宁　晋,宁　眺,金　璐,等. 草莓拟盘根腐病拮抗细菌的分离鉴定与抑菌效果评价[J]. 江苏农业科学,2026,54(1):161 – 168.
doi:10.15889/j.issn.1002 – 1302.2026.01.022

草莓拟盘根腐病拮抗细菌的分离鉴定与抑菌效果评价

宁　晋[1], 宁　眺[1], 金　璐[1], 谢莹莹[1], 牛燕芬[1], 邓昌军[2], 李　晶[1,3]
(1. 昆明学院农学与生命科学学院/云南省高校都市型现代农业工程研究中心,云南昆明 650214;
2. 云南瀚哲科技有限公司,云南昆明 650106; 3. 香格里拉市藏美农业科技有限责任公司,云南迪庆 674400)

摘要:以健康草莓植株和草莓根际土壤为试材,采用表面消毒法、土壤稀释涂布法、平板对峙法等试验方法,分离筛选出草莓拟盘根腐病病菌棒状拟盘多毛孢(*Neopestalotiopsis clavispora*)的拮抗细菌,结合形态特征和 16S rDNA 序列鉴定拮抗细菌的种类,并测定其广谱抑菌特性,以期为草莓拟盘根腐病的生物防治提供微生物资源。结果表明,筛选获得 5 株对棒状拟盘多毛孢具有拮抗作用的菌株 QT – 1、QT – 2、QT – 3、QG – 7、TT – 15,初步鉴定菌株 QT – 1 为暹罗芽孢杆菌(*Bacillus siamensis*)、QT – 2 为贝莱斯芽孢杆菌(*B. velezensis*)、QG – 7 为解淀粉芽孢杆菌(*B. amyloliquefaciens*)、QT – 3、TT – 15 均为特基拉芽孢杆菌(*B. tequilensis*)。抑菌谱试验发现,5 株拮抗细菌对 7 种病原真菌都具有不用程度的拮抗效果,抑菌率为 26.16% ~75.94%。初步探究 5 株拮抗细菌抑菌物质的抑菌效果,结果表明 5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液和挥发性有机物均能抑制草莓拟盘根腐病菌菌丝生长,其中菌株 QG – 7 的抑菌效果显著,抑菌率分别是 73.15%、69.72%。综上所述,5 株拮抗细菌可用于生防菌剂的开发利用。

关键词:草莓;草莓拟盘根腐病;拮抗细菌;芽孢杆菌;抑菌作用
中图分类号:S436.68⁺4　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1002 – 1302(2026)01 – 0161 – 08

草莓属于蔷薇科(Rosaceae)草莓属(*Fragaria*),是多年生草本植物,原产于南美洲,其果实酸甜可口,柔软多汁,果表散发浓郁果香,深受人们喜爱[1]。根据最新研究显示,草莓拟盘根腐病是由棒状拟盘多毛孢(*Neopestalotiopsis clavispora*)或 *Neopestalotiopsis roase* 侵染引起的新病害,该病害导致草莓整叶呈褐红色,根部腐烂,最终全株枯萎死亡,对草莓的产量和品质造成严重影响[2-4]。其中,棒状拟盘多毛孢是典型的高温高湿型病菌,致病力强,寄主范围广,没有特异专化性,可导致越橘(*Vaccinium vitis – idaea* L.)、枇杷(*Eriobotrya japonica*)、芒果(*Mangifera indica*)、蓝莓(*Vaccinium corymbosum*)等多种经济作物发病[5-8]。目前,农业生产中主要使用苯醚甲环唑可湿性粉剂、戊唑醇可湿性粉剂等化学药剂防治草莓拟盘根腐病。但长

收稿日期:2025 – 02 – 12
基金项目:昆明市春城计划青年拔尖人才项目(编号:C201914005);云南省中青年学术与技术带头人项目(编号:201914005);云南省兴滇英才计划创业人才项目(编号:XDYC – CYRC – 2022 – 0002)。
作者简介:宁　晋(2000—),女,云南宣威人,硕士研究生,主要从事生物防治研究。E – mail:Ningjin1632025@163.com。
通信作者:李　晶,博士,教授,主要从事分子遗传育种研究。E – mail:lijing@kmu.edu.cn。

[15]韩　旸,吴京城,庞秋凌,等. 我国二斑叶螨发生及防控研究概况[J]. 农药,2023,62(4):235 – 239,251.
[16]Namin H H,Zhurov V,Spenler J,et al. Resistance to pyridaben in Canadian greenhouse populations of two – spotted spider mites,*Tetranychus urticae*(Koch)[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology,2020,170:104677.
[17]Papapostolou K M,Riga M,Charamis J,et al. Identification and characterization of striking multiple – insecticide resistance in a *Tetranychus urticae* field population from Greece[J]. Pest Management Science,2021,77(2):666 – 676.
[18]Brown S,Kerns D L,Gore J,et al. Susceptibility of twospotted spider mites(*Tetranychus urticae*) to abamectin in Midsouth cotton[J]. Crop Protection,2017,98:179 – 183.
[19]Wang L,Zhang Y J,Xie W,et al. A bioassay for evaluation of the resistance of *Tetranychus urticae*(Acari:Tetranychidae) to selected acaricides[J]. Systematic and Applied Acarology,2015,20(6):579.
[20]沈一凡,沈慧敏,岳秀利,等. 二斑叶螨抗阿维菌素品系选育及其解毒酶系活力变化[J]. 植物保护,2014,40(5):44 – 48,74.
[21]张亚男. 二斑叶螨对甲氰菊酯、螺螨酯的抗性风险评估及抗性发展规律研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2013:38 – 39.
[22]姚　强. 二斑叶螨对三种重要杀螨剂的抗性选育及抗性风险评估[D]. 广州:华南农业大学,2018:23 – 24.
[23]张志刚,沈慧敏,段辛乐,等. 二斑叶螨对螺螨酯抗药性及对 18 种杀螨剂交互抗性[J]. 植物保护,2011,37(1):82 – 85.
[24]杨振国,谢道燕,倪　婧,等. 二斑叶螨抗丁醚脲品系对杀螨剂的交互抗性和相对适合度[J]. 农药,2022,61(2):143 – 148.

