

# 解淀粉芽胞杆菌XJ5挥发性物质抑菌活性及对苹果褐腐病防效测定

郭洁心, 张育铭, 朱洪磊, 任璐, 张宝俊\*

(山西农业大学植物保护学院, 太谷 030801)

**摘要:** 解淀粉芽胞杆菌 *Bacillus amyloliquefaciens* XJ5 挥发性物质对苹果褐腐病菌 *Monilinia fructigena* 等多种病原真菌具有良好的拮抗活性。通过固相微萃取-气相色谱质谱联用仪 (Solid-phase microextraction-Gas chromatography mass spectrometry, SPME-GC-MS) 对菌株 XJ5 产生的挥发性物质进行检测, 利用平板对扣法测定挥发性化合物的抑菌活性, 并离体接种评价菌株 XJ5 挥发性物质对苹果褐腐病的防效。结果表明, XJ5 菌株挥发性物质对 9 种植物病原真菌的抑菌率在 47.9%~84.8%, 其中对苹果褐腐病菌的抑菌率最高为 84.8%。SPME-GC-MS 检测及抑菌活性测定表明, 菌株 XJ5 分泌的主要挥发性物质为十二醛 (Dodecanal), 具有抑菌活性的挥发性物质主要为 2-壬醇 (2-Nonanol)、2-乙基己醇 (2-Ethyl-1-hexanol) 和 2-十一醇 (2-Undecanol)。其中 2-壬醇抑制苹果褐腐病菌的  $EC_{50}$  为 3.43  $\mu\text{g/mL}$ , 且 XJ5 菌液离体熏蒸与 2-壬醇离体熏蒸均可有效抑制苹果褐腐病菌丝生长及病斑扩展, 其对苹果褐腐病的离体防效分别在 14.4%~71.2% 和 66.4%~97.6%, 与对照差异显著。

**关键词:** 解淀粉芽胞杆菌; 挥发性物质; SPME-GC-MS; 抑菌活性; 离体防效

中图分类号: S476 文献标志码: A 文章编号: 1005-9261(2020)04-0575-06

## Antifungal Activity of Volatile Organic Compounds from *Bacillus amyloliquefaciens* XJ5 and Control Effect against *Monilinia fructigena*

GUO Jiexin, ZHANG Yuming, ZHU Honglei, REN Lu, ZHANG Baojun\*

(College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

**Abstract:** Volatile organic compounds (VOCs) of *Bacillus amyloliquefaciens* XJ5 have good antifungal activity against various pathogenic fungi such as *Monilinia fructigena*. The VOCs produced by strain XJ5 were detected by SPME-GC-MS, their antifungal activities were determined by two-sealed-base-plates method, and the control effects against *M. fructigena* were evaluated *in vitro*. The results indicated that inhibition rate of XJ5 VOCs against nine pathogenic fungi were ranged between 47.9% and 84.8%, and the highest inhibition rate against *M. fructigena* was 84.8%. SPME-GC-MS analysis and antifungal activity determination showed that the major VOCs produced by strain XJ5 were Dodecanal, and the major VOCs with antifungal activity were 2-Nonanol, 2-Ethyl-1-hexanol and 2-Undecanol. The  $EC_{50}$  value of 2-Nonanol inhibiting *M. fructigena* was 3.43  $\mu\text{g/mL}$ . *In vitro* fumigation with XJ5 bacteria suspension and 2-Nonanol can effectively inhibited the mycelial growth of *M. fructigena* and the lesion development. The fumigation control efficacies of XJ5 bacteria suspension and 2-Nonanol against *M. fructigena* were 14.4%~71.2% and 66.4%~97.6%, respectively, significantly different from those of the control.

