

## 研究报告

节杆菌(*Arthrobacter* sp.)降解阿魏酸的效能

李敏\* 王桂莲 马璐 张琇

北方民族大学生物科学与工程学院 宁夏 银川 750021

**摘要:**【背景】蓄积在土壤中的阿魏酸类化感自毒物质对农作物生长产生危害,利用有益微生物分解该类物质是一项有效的治理措施。【目的】从自然界土壤分离获得能高效降解阿魏酸的菌株,并评估典型环境因子对降解效能的影响,以期为该菌在阿魏酸类自毒物质降解领域中的应用提供理论依据。【方法】采用一次性投加高浓度化合物的驯化方法分离筛选得到能有效降解阿魏酸的菌株,采用16S rRNA基因序列分析进行菌株鉴定,采用高效液相色谱法跟踪不同条件下该菌株对阿魏酸的降解情况。【结果】分离筛选获得的菌株为节杆菌属细菌(*Arthrobacter* sp.),命名为J6;在≤1.20%盐度(即12 g/L NaCl)、pH 5.0–9.0、20–40 °C、有/无葡萄糖和有/无酵母粉条件下,菌株J6均能高效降解阿魏酸。【结论】菌株J6在阿魏酸类自毒物质的生物修复领域具有较高的应用潜能。

**关键词:** 阿魏酸, 节杆菌, 生物降解

Degradation of ferulic acid by *Arthrobacter* sp.

LI Min\* WANG Guilian MA Lu ZHANG Xiu

College of Biological Science and Engineering, North Minzu University, Yinchuan, Ningxia 750021, China

**Abstract:** [Background] Ferulic acid and its analogues, accumulated in soil, are harmful to crop growth. It is an effective solution to decompose these substances by microorganisms. [Objective] A strain that could degrade ferulic acid efficiently was isolated from the soil. The ferulic acid degradation efficiency of the strain was evaluated for further application of the strain. [Methods] The strain was screened by the special culture containing high concentration of ferulic acid. The partial 16S rRNA gene sequences were used to identify the strain. The ferulic acid degradation characters of the strain were detected by HPLC. [Results] The strain was *Arthrobacter* sp. and named J6. High degradation efficiency was obtained at ≤1.20% saline stress (i.e., 12 g/L NaCl), pH 5.0–9.0, temperature at 20–40 °C, with/without glucose and with/without yeast. [Conclusion] Strain J6 had good application potential in bioremediation of ferulic acid.

**Keywords:** ferulic acid, *Arthrobacter* sp., biodegradation

**Foundation items:** Natural Science Foundation of Ningxia Hui Autonomous Region (2020AAC03256); Innovation Project of College Students of Ningxia Hui Autonomous Region (2019-QJ-045); Project of Innovation Team for Development and Utilization of Unique Microbial Resources of Ningxia Hui Autonomous Region (2020TSW04)

\*Corresponding author: E-mail: bkdlimin@126.com

**Received:** 31-07-2020; **Accepted:** 17-09-2020; **Published online:** 20-11-2020

**基金项目:** 宁夏回族自治区自然科学基金(2020AAC03256); 宁夏回族自治区大学生创新项目(2019-QJ-045); 宁夏特色微生物资源开发与利用创新团队科研项目(2020TSW04)

\*通信作者: E-mail: bkdlimin@126.com

**收稿日期:** 2020-07-31; **接受日期:** 2020-09-17; **网络首发日期:** 2020-11-20

酚酸是一类芳香环上带有活性羧基的有机酸, 芳香环上往往富含一至数个羟基和/或甲氧基, 结构类型多样。作为植物的次级代谢产物, 酚酸广泛存在于植物组织中并与植物的生长密切相关<sup>[1]</sup>。近年来, 酚酸因其化感效应而备受关注, 阿魏酸是其中的典型代表。研究显示, 黄连种植基地土壤中阿魏酸含量达 13.9–65.2  $\mu\text{g/g}$ <sup>[2]</sup>, 苜蓿<sup>[3]</sup>、黄瓜<sup>[4]</sup>、甜瓜<sup>[5]</sup>、烟草<sup>[6-7]</sup>和西瓜<sup>[8]</sup>等作物根际土壤中阿魏酸的含量也相对较高。赋存于土壤介质中的阿魏酸, 其化感作用的影响主要表现在2个方面: (1) 对植物种子萌发、幼苗生长发育等产生毒害作用<sup>[9-14]</sup>; (2) 对土壤理化性质和微生物种群及活性等产生负面影响<sup>[15-16]</sup>。

在农业生产领域, 蓄积在土壤中的酚酸类物质被认为是导致连作障碍的重要诱因<sup>[16]</sup>。利用有益微生物分解该类物质, 有利于农田生态系统的保护和农业的可持续发展, 是一项经济有效的措施。近年来, 研究者们已从自然环境、作物内生菌和肠道微生物中分离、筛选获得多种酚酸类物质降解菌<sup>[17]</sup>, 并对其降解特性、转化机理等做了一定程度的研究。考虑到我国是盐碱地大国, 化感物质累积导致盐碱土壤生境雪上加霜<sup>[18]</sup>。因此, 开发在富含盐和/或碱的环境中能高效降解阿魏酸类化感物质的微生物资源具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

阿魏酸( $\geq 98\%$ ), 阿拉丁试剂(上海)有限公司; 色谱纯甲醇和乙酸, 天津市大茂化学试剂厂。

高效液相色谱仪(HPLC)、色谱柱(ZORBAX RX-C18, 4.6 mm $\times$ 150 mm, 5  $\mu\text{m}$ )、二极管阵列检测器(DAD), Agilent 公司; 紫外可见分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司。