期大量使用杀菌剂会导致病原菌产生耐药性,并造成农药残留,进而对人体健康和生态环境构成潜在风险[9]。草莓属于浆果类水果,果实表面没有果皮保护,农药残留风险相对较高。研究表明,在草莓开花期施用杀菌剂可能会抑制花粉活力,从而影响授粉效率和果实产量[10]。因此,开发高效安全、对环境无害的防控方法,已成为一项紧迫而重要的课题。

芽孢杆菌(*Bacillus* spp.)对环境友好,不易产生耐药性,抗逆性强,所产生的代谢产物可以抵御病原菌的侵害,降低病害发生,被作为一类重要的微生物资源[11]。鉴于此,本研究从健康草莓植株和根际土壤中分离筛选出对草莓拟盘根腐病病原菌 *N. clavispora* 有显著抑制作用的拮抗细菌,通过菌落形态观察和分子生物学方法来鉴定拮抗菌株的种属,测定其广谱抑菌特性,评价拮抗菌株的无菌发酵滤液和挥发性有机物对病原菌的抑菌效果,以期为草莓拟盘根腐病的生物防治提供微生物资源。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试植物材料:2023 年 11 月在云南省玉溪市红塔区华宁县青龙镇草莓拟盘根腐病发病区,采集红叶病发病植株相邻的未发病且长势健康的草莓植株和根际土壤,并在 48 h 内进行细菌分离。

供试病原真菌:本试验所用病原菌信息详见表 1,所有病原菌均保存于笔者所在实验室,并通过单孢分离纯化,供试验使用。

表 1　供试病原真菌信息

病原菌种属	感病植物
棒状拟盘多毛孢(*N. clavispora*)	草莓
尖孢炭疽菌(*Colletotrichum acutatum*)	草莓
多脂长喙壳(*Ceratocystis adiposa*)	荸荠
链格孢(*Alternaria alternata*)	魔芋
葡萄座腔菌(*Botryosphaeria dothidea*)	核桃
木贼镰刀菌(*Fusarium equiseti*)	菊花
茄病镰刀菌(*F. solani*)	烤烟
灰葡萄孢(*Botrytis cinerea*)	雪茄烟

供试培养基:本试验所用培养基及配方详见表 2。

表 2　培养基与配方

培养基	配方
LB 培养基	酵母提取物 5 g、蛋白胨 10 g、NaCl 10 g、蒸馏水 1 000 mL
PDA 培养基	新鲜去皮马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、琼脂粉 15 g、蒸馏水 1 000 mL

1.2　试验方法

1.2.1　草莓内生细菌和根际细菌的分离筛选　采用表面消毒法分离内生细菌[12];采用土壤稀释涂布法分离根际细菌[13];对不同形态特征的菌落进行 3 次纯化培养后编号并用 30% 甘油保藏于 -80 ℃冰箱,用于拮抗细菌的筛选。

1.2.1.1　初筛　采用平板对峙法进行初筛,以病原真菌棒状拟盘多毛孢为靶标菌。在培养 6 d 的病原菌菌落边缘打取 3 mm 的菌饼,接入 PDA 培养基中央,在距离菌饼中心 3 cm 处四周接种细菌菌饼(d = 3 mm),以只接种病原菌的平板为对照,每个处理重复 3 次,28 ℃恒温培养箱培养。待对照长满平板,测量病原菌菌落半径,计算抑菌率[14]。

抑菌率 = [(对照组菌落半径 - 处理组菌落半径)]/对照组菌落半径 ×100%。

1.2.1.2　复筛　采用滤纸片法对初筛中抑菌率大于等于 50% 的菌株进行复筛。28 ℃、180 r/min,振荡培养 24 h 获得菌株发酵液(用 LB 液体培养基将菌株发酵液 $D_{600\ nm}$ 调至统一数值 0.8)。取培养 6 d 的病原菌平板,用打孔器制备菌饼(d = 3 mm,将菌饼转接于 PDA 平板中央,在距离菌饼 3 cm 处的上下左右放置无菌滤纸片并在滤纸片上接种菌株发酵液 20 μL,以接种 20 μL LB 液体培养基的平板作为对照,每个处理重复 3 次,28 ℃恒温培养箱培养。待对照长满平板,测量病原菌菌落直径,计算抑菌率[15]。

抑菌率 = [(对照组菌落直径 - 处理组菌落直径)]/对照组菌落直径 ×100%。

1.2.2　拮抗细菌的鉴定

1.2.2.1　菌落形态观察　参照东秀珠等的方法,观察并拍照记录细菌在 LB 培养基上生长的单菌落形态特征,并进行革兰氏染色和芽孢染色,在光学显微镜下观察细菌微观形态和颜色特征[16]。

1.2.2.2　分子生物学鉴定　将拮抗细菌单菌落平板送至生工生物工程(上海)股份有限公司进行 16S rDNA 序列测序,在 NCBI 网站上进行测序序列 BLAST 比对,获取同源序列,在 MEGA 7.0 软件中采用邻接法构建系统发育树,确定菌株的种属。

1.2.3　拮抗细菌抑菌谱和抑菌率　采用平板对峙法,将供试的 7 种病原真菌作为靶标菌,选取复筛中具有拮抗效果的细菌测定抑菌谱,以只接病原菌的平板为空白对照,每个处理重复 3 次,28 ℃恒温培养箱培养,待对照长满平板,测量病原菌菌落直径,计算抑菌率。

