

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.23.012

溶藻进程中菌株的生长动力学与降解动力学研究

郑安东¹, 钱成龙¹, 黄金杰¹, 薛静静^{1,2}, 毛林强¹, 张文艺¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 扬州市城市规划设计研究院
有限责任公司, 江苏 扬州 225000)

摘要: 针对近年来采用微生物法治理蓝藻这一热点问题,以铜绿微囊藻为受试对象,以浇灌蓝藻水华藻水的水稻根部土壤筛得的菌株XXG(*Paenibacillus* sp.)为试验对象,考察菌株的溶藻特性,研究溶藻进程中菌株的动力学,分别构建其生长、降解动力学模型。结果表明,在菌藻体积比为5.6%、温度为30℃且处于对数增长期的铜绿微囊藻条件下,处于对数增长期的菌株XXG 6 d的溶藻率为60.60%;菌株XXG在溶藻体系中的生长曲线符合Polynomial模型,其中第3.5天菌株的细胞密度(OD_{600})达到最大(0.799),菌株XXG比生长速率动力学符合一元一次线性模型;在菌藻共生状态下,指数衰减动力学模型和一级反应动力学模型均可较好地预测、模拟溶藻体系中叶绿素a浓度的变化;在溶藻过程中藻细胞的TN和TP浓度变化量与溶藻时间也都符合一元一次动力学模型。

关键词: 溶藻; 生长动力学; 降解动力学

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)23-0083-08

Growth and Degradation Kinetics of Strains during Algae Lysis Process

ZHENG An-dong¹, QIAN Cheng-long¹, HUANG Jin-jie¹, XUE Jing-jing^{1,2},
MAO Lin-qiang¹, ZHANG Wen-yi¹

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164,
China; 2. Yangzhou Urban Design Institute Co. Ltd., Yangzhou 225000, China)

Abstract: The microbial treatment of cyanobacteria is a hot research issue in recent years. This paper explored the algae lysis characteristics of *Microcystis aeruginosa* by the strain XXG (*Paenibacillus* sp.) selected from rice root soil irrigated with cyanobacteria bloom water, investigated the growth and degradation kinetics of the strain during the algae lysis process and established corresponding models. The algae lysis rate of strain XXG was 60.60% within 6 days under the conditions of bacteria-algae volume ratio of 5.6%, temperature of 30℃ and logarithmic growth of *Microcystis aeruginosa*. The growth curve of strain XXG in the algae lysis system was in accordance with the Polynomial model, in which the cell density (OD_{600}) of the strain reached the maximum 0.799 on the 3.5th day, and the specific growth rate kinetics of the strain was in line with the one-dimensional linear model. In the symbiotic state of bacteria and algae, both of the exponential decay kinetic model and primary reaction kinetic model could effectively predict and simulate the change of chlorophyll-a concentration in the algae lysis system. The

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202-004); 2020年江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX20-0943)

通信作者: 张文艺 E-mail: zhangwenyi888@sina.com

changes of total nitrogen and total phosphorus in algal cells and the algae lysis time were in accordance with the one-dimensional kinetic models.

Key words: algae lysis; growth kinetics; degradation kinetics

近年来,水体富营养化导致蓝藻水华暴发已成为全球水环境治理的一大难题,其中铜绿微囊藻是蓝藻水华的优势藻种^[1]。溶藻细菌作为微生物控藻领域的新兴方法,具有标本兼治、生态安全性好等优点,引起了国内外学者的广泛关注,然而现阶段大多数溶藻细菌的研究偏向于筛选菌株及探寻溶藻机理等方面,鲜见对溶藻进程中菌株生长和降解动力学研究。为探究菌藻共生状态下,菌藻间的相互影响过程及机理,需定量分析溶藻细菌在藻液中的生长规律及溶藻机理,揭示溶藻进程及其动力学。在溶藻体系中,系统研究溶藻菌株的生长动力学和降解动力学有利于了解菌株生长特性及提高溶藻效率^[2-3],也能确定菌株的最佳投放时间和投放量,对溶藻细菌的应用具有重要意义。鉴于此,笔者以水稻根部土壤中分离出一株高效溶藻细菌XXG(*Paenibacillus* sp.)为受试菌株,以铜绿微囊藻为试验对象,通过测定溶藻体系中的溶藻细菌密度,考察溶藻细菌以铜绿微囊藻为营养源的生长曲线,拟合菌株在溶藻进程中的生长动力学;测定溶藻体系中的叶绿素a(Chl-a)浓度,建立该菌株对Chl-a的降解动力学模型,探究降解过程中Chl-a浓度与溶藻时间之间的关系;测定藻液及藻细胞外溶液中的TN和TP浓度,分析氮、磷营养元素含量的变化,拟合溶藻体系中氮、磷的降解动力学。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验菌种:菌株XXG,从蓝藻水华暴发期水稻田(用蓝藻水华藻水灌溉)的水稻根部土壤中筛得。

试验藻种:铜绿微囊藻(FACHB-905),购自中国科学院武汉水生生物研究所,设定培养条件为光照比=12 h:12 h、光照度=3 200 lx、温度=25 ℃。