无机盐培养基和胰蛋白胨大豆肉汤培养基参照文献<sup>[19]</sup>配制。

### 1.2 菌株筛选及鉴定

在液体无机盐培养基中添加 100 mg/L 阿魏酸、0.30% NaCl (即 3 g/L NaCl, 本文表示盐碱浓度的百分比均指质量体积浓度)和 0.30%  $\text{NaHCO}_3$ 、5 g 宁夏中卫硒砂瓜种植连作土壤, 于 30  $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 条件下避光培养 4 d, 然后从中吸取 2 mL 培养液涂布到含 100 mg/L 阿魏酸、0.30% NaCl 和 0.30%  $\text{NaHCO}_3$  的固体无机盐培养基, 30  $^{\circ}\text{C}$  避光培养 3 d 后, 观察菌落生长情况, 挑取长势良好的菌落在 TSB 平板上划线培养, 直至获得单菌落。纯化后的菌种-80  $^{\circ}\text{C}$  甘油管保存。委托青岛科创检测有限公司进行菌株细胞形态的扫描电镜观察。委托生工生物工程(上海)股份有限公司进行菌株的 16S rRNA 基因序列分析。采用 MEGA 6.0 软件构建系统进化树。

### 1.3 降解阿魏酸的效能检测

采用胰酪大豆胨(Tryptic Soy Broth, TSB)液体培养基, 于 30  $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 条件下将甘油管冻存的菌种活化至对数生长期(即  $OD_{600}$  在 0.40–0.60 之间)。取 2.00 mL 菌悬液于 5 000 r/min 离心 5 min, 弃去上清液并用无菌水洗涤表面 3 次, 再加入少量无菌水旋涡混合制备菌悬液。将菌悬液加入以 50 mg/L 阿魏酸为唯一碳源的液体无机盐培养基中, 控制初始菌密度约为  $10^7$  CFU/mL。于 30  $^{\circ}\text{C}$ 、150 r/min 摇床培养, 根据需要每隔 3–12 h 取样测定降解液中菌密度( $OD_{600}$ )和阿魏酸残留率。

利用分光光度计跟踪检测菌株的  $OD_{600}$  值, 获得降解体系菌株的生长情况。降解体系中阿魏酸的含量采用 HPLC-DAD 跟踪检测。取 1 mL 降解液经 5 000 r/min 离心 5 min 后, 取上清液经 0.22  $\mu\text{m}$  有机相滤膜过滤至棕色液相进样瓶中。色谱流动相为甲醇:0.25%乙酸溶液=50:50 (体积比), 进样量 10  $\mu\text{L}$ , 柱温 30  $^{\circ}\text{C}$ , 流速 0.50 mL/min, 检测波长 320 nm。

在 30  $^{\circ}\text{C}$  条件下, 以盐碱浓度 0.30% 为起始<sup>[20-21]</sup>, 降解体系中分别加入 0.30%、0.60%、0.90%、1.20%、3.00% 和 6.00% 的 NaCl, 0.30%、0.45%、

0.60%和0.90%的 $\text{NaHCO}_3$ ，以及浓度各为0.30%、0.45%和0.60%的 $\text{NaCl}$ 和 $\text{NaHCO}_3$ ，考察降解体系对盐碱度的耐受阈值。在0.30%  $\text{NaCl}$ 和0.30%  $\text{NaHCO}_3$ 共存的条件下，分别于10、20、30、40和50℃条件下考察降解体系对温度的耐受性能。采用0.10 mol/L  $\text{HCl}$ 或 $\text{NaOH}$ 调节无机盐培养基初始pH分别为4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0和10.0，于30℃考察降解体系对酸碱的耐受性能。分别向含有0.30%  $\text{NaCl}$ 和0.30%  $\text{NaHCO}_3$ 的无机盐培养基中加入1 000、100、10、1、0.10和0.01 mg/L酵母粉或葡萄糖，于30℃考察典型有机氮源、碳源共存时对降解性能的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 阿魏酸降解菌的筛选及鉴定

经大量筛选驯化后，得到一株能够高效降解阿魏酸的菌株，命名为J6，DDBJ (DNA Data Bank of Japan)数据库登录号为LC574876。在TSB平板上生长24–48 h后，可形成近似圆形菌落，边缘整齐，浅黄色，有光泽，不透明。取对数生

长期菌体进行扫描电镜拍摄，其微观形态如图1所示，发现细菌呈杆状。经16S rRNA基因序列分析和同源性比对，发现菌株J6属于节杆菌属细菌(*Arthrobacter* sp.)，基于其基因序列构建的系统进化树如图2所示，J6与*A. Nitroguajacolicus*相似度最高。文献报道节杆菌属细菌具有明显的杆状和