1.2.4　拮抗细菌的无菌发酵滤液对 *N. clavispora* 菌丝生长的抑制作用　种子液制备：活化后的拮抗细菌接种到 50 mL LB 液体培养基，在 28 ℃、180 r/min 条件下振荡培养 18 h。以 5% 的接种量转接种子液至 LB 液体培养基，相同条件下振荡培养 5 d，获得菌株发酵液。发酵液经 10 000 r/min 离心 10 min，取上清液，通过 0.22 μm 微孔滤膜过滤 3 次，得到无菌发酵滤液。将无菌发酵滤液与 PDA 培养基按 1∶1 体积比混合，倒板备用。病原菌菌饼接种于含无菌发酵滤液的平板中央，对照组使用相同体积的水替代发酵滤液，每个处理重复 3 次，28 ℃恒温培养。待对照组菌落长满平板，测量病原菌菌落直径，计算抑菌率[17]。

1.2.5　拮抗细菌不同浓度的无菌发酵滤液对 *N. clavispora* 细胞膜通透性的影响　参考“1.2.4 节”进行菌株无菌发酵滤液的制备。接种病原菌至 PDA 固体培养基，置于 28 ℃培养至孢子产生，加 5 mL 无菌水洗下孢子，稀释成 1×10^8 个/mL 的孢子悬浮液。将 1 mL 病原菌孢子悬浮液接种于 50 mL PDA 液体培养液中，振荡培养 7 d（180 r/min，28 ℃）后，在 PDA 液体培养液中分别加入无菌发酵滤液，使其终浓度分别为 0.5%、5% 和 50%，以不加无菌发酵滤液的培养液为对照，每个处理重复 3 次，振荡培养 24 h 后取 5 mL 培养液进行离心（1 000 r/min，10 min）取上清液，测定电导率[18]。

1.2.6　拮抗细菌的挥发性有机物（VOCs）对 *N. clavispora* 菌丝生长的抑制作用　采用平板对扣法测定拮抗细菌产生的 VOCs 对病原菌的影响。用封口膜将涂布培养 24 h 拮抗细菌的 LB 平板和已接种病原菌菌饼的 PDA 平板进行密封，以不接拮抗细菌的双层平板为对照，PDA 平板作为上层平板，每个处理 3 次重复，28 ℃恒温培养，待对照长满平板，测定菌落直径，计算抑菌率[19]。

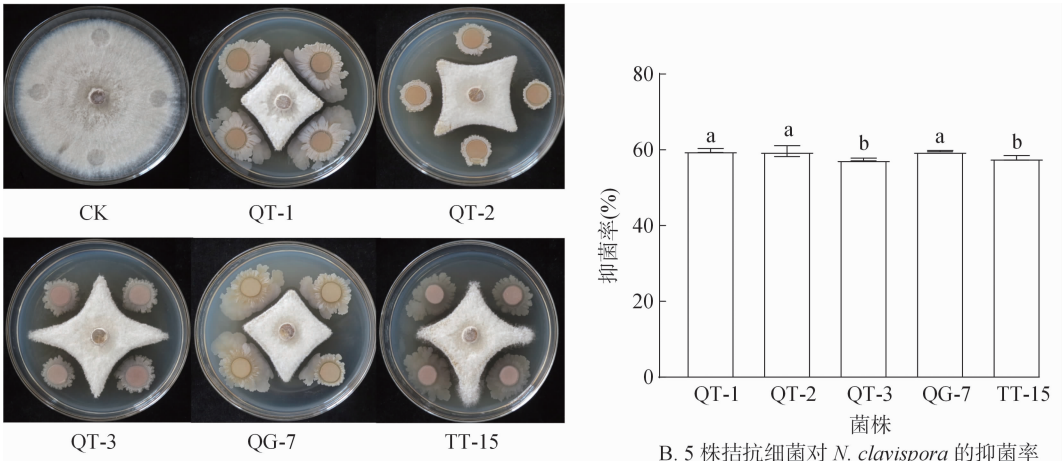
1.3　数据分析

采用 SPSS 26.0 统计软件进行数据处理，通过单因素方差分析（ANOVA）评估组间差异，并运用 Duncan's 氏新复极差法进行多重比较，以 $\alpha = 0.05$ 作为差异显著性判断标准。

2　结果与分析

2.1　拮抗细菌的分离筛选

从生长良好的草莓植株和根际土中分离得到 113 株细菌。初筛获得 20 株对 *N. clavispora* 有拮抗效果的细菌，从 20 株细菌中复筛出 5 株能显著抑制 *N. clavispora* 菌丝生长的细菌，编号分别是 QT－1、QT－2、QT－3、QG－7、TT－15（图 1－A），抑菌率分别是 59.83%、59.67%、57.47%、59.68%、57.91%（图 1－B）。