1.2 试验方法

1.2.1 菌株XXG的溶藻试验

前期研究表明,溶藻时间取前6 d可排除培养基对溶藻效果的影响;在菌藻体积比为5.6%、菌株XXG处于对数生长期、铜绿微囊藻液处于对数生长期前期的条件下,菌株XXG的溶藻率最高。因菌株

XXG是在8月从水稻土壤中筛得,并鉴于太湖地区铜绿微囊藻水华一般暴发于夏秋季节,故溶藻试验温度设置为30 ℃。

取5.6 mL处于对数生长期的XXG菌株液,接种至100 mL、叶绿素a浓度为1 124.08 μg/L的铜绿微囊藻液中,在120~150 r/min下振荡培养,设置未加菌的铜绿微囊藻液为空白对照,每12 h取样测定菌株细胞密度,以600 nm波长下菌株的光密度OD₆₀₀表示;每24 h取样测定Chl-a浓度,测定方法为乙醇法^[4]。

1.2.2 溶藻细菌生长动力学参数控制

采用比浊法^[5]测定菌株XXG的生长曲线,以未加菌的铜绿微囊藻液为空白对照,菌藻处理液为样品,同时设置平行样,每12 h测定OD₆₀₀值,OD₆₀₀表征铜绿微囊藻中菌株XXG的浓度(N_t),绘制成图,并拟合菌株XXG在铜绿微囊藻中的生长动力学模型,同时与前期试验中牛肉膏蛋白胨培养基条件下菌株XXG的生长曲线进行对比。计算菌株XXG的比生长速率,拟合比生长速率 μ 与时间 t 的线性关系,比生长速率^[6]计算公式如下:

$$\mu = \frac{\ln N_t - \ln N_0}{t} \quad (1)$$

1.2.3 铜绿微囊藻降解动力学参数控制

以未加菌的铜绿微囊藻液为空白对照,菌藻处理液为样品,同时设置平行样,每12 h测定Chl-a浓度(S_t),通过Chl-a浓度和Chl-a降解率表征溶藻效果^[5],绘制成图,并拟合铜绿微囊藻在菌株XXG作用下的Chl-a降解动力学模型^[7]。Chl-a降解率计算公式如下:

$$\eta = \frac{C_c - C_t}{C_c} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为Chl-a降解率,%; C_c 、 C_t 分别为对照组和试验组的Chl-a浓度,μg/L。

1.2.4 藻细胞中TP和TN含量的测定

设定加灭菌培养基的铜绿微囊藻液及藻细胞外溶液为空白对照组,加菌株XXG的铜绿微囊藻液及藻细胞外溶液为试验组,测定溶藻前后铜绿微囊藻液及藻细胞外溶液的TP和TN含量。TP、TN含量

的测定参照《排水工程:下册》^[8],每24 h测定1次,藻细胞外溶液通过循环水式真空泵抽滤(0.45 μm 滤膜)溶藻前后的菌藻处理液获得。以添加灭菌培养基的铜绿微囊藻液中TP、TN含量与添加灭菌培养基的藻细胞外溶液中TP、TN含量之差(ΔTP_1 、 ΔTN_1)衡量不加菌条件下藻细胞固定的磷和氮含量。以加菌株XXG悬浊液的铜绿微囊藻液中TP、TN含量与加菌株XXG悬浊液的藻细胞外溶液中TP、TN含量之差(ΔTP_2 、 ΔTN_2)衡量加菌条件下藻细胞固定的磷和氮含量^[9]。

以 ΔTP 、 ΔTN 分别表示加菌对藻细胞所固定磷和氮含量的影响。 $\Delta TP = \Delta TP_2 - \Delta TP_1$, $\Delta TN = \Delta TN_2 - \Delta TN_1$ 。以 ΔTP 、 ΔTN 拟合动力学方程,表征溶藻进程中的磷、氮元素降解动力学。

2 结果与讨论

2.1 菌株XXG的溶藻特性

在Chl-a初始浓度为1 124.08 μg/L的铜绿微囊藻液中加入处于对数生长期的菌株XXG液,在菌藻体积比为5.6%、150 r/min条件下振荡培养6 d,所得菌株生长曲线和Chl-a浓度变化如图1所示。

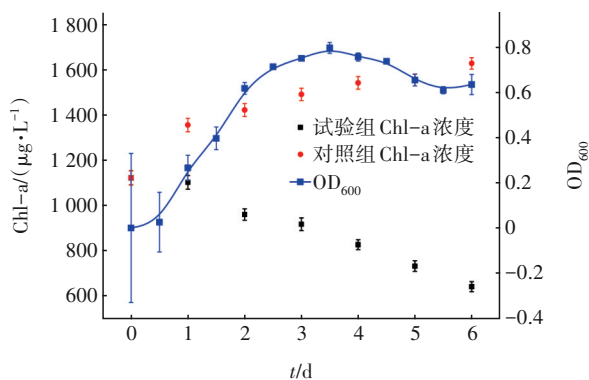


图1 菌株XXG的溶藻特性

Fig.1 Algae lysis characteristics of strain XXG

溶藻第1天,Chl-a浓度仅下降了19.91 μg/L,此时菌株生长缓慢,OD₆₀₀仅为0.268;从第2天开始,Chl-a浓度开始持续下降,平均日降解速率达到92.34 μg/L,菌株密度迅速增加,至第3.5天时菌株密度达到最高,OD₆₀₀为0.799,之后菌株密度逐渐降低;至第6天时,试验组Chl-a浓度为642.46 μg/L,对照组Chl-a浓度为1 630.66 μg/L,Chl-a降解率为60.60%,此时OD₆₀₀稳定在0.6左右。

