

· 研究论文 ·

贝莱斯芽孢杆菌对芒果炭疽病的抑制作用及果实保鲜效果

曹慧¹, 羊尾燕², 纳琦婷¹, 朱长松¹, 孟兰环¹, 宋海超², 史学群^{2*}

¹海南大学食品科学与工程学院, 海口 570228; ²海南大学生命健康学院, 海口 570228

摘要 炭疽病是芒果(*Mangifera indica*)主要病害之一, 由胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*)侵染引起。发病后影响果实品质, 从而缩短果实货架期。该研究从生物防治角度出发, 利用贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)和从芒果果实中分离出的炭疽菌进行实验, 以贝莱斯芽孢杆菌菌悬液(CB)处理芒果果实, 并利用平板对峙法观察CB对胶孢炭疽菌的抑制效果。用发酵液(CF)处理胶孢炭疽菌, 结果显示发酵液能够有效抑制胶孢炭疽菌孢子萌发并缩短芽管长度, 显著抑制菌丝生长, 其中CF浓度为2%和4%时, 对炭疽菌菌丝抑制率分别为75.18%和80.96%。果实活体接种实验表明, CB和CF能有效抑制果实病斑直径增大, 抑制率分别为44.33%和65.00%; 与对照组相比, 处理组果实可溶性固形物含量显著降低, 可滴定酸、果实总酚和类黄酮含量均高于对照, 且发酵液处理未对果实品质产生负面影响。上述结果表明, 贝莱斯芽孢杆菌菌株能够抑制芒果炭疽病的发生, 在芒果保鲜方面有较强的应用潜力。

关键词 贝莱斯芽孢杆菌, 生物防治, 胶孢炭疽菌, 芒果, 果实保鲜

曹慧, 羊尾燕, 纳琦婷, 朱长松, 孟兰环, 宋海超, 史学群 (2026). 贝莱斯芽孢杆菌对芒果炭疽病的抑制作用及果实保鲜效果. 植物学报 61, 68–77.

芒果(*Mangifera indica*)是一种被广泛种植的热带水果, 因其具有丰富的营养价值及美味多汁的果肉而深受人们喜爱(Pal, 1998)。芒果果实饱满, 色泽鲜艳, 肉质香甜, 营养价值较高, 其富含碳水化合物和蛋白质等营养成分, 还含有种类丰富的维生素以及少量的钙、铁等元素(高爱平等, 2006)。在采摘与储运过程中, 芒果极易病变腐烂, 影响果实品质和食用价值, 使货架期缩短, 造成巨大的经济损失。芒果采后病害中最常见的是炭疽病和蒂腐病(杨建波等, 2019), 其中炭疽病的致病菌主要为胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides*) (王文静等, 2020)。当果实被病原真菌感染后, 在发病的早期阶段, 受影响的部分会变得坚硬, 表面出现黑褐色圆形病斑。随着发病时间的延长, 病斑逐步扩大, 形成圆形或不规则形状, 并在中心部位产生凹陷, 后期出现严重腐烂(李其利等, 2020)。

在生产实践中, 通常采用田间管理、化学防治、物理防治以及生物防治等多种方法减轻芒果病原真菌的危害(詹儒林等, 2005; 许家辉等, 2007)。其中化

学防治是控制芒果炭疽病的主要手段, 通过喷施化学杀菌剂, 如甲基硫菌灵、多菌灵和苯醚甲环唑, 直接对病害进行抑制和消除(赵佳等, 2022; 章乐乐等, 2023)。虽然化学杀菌剂在市场上被广泛应用, 并在一定程度上取得了显著效果, 但长期使用杀菌剂会导致药物残留且污染环境, 容易引发食品安全问题, 影响人类健康。此外, 过多使用杀菌剂可能导致病原真菌对其产生抗药性。目前已开发出杀菌剂的替代品, 如精油和草酸处理均被证实是化学防治的有效替代方案, 但是在一些国际贸易条约中禁止使用合成杀菌剂(Dofuor et al., 2023)。因此, 开发安全有效的生物防治方法以控制芒果炭疽病, 对于保持芒果品质并延长货架期具有重要意义, 并已成为果蔬采后防治及保鲜的研究热点(赵鲁宁等, 2019)。