A. 5 株拮抗细菌对 *N. clavispora* 的抑菌效果　B. 5 株拮抗细菌对 *N. clavispora* 的抑菌率

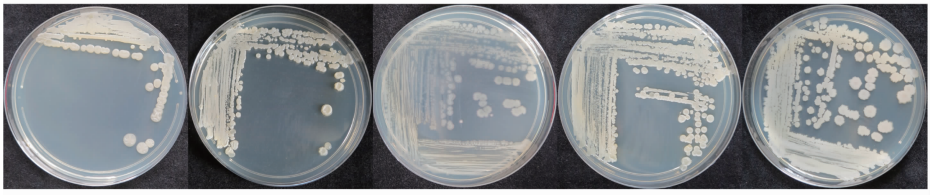
不同小写字母表示各处理组间在 0.05 水平上差异显著，下同

图1　5 株拮抗菌株对 *N. clavispora* 的抑制作用

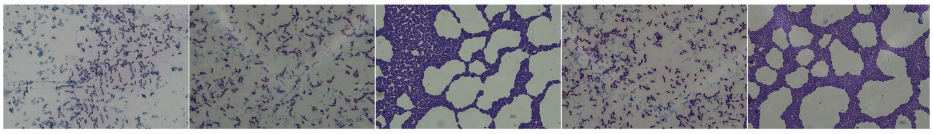
2.2　5 株拮抗细菌的鉴定

2.2.1　菌落形态观察　菌株 QT－1、QT－2 和 QG－7 在 LB 平板上的单菌落均为白色，边缘圆环状，表面光滑不透明；菌株 QT－3、TT－15 的单菌落均为白色，边缘不规则，表面粗糙不透明（图 2－A）。由图 2－B 和图 2－C 可知，5 株拮抗细菌均为杆状，革兰氏阳性菌，产芽孢。

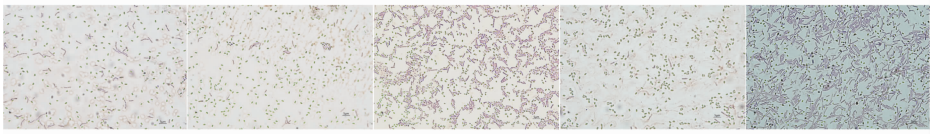
2.2.2　分子生物学鉴定　5 株拮抗细菌测序序列经 NCBI 数据库中的 BLAST 同源性比对后，基于 16S rDNA 基因序列建立的系统发育树如图 3 所示，



A. 单菌落形态



B. 革兰氏染色镜检



C. 芽孢染色镜检

图2　5 株拮抗细菌的形态观察

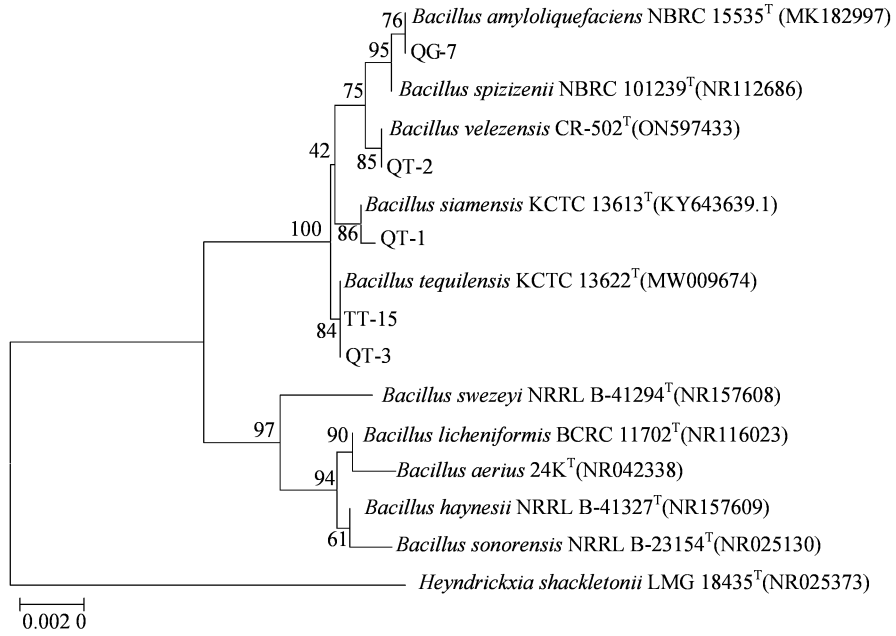


图3　基于 16S rDNA 基因序列分析构建的 5 株拮抗细菌系统发育树

结合菌株形态特征，初步判断菌株 QT－1 为暹罗芽孢杆菌（*B. siamensis*）、QT－2 为贝莱斯芽孢杆菌（*B. velezensis*）、QG－7 为解淀粉芽孢杆菌（*B. amyloliquefaciens*）、QT－3、TT－15 均为特基拉芽孢杆菌（*B. tequilensis*）。

2.3　5 株拮抗细菌的抑菌谱和抑菌率

5 株拮抗细菌对 7 种病原真菌表现出不同程度的拮抗能力（图 4）。由表 3 可知，QT－3 对木贼镰刀菌和茄病镰刀菌的抑菌效果最弱，抑菌率分别为 26.16%、43.56%。而其他拮抗细菌对病原真菌的均具有较强的抑制效果，抑菌率都在 50% 以上，其中 QT－1、QT－2、QG－7 对尖孢炭疽菌具有显著的抑制作用，抑制率分别是 75.94%、74.79%、74.72%。结果表明，5 株拮抗菌株的抗菌范围较广，具有良好的应用前景。

2.4　5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液对 *N. clavispora* 菌丝生长的抑制作用