2.2 溶藻细菌的生长动力学

溶藻体系中菌株浓度与溶藻时间的关系如图2

(a)所示。在0~0.5 d,菌株XXG浓度增长缓慢,可能是因为菌株在转接后对新生长环境中的外源异生物质有个适应的过程,首先利用转接菌液中剩余的营养物质进行生长繁殖;0.5~3.5 d,菌株浓度随溶藻时间的增加而迅速增加,在3.5 d达到最大浓度,之后菌株浓度开始下降,可能是由于铜绿微囊藻液中的营养物质不足以支撑菌株生长或达到环境承载量的阈值,从而抑制了菌株生长;随着溶藻的进行,菌株比生长速率逐渐降低,猜测比生长速率与菌株的生理特征和环境条件有关,拟合结果表明,比生长速率与时间呈负相关,说明菌株在铜绿微囊藻液中的生长繁殖变慢,代谢能力逐渐减弱^[10]。

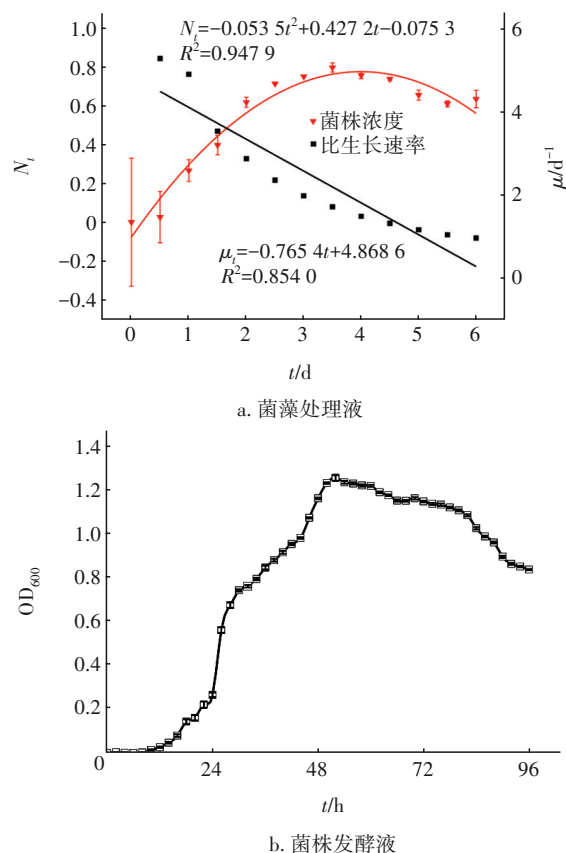


图2 菌株XXG浓度与时间的对应关系

Fig.2 Relationship between strain XXG concentration and time

比较图2(a)与(b)可知,菌株XXG在两种不同环境载体下的生长趋势类似。菌株XXG在藻液中的最大OD₆₀₀为0.799,而在牛肉膏蛋白胨培养基中最大OD₆₀₀可达1.261,且在藻液中达到最大浓度所需的时间(3.5 d)比在牛肉膏蛋白胨培养基中(2.5 d)更长,说明菌株XXG对藻液的适应期比牛肉膏蛋

白鲮培养基更长,原因可能是藻液中用于菌株生长繁殖的营养物质较少,抑制了菌株生长^[11]。

对铜绿微囊藻中的菌株XXG浓度与溶藻时间进行方程拟合,如式(3)所示,溶藻进程中菌株XXG的生长动力学符合 Polynomial 模型,拟合方程的校正决定系数 R^2 为 0.947 9,说明模型可反映菌株XXG以铜绿微囊藻液为营养源促进自身生长, P 值为 1.55×10^{-7} , $P < 0.001$,差异性显著。

$$N_t = -0.053 5t^2 + 0.427 2t - 0.075 3 \quad (3)$$

对菌株XXG的比生长速率与溶藻时间进行方程拟合,如式(4)所示,溶藻进程中菌株XXG的比生长速率动力学符合一元一次线性模型,拟合方程的校正决定系数 R^2 为 0.854 0,说明模型能解释约 85.40% 的菌株比生长速率的变化,模型拟合程度良好,误差较小,可用来分析和预测菌株XXG的生长速率。