生防微生物是一类能够有效控制果蔬病害的益生菌。研究人员已分离筛选到具有显著抑制果蔬腐烂的生防微生物(Lima et al., 1998; Chanchaichaovivat et al., 2007; Droby et al., 2007)。目前研究最多的生

收稿日期: 2025-01-15; 接受日期: 2025-02-22

基金项目: 海南省重点研发项目(No.ZDYF2025XDNY092)

* 通讯作者。E-mail: shixuequn@163.com

防菌主要包括放线菌、酵母菌以及细菌, 贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)是其中一种生防细菌。生防细菌因其生长周期短、繁殖快以及有利于拮抗物质积累等特点而备受关注(赵焕兰, 2022)。

贝莱斯芽孢杆菌是一种具有重要应用价值的革兰氏阳性好氧细菌, 能有效抑制多种植物病原菌, 用于防治由木霉菌属、镰刀菌属、炭疽菌属、丝核菌属以及灰霉菌属等引起的病害; 其通过分泌抑菌活性代谢物, 如脂肽类抗生素、聚酮类化合物和细菌素(皮娜娜等, 2024), 来抑制病原菌的生长和繁殖。研究表明, 贝莱斯芽孢杆菌作为拮抗菌对葡萄柚褐斑病(Wang and Zhu, 2023)、柑橘青霉病(田中欢等, 2023)、番茄灰霉病(Li et al., 2022)、草莓叶枯病(梁松等, 2023)、黄瓜枯萎病(褚睿等, 2023)和香蕉枯萎病(甘林等, 2024)等多种植物病害具有显著的防治效果。杨芝霓等(2023)从芒果健康表皮分离筛选出多种芽孢杆菌, 发现贝莱斯芽孢杆菌YM-11-C产生的挥发性物质对采后芒果炭疽病的防治效果最佳。张晓勇等(2021)在*B. velezensis* SB023发酵液中检测到杆菌抗霉素D等多种高活性抗真菌成分, 对芒果炭疽病表现出良好的生防效果。Choub等(2021)从贝莱斯芽孢杆菌CE100培养滤液中分离出环状四肽, 其浓度为1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时对胶孢炭疽菌菌丝生长和孢子萌发表现出强烈的抑菌作用, 可预防由*C. gloeospories*引起的植物炭疽病。

本研究以贝莱斯芽孢杆菌、芒果胶孢炭疽菌以及无伤无腐的芒果果实为材料, 探讨贝莱斯芽孢杆菌对芒果炭疽病病原菌生长的影响。在此基础上, 结合贝莱斯芽孢杆菌对芒果采后贮存的影响, 阐明贝莱斯芽孢杆菌对采后芒果炭疽病的抑制作用及果实保鲜效果。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用病原菌胶孢炭疽菌(*Colletotrichum gloeosporioides* Penz.)由本实验室从发病芒果(*Mangifera indica* L.)中分离纯化得到。贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)由南京农业大学肖红梅团队提供。供试植物材料八成熟台农芒果购自海南省昌江县芒果园, 于采摘当日运回实验室。

1.2 实验方法

1.2.1 贝莱斯芽孢杆菌菌体悬浮液(CB)制备

将LB培养基活化的贝莱斯芽孢杆菌接种1环于100 mL LB液体培养基, 28°C、180 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养12小时, 得到种子液。取1 mL种子液于250 mL LB液体培养基中, 同样条件下振荡培养12小时, 4°C、8 000 $\times g$ 离心20分钟, 去除培养基得到菌体沉淀, 用无菌水将菌体充分振荡混匀, 测定其吸光值 OD_{600} 为1时保存备用。