5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液对 *N. clavispora*

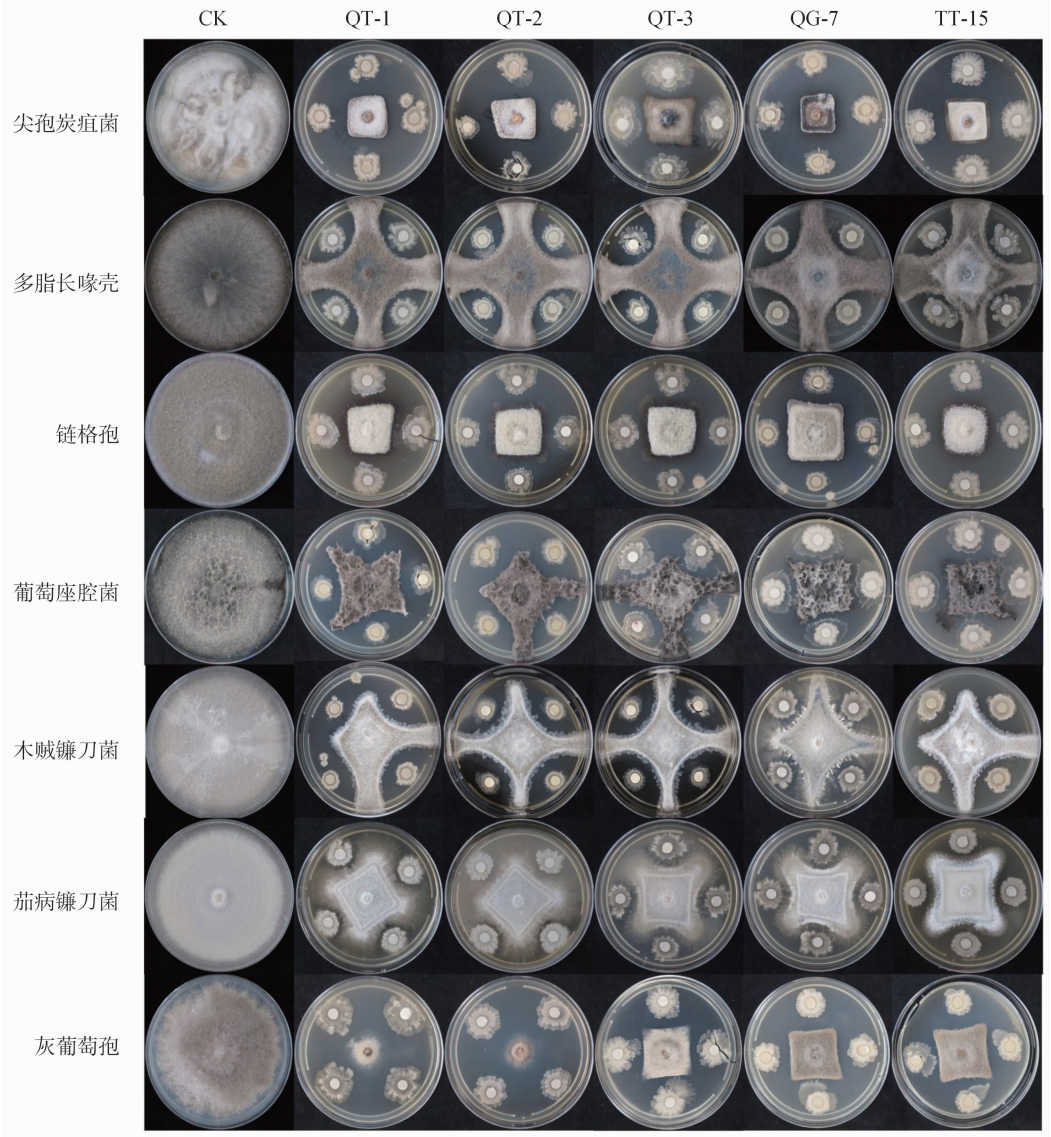


图4　5 株拮抗细菌对 7 种病原真菌的抑菌效果

表 3　5 株拮抗细菌对 7 种病原真菌的抑菌率

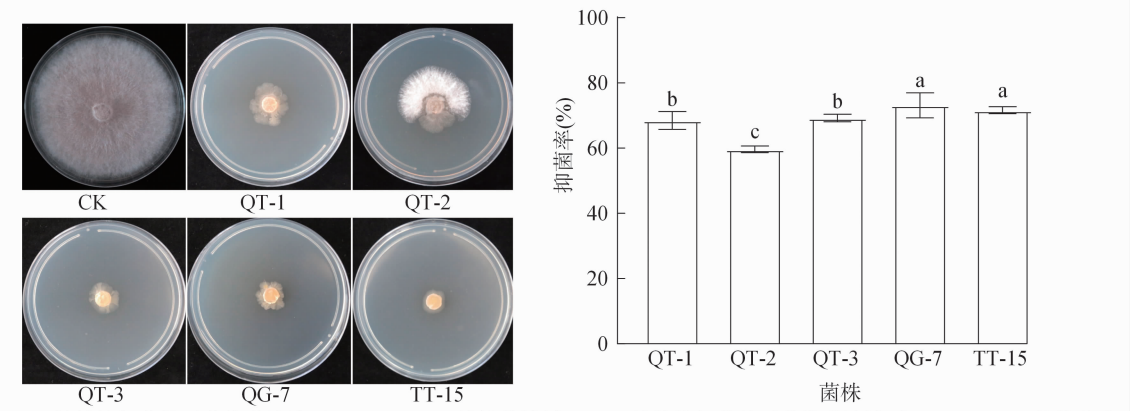
病原菌	抑菌率(%)				
	QT－1	QT－2	QT－3	QG－7	TT－15
尖孢炭疽菌	75.94 ±1.84a	74.79 ±1.63a	62.99 ±1.63a	74.72 ±1.41a	67.17 ±0.42a
多脂长喙壳	53.00 ±2.31e	51.52 ±3.17f	50.13 ±2.07c	52.81 ±1.71f	54.29 ±1.79d
链格孢	60.83 ±1.33d	62.42 ±1.07d	63.04 ±0.48a	64.91 ±1.42c	66.88 ±0.62a
葡萄座腔菌	64.34 ±1.84b	65.88 ±2.20b	58.13 ±2.06b	63.21 ±0.77de	62.20 ±1.18b
木贼镰刀菌	62.75 ±0.92c	59.30 ±1.00e	26.16 ±6.31e	62.48 ±3.52e	54.16 ±0.97d
茄病镰刀菌	62.90 ±1.18bc	63.03 ±1.10cd	43.56 ±1.02d	64.27 ±0.84cd	55.72 ±1.72c
灰葡萄孢	64.07 ±1.09cb	64.43 ±0.87bc	61.93 ±0.99a	68.91 ±0.96b	67.26 ±1.09a