**Key words:** *Bacillus amyloliquefaciens*; volatile organic compounds; SPME-GC-MS; antifungal activity; control effect *in vitro*

收稿日期: 2020-02-05

基金项目: 山西省科技基础条件平台项目 (201605D121024); 山西省应用基础研究计划 (201801D121244)

作者简介: 郭洁心, 女, 硕士研究生, E-mail: 15234483340@163.com; \*通信作者, 副教授, E-mail: zhangbj992@163.com。

DOI: 10.16409/j.cnki.2095-039x.2020.04.018

苹果褐腐病是苹果生长后期及储藏期间一种常发病害,受感染果实多早落,在贮藏期病果呈白色绒球状霉团,果实腐烂。其病原菌果生链核盘菌生长速度快、扩展能力强、严重时侵染率可达30%,严重影响果农的经济效益<sup>[1]</sup>。果实采收后、储藏前使用杀菌剂浸泡果实或改善储存条件可减少储藏期内病害的传播<sup>[2]</sup>。纪兆林等<sup>[3]</sup>对8类15种杀菌剂的室内毒力测定表明,咪鲜胺对桃褐腐病菌具有较好的抑菌活性。张殿朋等<sup>[4]</sup>研究发现,经戊唑醇处理的桃褐腐病发病率仅为18.7%,而对照组发病率高达45.5%。化学杀菌剂对采后果实褐腐病具有直接有效的杀菌作用,但长期使用易产生抗药性、杀菌剂残留、果实表面污染及存储成本较高等问题,因此采用气体熏蒸方式在生产中防治采后病害更为方便。

芽胞杆菌是一类抗逆能力强、具有显著抗菌活性的生防微生物资源,其产生的抗菌物质可分为由核糖体合成的羊毛硫类抗生素<sup>[5]</sup>或拮抗蛋白<sup>[6]</sup>、由非核糖体合成的脂肽类抗生素<sup>[7]</sup>和挥发性物质(volatile organic compounds, VOCs)<sup>[8]</sup>等。其中,挥发性物质由于其高效抑菌、成分较多、易于挥发、在植物表面不残留等特点,研究日益增多。微生物释放的VOCs具有促进植物生长、诱导植物产生抗性、杀线虫活性及抑制病原菌生长和孢子萌发等不同作用<sup>[9-13]</sup>。殷晓慧等<sup>[14]</sup>研究表明,死谷芽胞杆菌 *Bacillus vallismortis* 12a 和高地芽胞杆菌 *Bacillus altitudinis* 14b 2株拮抗菌的无菌发酵滤液和挥发物对桃褐腐菌具有显著抑制作用,可延缓桃褐腐病发病时间,并有效控制病斑扩展。Zhao等<sup>[15]</sup>研究表明,枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis* CF-3产生的挥发性物质2,4-二叔丁基苯酚能有效防止荔枝果实受胶胞炭疽菌侵染后腐烂,并能显著抑制病原菌的孢子萌发和生长。

前期通过生长速率法筛选到1株对苹果褐腐病菌、番茄灰霉病菌 *Botrytis cinerea*、梨黑斑病菌 *Alternaria alternata* 等多种病原真菌具有广谱拮抗活性的芽胞杆菌 XJ5,经鉴定为解淀粉芽胞杆菌(GeneBank 登录号:MT000964)。为分析其挥发性物质的抑菌活性,采用SPME-GC-MS对其挥发性物质进行检测,并通过离体防效评价菌株XJ5挥发性物质对苹果褐腐病的防治效果,探索拮抗微生物在果蔬采后病害的防治及保鲜方面的应用潜力。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

解淀粉芽胞杆菌 XJ5 (GeneBank 登录号:MT000964)由山西省植物内生菌服务共享平台保藏并提供。苹果褐腐病菌、番茄灰霉病菌、梨黑斑病菌、立枯丝核病菌 *Rhizoctonia solani*、番茄早疫病菌 *Alternaria solani*、苹果炭疽病菌 *Glomerella cingulate*、苹果轮纹病菌 *Botryosphaeria berengeriana*、棉花立枯病菌 *Rhizoctonia solani*、腐皮镰孢病菌 *Fusarium solani* 由山西省绿色生物农药工程技术中心保存提供。

PDA培养基:土豆200 g/L,葡萄糖20 g/L,琼脂16 g/L, pH 7.0。NA培养基:牛肉膏3 g/L,蛋白胨10 g/L, NaCl 5 g/L,琼脂16 g/L, pH 7.0。BPY培养液:蛋白胨10 g/L,牛肉浸膏5 g/L,酵母粉5 g/L,葡萄糖5 g/L, NaCl 5 g/L, pH 7.0。对照药剂:45%咪鲜胺水乳剂为市购(山东东合生物科技有限公司,PD20160183)。

