

## 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻氮代谢的影响

张涵之<sup>1,2</sup> 潘伟斌<sup>1,2\*</sup> 陈宝华<sup>1,2</sup>

(1. 华南理工大学 环境科学与工程学院 广东 广州 510006)

(2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室 广东 广州 510006)

**摘要:** 【目的】进一步探明藻菌关系, 研究溶藻细菌对藻类氮代谢的影响及其作用机制。【方法】将水华鱼腥藻和溶藻细菌 L7 按两种比例接种入 BG11 培养液中, 在室内进行共培养(藻细胞初始密度为  $1.21 \times 10^8$  cells/L; 溶藻细菌 L7 初始密度分别为  $1.75 \times 10^7$ 、 $1.75 \times 10^8$  CFU/mL)。连续 7 d 测定藻细胞数、异形胞频率和藻细胞内的硝酸还原酶(NR)活性、谷氨酰胺合成酶(GS)活性、谷氨酸合成酶(GOGAT)活性、蛋白质含量、丙二醛(MDA)含量。【结果】低密度溶藻细菌 L7 能够促进藻生长(第 7 天藻细胞密度是对照组的 1.58 倍), 增加异形胞频率(第 7 天高于对照组 66.67%); 高密度则会抑制藻生长(第 7 天藻细胞密度相比对照组下降 98.84%), 降低异形胞频率(第 7 天为 0)。在藻细胞内氮代谢关键酶活性方面, 接种后 2–5 d, 两处理组中藻细胞内 NR 和 GOGAT 活性均极显著高于对照组( $P < 0.01$ ); 接种后 0–5 d, 高密度处理组的 GS 活性极显著高于对照组( $P < 0.01$ ), 而低密度处理组的则在大部分时间内极显著低于对照组( $P < 0.01$ )。在整个实验期内, 低密度处理组中藻细胞内蛋白质含量一直极显著高于对照组( $P < 0.01$ ); 而在高密度处理组中, 除第 5 天外, 细胞内蛋白质含量则全部极显著低于对照组( $P < 0.01$ )。接种后 2–4 d, 高密度处理组中藻细胞内 MDA 含量呈现上升趋势, 并极显著高于其余两组( $P < 0.01$ )。【结论】低密度溶藻细菌 L7 能够提高水华鱼腥藻对氮源的需求, 加速蛋白质合成, 促进氮代谢; 而高密度溶藻细菌 L7 会对藻细胞产生过氧化伤害, 阻碍蛋白质合成和氮代谢过程。

**关键词:** 溶藻细菌 L7, 水华鱼腥藻, 氮代谢, 影响机制

\*通讯作者: Tel: 86-20-39380555; 信箱: ppwbpan@scut.edu.cn

收稿日期: 2012-03-14; 接受日期: 2012-05-04

## Effects of the algicidal bacterial strain L7 on nitrogen metabolism of *Anabaena flos-aquae*

ZHANG Han-Zhi<sup>1,2</sup> PAN Wei-Bin<sup>1,2\*</sup> CHEN Bao-Hua<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

(2. The Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** [Objective] The influence mechanism of the algicidal bacterial strain L7 on nitrogen metabolism of *Anabaena flos-aquae* were investigated to understand the interaction of cyanobacteria-bacteria. [Methods] The algicidal bacterial strain L7 and *Anabaena flos-aquae* with different ratio were inoculated into BG11 liquid medium. The initial concentration of the algicidal bacterial strain L7 were  $1.75 \times 10^7$  and  $1.75 \times 10^8$  CFU/mL responding to the same initial concentration of *Anabaena flos-aquae* ( $1.21 \times 10^8$  cells/L), respectively. The treatment without the algicidal bacterial strain L7 was set up as the control. The number of cyanobacterial cells, the heterocyst frequency, activities of the nitrate reductase (NR), glutamine synthetase (GS), glutamate synthetase in cyanobacterial cells, and the protein and malondialdehyde (MDA) contents in cyanobacterial cells were measured for 7 days after incubation. [Results] Lower concentration of the algicidal bacterial strain L7 stimulated the growth of the cyanobacteria and increased the heterocyst frequency. On the 7th day, the concentration of cyanobacterial cells and the heterocyst frequency were 1.58 times and 66.67% more than that in the control, respectively. Higher concentration of the algicidal bacterial strain L7 had opposite effects to *Anabaena flos-aquae*. The cyanobacterial cell concentration was 98.84% less than that in the control and the heterocyst frequency decreased to 0 on the 7th day. As to activities of important enzymes relating to nitrogen metabolism in cyanobacterial cells, activities of NR and GOGAT in two treatments with the algicidal bacterial strain L7 were significantly higher than that in the control between the 2nd and 5th day ( $P < 0.01$ ). In the first 5 days, GS activity was significantly higher than that in the control ( $P < 0.01$ ) in the treatment with higher concentration of the algicidal bacterial strain L7, while lower concentration of the algicidal bacterial strain L7 had opposite effects for most of time. During the entire experiment, the protein content in the treatment with lower concentration of the algicidal bacterial strain L7 was significantly higher than that in the control ( $P < 0.01$ ). However, the protein content in the treatment with higher concentration of the algicidal bacterial strain L7 was always less than that in the control ( $P < 0.01$ ), except on the 5th day. During the period between the 2nd day and the 4th day, the MDA content in the treatment with higher concentration of algicidal bacteria strain L7 exhibited a rising trend and were significantly higher than that in the other treatments ( $P < 0.01$ ). [Conclusion] Lower concentration of the algicidal bacterial strain L7 could stimulate nitrogen metabolism of *Anabaena flos-aquae* by enhancing its demand for nitrogen and accelerating protein synthesis. Higher concentration of