1.2.2 孢子悬浮液制备

挑取活化的胶孢炭疽菌菌柄(3 mm \times 3 mm), 转接在PDA平板上, 置于28°C恒温培养箱培养7–12天。用无菌牙签在产孢区域挑取孢子并放入10 mL无菌水中, 用血球计数板计数, 用无菌水稀释至 10^7 $\text{cells}\cdot\text{mL}^{-1}$, 得到孢子悬浮液, 备用。

1.2.3 贝莱斯芽孢杆菌发酵液(CF)制备

将LB培养基活化的贝莱斯芽孢杆菌接种1环于100 mL LB液体培养基, 28°C、180 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 振荡培养12小时, 得到种子液。取1 mL种子液于250 mL LB液体培养基, 同样条件下振荡培养96小时, 4°C、8 000 $\times g$ 离心20分钟, 去除菌体沉淀得到上清液, 用滤膜除菌得到发酵液, 备用。

1.2.4 贝莱斯芽孢杆菌对胶孢炭疽菌的抗菌活性测定

采用平板对峙法, 将直径为0.5 cm的胶孢炭疽菌饼置于PDA培养基中央, 用无菌接种环挑取贝莱斯芽孢杆菌, 在炭疽菌四侧距离1 cm处点样, 以只接种炭疽菌作为对照。接种后密封, 于(25 \pm 1)°C恒温培养。每隔1天测量菌落直径, 每组重复3次。

1.2.5 孢子萌发率和芽管长度测定

芽孢杆菌发酵液的制备同1.2.3节所述。在无菌条件下, 从制备好的孢子悬浮液、芽孢杆菌发酵液和PDB液体培养基中分别吸取30 μL 置于1.5 mL离心管中, 混匀后, 将其分别涂布于载玻片上。在培养皿中铺好1层湿润的滤纸, 然后将载玻片放置其中, 在28°C恒温培养箱中培养。以PDB液体培养基作为空白对照。在第6、8和10小时镜检观察每100个病原菌孢子的萌

发数, 每组设置3个平行处理, 计算各组孢子萌发率并测量芽管长度。

1.2.6 贝莱斯芽孢杆菌发酵液处理后对胶孢炭疽菌病斑扩展的影响

将芒果炭疽菌接种在空白对照及发酵液浓度为2%和4%的PDA培养基上。每个浓度设置3组平行处理。接种后密封, 于(25±1)°C恒温培养。在第1、3、5和7天进行观察并拍照, 按照十字交叉法测量病斑直径。

$$\text{生长抑制率} = (1 - (\text{处理组菌落直径} / \text{对照组菌落直径})) \times 100\%$$

1.2.7 芒果预处理

选取大小一致、色泽相近且表面无极限损害和病虫害的新鲜芒果果实, 用2%次氯酸消毒2分钟, 再用自来水清洗干净, 置于室温下自然风干。

1.2.8 芒果伤口处病斑直径测定

在超净工作台上用无菌打孔器在每个芒果腰部刺3 mm伤口。共4个处理, 每处理30个果。对照: 在伤口处接种10 μL无菌水和10 μL炭疽孢子悬浮液; CB处理: 在伤口处接种10 μL芽孢杆菌悬浮液和10 μL炭疽孢子悬浮液; CF处理: 在伤口处接种10 μL芽孢杆菌发酵液和10 μL炭疽孢子悬浮液; H₂O处理: 在伤口处接种20 μL无菌水。处理后将芒果装入带孔塑料容器中, 置于温度为28°C、相对湿度为90%的条件下贮存。参照Miguel等(2018)的方法, 采用十字垂直交叉法测量各处理体外接种在芒果果实赤道线上的病斑直径, 取平均直径作为单个果实的病斑直径。

1.2.9 芒果自然发病实验

随机选取若干大小一致的新鲜芒果果实, 预处理后分为2组, 每组60个。分别使用芽孢杆菌悬浮液和等体积无菌水浸泡果实2分钟, 无菌水处理为对照组。将处理后的芒果装入带孔塑料容器中, 置于温度为28°C、相对湿度为90%的条件下贮存。定期观察发病情况, 每隔1天取样, 用于后续实验。