### 1.2 菌株 XJ5 挥发性物质抑菌谱检测

以上述9种病原真菌为指示菌,NA平板上划线接种XJ5菌株,PDA平板中央接种直径为5 mm的植物病原菌菌饼,将NA平板与PDA平板对扣,并用PE缠绕膜封口,25℃恒温培养3 d后测定抑菌活性,以NA平板不接细菌为对照,3次重复。抑菌率(%)=(对照组菌落直径-处理组菌落直径)/(对照组菌落直径-5 mm)×100。

### 1.3 菌株 XJ5 挥发性物质收集与 GC-MS 检测

将3 mL NA培养基注入20 mL无菌顶空进样瓶内,凝固后在培养基表面注入浓度为 $1 \times 10^8$  cfu/mL的XJ5菌液20  $\mu$ L,PE缠绕膜封口后26℃恒温培养培养7 d。采用顶空固相微萃取技术,在萃取温度70℃、萃取时间40 min条件下对XJ5菌株挥发性气体进行收集,然后进行GC-MS分析。以无菌水为对照,3次重复。

气相色谱条件:色谱柱为TG-5 MS(30.0 m×0.25 mm×0.25  $\mu$ m, Thermo);载气为氦气,流速1 mL/min;进样口温度250℃;温度程序为50℃保持2 min,后以4℃/min频率升温至150℃,并维持1 min,再

以 5 °C/min 频率升温至 250 °C, 并维持 5 min。质谱条件: 离子源为 ESI, 电子能量 70 eV, 电离源温度 280 °C; 质核比扫描范围 45~500 amu, 扫描间隔时间 0.2 s。GC-MS 所得质谱图经 NIST 质谱数据库检索分析, 推测化合物种类和结构。

#### 1.4 菌株 XJ5 挥发性物质不同组分抑菌活性测定

用丙酮溶液溶解 XJ5 产生的 9 种主要挥发性化合物, 分别建立浓度为 1、5、10、50、100 µg/mL 的梯度, 用量为 5 µL 加到培养皿中央制成药剂平板, 并在 PDA 平板中央接种直径为 5 mm 的苹果褐腐病菌菌饼, 将药剂平板与 PDA 平板对扣, 并用 PE 缠绕膜封口, 25 °C 恒温培养 3 d 后测定抑菌活性, 以药剂平板为丙酮溶液为对照, 3 次重复。抑菌率 (%) = (对照组菌落直径 - 处理组菌落直径) / (对照组菌落直径 - 5 mm) × 100。

#### 1.5 菌株 XJ5 对苹果褐腐病的离体防效测定

选取新鲜健康、大小相近的苹果, 用 75% 酒精浸泡 30~60 s, 然后用无菌水浸洗 3 次, 擦干果实表面水分, 用 6 mm 消毒的打孔器在每个苹果腰部上打孔, 接种直径为 6 mm 的苹果褐腐病菌菌饼, 之后将苹果分别放入内尺寸为 42 cm × 32 cm × 22 cm 的泡沫箱, 每箱 10 个苹果备用。挑取 XJ5 单菌落于 BPY 培养液中, 28 °C、180 r/min 过夜培养获得种子液, 将种子发酵液按 1% 的比例接种于 BPY 培养液中, 同样条件下振荡培养 72 h 后, 用血球计数板法进行计数统计, 稀释不同倍数后建立 XJ5 菌液浓度为  $1 \times 10^8$ 、 $1 \times 10^6$  和  $1 \times 10^4$  cfu/mL 的梯度, 菌液用量为 20 mL。用丙酮溶液溶解 2-壬醇, 建立浓度为 10、50、100 µg/mL 的梯度, 药剂用量为 2 mL。对备用接菌苹果进行不同浓度的发酵液和药剂熏蒸处理, 熏蒸 24 h 后开盖通气, 25 °C 恒温培养 5 d 后测定各处理病斑直径, 计算防治效果。每处理接种 10 个苹果, 以接种苹果褐腐病菌为阴性对照, 以喷施浓度为 450、300 和 225 mg/L 的 45% 咪鲜胺水乳剂为阳性对照, 以不接菌为空白对照, 重复 3 次。防治效果 (%) = (阴性对照病斑直径 - 处理组病斑直径) / (阴性对照病斑直径 - 0.6 cm) × 100。