注:同列数据后不同小写字母表示各处理组间在 0.05 水平上差异显著,下表同。

菌丝生长有较强的抑制作用(图 5－A),抑制率分别为 68.53%、59.68%、69.27%、73.15%、71.64%,其中菌株 QG－7 和 TT－15 无菌发酵滤液的抑菌作用最强(图 5－B)。结果表明,5 株拮抗细菌可以通过产生抑菌物质来抑制病原菌菌丝生长。

2.5　5 株拮抗细菌不同浓度的无菌发酵滤液对 *N. clavispora* 细胞膜通透性的影响

细胞膜通透性的改变会导致细胞内环境稳态



A. 5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液对 *N. clavispora* 的抑菌效果　B. 5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液对 *N. clavispora* 的抑菌率

图5　5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液对 *N. clavispora* 菌丝生长的抑制作用

失衡,引起胞内离子、核酸等物质外泄,使胞外电导率升高[20]。因此,可以通过测定 5 株拮抗细菌不同体积浓度的无菌发酵滤液作用 24 h 后病原菌胞外电导率的变化来反映其对病原菌细胞膜通透性的影响。由图 6 可知,5 株拮抗细菌的 0.5% 浓度处理组与 CK 组之间没有差异显著性,对细胞膜通透性没有显著影响;当浓度为 5% 和 50% 时,其电导率都显著高于 CK 组,且随浓度增加而增加。由此可以推测,当 5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液达到一定浓度时,可以改变病原菌的细胞膜通透性,使胞内物质外流,胞外电导率升高。

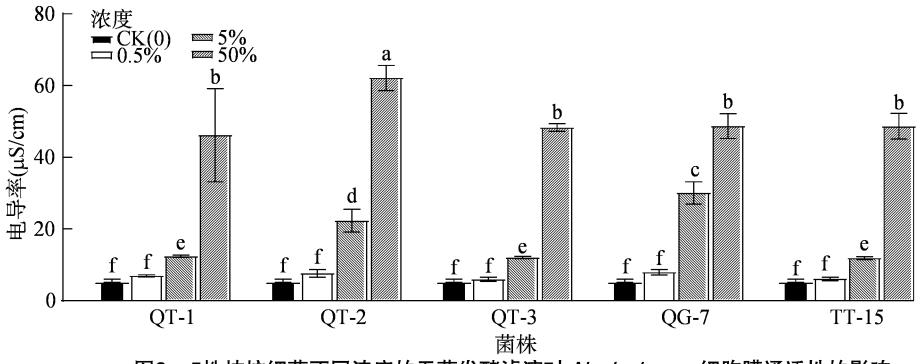


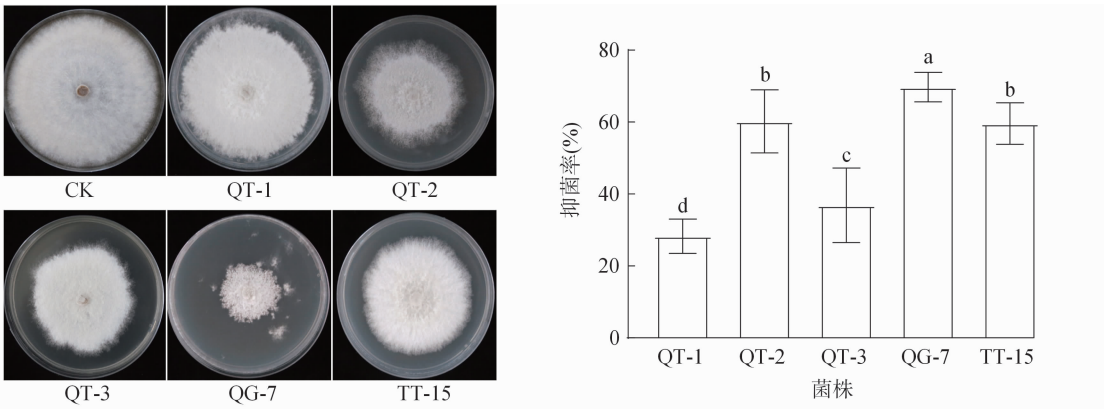
图6　5株拮抗细菌不同浓度的无菌发酵滤液对 *N. clavispora* 细胞膜通透性的影响

2.6　5 株拮抗细菌的 VOC 对 *N. clavispora* 菌丝生长的抑制作用

5 株拮抗细菌产生的 VOC 对 *N. clavispora* 的菌丝生长表现出不同程度的抑制作用(图 7 - A),抑制率分别为 28.29%、60.17%、36.86%、69.72%、59.58%(图 7 - B)。结果表明,5 株拮抗细菌产生的 VOC 通过空气扩散可对病原菌产生不同程度的抑制作用,其中菌株 QG - 7 产生的 VOC 的抑菌作用最强。

3　讨论

芽孢杆菌作为一类具有微生物农药开发潜力的菌属,展现出广阔的应用前景[21]。研究表明,芽孢杆菌对多种草莓真菌性病害有显著的抑制作用,如草莓灰霉病、草莓根腐病、草莓炭疽病、草莓褐色叶斑病等,这为草莓真菌性病害的生物防控提供了重要依据[22-24]。然而,关于草莓拟盘根腐病病原菌的芽孢杆菌研究较为缺乏。基于此,本试验分离筛选得到的 5 株对棒状拟盘多毛孢是有较强拮抗作用的芽孢杆菌,编号分别为 QT - 1、QT - 2、QT - 3、QG - 7、TT - 15,抑菌率都达到 57% 以上。结合菌株形态特征和 16S rDNA 序列分析,初步鉴定 QT - 1 为暹罗芽孢杆菌,QT - 2 为贝莱斯芽孢杆菌,QG - 7 为解淀粉芽孢杆菌,QT - 3 和 TT - 15 均为特基拉芽孢杆菌。目前,大多数的拮抗细菌仅对某特定作物上的单一或者少数病原菌有拮抗作用,而在实际生产中,作物常受到多种病原菌的复合侵染,而单一的拮抗细菌抑菌谱窄,特异性教强,难以实现有效的