1.2.10 呼吸强度测定

将各组芒果称重后分别放入密闭容器中, 室温放置30分钟。使用便携式O₂/CO₂测定仪测量每个容器中芒果呼吸所释放的CO₂浓度, 并计算呼吸速

率, 以单位时间内单位质量果实释放的CO₂量表示(CO₂ mg·kg⁻¹·h⁻¹)。

1.2.11 可溶性固形物含量测定

从每组样品中取10 g芒果果实可食组织, 采用2,6-二氯酚法(胡孝贵, 2013)测定芒果果实中抗坏血酸含量。挑选9个果实, 分成3组, 研磨至匀浆, 取汁水, 滴在糖度计上测定可溶性固形物含量(soluble solids content, SSC), 记录数据。

1.2.12 可滴定酸含量测定

从每组样品各部位取10 g果实, 研磨至匀浆, 放入100 mL容量瓶中, 用蒸馏水定容至刻度线, 静置30分钟, 过滤掉果肉, 测量滤后滤液体积。分别取20 mL滤液, 滴2滴酚酞溶液, 用标定好的NaOH滴定滤液, 当pH计读数在8.10–8.30之间时, 记录滴定滤液所用的NaOH体积。重复3次。可滴定酸(titratable acidity, TA)折算系数按柠檬酸0.064计算。

1.2.13 总酚和类黄酮含量测定

从每组样品各部位取0.15 g果实, 加入1.5 mL预冷的80%甲醇, 4°C静置20分钟, 4°C、10 000 ×g离心15分钟。测定总酚含量时, 取250 μL提取液, 加入2 mL预冷的甲醇和250 μL福林酚, 5分钟后加入2.5 mL 10% Na₂CO₃, 25°C黑暗下放置1小时, 测定765 nm处吸光值。测定类黄酮含量时, 取50 μL提取液, 加入0.15 mL 15% NaNO₃, 5分钟后加入1 mL AlCl₃·6H₂O₂, 用蒸馏水稀释至5 mL, 测定510 nm处吸光值。

1.2.14 数据统计分析

实验结果取平均值±标准差, 所有实验至少设3次重复。使用Excel 2021软件对实验数据进行预处理。利用SPSS 23.0软件进行单因素方差分析。采用Duncan's多重比较法对数据进行差异显著性分析, 显著性水平为P<0.05。用Graphpad Prism 9.5软件作图。

2 结果与分析

2.1 贝莱斯芽孢杆菌处理对胶孢炭疽菌病斑扩展的影响

为探明贝莱斯芽孢杆菌对炭疽菌生长的抑制效果, 我

们采用平板对峙法,对2组炭疽菌的菌丝生长情况进行观察与测量。结果显示,对照组菌丝正常生长,第7天菌落直径达(8.14±0.23) cm,而CB处理组菌丝生长受到明显抑制,其菌落直径仅为(1.95±0.13) cm,与对照组相比减小了76.04%,二者之间差异显著(图1A, B)。上述结果表明,贝莱斯芽孢杆菌在一定程度上抑制了炭疽菌的生长,具有生物防治前景。

2.2 发酵液对胶孢炭疽菌孢子生长的影响

为探究发酵液对胶孢炭疽菌孢子萌发及芽管生长的影响,在无菌环境下,将胶孢炭疽菌孢子分别接种于含有常规培养基(对照组)和发酵的马铃薯液体培养基中,在显微镜下观察并统计孢子萌发率,测量芽管长度。结果表明,对照组孢子萌发率在处理6小时达(39.60±4.27)%,孢子芽管长度为(78.86±7.15) mm;而发酵液处理的胶孢炭疽菌孢子萌发率为(25.80±1.98)%,芽管长度为(57.11±4.73) mm,与对照组差异显著。第10小时,对照组孢子萌发率高达(95.80±1.30)%,芽管长度为(183.15±8.67) mm;发酵液处理组孢子萌发率仅为(63.60±3.36)%,芽管长度为(114.54±6.85) mm(表1,表2),二者差异显著(图2A, B)。上述结果表明,发酵液对孢子萌发具有显著的抑制作用,可在一定程度上延缓孢子萌发,具有抑菌效果。