#### 1.6 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2010 和 IBM SPSS Statistics 20.0 软件对试验数据进行统计和分析, 并应用 Duncan 氏新复极差法对不同处理组间的差异进行单因素方差分析 ( $P < 0.05$ ), 所有数据为平均值 ± 标准差。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌株 XJ5 挥发性物质抑菌谱

解淀粉芽胞杆菌 XJ5 挥发性物质对所测 9 种植物病原真菌均有不同程度的抑菌活性, 其抑菌率在 47.9%~84.8% (表 1)。其中, XJ5 挥发性物质对苹果褐腐病菌的抑菌效果最好, 抑菌率为 84.8% (图 1)。

### 2.2 菌株 XJ5 挥发性物质 GC-MS 检测结果

菌株 XJ5 挥发性物质分析表明, 根据峰面积大小可推测 XJ5 挥发性物质主要组分有醇类、酮类、醛类、

表 1 菌株 XJ5 挥发性物质对 9 种病原真菌的抑制率

Table 1 The inhibition rate of strain XJ5 VOCs against 9 kinds of pathogenic fungi

植物病原菌 Plant pathogens	抑制率 Inhibition rate (%)
苹果褐腐病菌 <i>Monilinia fructigena</i>	84.84 ± 1.66 a
番茄灰霉病菌 <i>Botrytis cinerea</i>	84.00 ± 2.09 a
梨黑斑病菌 <i>Alternaria alternata</i>	78.33 ± 0.72 b
立枯丝核病菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	71.76 ± 1.18 c
番茄早疫病菌 <i>Alternaria sonali</i>	64.92 ± 2.49 d
苹果炭疽病菌 <i>Glomerella cingulate</i>	56.19 ± 1.41 e
苹果轮纹病菌 <i>Botryosphaeria berengeriana</i>	55.90 ± 0.59 e
棉花立枯病菌 <i>Rhizoctonia solani</i>	49.74 ± 1.24 f
腐皮镰孢病菌 <i>Fusarium solani</i>	47.93 ± 2.30 f

注: 同列数据后不同字母表示 Duncan 新复极差检验在  $P < 0.05$  水平差异显著性。

Note: Different letters in the same column mean significantly different at 0.05 level by Duncan's test.

烯烃类等物质, 包括十二醛、3-羟基-2-丁酮、2-十三烷酮、2-十一酮、2-十一醇、2-乙基己醇、2-壬醇、2-庚酮、2-壬酮、环庚三烯等 10 种(表 2)。其中十二醛为峰面积最大, 占比 12.48%, 为主要挥发性物质。

### 2.3 挥发性物质不同组分抑菌活性

以苹果褐腐病菌为指示菌, 所测 10 种挥发性物质中有 9 种对苹果褐腐病菌均有不同程度的抑制活性。其中 2-壬醇、2-乙基己醇、2-十一醇在施药浓度为 10  $\mu\text{g/mL}$  时, 抑菌率均在 80%以上, 其余挥发物的抑菌率均低于 46%, 2-壬醇  $\text{EC}_{50}$  最小为 3.43  $\mu\text{g/mL}$  (表 3)。