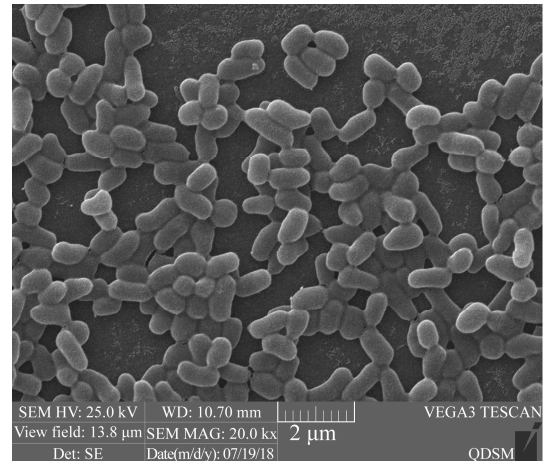


图1 菌株J6的扫描电镜照片图

Figure 1 The SEM image of the strain J6

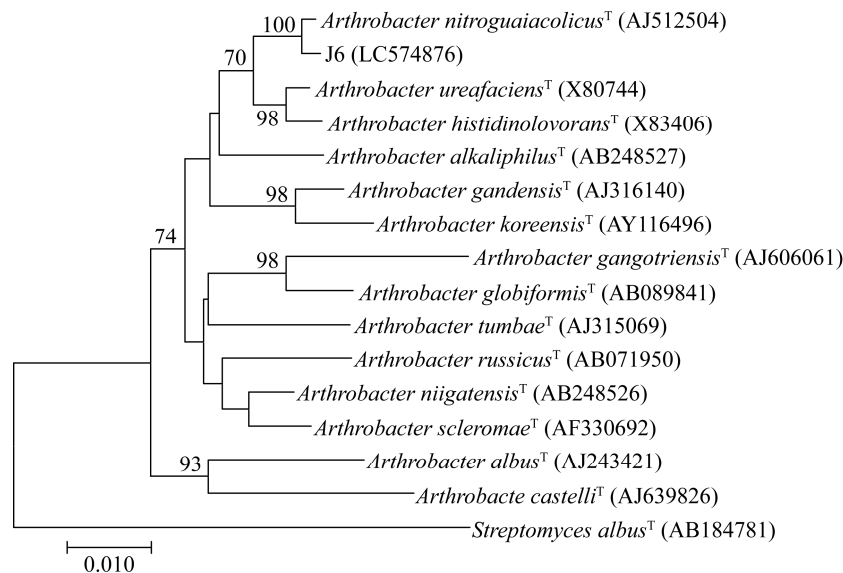


图2 菌株J6基于16S rRNA基因构建的系统进化树

Figure 2 Phylogenetic tree of strain J6 based on 16S rRNA gene

注：括号中序号：菌株登录号；分支点上的数字：Bootstrap支持率；标尺刻度0.010：序列差异的分支长度

Note: Numbers in parentheses: The sequence accession number; Numbers in each branch points: The percentages supported by bootstrap; Bar=0.010: Nucleotide divergence

球状变化周期<sup>[22]</sup>, 幼龄期呈不规则杆状, 稳定期近似球状<sup>[23]</sup>, 电镜观察结果与之相符。

## 2.2 典型环境因子对降解性能的影响

### 2.2.1 盐和/或碱浓度对降解性能的影响

菌株 J6 在不同浓度 NaCl、NaHCO<sub>3</sub> 以及 NaCl 和 NaHCO<sub>3</sub> 共存条件下对阿魏酸的降解效能如图 3 所示。降解体系单独存在 0.30% NaCl 或 0.30% NaHCO<sub>3</sub> 以及 0.30% NaCl 和 0.30% NaHCO<sub>3</sub> 共存时, 菌株 J6 的生长基本不受影响, 在 9 h 内对阿魏酸的降解效率可达 90%以上; 随着降解体系添加的盐和/或碱的浓度的增大, 菌株 J6 生长逐渐受到抑制, 对阿魏酸的降解转化效能也随之下降。降解体系中盐碱单独存在和盐碱共存的阈值分别为 1.20% NaCl、0.60% NaHCO<sub>3</sub>、0.45% NaCl 和 0.45% NaHCO<sub>3</sub>, 在上述盐度和/或碱度的条件下, 该菌 24 h 内对阿魏酸的降解率可达 90%以上。

对降解体系进行紫外-可见光谱扫描, 结果如图 4 所示。随着降解时间的延长, 阿魏酸 310 nm 特征吸收波长处的吸光强度逐渐下降, 直至趋于基线, 表明化合物分子结构中由苯环及丙烯酸基团构成的大共轭体系在降解过程中逐渐被破坏; 由于溶剂的极性对有机化合物的紫外-可见吸收光谱有一定影响, 当降解体系中加入 0.30% NaCl 和 0.30% NaHCO<sub>3</sub> 后, 阿魏酸的吸收光谱轮廓发生一定变形, 但仍符合吸光强度随降解时间延长而下降的趋势, 以上结果佐证了菌株 J6 能够有效降解转化阿魏酸。

### 2.2.2 温度对降解性能的影响

在阿魏酸初始浓度 50 mg/L、0.30% 盐和 0.30% 碱共存条件下考察不同温度对菌株 J6 降解阿魏酸效能的影响, 结果如图 5 所示。就菌株 J6 的生长情况而言, 30 °C>40 °C>50 °C>20 °C>10 °C; 就阿魏酸的降解情况而言, 则 30 °C>40 °C>20 °C>50 °C>10 °C。由此发现, 降

解体系最适温度为 30 °C, 40 °C 次之, 20 °C 降解情况优于 50 °C, 但菌体生长情况略低于 50 °C; 在 10 °C 和 50 °C 下, 降解性能受到显著抑制。综上, 降解体系在 20–40 °C 条件下具备较高的降解效能。

### 2.2.3 初始 pH 对降解性能的影响

在阿魏酸初始浓度 50 mg/L 和 30 °C 条件下考察不同初始 pH 对菌株 J6 降解阿魏酸效能的影响, 结果如图 6 所示。菌株 J6 最优降解 pH 值为 5.0, 而且随着 pH 值的升高降解能力逐渐下降; 在 pH 5.0–9.0 范围内, 经 12 h 后, 阿魏酸的降解率可达 90%以上。在 pH 4.0 和 pH 10.0 的条件下该菌不能生长, 也无降解能力。观察 6 h 时菌体 J6 的生长情况, 发现 pH 5.0>6.0>7.0>8.0>9.0, 即菌体生长情况与降解能力一致。总体而言, 降解体系在较宽的 pH (5.0–9.0) 范围内均表现出较高的降解效能。

### 2.2.4 典型有机碳源和氮源对降解效能的影响

在阿魏酸初始浓度 50 mg/L、0.30% 盐和 0.30% 碱共存条件下, 降解体系中添加不同浓度的葡萄糖或酵母粉, 考察典型有机碳源和氮源对降解效能的影响, 结果如图 7 所示。葡萄糖或酵母粉均能促进菌株 J6 的生长, 其中, 当添加量在 0.01–100 mg/L 范围时促进作用不明显, 添加量达 1 000 mg/L 时菌体生长显著增强, 而且酵母粉的促进作用显著高于葡萄糖。观察阿魏酸的降解情况, 发现在降解体系中添加 0.01–100 mg/L 葡萄糖或 0.01–1 000 mg/L 酵母粉时, 菌株 J6 降解阿魏酸的效能基本不受影响, 经 12 h 后降解率仍能达到 90%以上。然而, 当体系中葡萄糖浓度达 1 000 mg/L 时, 经 12 h 后阿魏酸的降解率约为 70%。由此可见, 典型有机氮源酵母粉能显著促进菌株 J6 的生长, 但对阿魏酸的降解影响不大; 典型有机碳源葡萄糖促进菌株 J6 生长的同时, 高浓度葡萄糖也会抑制菌株对阿魏酸的降解。