the algicidal bacterial strain L7 could induce membrane lipid peroxidation of *Anabaena flos-aquae*, thereby inhibiting protein synthesis and nitrogen metabolism.

**Keywords:** Algicidal bacterial strain L7, *Anabaena flos-aquae*, Nitrogen metabolism, Influence mechanism

氮是藻类生长必需的元素。氮源能够为藻类合成蛋白质提供原料。虽然自然界中存在多种形态的氮源,但是一般能够被藻类直接利用的仅有无机氮源,即氨氮和硝态氮。其中,藻类对硝态氮的利用更为普遍<sup>[1]</sup>。对于能够固氮的水华藻类而言,当细胞内氮源缺乏时,它能够通过分化异形胞,固定空气中的氮以保证细胞内氮代谢的正常进行<sup>[2]</sup>。但同时藻细胞的固氮作用也向水体中引入了更多的氮源<sup>[3]</sup>,进而可能会导致更为严重的环境问题。

溶藻细菌作为水生生态系统结构和功能的重要组成部分,对于调节藻类生物量发挥着重要作用<sup>[4-5]</sup>。目前,国内外在溶藻细菌的溶藻机理和溶藻物质方面已有了较为深入的研究<sup>[6]</sup>,但对于溶藻细菌对固氮藻类的氮代谢方面所产生的影响鲜有报道。溶藻细菌 L7 是本课题组从广州市某富营养化池塘筛选和鉴定出的一株溶藻细菌<sup>[7]</sup>。它能够通过分泌具有溶藻活性的胞外代谢产物损伤藻细胞的膜结构和功能<sup>[8-9]</sup>,抑制其光合作用<sup>[10]</sup>,影响藻细胞内氧化/抗氧化反应,最终呈现出低密度促进藻的生长,而高密度抑制藻生长的结果<sup>[11]</sup>。

因此,本研究以水华鱼腥藻为研究对象,研究了 2 种密度的溶藻细菌 L7 对藻生长及其异形胞频率、硝酸还原酶(NR)活性、谷氨酰胺合成酶(GS)活性、谷氨酸合成酶(GOGAT)活性、蛋白质和丙二醛(MDA)含量的影响,旨在探求溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻氮代谢的影响及其途径,为进一步探明藻菌相互作用关系打下基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试菌种和培养条件

本研究采用的菌种是课题组从广州市城区某富营养化池塘分离筛选得到的,编号为 L7,属蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*),其在 GenBank 的登录号为 DQ459876。菌种培养于牛肉膏蛋白胨斜面,于 4 °C 冷藏保存。使用前,需转接入新的牛肉膏蛋白胨斜面,并于 30 °C 培养 24 h 后用 BG11 培养液洗脱,制成菌悬液备用。

### 1.2 供试藻种和培养条件

本研究所用藻种为水华鱼腥藻(*Anabaena flos-aquae*, FACHB-245),来自于中国科学院水生生物研究所淡水藻种库。藻种经转接后,于 28 °C、2500-2800 lx、光暗周期 12 h:12 h 的条件下,在 BG11 培养液中培养。

### 1.3 研究方法

本研究共设 3 个实验组,且每个实验组共设 3 个平行。取适量预培养 4 d、处于对数生长期的水华鱼腥藻接入 BG11 培养液中,使其终密度为  $1.21 \times 10^8$  cells/L。再另取适量菌悬液接入其中 2 个培养体系中,使其终密度分别为  $1.75 \times 10^7$ 、 $1.75 \times 10^8$  CFU/mL,分别记为低处理组和高处理组。未接入溶藻细菌 L7 的培养体系作为空白对照。每个培养体系的终体积为 1 L,置于 2 L 的锥形瓶中,在 28 °C、2 500-2 800 lx、光暗周期 12 h:12 h 的条件下连续培养 7 d,每天取样对藻细胞数、异形胞频率和藻细胞内硝酸还原酶(NR)活性、谷氨酰胺合成酶(GS)活性、谷氨酸合成酶(GOGAT)活性、蛋白质含量以及丙二醛(MDA)含量进行测定。