对照  
Control

处理  
Treatment

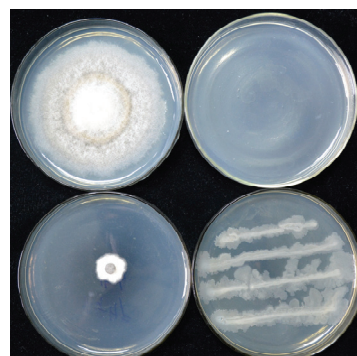


图 1 菌株 XJ5 挥发性物质对苹果褐腐病菌的抑菌效果

Fig. 1 The inhibition effect of strain XJ5 VOCs against *M. fructigena*

表 2 菌株 XJ5 挥发性物质 SPME-GC-MS 检出结果

Table 2 SPME-GC-MS identification results of VOCs by strain XJ5

序号 S/N	物质 Compound	化学式 Chemical formula	保留时间 Retention time (min)	相对峰面积 Area (%)	SI	RSI
1	3-羟基-2-丁酮 3-Hydroxy-2-butanone	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$	3.41	3.78	816	851
2	环庚三烯 Cycloheptatriene	$\text{C}_7\text{H}_8$	4.37	0.57	942	943
3	2-庚酮 2-Heptanone	$\text{C}_7\text{H}_{14}\text{O}$	7.5	0.72	891	909
4	2-乙基己醇 2-Ethyl-1-hexanol	$\text{C}_8\text{H}_{18}\text{O}$	12.27	0.93	915	915
5	2-壬酮 2-Nonanone	$\text{C}_9\text{H}_{18}\text{O}$	14.59	0.67	920	934
6	2-壬醇 2-Nonanol	$\text{C}_9\text{H}_{20}\text{O}$	14.96	0.77	881	886
7	2-十一酮 2-Undecanone	$\text{C}_{11}\text{H}_{22}\text{O}$	21.8	1.02	915	915
8	2-十一醇 2-Undecanol	$\text{C}_{11}\text{H}_{24}\text{O}$	22.1	0.94	930	944
9	十二醛 Dodecanal	$\text{C}_{12}\text{H}_{24}\text{O}$	25.71	12.48	923	923
10	2-十三烷酮 2-Tridecanone	$\text{C}_{13}\text{H}_{26}\text{O}$	28.47	2.62	878	881

注: SI 是化合物的 MS 谱图与谱图库中的标准谱图比较得到的相似度; RSI 是用标准谱图与化合物反相比较得到的相似度。

Note: SI is the similarity obtained by comparing the MS spectrum of the compound with the standard spectrum in the spectrum library; RSI is the similarity obtained by comparing the standard spectrum with the compound in inverse phase.

表 3 9 种挥发物对苹果褐腐病菌的抑菌结果

Table 3 The inhibition activities of 9 standard volatile compounds against *M. fructigena*

药剂 Pharmaceutics	$\text{EC}_{50}$ ( $\mu\text{g/mL}$ )	毒力回归方程 Toxicity regression equation	相关系数 Correlation coefficient
2-壬醇 2-Nonanol	3.43	$y=3.5691x+3.0892$	0.9740
2-乙基己醇 2-Ethyl-1-hexanol	3.69	$y=3.6955x+2.9025$	0.9776
2-十一醇 2-Undecanol	4.36	$y=3.6078x+2.6923$	0.9661
环庚三烯 Cycloheptatriene	24.87	$y=2.8603x+1.0081$	0.9333
2-十一酮 2-Undecanone	24.29	$y=2.8990x+0.9836$	0.9389
2-壬酮 2-Nonanone	25.91	$y=1.1830x+3.3279$	0.9271
2-庚酮 2-Heptanone	29.59	$y=0.4932x+4.2745$	0.9775
2-十三烷酮 2-Tridecanone	32.50	$y=2.6141x+1.0479$	0.9186
十二醛 Dodecanal	177.46	$y=0.5737x+3.7097$	0.8588

### 2.4 菌株 XJ5 挥发物对苹果褐腐病的离体防效

测定结果表明, 不同处理组对苹果褐腐病菌菌丝生长及病斑扩展有显著抑制作用。2-壬醇熏蒸对苹果褐腐病的防效在 66.4%~97.6%, 菌株 XJ5 熏蒸对苹果褐腐病的防效在 14.4%~71.2%, 阳性对照咪酰胺对苹果褐腐病在 94.4%~98.4% (表 4)。

表4 不同处理对苹果褐腐病的离体防效  
Table 4 The control effects of different treatments against *M. fructigena*