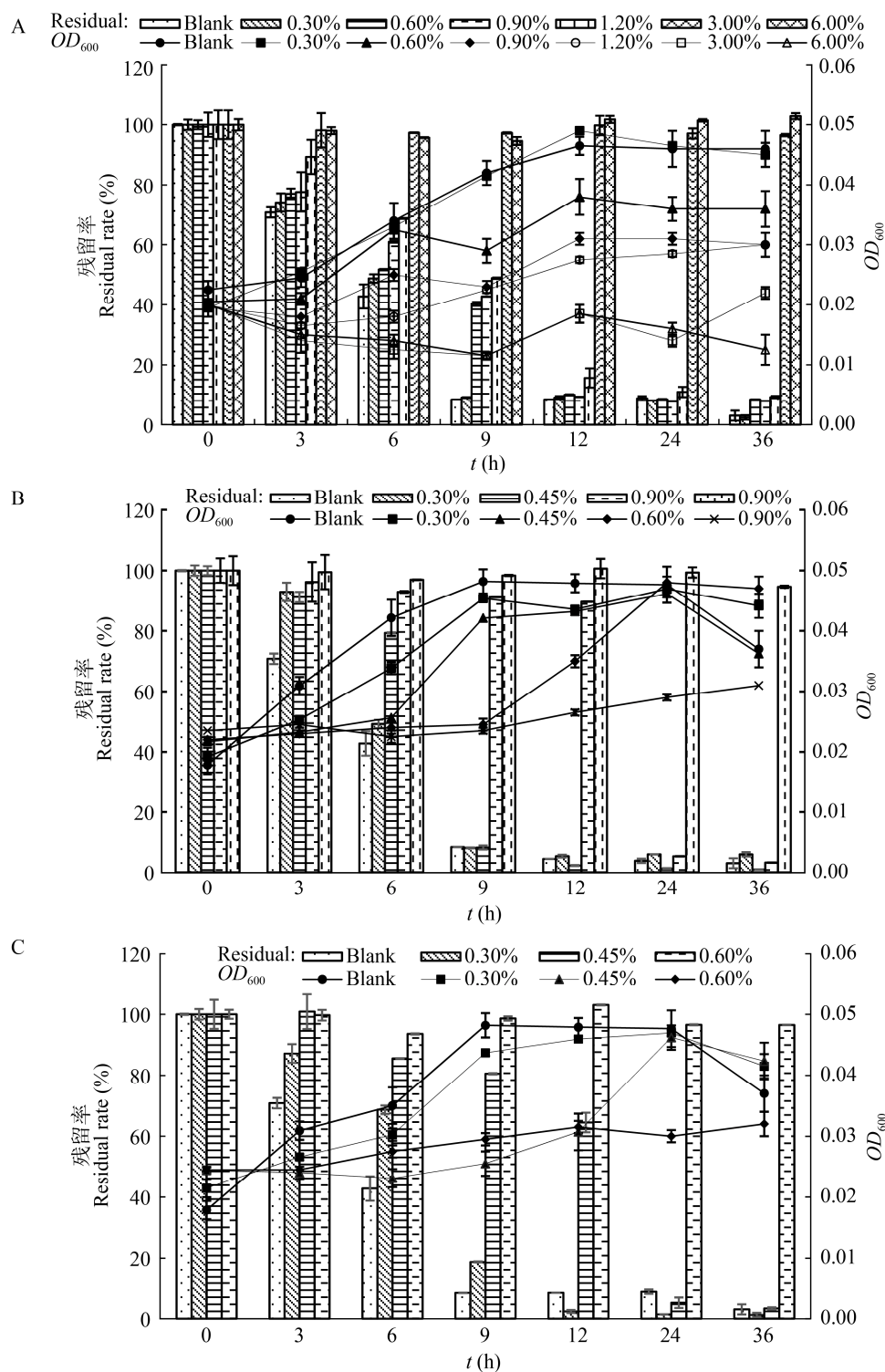


图3 菌株 J6 在不同浓度 NaCl 和/或  $\text{NaHCO}_3$  存在下的降解效能

**Figure 3** The degradation efficacy of strain J6 at different concentrations of NaCl and/or  $\text{NaHCO}_3$

注: A: 降解体系中添加不同浓度 NaCl; B: 降解体系中添加不同浓度  $\text{NaHCO}_3$ ; C: 降解体系中添加不同浓度 NaCl 和  $\text{NaHCO}_3$

Note: A: Different concentrations of NaCl were added into the reaction solutions; B: Different concentrations of  $\text{NaHCO}_3$  were added into the reaction solutions; C: Different concentrations of NaCl and  $\text{NaHCO}_3$  were added into the reaction solutions

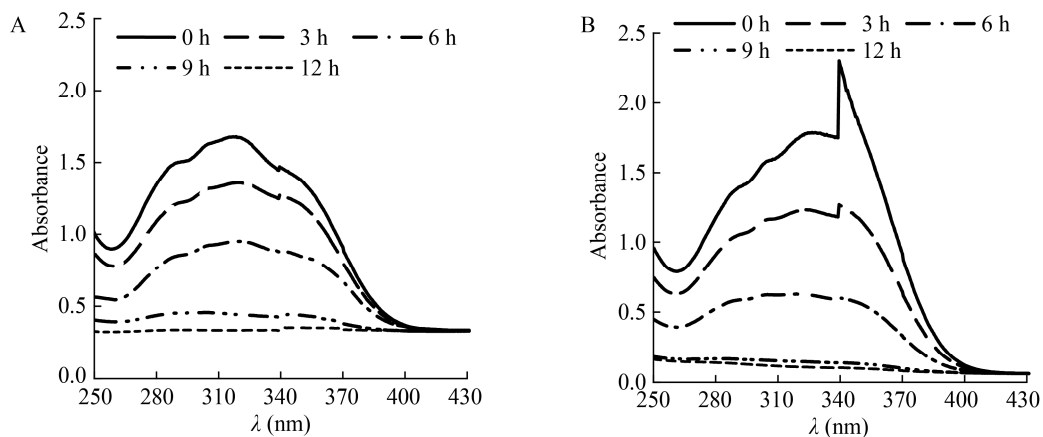


图4 菌株 J6 降解阿魏酸体系的分子光谱

Figure 4 Molecular spectrograms of ferulic acid degradation by strain J6

注: A: 空白对照; B: 降解体系中添加 0.30% NaCl 和 0.30% NaHCO<sub>3</sub>

Note: A: Blank control; B: 0.30% NaCl and 0.30% NaHCO<sub>3</sub> were added into the reaction solutions