$$\mu_t = -0.765 4t + 4.868 6 \quad (4)$$

2.3 铜绿微囊藻的 Chl-a 降解动力学

溶藻体系中 Chl-a 浓度与溶藻时间的关系如图 3 所示。

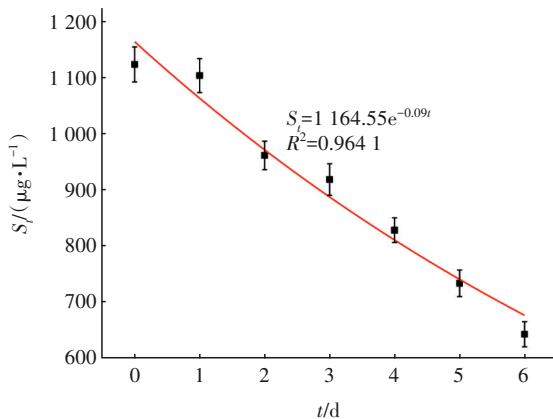


图3 Chl-a浓度与时间的对应关系

Fig.3 Relationship between Chl-a concentration and time

当菌株XXG加至铜绿微囊藻后,第1天 Chl-a 浓度下降不明显,这与菌株密度增长缓慢的结果一致,可能是由于菌株XXG处于适应期;从第2天开始 Chl-a 浓度迅速下降,推测菌株XXG会分泌某种活性物质使铜绿微囊藻死亡^[12],从而导致藻液中的 Chl-a 浓度下降。在最佳菌藻比基础上对溶藻体系中的 Chl-a 浓度与溶藻时间进行方程拟合,如式(5)所示,Chl-a 降解动力学符合 Exponential 模型,拟合方程的校正决定系数 R^2 为 0.964 1,说明模型可反映

出溶藻进程中铜绿微囊藻浓度变化与动力学拟合方程之间的相关性, P 值为 5.96×10^{-7} , $P < 0.001$,差异性显著。

$$S_t = 1164.55e^{-0.09t} \quad (5)$$

由图3可知,随着 Chl-a 浓度的降低,菌株XXG的溶藻速率亦呈降低趋势,因此采用一级反应方程分析菌株XXG降解 Chl-a 反应中降解速率与底物浓度^[13-14]的关系,并研究该降解过程中 Chl-a 浓度随溶藻时间的定量关系,一级反应方程式如下所示:

$$dS/dt = -kS \quad (6)$$

对式(6)两边积分得:

$$S_t = -kt + \ln S_0 \quad (7)$$

式中: S_t 为 t 时刻溶藻体系中的 Chl-a 浓度, $\mu\text{g/L}$; t 为溶藻时间, d ; k 为一级反应速率常数, $\mu\text{g}/(\text{L} \cdot \text{d})$; S_0 为铜绿微囊藻液的初始 Chl-a 浓度, $\mu\text{g/L}$ 。

当铜绿微囊藻初始 Chl-a 浓度为 $1124.08 \mu\text{g/L}$ 时,对 $\ln S_t$ 与 t 的关系进行线性拟合,结果如图4所示,菌株XXG降解 Chl-a 的一级反应方程式如式(8)和(9)所示,一级动力学反应速率常数 k 为 0.094 5,半衰期 $t_{1/2}$ 为 8.1 d,决定系数 R^2 为 0.968 8。

$$\ln S_t = -0.094 5t + 7.07 \quad (8)$$

$$S_t = 1176.15e^{-0.09t} \quad (9)$$

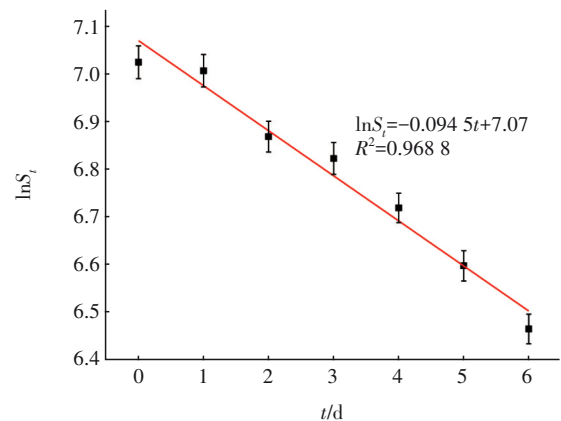


图4 $\ln S_t$ 与时间的对应关系

Fig.4 Relationship between $\ln S_t$ and time

根据 Chl-a 降解的一级动力学拟合结果可知,一级动力学模型能较好地描述菌株XXG降解铜绿微囊藻液中 Chl-a 的动力学,其降解速率与 Chl-a 浓度具有相关性。结合菌株生长动力学来看,0~0.5 d,菌株处于适应阶段,溶藻效应较弱;0.5~3.5 d,菌株浓度迅速增加,铜绿微囊藻液中的 Chl-a 浓度大幅减少;3.5 d 后菌株浓度开始下降,此时藻细胞逐

渐失去荧光特性,藻细胞破碎,胞内物质流出,Chl-a 降解速率仍较高^[15]。

Chl-a 降解动力学模型预测比较如表 1 所示。可知,菌株 XXG 降解 Chl-a 的指数衰减模型与一级动力学模型结果具有高度一致性,均能较好地模拟、预测溶藻体系中 Chl-a 浓度的变化。