## 1.4 酶液制备

取培养液 100 mL, 用定量滤纸进行过滤, 以获得藻细胞。随后, 将滤纸放入玻璃研钵中, 加入少量石英砂和 10 mL 预冷的磷酸缓冲液 (0.05 mol/L, pH 7.8) 研磨后, 转入离心管中, 在 4 000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清液于 4 °C 条件下保存, 用于酶活性、蛋白质和 MDA 含量的测定。

## 1.5 测定方法

**1.5.1 藻细胞数和异形胞频率:** 采用藻类计数框显微镜目视法对所有藻细胞进行计数, 其中异形胞数目占全部细胞数的百分比即为异形胞频率。

**1.5.2 酶活性、蛋白质含量和 MDA 含量:** 硝酸还原酶(NR)活性采用离体法进行测定<sup>[12]</sup>; 谷氨酰胺合成酶(GS)活性的测定参考刘淑云等<sup>[13]</sup>的方法; 谷氨酸合成酶(GOGAT)活性的测定参考 Chuan Chi Lin 等<sup>[14]</sup>的方法; 蛋白质含量采用考马斯亮蓝法进行测定<sup>[15]</sup>; 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法进行测定<sup>[12]</sup>。

## 1.6 数据分析

所有数据用 SPSS 13.0 进行差异显著性分析,  $P < 0.05$  表示差异显著,  $P < 0.01$  表示差异极显著。所有图形用 Origin 8.5 绘制。

# 2 结果

## 2.1 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻生长的影响

溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻的生长具有低密度促进、高密度抑制的作用, 如图 1 所示。从接种之日起, 在高处理组中, 水华鱼腥藻细胞密度虽有波动, 但是总体呈现下降的趋势, 藻细胞密度在第 7 天与第 0 天间存在极显著差异( $P < 0.01$ ), 相比下降了 98.84%。而在低处理组和对照组中, 藻细胞密度均有极显著性增加( $P < 0.01$ )。且除第 5 天外, 低处理组中的藻细胞密度均极显著高于对照组( $P < 0.01$ )。至第 7 天, 低处理组中的藻细胞密度

达到 $(6.25 \pm 0.07) \times 10^9$  cells/L, 是对照组的 1.58 倍。

## 2.2 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻异形胞频率的影响

溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻异形胞频率的影响如图 2 所示。在接种后第 1 天, 各处理组均有异形胞出现, 但此时各处理组间异形胞频率无显

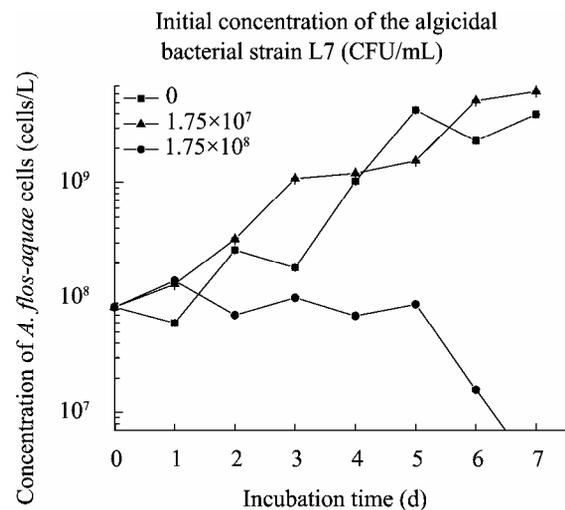


图 1 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻生长的影响

Fig. 1 Effects of the algicidal bacterial strain L7 on the growth of *Anabaena flos-aquae*

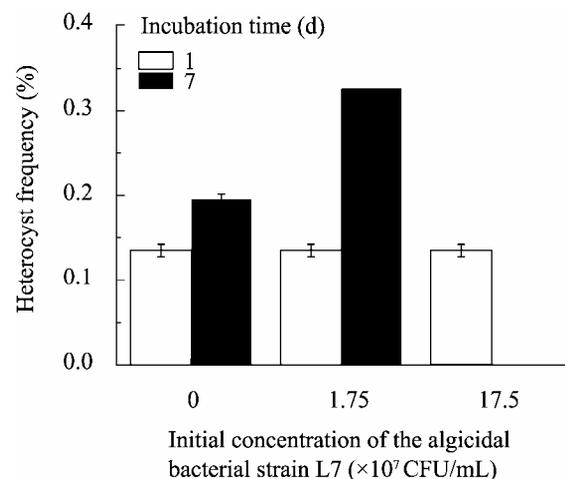


图 2 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻异形胞频率的影响

Fig. 2 Effects of the algicidal bacterial strain L7 on the heterocyst frequency of *Anabaena flos-aquae*