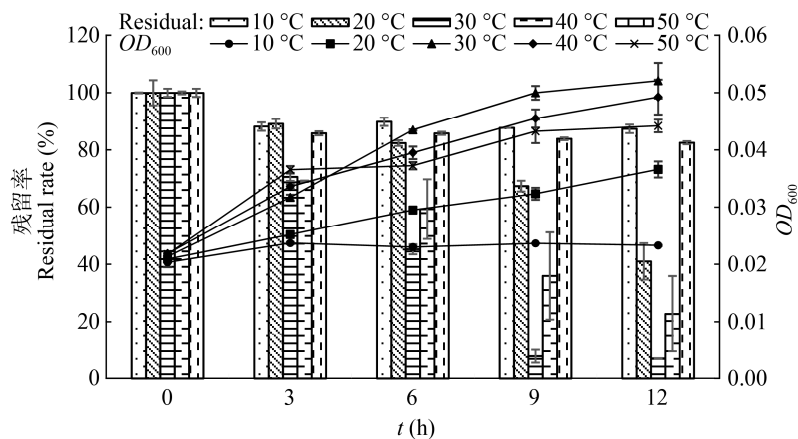


图5 不同降解温度对菌株 J6 降解效能的影响

Figure 5 Effects of different temperatures on the degradation efficacy of strain J6

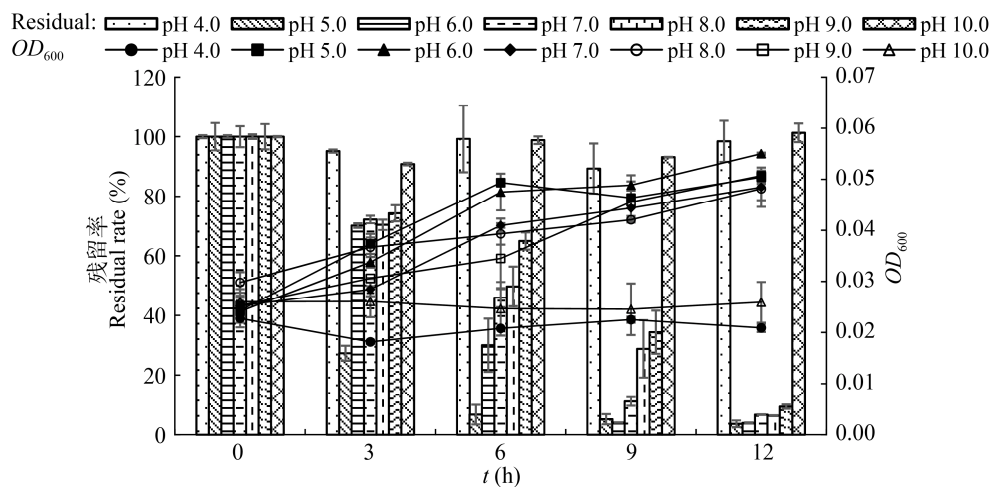


图6 不同初始 pH 值对菌株 J6 降解效能的影响

Figure 6 Effects of initial pH values on the degradation efficacy of strain J6



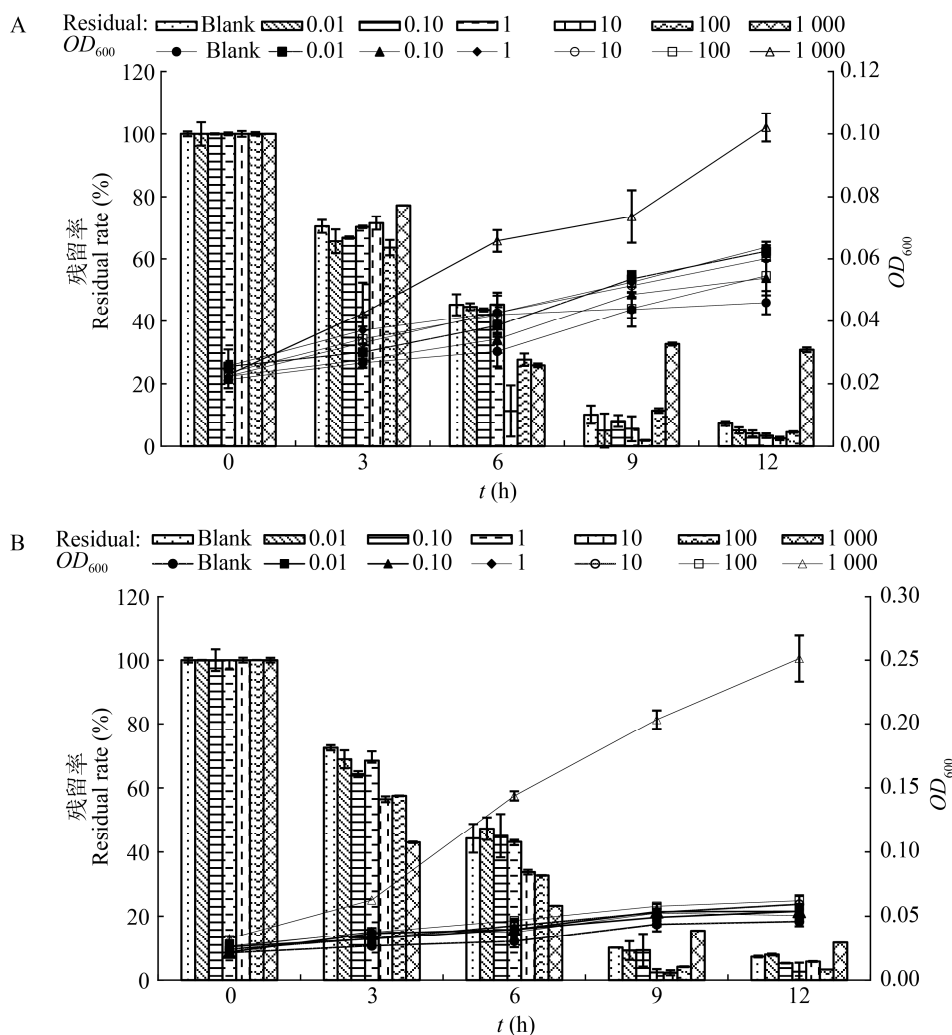


图7 葡萄糖(A)或酵母粉(B)对菌株 J6 降解效能的影响

Figure 7 Effects of glucose (A) or yeast (B) on the degradation efficacy of strain J6