表 1 Chl-a 降解动力学模型预测比较

Tab.1 Comparison of Chl-a degradation kinetics model prediction

时间/d	Chl-a 降解指数衰减模型			Chl-a 降解一级动力学模型		
	预测值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	实际值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误差/%	预测值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	实际值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对误差/%
0	1 164.55	1 124.08	3.60	1 176.15	1 124.08	4.63
1	1 064.32	1 104.16	3.61	1 074.92	1 104.16	2.65
2	972.71	961.70	1.14	982.40	961.70	2.15
3	888.99	918.64	3.23	897.85	918.64	2.26
4	812.48	828.20	1.90	820.57	828.20	0.92
5	742.55	733.42	1.24	749.95	733.42	2.25
6	678.64	642.46	5.63	685.40	642.46	6.68

2.4 菌株对藻液及藻细胞外溶液中 TP 的影响

菌株 XXG 对铜绿微囊藻液及藻细胞外溶液中 TP 含量的影响如图 5 所示。由图 5(a)可知,相比加入灭菌液体培养液的铜绿微囊藻液,投加菌株 XXG 的铜绿微囊藻液中 TP 含量没有明显变化,TP 含量均稳定在 4 mg/L 左右,TP 含量变化率<15%,说明投加菌株 XXG 对溶藻过程中铜绿微囊藻液的 TP 含量影响不大。由图 5(b)可知,相比加入灭菌液体培养液的藻细胞外溶液,投加菌株 XXG 的藻细胞外溶液中 TP 含量有显著差异,未加菌的藻细胞外溶液中 TP 含量逐渐减少,说明藻细胞从藻细胞外溶液中吸收磷元素用于生长增殖。加菌的藻细胞外溶液中 TP 含量呈增加趋势,TP 含量变化率逐渐增加,在溶藻的第 6 天藻细胞外溶液中 TP 含量相比空白对照组的变化率达到 161%,表明在溶藻过程中,藻细胞中的磷元素由于藻细胞的死亡而从藻细胞内进入到外界环境,造成了磷浓度的升高。

投加菌株 XXG 对藻细胞固定的磷元素的影响如图 6 所示。可以看出,6 d 内未加菌的铜绿微囊藻液中藻细胞固定的 TP 含量由 1.348 mg/L 增加至 2.724 mg/L,而加菌的处理液中藻细胞固定的 TP 含量由 1.348 mg/L 减少至 0.424 mg/L,投加菌株 XXG 使得藻细胞固定的磷元素减少,而藻细胞固定磷元

素的方式主要是用于细胞壁壳聚糖的合成^[16],由此说明藻细胞数量变少了。

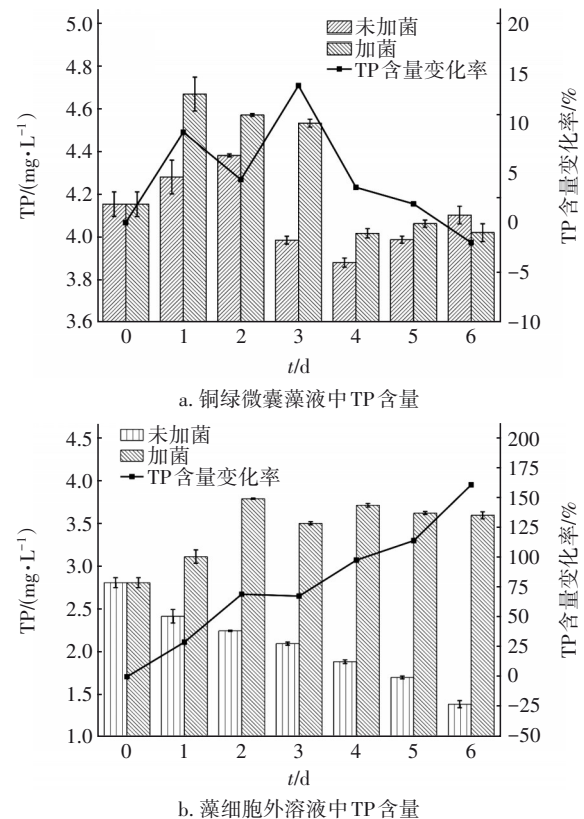


图 5 加菌对铜绿微囊藻液及藻细胞外溶液中 TP 含量的影响

Fig.5 Effect of adding bacteria on TP content in *Microcystis aeruginosa* solution and extracellular alga solution