著性差异( $P > 0.05$ )。待培养至第 7 天, 仅在高处理组中, 没有观察到异形胞的出现, 而在其余两组中,

异形胞频率均较第1天有显著性增加( $P < 0.05$ )。同时,在低处理组中,异形胞频率较对照组有极显著增加( $P < 0.01$ ),高于对照组 66.67%。

### 2.3 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻 NR 活性的影响

溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻 NR 活性的影响如图 3 所示。接种后第 1 天,两处理组内藻细胞中 NR 活性均有所上升,随后各组 NR 活性出现不同程度的下降,其中高处理组藻细胞 NR 活性下降得较为缓慢,而低处理组和对照组中 NR 活性在第 2 天骤降至 0.5 g/(g protein·h) 以下。在第 2–5 天,高处理组中 NR 活性极显著高于低处理组和对照组( $P < 0.01$ ),而低处理组除在第 2 天与对照组无显著性差异外( $P > 0.05$ ),其余时间均极显著高于对照组( $P < 0.01$ ),且呈上升趋势。第 6–7 天,两处理组中的藻细胞 NR 活性均下降至较低水平,低于 0.1 g/(g protein·h)。

### 2.4 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻 GS 活性的影响

各组水华鱼腥藻 GS 活性在接种后都出现了不同程度的下降,如图 4 所示。第 2 天高、低处

间均具有极显著性差异( $P < 0.01$ )。随后,高处理组中 GS 活性有较大波动,但在第 5 天前,均极显著高于其余两组( $P < 0.01$ )。同时,在低处理组中,GS 活性则波动较为平稳,且大部分时间都极显著低于对照组( $P < 0.01$ )。

### 2.5 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻 GOGAT 活性的影响

在接种后第 1 天,各组 GOGAT 活性有不同程度的升高(图 5)。其中,高处理组中 GOGAT 活性增加了 5.8 倍;低处理组和对照组增加了 0.7 倍,且两组间无显著性差异( $P > 0.05$ )。第 2 天,各组 GOGAT 活性均急剧下降至 0.025 A/( $\mu\text{g protein}\cdot\text{min}$ ) 以下。此后,高处理组中 GOGAT 活性有较大波动,而其余两组的变化较为平稳。其中,第 2–3 天,两处理组 GOGAT 活性均极显著高于对照组,且高处理组也极显著高于低处理组( $P < 0.01$ )。第 4 天,高处理组中 GOGAT 活性有较大上升,至  $0.026 \pm 0.001$  A/( $\mu\text{g protein}\cdot\text{min}$ )。第 5–7 天,各组 GOGAT 活性均在 0.002 A/( $\mu\text{g protein}\cdot\text{min}$ ) 以下波动。

Concentration of the algicidal bacterial strain L7 (CFU/mL)

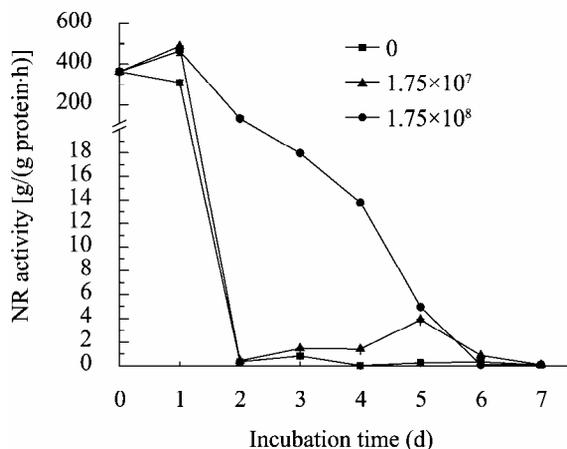


图 3 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻硝酸还原酶(NR)活性的影响

Fig. 3 Effects of the algicidal bacterial strain L7 on the nitrate reductase (NR) activity of *Anabaena flos-aquae* 理组和对照组中 GS 活性,相比第 0 天,分别下降了 61.45、61.60、61.58 A/( $\mu\text{g protein}\cdot\text{h}$ ),且各组