### 3 讨论与结论

酚酸类自毒物质对农业生态系统造成了显著危害,微生物修复技术为该问题的解决带来了希望,高效安全的菌种资源是核心物质基础。尽管针对阿魏酸、肉桂酸和苯甲酸等典型酚酸筛选得到了部分具有高效降解能力的菌种,但能够适用于盐碱地生境的降解菌种及降解行为却未得到足够关注。盐碱度不仅能显著改变区域环境的微生物群落<sup>[24-28]</sup>,也是影响微生物降解有机污染物的重要因素<sup>[29]</sup>。本研究获得的节杆菌 J6,在 1.20% NaCl、0.60% NaHCO<sub>3</sub> 单独存在以及 0.45% NaCl

和 0.45% NaHCO<sub>3</sub> 共存条件下,对阿魏酸表现出了较高的降解能力。降解体系对盐碱浓度的耐受水平表明所获得的菌株可应用于轻度盐碱地<sup>[19-20]</sup>阿魏酸类自毒物的降解去除。温度对降解性能的影响呈倒钟形曲线,在 20–40 °C 范围内具有较高降解性能。此外,典型有机碳源葡萄糖和典型有机氮源酵母粉存在与否,对降解性能的影响微弱,表明即使在贫瘠的营养条件下,菌株 J6 也能良好地降解阿魏酸,有望成为阿魏酸类自毒物质生物修复的菌种资源。

已有研究证实,节杆菌属细菌可以降解诸多

苯衍生物、多环芳烃、N-杂环化合物等环境有机污染物<sup>[30-35]</sup>。丙烯基苯、4-氟肉桂酸与阿魏酸具有较为类似的分子结构, 节杆菌属细菌能够将一类列烯丙基苯转化为对羟基苯甲酸甚至苯环开裂产物<sup>[36-37]</sup>, 还能将 4-氟肉桂酸转化为 4-氟苯甲酸、4-氟苯乙酮等产物<sup>[38]</sup>, 这表明在代谢方面节杆菌属细菌能够利用多种有机化合物作为其营养物质, 其转化有机污染物的能力显著。基于基因组和转录组等研究手段, 节杆菌的极强抗逆能力分子机制得以挖掘, 其丰富的选择性  $\sigma$  因子、氧化应激、渗透应激和温度应激等相关基因使其在严苛生境下能够生存<sup>[39]</sup>, 因此该属细菌被认为是能够应用于土壤生物修复的优良菌种。目前, 国内外对节杆菌的研究多集中于环境污染物降解及基因组学方面<sup>[22]</sup>。在农业生产领域, 节杆菌属细菌固氮能力、对植物的促生能力等也被逐步挖掘<sup>[40-41]</sup>。本研究结果进一步丰富了节杆菌属细菌在农业生产领域的应用潜能。

## REFERENCES

- [1] Li ZH, Wang Q, Ruan X, Pan CD, Jiang DA. Phenolics and plant allelopathy[J]. *Molecules*, 2010, 15(12): 8933-8952
- [2] Liu YL, Zheng SH, Ye LX, Liao GJ, Hu CH. Isolation and degradation characteristics of ferulic acid-degrading fungi in rhizosphere soil of *Coptis chinensis*[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2019, 41(1): 46-50 (in Chinese)  
刘云露, 郑守豪, 叶磊鑫, 廖国建, 胡昌华. 黄连土壤阿魏酸降解菌的筛选及降解特性[J]. *西南大学学报: 自然科学版*, 2019, 41(1): 46-50
- [3] Rong SC, Shi SL, Sun CC. Determination of coumarins and major phenolic acids in plant and rhizosphere soil of alfalfa (*Medicago sativa* L.)[J]. *Soils*, 2016, 48(5): 931-938 (in Chinese)  
荣思川, 师尚礼, 孙灿灿. 苜蓿植株及根际土壤中主要酚酸和香豆素物质含量测定[J]. *土壤*, 2016, 48(5): 931-938
- [4] Chen TX, Gu X, Sun Q. Effect of exogenous phenolic acids on biomass accumulation and antioxidant system of greenhouse cucumber seedlings[J]. *Northern Horticulture*, 2016, 40(20): 44-49 (in Chinese)  
陈天祥, 顾欣, 孙权. 外源酚酸对设施黄瓜幼苗生物量积累和抗氧化系统的影响[J]. *北方园艺*, 2016, 40(20): 44-49
- [5] Zhang L, Yang RX, Wang Y, Yao Y, Yan H, Gao ZG. Identification and degradation of phenolic acids in rhizosphere soil of replanted muskmelon[J]. *Northern Horticulture*, 2017, 41(9): 18-23 (in Chinese)  
张璐, 杨瑞秀, 王莹, 姚远, 延涵, 高增贵. 甜瓜连作土壤中酚酸类物质测定及降解研究[J]. *北方园艺*, 2017, 41(9): 18-23
- [6] Zhang KQ, Xu T, Shen FK, Shi BF, Gu MH, Shou AF, Li XF. Phenolic acids in *Nicotiana tobacco* L. root exudate and their autotoxicity effects[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(6): 2552-2557 (in Chinese)  
张克勤, 徐婷, 沈方科, 石保峰, 顾明华, 首安发, 黎晓峰. 烟草根系分泌的酚酸及自毒效应[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(6): 2552-2557
- [7] Chen YX, Chen W, Lan Y, Wang KT, Wu YC, Zhong XL, Ying KY, Li JY, Yang GD. Determination of 18 phenolic acids in tobacco and rhizosphere soil by ultra high performance liquid chromatography combined with triple quadrupole mass spectrometry[J]. *Journal of Separation Science*, 2019, 42(4): 816-825
- [8] Li XX, Jin KP, Li WX, Li D, Han WQ, Su XM, Wang J, Wang QL, Cao JJ. Research progress of mechanism of continuous cropping obstacles of tomatoe in dryland[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2020, 48(1): 35-40 (in Chinese)  
李小霞, 靳鲲鹏, 李万星, 李丹, 韩文清, 苏秀敏, 王佼, 王秋兰, 曹晋军. 旱地番茄连作障碍机理研究进展[J]. *北方农业学报*, 2020, 48(1): 35-40
- [9] Li HM, Zhang HR, Shen YC, Gao ZM, Zhang ZL. Effects of phenolic-acids on growth and physiological characteristics of cabbage seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2017, 51(5): 626-633 (in Chinese)  
李贺敏, 张红瑞, 沈玉聪, 高致明, 张子龙. 酚酸类物质对白菜幼苗和生理特性的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2017, 51(5): 626-633
- [10] Hao SQ, Li CY, Sun JR, Lv JZ. Effect of ferulic acid on seed germination and seedling growth of maize[J]. *Horticulture & Seed*, 2017(2): 39-41, 73 (in Chinese)  
郝斯祁, 李辰垚, 孙静茹, 吕建洲. 阿魏酸对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *园艺与种苗*, 2017(2): 39-41, 73
- [11] Zhu J, Xu XJ, Zhang GL, Niu TT, Li MH, Wang SR, Huang JQ. Effect of different allelopathic chemicals on the growth of watermelon seedlings[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2018, 37(1): 400-407 (in Chinese)  
朱军, 徐小军, 张桂兰, 牛彤彤, 李梦辉, 王生瑞, 黄家权. 不同化感物质对西瓜幼苗生长的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2018, 37(1): 400-407
- [12] Li M, Yan XF, Ma L, Ma L, Shi R. Allelopathic inhibition of phenolic acids on germination of Wolfberry (*Lycium barbarum* Linn.)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 2072-2079 (in Chinese)