A. 5 株拮抗细菌的 VOCs 对 *N. clavispora* 的抑菌效果　　B. 5 株拮抗细菌的 VOCs 对 *N. clavispora* 的抑菌率

图7　5 株拮抗细菌的 VOCs 对 *N. clavispora* 菌丝生长的抑制作用

病害防治,因此筛选广谱拮抗细菌迫在眉睫[25-26]。

本试验分离得到的 5 株拮抗细菌对多种病原真菌都表现出不同程度的拮抗作用,尤其对尖孢炭疽菌、多脂长喙壳、链格孢、葡萄座腔菌、灰葡萄孢均具有较显著的拮抗作用,表现出较好的应用前景。芽孢杆菌通过营养竞争、空间竞争、分泌有抑菌活性的代谢产物等方式抑制病原菌菌丝的生长[27]。研究发现,暹罗芽孢杆菌的无菌发酵滤液和 VOC 对引起烟草褐斑病的链格孢具有显著的拮抗作用,经分析鉴定非挥发抑菌物质是伊枯草菌素、大环内酯,抑菌挥发性物质是 2 - 甲基丁酸和 3 - 甲基丁酸[28]。贝莱斯芽孢杆菌的无菌发酵滤液对麦根腐平脐蠕孢菌(*Bipolaris sorokiniana*)、灰葡萄孢(*B. cinerea*)和辣椒刺盘孢菌(*Colletotrichum capsici*)的抑菌率分别达到 92.26%、81.82%、72.73%,所产生的 VOC 对病原菌链格孢和枝状枝孢菌(*Cladosporium cladosporioides*)的抑菌率高达 100%[29-30]。解淀粉芽孢杆菌发酵上清液的体积分数从 0.25 μL/mL 增至 5.00 μL/mL,其对玉米大斑病病菌(*Exserohilum turcicum*)的抑制率从 23.99% 增至 88.68%,所产生的 VOC 对西瓜枯萎病病菌(*F. oxysporum* f. sp. *niveum*)具有较好的抗真菌能力,抑菌率为 58.12%,对 VOC 进行分析鉴定发现存在抗真菌物质 2 - 壬酮、2 - 庚酮[31-32]。特基拉芽孢杆菌的无菌发酵液中含有 6 种抗真菌化合物 8 种酶类物质,对茄病镰刀菌的菌丝生长表现出很强的抑制活性,抑菌率为 73.49%,其产生的异戊酸、2 - 甲基丙酸和 2 - 甲基丁酸等 VOC 能有效抑制甘薯黑斑病病菌(*Ceratocystis fimbriata*)的菌丝生长[33-34]。

本试验获得的 5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液均对棒状拟盘多毛孢菌丝生长具有显著的抑制效果,抑制率高达 59% 以上。同时,5 株拮抗细菌的无菌发酵滤液浓度与培养液电导率大小呈正相关,表明无菌发酵滤液浓度越高,病原菌细胞膜结构破坏越严重,通透性越强,胞内物质外泄越多。5 株拮抗细菌产生 VOC 对病原菌菌丝生长有不同程度的抑制作用,其中菌株 QG - 7 的抑制效果最好,抑菌率为 69.72%,而菌株 QT - 1、QT - 3 的抑制效果较差,抑菌率仅达到 28.29%、36.86%,推测试验中菌株培养时间较短,导致拮抗细菌产生的 VOC 浓度较低。与前人研究结果一致,5 株拮抗细菌可以通过产生非挥发性抑菌物质和挥发性抑菌物质来抑制病原真菌的生长,但后续还需进一步研究是否还有其他的抑菌机制,分析鉴定 5 株拮抗细菌的抑菌物质和 VOC 的成分,确定是哪些类抑菌物质,并优化拮抗细菌的发酵条件,提高活菌量及其抑菌物质活性和产量。

4　结论

综上所述,本研究筛选获得的 5 株拮抗细菌对草莓拟盘根腐病病原菌有显著的拮抗效果,且具有广谱抑菌性,可作为潜在的生防菌株用于草莓拟盘根腐病生物防控。

参考文献:

[1]Manganaris G A,Goulas V,Vicente A R,et al. Berry antioxidants: small fruits providing large benefits[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2014,94(5):825-833.

[2]刘艳茹,曹　莹,孙　琰,等. 草莓红叶根腐病病原菌分离与鉴定[J]. 植物病理学报,2022,52(1):104-108.

[3]刘艳茹. 草莓拟盘根腐病病原菌鉴定及其防治药剂筛选[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2021.

[4]曾祥国,朱国芳,陈丰滢. 湖北地区草莓拟盘根腐病的发生与防治策略[J]. 湖北植保,2019(6):6-8.

[5]尚卓婷. 越橘病害的诊断、鉴定与生物防治[D]. 大连:大连理工大学,2008.

[6]Abbas M F,Batool S,Khan T,et al. First report of *Neopestalotiopsis clavispora* causing postharvest fruit rot of loquat in Pakistan[J]. Journal of Plant Pathology,2022,104(1):459.

[7]Ismail A M, Cirvilleri G, Polizzi G. Characterisation and pathogenicity of *Pestalotiopsis uvicola* and *Pestalotiopsis clavispora* causing grey leaf spot of mango (*Mangifera indica* L.) in Italy[J]. European Journal of Plant Pathology,2013,135(4):619-625.