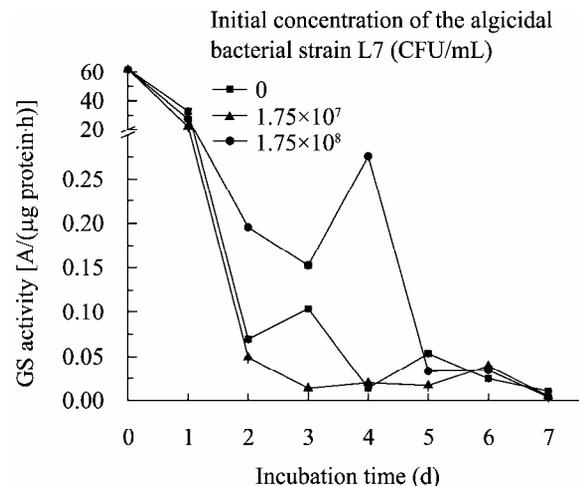


图 4 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻谷氨酰胺合成酶(GS)活性的影响

Fig. 4 Effects of the algicidal bacterial strain L7 on the glutamine synthetase (GS) activity of *Anabaena flos-aquae*

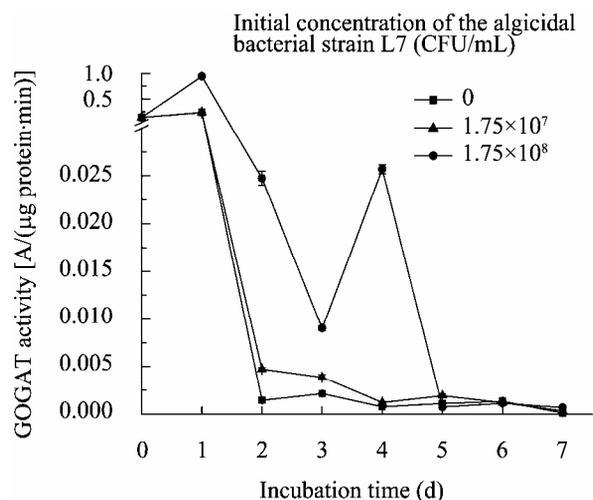


图 5 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻谷氨酸合成酶 (GOGAT)活性的影响

Fig. 5 Effects of the algicidal bacterial strain L7 on the glutamate synthase (GOGAT) activity of *Anabaena flos-aquae*

## 2.6 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻细胞内蛋白质含量的影响

藻细胞内蛋白质含量在低处理组和对照组中出现相似的变化规律(图 6)。在接种后前 4 天, 两组蛋白质含量均出现一个峰值, 分别为  $283.60 \pm 0.77 \mu\text{g/L}$ 、 $231.55 \pm 2.22 \mu\text{g/L}$ 。在第 5 天, 又分别下降至  $112.75 \pm 0.23 \mu\text{g/L}$ 、 $51.38 \pm 0.11 \mu\text{g/L}$ 。在第 5–7 天, 分别持续上升至  $268.59 \pm 0.44 \mu\text{g/L}$ 、 $224.95 \pm 0.14 \mu\text{g/L}$ 。在整个培养时间内, 低处理组中的蛋白质含量均极显著高于对照组 ( $P < 0.01$ )。而对于高处理组, 在整个培养周期中, 蛋白质含量的变化呈现出较为规律的上升趋势。除第 5 天外, 其蛋白质含量均极显著低于对照组 ( $P < 0.01$ )。

## 2.7 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻 MDA 含量的影响

两处理组 MDA 含量在接种后第 1 天相比对照组而言, 上升幅度较小(图 7)。其中, 高、低处理组中 MDA 含量分别上升了  $0.222 \text{ mol/g protein}$ 、 $0.265 \text{ mol/g protein}$ , 但其间并无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。但在第 2 天, 各组 MDA 含量骤降至

$0.006 \text{ mol/g protein}$  以下。随后至第 4 天, 在高处理组中, MDA 含量上升至  $0.005 \pm 0.000 \text{ mol/g protein}$ , 而低处理组和对照组中 MDA 含量却降至  $0.001 \text{ mol/g protein}$  以下。第 5–7 天, 各组间 MDA 含量在  $0.003 \text{ mol/g protein}$  以下波动。除第 1、3、5 天, 低处理组中 MDA 含量极显著低于对照组 ( $P < 0.01$ ) 外, 其余时间低处理组和对照组中的 MDA 含量均无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

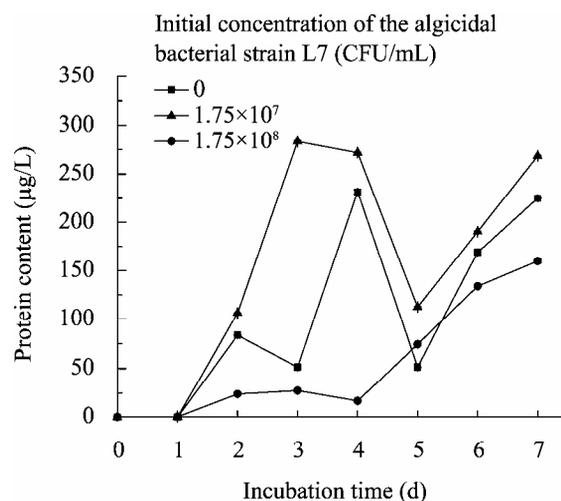


图 6 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻蛋白质含量的影响  
Fig. 6 Effects of the algicidal bacterial strain L7 on the protein content of *Anabaena flos-aquae*