处理 Treatment	处理浓度 Treatment concentration	病斑直径 Lesion diameter (cm)	防治效果 Control effect (%)
2-壬醇 2-Nonanone	10 µg/mL	2.00±0.10	66.4±2.4 c
	50 µg/mL	1.63±0.32	75.2±7.7 b
	100 µg/mL	0.70±0.10	97.6±2.4 a
XJ5	1×10 <sup>4</sup> cfu/mL	4.17±0.29	14.4±6.9 e
	1×10 <sup>6</sup> cfu/mL	3.10±0.10	40.0±2.4 d
	1×10 <sup>8</sup> cfu/mL	1.80±0.26	71.2±6.3 bc
咪酰胺 Prochloraz	450 mg/L	0.67±0.58	98.4±1.4 a
	300 mg/L	0.73±0.55	96.8±3.7 a
	225 mg/L	0.83±0.52	94.4±4.8 a
苹果褐腐病菌 <i>M. fructigena</i>	—	4.77±0.25	—

注: 同列不同字母表示 Duncan 新复极差检验在  $P < 0.05$  水平差异显著性

Note: Different letters in the same column mean significantly different at 0.05 level by Duncan's test.

### 3 讨论

微生物产生的 VOCs 作为一类潜在的果蔬存储病害防治的生防物质, 可有效预防病原菌的侵染、为害、减少化学杀菌剂使用造成的药剂残留等。Gao 等<sup>[16]</sup>发现枯草芽胞杆菌 CF-3 VOCs 中主要抑菌物质为 2,4-二叔丁基噻吩和苯并噻唑, 其中苯并噻唑熏蒸处理桃和荔枝可显著提高果实的健康率。Hassan 等<sup>[17]</sup>研究发现, 地衣芽胞杆菌 *Bacillus licheniformis* 350-2 的挥发物 3-甲基-1-丁醇在平板和储藏玉米上都对黄曲霉菌 *Aspergillus* sp. 和青霉菌 *Penicillium* sp. 的生长、产孢和真菌毒素的积累有明显的抑制作用。本研究表明, 解淀粉芽胞杆菌 XJ5 挥发性物质 2-壬醇、2-乙基己醇及 2-十一醇等物质对多种病原真菌具有较好抑制活性, 且该菌株挥发性物质在苹果离体防治、保鲜上均有显著效果, 能有效抑制了苹果褐腐病菌菌丝生长及病斑扩展。但因菌株挥发性物质含量低、易挥发, 在实际生产应用中无法保证挥发物质有效的浓度和含量, 后续可通过其调控基因的突变等提高菌株产挥发性物质的能力和效率。

解淀粉芽胞杆菌是第一批通过美国食品药品监督管理局 (FDA) 安全认证的菌种, 如菌株 MBI600、f727、PTA-4838、ENV503 等已被豁免在食品中的残留限量, 并且在国内农业部发行的微生物肥料生物安全技术通用准则 (NY-1009-2006) 也是免检菌种<sup>[18]</sup>。本研究前期在苹果伤口中先后接种拮抗菌和病原菌, 结果发现菌株 XJ5 发酵液对苹果褐腐病具有 96.8% 的防效, 表明菌株 XJ5 不仅可以产生挥发性物质, 还存在其他抑菌活性物质, 可作为一类优势拮抗菌株, 在储藏病害防治上具有良好应用潜力。据报道 2, 3-丁二醇和 3-羟基-2-丁酮等物质可促进植物生长和诱导植物产生抗性<sup>[19,20]</sup>。Rath 等<sup>[21]</sup>研究发现莫海威芽胞杆菌 *Bacillus mojavensis* RRC101 VOCs 中乙酸乙酯和 2, 3-丁二醇对拟南芥幼苗的植株生长有明显的促进作用。本研究菌株 XJ5 挥发性物质中包含 3-羟基-2-丁酮, 可通过后续试验对菌株 XJ5 促进植株生长的作用进行验证, 为解淀粉芽胞杆菌 XJ5 在实际工农业生产及应用中提供坚实的理论依据和数据支撑。