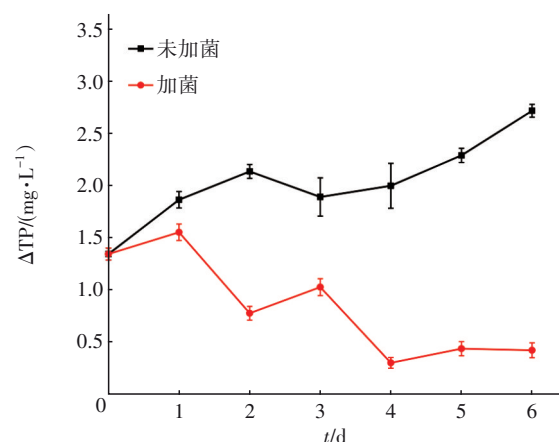


图 6 菌株 XXG 对藻细胞固定的磷元素的影响

Fig.6 Effect of strain XXG on phosphorus fixed in algal cells

2.5 菌株对藻液及藻细胞外溶液中 TN 的影响

投加菌株 XXG 对铜绿微囊藻液及藻细胞外溶

液中TN含量的影响如图7所示。

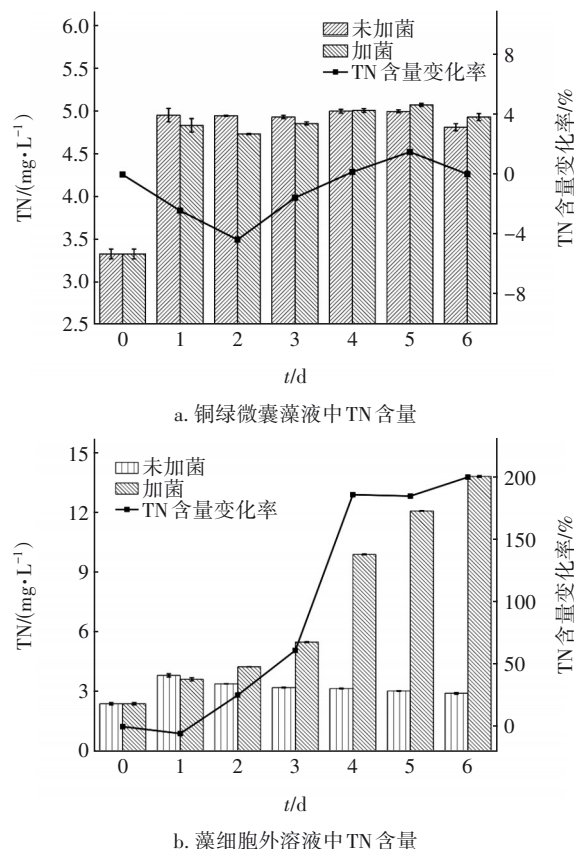


图7 加菌对铜绿微囊藻液及藻细胞外溶液中TN含量的影响

Fig.7 Effects of adding bacteria on TN content in *Microcystis aeruginosa* solution and extracellular alga solution

由图7(a)可知,相比加入灭菌液体培养液的铜绿微囊藻液,投加菌株XXG的铜绿微囊藻中TN含量没有明显变化,从溶藻第1天开始,TN含量均稳定在5~6 mg/L,TN含量变化率<5%,说明投加菌株XXG对溶藻过程中铜绿微囊藻液的TN含量影响不大。由图7(b)可知,投加菌株XXG的藻细胞外溶液中TN含量与加入灭菌液体培养液的藻细胞外溶液中TN含量有显著差异,未加菌的藻细胞外溶液中TN含量逐渐减少,说明藻细胞从藻细胞外溶液中吸收氮元素用于生长增殖。加菌的藻细胞外溶液中TN含量逐渐增多,TN含量变化率逐渐增加,在溶藻的第6天藻细胞外溶液中TN含量相比空白对照组的变化率达到了199.82%,从溶藻的第4天开始,TN含量变化率大幅增加,表明此时由于藻细胞破碎导致其中的氮元素进入到藻细胞外环境,造成了氮浓度的大幅升高^[17]。

投加菌株XXG对藻细胞固定的氮元素的影响如图8所示。可以看出,6 d内未加菌株XXG的铜绿微囊藻液中藻细胞固定的磷含量由0.935 mg/L增加至1.886 mg/L,而投加菌株XXG使得藻细胞固定的氮元素减少,藻细胞固定氮元素的方式主要是用于细胞的新陈代谢,由此说明藻细胞数量变少了,新陈代谢减弱了^[17-18]。

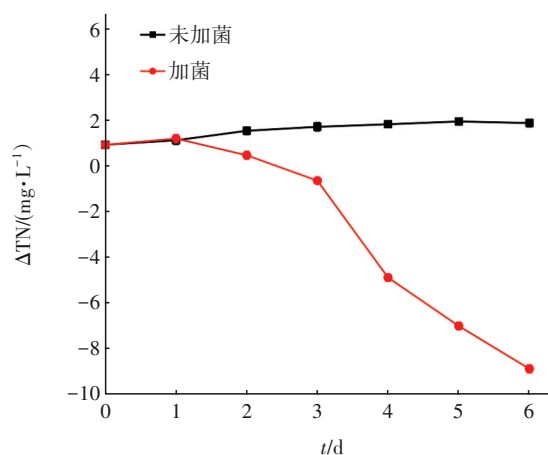
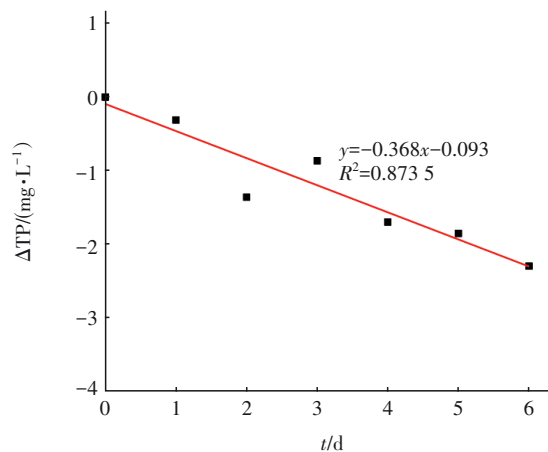