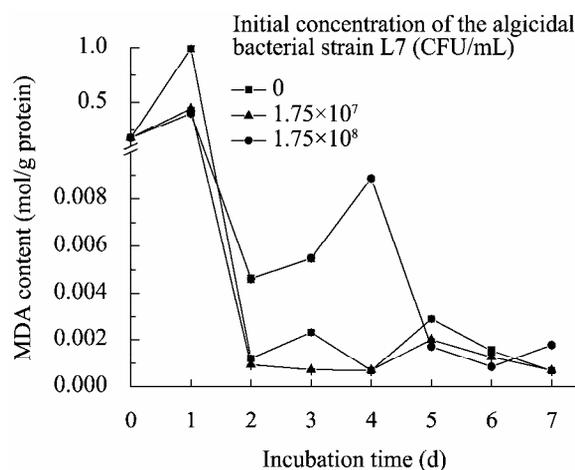


图 7 溶藻细菌 L7 对水华鱼腥藻丙二醛(MDA)含量的影响

Fig. 7 Effects of the algicidal bacterial strain L7 on the malondialdehyde (MDA) content of *Anabaena flos-aquae*

### 3 讨论

固氮藻类获取氮源的途径主要有两种:一种是藻细胞直接吸收无机态氮(硝态氮较为普遍);另一种是藻细胞通过分化出异形胞进行生物固氮。固氮藻类会在环境中缺乏氮源时分化出异形胞,而异形胞出现的直接原因则是胞内碳氮比的升高<sup>[2]</sup>。在本次研究中,第1天就在各组藻细胞中发现了异形胞,说明藻细胞仅靠对培养液中硝态氮的吸收已经不能够满足水华鱼腥藻进行正常生命活动的需求,需要通过分化异形胞增加胞内氮源含量,以保持细胞内正常的碳氮比。随后,在低处理组中,藻的生长受到了溶藻细菌 L7 的促进(图 1),表明藻细胞代谢活力的增强和合成新物质的速度加快。同时,溶藻细菌 L7 分泌的溶藻活性物质在低浓度时能够增强水华鱼腥藻抗氧化酶系统活性和提高光合作用<sup>[16]</sup>,这无疑进一步增加了藻对氮源的需求。因此,第7天时,低处理组中的异形胞频率较第1天有了极显著的上升,同比对照组高了0.13%。在高处理组中,溶藻细菌 L7 可能通过发挥溶藻作用,使藻细胞膜脂过氧化,光合作用遭到破坏,进而降低了培养体系中藻细胞密度,抑制了藻的生长,这也就降低了对氮源的需求。故第7天,在高处理组中没有再观察到异形胞。

藻类氮代谢过程需要多种酶的参与,以完成氨的同化,为蛋白质的合成提供原料。当硝态氮进入藻营养细胞后,首先经过 NR 和亚硝酸还原酶(NiR)的催化反应,被转化为能被细胞直接利用的铵态氮<sup>[17]</sup>。随后,铵态氮在 GS 的催化和谷氨酸的参与下,被合成谷氨酰胺。最后,谷氨酰胺在 GOGAT 的作用下被合成谷氨酸,进而参与蛋白质合成等代谢活动<sup>[18-19]</sup>。但当藻类需要进行生物固氮补充氮源时,它会在异形胞中将空气中的分子氮转化为铵态氮,并以酰胺的形式输送给

营养细胞参与蛋白质的合成等物质代谢<sup>[20]</sup>。

在低处理组中,溶藻细菌 L7 增强了藻细胞中 NR 和 GOGAT 活性,却降低了 GS 活性(图 3-5)。NR 是氮代谢过程中重要的调节酶和限速酶<sup>[21]</sup>,通常存在于细胞质中<sup>[22]</sup>,它的活性可以指示藻类对硝酸盐的同化速率<sup>[23]</sup>。GS 和 GOGAT 同样在藻类氮代谢中发挥重要作用,在它们的作用下藻类才能真正完成氨的同化作用<sup>[24]</sup>。因此,低密度溶藻细菌 L7 发挥对藻生长的促进作用有赖于对这3种氮代谢关键酶活性所产生的影响。NR 活性的增强表明溶藻细菌 L7 能够促进藻细胞对培养液中硝态氮的吸收和转化。GOGAT 活性的升高说明有更多的谷氨酰胺被转化为谷氨酸,最终使得蛋白质含量极显著高于对照组(图 6)。异形胞是专一执行固氮作用的细胞<sup>[25]</sup>。因此,结合异形胞频率和 GOGAT 活性变化结果,分析 GS 活性降低的原因可能是异形胞大量分化,降低了藻细胞中 GS 的总含量。但 GOGAT 活性的上升说明谷氨酰胺的量并未减少,相比对照组还有所上升。同时,观察到第3-5天,GS 活性变化较为平稳。据此推测,GS 活性相比对照组虽有所下降,但其活性已经发挥到最大,以保证氮代谢的正常进行。具体原因还有待进一步验证。