[8]Espinoza J G, Briceño E X, Keith L M, et al. Canker and twig dieback of blueberry caused by *Pestalotiopsis* spp. and a *Truncatella* sp. in Chile[J]. Plant Disease,2008,92(10):1407-1414.

[9]宁志怨,伊兴凯,黄锡桂,等. 甜查理草莓拟盘根腐病防治药剂筛选的研究[J]. 安徽农业科学,2020,48(5):146-149.

[10]Kovach J,Petzoldt R,Harman G E. Use of honey bees and bumble bees to disseminate *Trichoderma harzianum* 1295-22 to strawberries for *Botrytis* control[J]. Biological Control,2000,18(3):235-242.

[11]朱　桐,王宇曦,逯昕明,等. 抑制鸢尾果枯病生防细菌的筛选及条件优化[J]. 北方园艺,2024(23):66-72.

[12] de Moura G G D,de Barros A V,Machado F,et al. Endophytic bacteria from strawberry plants control gray mold in fruits via production of antifungal compounds against *Botrytis cinerea* L.[J]. Microbiological Research,2021,251:126793.

[13]李　爽,张志钒,高　飞,等. 花生白绢病病菌拮抗细菌的分离鉴定及其温室抑菌促生效果[J]. 农药学学报,2024,26(2):337-347.

[14]王梦园. 草莓重茬病原菌的分离及其拮抗菌的筛选与应用[D]. 荆州:长江大学,2020.

[15]王卓妮,覃艮红,王　丽,等. 草莓病害拮抗细菌的筛选及其对草莓褐色叶斑病的防效[J]. 中国蔬菜,2023(2):63-71.

[16]东秀珠,蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京:科学出版社,2001.

[17]张　平,李朝阳,赵清泉,等. 生防细菌对油茶炭疽病病原菌的抑制作用[J]. 北京林业大学学报,2020,42(10):107-116.

[18]杨　可,郑柯斌,黄晓慧,等. 海洋生境贝莱斯芽孢杆菌 TCS001 的鉴定及抑真菌活性[J]. 农药学学报,2018,20(3):333-339.

[19]章乐乐,王　冠,柳　凤,等. 芒果炭疽病拮抗菌分离、鉴定及生防机制研究[J]. 生物技术通报,2023,39(4):277-287.

[20]曹鹏飞,吴华芬,陈银华. 抗桃树细菌性穿孔病植物内生菌的筛选及其抑菌机制研究[J]. 江苏农业科学,2023,51(17):131-137.

[21]田孟凡,戴威威,周佳慧,等. 大蒜内生贝莱斯芽孢杆菌促进蒜氨酸积累[J]. 江苏农业学报,2024,40(12):2283-2291.

[22]严　浩,于佳乐,朱　强,等. 草莓灰霉病病原菌分离鉴定及拮抗微生物筛选[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版),2024,33(1):16-23.

[23]邢　坤,冯嘉玥,文颖强. 草莓根腐病病原菌的分离鉴定及拮抗芽孢杆菌的筛选[J]. 陕西农业科学,2023,69(11):63-66.

[24]曹　灏,陈智磊,李雪松,等. 贝莱斯芽孢杆菌 TCS001 悬浮剂配方优化及对草莓炭疽病的防治效果[J]. 农药学学报,2024,26(5):911-921.

[25]Shemshura O, Alimzhanova M, Ismailova E, et al. Antagonistic activity and mechanism of a novel *Bacillus amyloliquefaciens* MB40 strain against fire blight[J]. Journal of Plant Pathology,2020,102(3):825-833.

[26]Zheng M,Shi J Y,Shi J,et al. Antimicrobial effects of volatiles produced by two antagonistic *Bacillus strains* on the anthracnose pathogen in postharvest mangos[J]. Biological Control,2013,65(2):200-206.

[27]秦菁菁,曹　璐,付　威,等. 拮抗两种辣椒病害的菌株鉴定及生防潜力评价[J]. 微生物学通报,2024,51(7):2450-2462.

[28]Wang D K,Li Y C,Yuan Y,et al. Identification of non-volatile and volatile organic compounds produced by *Bacillus siamensis* LZ88 and their antifungal activity against *Alternaria alternata*[J]. Biological Control,2022,169:104901.

[29]Huang T,Zhang Y,Yu Z H,et al. *Bacillus velezensis* BV01 has broad-spectrum biocontrol potential and the ability to promote plant growth[J]. Microorganisms,2023,11(11):2627.

[30]Zaid D S,Li W Y,Yang S Y,et al. Identification of bioactive compounds of *Bacillus velezensis* HNA3 that contribute to its dual effects as plant growth promoter and biocontrol against post-harvested fungi[J]. Microbiology Spectrum,2023,11(6):e0051923.

[31]段海明,程　红,李林玉,等. 解淀粉芽孢杆菌 gfj-4 发酵上清液及与化学杀菌剂混配对玉米大斑病病菌的抑制作用[J]. 华南农业大学学报,2018,39(5):74-81.

[32]Wu Y C,Zhou J Y,Li C G,et al. Antifungal and plant growth promotion activity of volatile organic compounds produced by *Bacillus amyloliquefaciens*[J]. MicrobiologyOpen,2019,8(8):e00813.

[33]Wang R F,Li H B,Qin Z,et al. Antifungal activity and application of *Bacillus tequilensis* A13 in biocontrol of *Rehmannia glutinosa* root-rot disease[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture,2023,10(1):20.

[34]Xu M J,Guo J H,Li T J,et al. Antibiotic effects of volatiles produced by *Bacillus tequilensis* XK29 against the black spot disease caused by *Ceratocystis fimbriata* in postharvest sweet potato[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2021,69(44):13045-13054.