图8 菌株XXG对藻细胞固定的氮元素的影响

Fig.8 Effects of strain XXG on nitrogen fixed by algal cells

2.6 溶藻进程中氮、磷降解动力学

投加菌株XXG对藻细胞中磷和氮含量的影响(ΔTP 和 ΔTN)与溶藻时间(t)的对应关系如图9所示。可以看出,投加菌株XXG对藻细胞固定的TP和TN含量均会产生显著的影响,在溶藻的0~6 d期间,在菌株XXG的影响下,藻细胞中TP和TN含量的变化量与溶藻时间呈线性关系,即溶藻过程中藻细胞的TP和TN含量变化量与溶藻时间满足一元一次动力学模型。



a. ΔTP 与 t 的对应关系

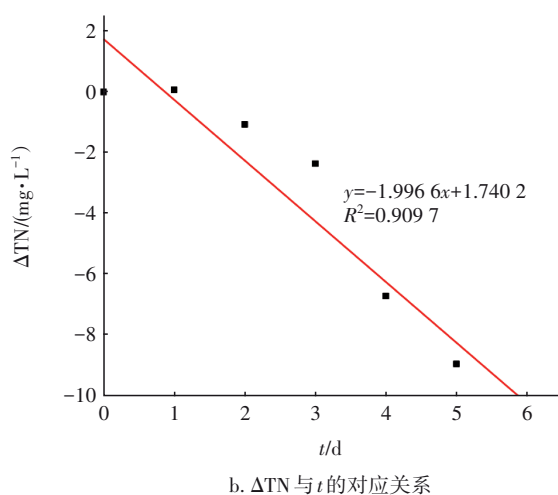


图9 菌株XXG对藻细胞中磷和氮含量的影响与时间的对应关系

Fig.9 Relationship between effect of strain XXG on phosphorus and nitrogen contents in algae cells and time

3 结论

① 当铜绿微囊藻液的初始 Chl-a 浓度为 $1\,124.08\,\mu\text{g/L}$ 、菌藻体积比为 5.6% 时, $6\,\text{d}$ 内 Chl-a 降解率为 60.60% , 菌株密度 OD_{600} 稳定在 0.6 左右。菌株 XXG 以铜绿微囊藻液为营养源的生长动力学符合 Polynomial 模型, 其方程为 $N_t = -0.0535t^2 + 0.4272t - 0.0753$ ($P < 0.001$, $R^2 = 0.9479$), 可再现菌株 XXG 在溶藻进程中的生长情况; 菌株 XXG 的比生长速率动力学符合一元一次线性模型, 方程为 $\mu_t = -0.7654t + 4.8686$ ($P < 0.001$, $R^2 = 0.8540$), 可较好地反映菌株的生理特征及环境条件。

② 铜绿微囊藻在菌株 XXG 作用下发生溶藻, 菌株 XXG 对 Chl-a、TN、TP 的降解动力学分别符合以下模型: $S_t = 1\,176.15e^{-0.09t}$ (k 为 0.0945 , 半衰期 $t_{1/2}$ 为 $8.1\,\text{d}$, $R^2 = 0.9688$)、 $y = -0.368x - 0.093$ ($R^2 = 0.8735$)、 $y = -1.9966x + 1.7402$ ($R^2 = 0.9097$)。上述模型均可预测分析藻细胞死亡过程及菌株 XXG 对溶藻进程藻细胞中氮、磷等营养元素的影响。

参考文献:

- [1] 秦伯强, 杨桂军, 马健荣, 等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制[J]. 科学通报, 2016, 61(7): 759-770.
QIN Boqiang, YANG Guijun, MA Jianrong, et al. Dynamics of variability and mechanism of harmful

cyanobacteria bloom in Lake Taihu, China [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(7): 759-770 (in Chinese).