### 参考文献

- [1] 周芳. 山西省褐腐病菌种群结构及致病性研究[D]. 晋中: 山西农业大学, 2015.
- [2] 凡先芳, 王宝刚, 曾凯芳. 采后果实褐腐病防治技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(12): 385-389.
- [3] 纪兆林, 蒋长根, 戴慧俊, 等. 不同杀菌剂对桃褐腐病菌的毒力测定[J]. 中国南方果树, 2013, 42(5): 95-97.
- [4] 张殿朋, 韩雪梅, 卢彩鸽, 等. 利用葡萄籽油防治桃子采后褐腐病的研究[J]. 河南农业科学, 2013, 42(5): 105-109.
- [5] Halami P M. Sublichenin, a new subtilin-like lantibiotics of probiotic bacterium *Bacillus licheniformis* MCC 2512T with antibacterial activity[J]. Microbial Pathogenesis, 2019, 128: 139-146.
- [6] 郑雅心. 萎缩芽胞杆菌 SF1 拮抗蛋白生防功能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [7] Jin Q, Jiang Q, Zhao L, et al. Complete genome sequence of, *Bacillus velezensis*, S3-1, a potential biological pesticide with plant pathogen inhibiting and

- plant promoting capabilities[J]. *Journal of Biotechnology*, 2017, 259: 199-203.
- [8] Zhou M S, Li P Z, Wu S Y, *et al.* *Bacillus subtilis* CF-3 volatile organic compounds inhibit monilinia fructicola growth in peach fruit[J]. *Front Microbiol*, 2019, 10: 1804.
- [9] Syed-Ab-Rahman S F, Carvalhais L C, Chua E T, *et al.* Soil bacterial diffusible and volatile organic compounds inhibit *Phytophthora capsici* and promote plant growth[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 692: 267-280.
- [10] Song G C, Ryu C M. Evidence for volatile memory in plants: boosting defence priming through the recurrent application of plant volatiles[J]. *Molecules and Cells*, 2018, 41(8): 724-732.
- [11] Lu H, Xu S, Zhang W, *et al.* Nematicidal activity of trans-2-Hexenal against southern root-knot nematode (*Meloidogyne incognita*) on tomato plants[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(3): 544-550.
- [12] 陈奕鹏, 杨扬, 桑建伟, 等. 拮抗内生芽胞杆菌 BEB17 分离鉴定及其挥发性物质抑菌活性分析[J]. *植物病理学报*, 2018, 48(4): 537-546.
- [13] Tang L, Mo J, Guo T, *et al.* In vitro antifungal activity of dimethyl trisulfide against *Colletotrichum gloeosporioides* from mango[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2019, 36(1): 4.
- [14] 殷晓慧, 王庆国, 张畅, 等. 桃果实褐腐病拮抗菌的筛选、鉴定及其拮抗活性[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(09): 86-90+96.
- [15] Zhao P, Li P, Wu S, *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) from *Bacillus subtilis* CF-3 reduce anthracnose and elicit active defense responses in harvested litchi fruits[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology Express*, 2019, 9(1): 119.
- [16] Gao H, Li P, Xu X, *et al.* Research on volatile organic compounds from *Bacillus subtilis* CF-3: Biocontrol effects on fruit fungal pathogens and dynamic changes during fermentation[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 456.
- [17] Hassan Z, Thani R, Alnaimi H, *et al.* Investigation and application of *Bacillus licheniformis* volatile compounds for the biological control of toxigenic *Aspergillus* and *Penicillium* spp.[J]. *American Chemical Society Omega*, 2019, 4(17): 17186-17193.
- [18] 朱弘元. 解淀粉芽胞杆菌 B15 的有效抑菌成分的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015.
- [19] Wu Y, Zhou J, Li C, *et al.* Antifungal and plant growth promotion activity of volatile organic compounds produced by *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. *Microbiology*, 2019, 8(8): e00813.
- [20] Farag M A, Zhang H, Ryu C M. Dynamic chemical communication between plants and bacteria through airborne signals: Induced resistance by bacterial volatiles[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2013, 39(7): 1007-1018.
- [21] Rath M, Mitchell T R, Goldb S E. Volatiles produced by *Bacillus mojavensis* RRC101 act as plant growth modulators and are strongly culture-dependent[J]. *Microbiological Research*, 2018, 208: 76-84.