cyanobacteria by extract of ephedra equisetina root [J]. *PLOS ONE*, 2012, 7(8): e42285.
- [16] 郑朔方,杨苏文,金相灿.铜绿微囊藻生长的营养动力学 [J]. *环境科学*, 2005, 26(2): 152-156.
ZHENG S F, YANG S W, JIN X C. Nutritional dynamics of *Microcystis aeruginosa* growth [J]. *Environmental Science*, 2005, 26(2): 152-156 (in Chinese).
- [17] 陈泽慧,高志伟,董小娜,等.藻毒素降解菌CQ5对MC-LR粗提液的降解动力学 [J]. *环境化学*, 2018, 37(1): 82-88.
CHEN Z H, GAO Z W, DONG X N, et al. Degradation kinetics of MC-LR crude extract by alginate degrading bacteria CQ5 [J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(1): 82-88 (in Chinese).
- [18] LØNBORG C, ÁLVAREZSALGADO X. A, MARTÍNEZGARCÍA S, et al A, MARTÍNEZGARCÍA S, et al. Stoichiometry of dissolved organic matter and the kinetics of its microbial degradation in a coastal upwelling system [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2010, 58(2): 117-126.
- [19] 李小彩,胡文容,裴海燕,等.一株溶藻细菌(P15)的溶藻效应研究 [J]. *中国给水排水*, 2006, 22(19): 8-11.
LI X C, HU W R, PEI H Y, et al. Study on the algae dissolving effect of a algae dissolving bacteria (P15) [J]. *Water Supply and Drainage in China*, 2006, 22(19): 8-11 (in Chinese).
- [20] 郭惠娟,张伟,张小梅,等.溶藻细菌 *Microbacterium oleivoran* 的溶藻进程与叶绿素降解动力学 [J]. *环境化学*, 2019, 38(6): 1274-1281.
GUO H J, ZHANG W, ZHANG X M, et al. The process of algal dissolution and the degradation kinetics of chlorophyll a of *Microbacterium oleivoran* [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(6): 1274-1281 (in Chinese).
- [21] 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 H C, PAN R S, WU X P, et al. Isolation and identification of algae dissolving bacteria from reed roots of Taihu Lake [J]. *Civil and Environmental Engineering*, 2017, 39(5): 123-128 (in Chinese).
- [22] 孔赞.溶藻菌分离鉴定、溶藻特性及作用机理研究[D].杭州:浙江大学,2013.
KONG Y. Isolation and Identification of Algae-lysing Bacteria[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese).
- [23] 孔赞,陈剑,徐向阳,等. *Streptomyces* sp. HJC-D1溶藻过程产物光谱学特征及机理 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(1): 167-171.
KONG Y, CHEN J, XU XY, et al. Spectroscopic characteristics and mechanism of products from algae dissolution process of *Streptomyces* sp. HJC-D1 [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(1): 167-171 (in Chinese).