- 李敏, 闫兴富, 马丽, 马璐, 时榕. 酚酸类化感自毒物质对枸杞种子萌发的抑制作用[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2072-2079
- [13] Wang Y, Wang L, Ma J, Lin D, Yang YJ. Effects of salicylic acid on seed germination and seedling growth of pepper under salt stress[J]. Northern Horticulture, 2020, 44(8): 1-6 (in Chinese)  
王莹, 王龙, 马静, 林多, 杨延杰. 水杨酸对盐胁迫下辣椒种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2020, 44(8): 1-6
- [14] Huang YF, Zhang EH, Zhang XH, Wang HZ, Wang Q, Liu QL, Cui JJ, Xu SR. Autotoxicity of water extracts from continuous cropping soil of *Lilium davidii* var. *unicolor salisb*[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(7): 84-93 (in Chinese)  
黄钰芳, 张恩和, 张新慧, 王惠珍, 王琦, 刘青林, 崔佳佳, 胥生荣. 兰州百合连作土壤水浸液自毒作用研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(7): 84-93
- [15] Cao ZQ, Fan TF, Bi YM, Tian GL, Zhang LS. Potassium deficiency and root exudates reduce root growth and increase *Fusarium oxysporum* growth and disease incidence in continuously cultivated strawberry[J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2016, 44(1): 58-68
- [16] Wang YP, Li CR, Wang QK, Wang HT, Duan BL, Zhang GC. Environmental behaviors of phenolic acids dominated their rhizodeposition in boreal poplar plantation forest soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(7): 1858-1870
- [17] Xie XG, Chen Y, Bu YQ, Dai CC. A review of allelopathic researches on phenolic acids[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6417-6428 (in Chinese)  
谢星光, 陈晏, 卜元卿, 戴传超. 酚酸类物质的化感作用研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6417-6428
- [18] Zhang YQ. Study on adaptability of switchgrass in saline-alkali land of Ningxia Yinbei region[D]. Ningxia: Master's Thesis of Ningxia University, 2018 (in Chinese)  
张永乾. 宁夏银北地区盐碱地柳枝稷适应性研究[D]. 宁夏: 宁夏大学硕士学位论文, 2018
- [19] Ma YY, Chen XX, Li M, Wang J, Zhang X, Yang GP. Degradation of cinnamic acid by *Exiguobacterium* sp. strain[J]. Microbiology China, 2017, 44(9): 2079-2088 (in Chinese)  
马元元, 陈向向, 李敏, 王静, 张琇, 杨国平. 微小杆菌 (*Exiguobacterium* sp.)对肉桂酸降解行为[J]. 微生物学通报, 2017, 44(9): 2079-2088
- [20] Gu HM, Chen BL, Sun J. Effects of mycorrhizal seeding on growth and physiological characteristics of processing tomato under salt stress[J/OL]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020(2020-05-14)[2020-08-27]. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2019.0714> (in Chinese)
- 顾惠敏, 陈波浪, 孙锦. 菌根化育苗对盐胁迫下加工番茄生长和生理特征的影响[J/OL]. 中国农业科技导报, 2020(2020-05-14)[2020-08-27]. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2019.0714>
- [21] Yang Y, Wang YJ, Yin FT, Zhang FH. Effects of saline-alkali stress on physiology and photosynthetic characteristics of rape seedlings[J]. Northern Horticulture, 2020, 44(15): 1-8 (in Chinese)  
杨洋, 王亚娟, 阴法庭, 张凤华. 盐碱胁迫对油菜苗期生理及光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2020, 44(15): 1-8
- [22] Li J, Uwaremwe C, Leng Y, Zhang XH, Li SW, Chen XM. Progress on the study of biodegradation of organic pollutants and adsorption of heavy metals with *Arthrobacter* strains[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(10): 89-97 (in Chinese)  
李娟, Uwaremwe C, 冷艳, 张晓华, 李师翁, 陈熙明. 节杆菌属细菌处理有机物和重金属污染物的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(10): 89-97
- [23] Fang GH, Li LT, Li R, Zhu JC, Hong Q, Li SP. Isolation and characterization of a malachite green-degrader *Arthrobacter* sp. M6[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2010, 16(4): 581-584 (in Chinese)  
房桂华, 李联泰, 李荣, 朱建春, 洪青, 李顺鹏. 孔雀石绿降解菌 *Arthrobacter* sp. M6 的分离及降解特性[J]. 应用与环境生物学报, 2010, 16(4): 581-584
- [24] Zheng W. Microbial community structure characteristics and its adaptation mechanisms to soil salinity in Tianjin[D]. Tianjin: Master's Thesis of Tianjin Normal University, 2018 (in Chinese)  
郑薇. 天津不同盐度土壤微生物群落结构特征及其适应机理研究[D]. 天津: 天津师范大学硕士学位论文, 2018
- [25] Guo XX, Wang XL, Liang HY, Yu S, Yu LH, Guo W, Fang MY, Zheng LN, Li X. Effects of salinity-alkalinity stress on rhizosphere soil microbial quantity and enzyme activity of common bean[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(4): 148-157 (in Chinese)  
郭潇潇, 王雪莱, 梁海芸, 于崧, 于立河, 郭伟, 房孟颖, 郑立娜, 李欣. 盐碱胁迫对芸豆根际土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(4): 148-157
- [26] Zhang HM. Effect of different saline-alkali stress on soil nitrogen transformation and ammonia-oxidizing microorganisms[D]. Shihezi: Master's Thesis of Shihezi University, 2018 (in Chinese)  
张慧敏. 不同盐碱胁迫对土壤氮素转化和氨氧化微生物的影响[D]. 石河子: 石河子大学硕士学位论文, 2018
- [27] Hou JW, Xing CF, Deng XM, Chen F. Effect of pH on soil bacterial community structure in root zone of prickly ash[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 115-122 (in Chinese)