在高处理组中, NR、GS 和 GOGAT 活性均极显著高于对照组(图 3-5),蛋白质含量呈现出相反的结果(图 6)。同时注意到,高处理组中 MDA 含量也明显高于其余两组(图 7)。MDA 是细胞膜脂过氧化作用的产物之一,它的产生能加剧膜损伤,导致膜脂流动性降低,通透性增加<sup>[26]</sup>,并能抑制蛋白质的合成<sup>[27]</sup>。这3种氮代谢关键酶分布于细胞质或叶绿体中,而非细胞膜系统中<sup>[28-29]</sup>。据此推测,在溶藻细菌 L7 的作用下,藻细胞膜通透性增加,进入藻细胞内的硝态氮增多, NR、GS 和 GOGAT 由于未受到损伤,故其活性也都明显

增加。邱昌恩等<sup>[30]</sup>在研究绿球藻时, 观测到当氮浓度在 1.5–15.0 g/L 范围内时, 随着氮浓度的升高, 藻细胞内 MDA 含量和 NR 活性也出现一致性的升高。而细胞膜脂的过氧化使藻细胞内蛋白质合成受到阻碍, 所以藻细胞氮代谢也遭到破坏, 藻的生长受到抑制。

## 4 结论

溶藻细菌 L7 会对藻类氮代谢造成影响。低密度溶藻细菌 L7 能够提高水华鱼腥藻对氮源的需求, 加速蛋白质的合成, 促进氮代谢的进行; 而高密度溶藻细菌 L7 会对藻细胞产生过氧化伤害, 阻碍蛋白质的合成和氮代谢过程。

## 参考文献

- [1] 王艳, 唐海溶, 蒋磊, 等. 硝酸盐对球形棕囊藻生长和硝酸还原酶活性的影响[J]. 植物学通报, 2006, 23(2): 138–144.
- [2] 康瑞娟, 施定基, 丛威, 等. 鱼腥藻7120中异形胞发育的影响因子[J]. 过程工程学报, 2005(2): 209–212.
- [3] 周云龙. 异形胞与蓝藻的固氮[J]. 生物学通报, 1994(11): 5–6.
- [4] Daft MJ, Mccord SB, Stewart WDP. Ecological studies on algal-lysing bacteria in fresh waters[J]. *Freshwater Biology*, 1975, 5(6): 577–596.
- [5] Peterson CG, Dudley TL, Hoagland KD, et al. Infection, growth, and community level consequences of a diatom pathogen in a Sonoran Desert stream[J]. *Journal of Phycology*, 1993, 29(4): 442–452.
- [6] 邱并生. 溶藻细菌[J]. 微生物学通报, 2011, 38(8): 1316.
- [7] 刘晶, 潘伟斌, 秦玉洁, 等. 两株溶藻细菌的分离鉴定及其溶藻特性[J]. 环境科学与技术, 2007(2): 17–19.
- [8] 黄昌妙, 潘伟斌, 李燕, 等. 三株溶藻菌对水华鱼腥藻抗氧化酶活性的影响[J]. 环境科技, 2009(6): 10–13.
- [9] 张纯敏, 潘伟斌, 陈岩赞. 溶藻细菌胞外活性物质对蛋白核小球藻的毒性效应[J]. 微生物学通报, 2009, 36(6): 821–825.
- [10] 于海涛, 潘伟斌. 溶藻细菌 L8的溶藻活性代谢产物对水华鱼腥藻光合特性的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2010(11): 25–29.
- [11] Zhao S, Pan W, Ma C. Stimulation and inhibition effects of algae-lytic products from *Bacillus cereus* strain L7 on *Anabaena flos-aquae*[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2011 (待刊).
- [12] 李合生, 孙群, 赵世杰, 等. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 125–127, 260–261.
- [13] 刘淑云, 董树亭, 赵秉强, 等. 长期施肥对夏玉米叶片氮代谢关键酶活性的影响[J]. 作物学报, 2007(2): 278–283.
- [14] Lin CC, Kao CH. Disturbed ammonium assimilation is associated with growth inhibition of roots in rice seedlings caused by NaCl[J]. *Plant Growth Regulation*, 1996, 18(3): 233–238.
- [15] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [16] 马超. 溶藻细菌L7胞外溶藻物质对水华鱼腥藻光合作用及抗逆性的生理效应[D]. 广州: 华南理工大学硕士学位论文, 2009.
- [17] 王利群, 王勇, 董英, 等. 硝酸盐对硝酸还原酶活性的诱导及硝酸还原酶基因的克隆[J]. 生物工程学报, 2003(5): 632–635.
- [18] 戴玲芬, 何慧, 林惠民. 谷氨酰胺合成酶在固氮鱼腥藻固氮调节中的作用[J]. 水生生物学报, 1987, 11(4): 344–352.
- [19] Temple SJ, Vance CP, Stephen Gantt J. Glutamate synthase and nitrogen assimilation[J]. *Trends in Plant Science*, 1998, 3(2): 51–56.
- [20] Wolk CP. Movement of carbon from vegetative cells to heterocysts in *Anabaena cylindrica*[J].