- [2] 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 Huijuan, ZHANG Wei, ZHANG Xiaomei, et al. Process of algae-lysis and chlorophyll degradation kinetics of *Microbacterium oleivoran* bacteria [J]. Environmental Chemistry, 2019, 38(6): 1274-1281 (in Chinese).
- [3] YAN R, JI H L, WU Y H, 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.
- [4] 洪桂云, 马少雄, 王佳, 等. 高效铜绿微囊藻溶藻菌 WJ6 的分离鉴定及溶藻特性[J]. 中国环境科学, 2018, 38(11): 4269-4275.
HONG Guiyun, MA Shaoxiong, WANG Jia, et al. Isolation and identification of an efficient algicidal bacteria strain and algicidal characteristics on *Microcystis aeruginosa* [J]. China Environmental Science, 2018, 38(11): 4269-4275 (in Chinese).
- [5] 张冬慧. 一株太湖流域土著溶藻菌的分离鉴定、溶藻特性及溶藻机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
ZHANG Donhui. Isolation, Identification, Algae-dissolving Characteristics and Algae-dissolving Mechanism of a Native Algicidal Bacteria in the Taihu Lake Basin [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019 (in Chinese).
- [6] 林忠, 罗众球, 窦洁, 等. 菌体比生长速率及不同培养基成分变化对解脂假丝酵母中 RNA 累积的影响[J]. 中国药科大学学报, 2011, 42(2): 169-175.
LIN Zhong, LUO Zhongqiu, DOU Jie, et al. High RNA accumulation in *Candida tropicalis* is affected by specific growth rate and different medium composition [J]. Journal of China Pharmaceutical University, 2011, 42(2): 169-175 (in Chinese).
- [7] XU K, CHEN F X. Martingale-difference-divergence-based tests for goodness-of-fit in quantile models [J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2020, 207: 138-154.
- [8] 张自杰. 排水工程: 下册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
ZHANG Zijie. Drainage Engineering: Volume II [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2015 (in

- Chinese).
- [9] 邱振鲁, 彭志芸, 陈钰涵, 等. 低浓度磷酸盐对绣源河铜绿微囊藻和衣藻生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(18): 54-56.
- QIU Zhenlu, PENG Zhiyun, CHEN Yuhan, *et al.* Effect of low concentration of phosphate on the growth of *Microcystis aeruginosa* and *Chlamydomonas reinhardtii* in Xiuyuan River [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(18): 54-56 (in Chinese).
- [10] 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 Zehui, GAO Zhiwei, DONG Xiaona, *et al.* Degradation kinetics of MC-LR crude extracts by strain CQ5 [J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(1): 82-88 (in Chinese).
- [11] 徐雅倩, 马骏, 杨正健. 基于实验室培养的一株铜绿微囊藻生长动力参数率定及生长数值模拟[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(3): 267-275.
- XU Yaqian, MA Jun, YANG Zhengjian. Calibration of kinetic parameters and numerical simulation of growth of *Microcystis aeruginosa* cultured in laboratory [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(3): 267-275 (in Chinese).
- [12] 牛丹丹. 一株溶藻细菌对铜绿微囊藻的溶藻机制及其溶藻物质特性的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- NIU Dandan. Study on the Algae-lytic Mechanism of Algicidal Bacteria on *Microcystis aeruginosa* and the Algicidal Substance Characteristics [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011 (in Chinese).
- [13] HUANG S L, KONG W W, YANG Z J, *et al.* Combination of Logistic and modified Monod functions to study *Microcystis aeruginosa* growth stimulated by fish feed [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 167: 146-160.
- [14] 裴海燕, 胡文容, 曲音波, 等. 一株溶藻细菌的溶藻特性及其鉴定[J]. 中国环境科学, 2005, 25(3): 283-287.
- PEI Haiyan, HU Wenrong, QU Yinbo, *et al.* Algae-lytic character and its identification of one algae-lysing bacterium [J]. China Environmental Science, 2005, 25(3): 283-287 (in Chinese).
- [15] 何雅孜. 溶藻细菌 L7 对富营养化水体藻类群落结构的调节及其机制初探[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- HE Yazi. Preliminary Study on Adjustment of Algicidal Bacteria Strain L7 on the Algal Community Structure in Eutrophic Water and Its Mechanism [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [16] ZHANG C C, MASSEY I Y, LIU Y, *et al.* Identification and characterization of a novel indigenous algicidal bacterium *Chryseobacterium* species against *Microcystis aeruginosa* [J]. Journal of Toxicology and Environmental Health: Part A, 2019, 82(15): 845-853.
- [17] 任梦甜, 陈荣, 雷振, 等. 铜绿微囊藻增殖与产毒过程中的氮磷限制与主控因子研究[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 102-107, 126.
- REN Mengtian, CHEN Rong, LEI Zhen, *et al.* Nitrogen and phosphorus restriction and main controlling factors in proliferation and toxicity production of *Microcystis aeruginosa* [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 102-107, 126 (in Chinese).
- [18] 姜小玉, 赵闪闪, 褚一凡, 等. 氮浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响[J]. 水生生物学报, 2019, 43(2): 439-447.
- JIANG Xiaoyu, ZHAO Shanshan, CHU Yifan, *et al.* Impacts of nitrogen concentration on the interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2019, 43(2): 439-447 (in Chinese).

作者简介: 郑安东(1998-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制与生态修复。

E-mail: 3266664395@qq.com

收稿日期: 2021-02-27

修回日期: 2021-03-02

(编辑: 刘贵春)