- 侯建伟, 邢存芳, 邓晓梅, 陈芬. pH 对花椒根区土壤细菌群落结构的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(5): 115-122
- [28] Bai JZ, Zhao Y, Wu FZ. Effects of saline-alkali stress on structure and abundance of bacteria/fungi community in rhizosphere soil of grafted cucumber seedlings[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(11): 1626-1635 (in Chinese)
- 白晶芝, 赵源, 吴凤芝. 盐碱胁迫对黄瓜嫁接苗根际土壤细菌和真菌群落结构及丰度的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(11): 1626-1635
- [29] Boopathy R. Factors limiting bioremediation technologies[J]. Bioresource Technology, 2000, 74(1): 63-67
- [30] Li XM, Zhang MJ, Jin JH, Liu SJ, Jiang CY. Population shift and degrading characteristics of a pyrenedegrading bacterial consortium during incubation process[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2012, 52(10): 1260-1267 (in Chinese)
- 李晓明, 张明江, 金京华, 刘双江, 姜成英. 芘降解菌群驯化过程中的演变[J]. 微生物学报, 2012, 52(10): 1260-1267
- [31] Yao YX, Tang HZ, Su F, Xu P. Comparative genome analysis reveals the molecular basis of nicotine degradation and survival capacities of *Arthrobacter*[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8642
- [32] Zhang S, Huang GL, Xu JL, Li B, Li HG, Chen DX. Screening, identification and characterization of a quinclorac-degrading *Arthrobacter* sp. MC-10[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2015, 55(1): 80-88 (in Chinese)
- 张顺, 黄国联, 许家来, 李斌, 李宏光, 陈德鑫. 二氯喹啉酸降解菌 MC-10 的筛选、鉴定及其降解特性[J]. 微生物学报, 2015, 55(1): 80-88
- [33] Zhang Z, Li HX, Chen X, Li WM, Li FH, Xu L. Isolation and characterization and fluoranthene degrading of an IAA secreting bacterial strain[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11): 5041-5048 (in Chinese)
- 张振, 李辉信, 陈雄, 李伟明, 李方卉, 徐莉. 一株具有荧蒽降解能力的产吲哚乙酸菌的筛选鉴定及其特性[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 5041-5048
- [34] Vandera E, Samiotaki M, Parapouli M, Panayotou G, Koukkou AI. Comparative proteomic analysis of *Arthrobacter phenanthrenivorans* Sphe3 on phenanthrene, phthalate and glucose[J]. Journal of Proteomics, 2015, 113: 73-89
- [35] Ren L, Jia Y, Ruth N, Shi YH, Wang JH, Qiao C, Yan YC. Biotransformations of bisphenols mediated by a novel *Arthrobacter* sp. strain YC-RL1[J]. Applied Microbiology Biotechnology, 2016, 100(4): 1967-1976
- [36] Shimoni E, Baasov T, Ravid U, Shoham Y. The trans-anethole degradation pathway in an *Arthrobacter* sp.[J]. The Journal of Biological Chemistry[J]. 2002, 277(14): 11866-11872
- [37] Shimoni E, Baasov T, Ravid U, Shoham Y. Biotransformations of propenylbenzenes by an *Arthrobacter* sp. and its *t*-anethole blocked mutants[J]. Journal of Biotechnology, 2003, 105(1/2): 61-70
- [38] Hasan SA, Ferreira MIM, Koetsier MJ, Arif MI, Janssen DB. Complete biodegradation of 4-fluorocinnamic acid by a consortium comprising *Arthrobacter* sp. strain G1 and *Ralstonia* sp. strain H1[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(2): 572-579
- [39] Zhang XJ, Zhang GZ, Yang HT. Genomics basis of *Arthrobacter* spp. environmental adaptability: a review[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2016, 56(4): 570-577 (in Chinese)
- 张新建, 张广志, 杨合同. 节杆菌环境适应性的基因组学研究进展[J]. 微生物学报, 2016, 56(4): 570-577
- [40] Zhao SC. Isolation, screening and promoting effect of rhizosphere soil functional strains of four endangered plants in desert[D]. Hohhot: Master's Thesis of Inner Mongolia University, 2019 (in Chinese)
- 赵世超. 四种荒漠珍稀植物根际土壤功能菌株的分离筛选及其促生作用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学硕士学位论文, 2019
- [41] Safdarian M, Askari H, Shariati JV, Nematzadeh G. Transcriptional responses of wheat roots inoculated with *Arthrobacter nitroguajacolicus* to salt stress[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 1792