- Journal of Bacteriology, 1968, 96(6): 2138-2143.
- [21] Barber MJ, Desai SK, Marohnic CC, et al. Synthesis and bacterial expression of a gene encoding the heme domain of assimilatory nitrate reductase[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2002, 402(1): 38-50.
- [22] Fritz L, Stringher CG, Colepicolo P. Immunolocalization of nitrate reductase in the marine dinoflagellate *Gonyaulax polyedra* (Pyrrophyta)[J]. Journal of Phycology, 1996, 32(4): 632-637.
- [23] Packard TT, Blasco D, Maclsaac JJ, et al. Variations in nitrate reductase activity in marine phytoplankton[J]. Investigacion Pesquera, 1971, 35(1): 209-219.
- [24] 陈煜, 朱保葛, 张敬, 等. 不同氮源对大豆硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性及蛋白质含量的影响[J]. 大豆科学, 2004(2): 143-146.
- [25] 王莉. *Anabaena* PCC7120中异形胞发育的信号传导机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学博士学位论文, 2004.
- [26] 吕秀华, 辰乔, 张三润, 等. 低温胁迫对钝顶螺旋藻细胞过氧化和质膜透性的影响[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2011, 32(1): 52-57.
- [27] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991(2): 84-90.
- [28] 唐洪杰, 王修林, 祝陈坚, 等. 两种海洋微藻硝酸还原酶活性测定方法的比较研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006(6): 981-986.
- [29] 韩娜, 葛荣朝, 赵宝存, 等. 植物谷氨酰胺合成酶研究进展[J]. 河北师范大学学报, 2004, 28(4): 407-410, 423.
- [30] 邱昌恩, 况琪军, 刘国祥, 等. 不同氮浓度对绿球藻生长及生理特性的影响[J]. 中国环境科学, 2005(4): 408-411.

## 稿件书写规范

### 高校教改纵横栏目简介及撰稿要求

“高校教改纵横”栏目,是中国微生物学会主办的科技期刊中唯一的教学类栏目,也是中国自然科学核心期刊中为数不多的教学栏目。该栏目专为微生物学及其相关学科领域高校教师开辟,一方面为高校微生物学科的教师提供一个发表论文的平台,同时微生物关联学科的一部分确实优秀的论文也可以在此发表,是微生物学及相关领域教学研究、交流、提高的园地。

本栏目的文章有别于其他实验类研究报告,特色非常鲜明。要求作者来自教学第一线,撰写的稿件内容必须要有新意、要实用,不是泛泛地叙述教学设计与过程,而是确实有感而发,是教学工作中的创新体会,或者在教学中碰到的值得商榷的、可以与同行讨论的有价值的论题。在内容选材上应该有鲜明的特点和针对性,做到主题明确、重点突出、层次分明、语言流畅。教师的教学思路应与时俱进,注意将国内外新的科技成果和教学理念贯穿到教学之中,只有这样才能真正起到教与学的互动,促进高校生物学教学的发展,更多更好地培养出国家需要的高科技创新人才。这也是本栏目的目的所在。

同时,为了给全国生物学领域的教育工作者提供一个更广阔更高层次的交流平台,本栏目还开辟了“名课讲堂”版块,邀约相关生命科学领域,如微生物学、分子生物学、生物医学、传染病学、环境科学等的教学名师、知名科学家就教学和学生培养发表观点,推荐在教学改革、教学研究、引进先进教学手段或模式以及学生能力培养等方面有突出成绩的优秀论文,为高校教师以及硕士、博士研究生导师提供一个可资交流和学习的平台,促进高校教学和人才培养水平的提高。

欢迎投稿! 欢迎对本栏目多提宝贵意见!