2.3 不同浓度发酵液对胶孢炭疽菌菌丝生长的影响

为探究不同浓度发酵液对胶孢炭疽菌菌丝生长的抑制效果,我们采用平板抑制法,对炭疽菌菌丝生长状况和病斑直径进行观察与测量。结果表明,对照组菌丝生长快,而经不同浓度发酵液处理的菌饼其生长速率受到不同程度的抑制(图3A)。第5天,对照组与各处理组的炭疽菌生长速率差异显著,而不同浓度发酵液处理的炭疽菌生长速率无显著差异。第7天,对照组病斑直径为(8.30±0.2) cm,2%和4%发酵液处理组病斑直径分别为(2.06±0.075) cm和(1.58±0.063) cm;与对照组相比分别减小了75.18%和80.96%(图3B)。上述结果表明,发酵液能够显著抑制胶孢炭疽菌菌丝生长。

2.4 贝莱斯芽孢杆菌对芒果病斑直径的影响

为探究贝莱斯芽孢杆菌对芒果炭疽病的抑制效果,我们将芒果果实分为4组,在相同的贮藏环境下,定期观察并测量每组果实炭疽病病斑直径,记录病害发展情况。结果表明,贮藏结束时(第9天),对照组病斑直径为(3.00±0.12) cm,而CB处理组为(1.67±0.12) cm,CF处理组为(1.05±0.13) cm,处理组病斑直径显著低于对照组($P<0.05$)。相较于对照组,CB处理组病斑直径减小了44.33%;CF处理组病斑直径减小了65.00%(图4A, B)。

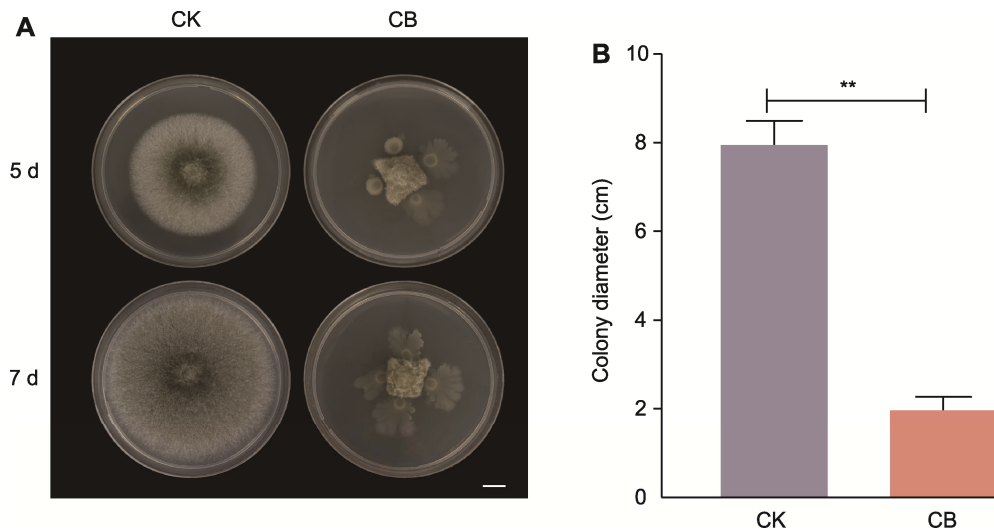


图1 贝莱斯芽孢杆菌对胶孢炭疽菌生长(A)及7天后菌落直径(B)的影响
CK: 对照组; CB: 菌悬液处理组。 ** $P<0.01$ 。 Bar=1 cm

Figure 1 Effect of *Bacillus velezensis* on the growth (A) and colony diameter (B) of *Colletotrichum gloeosporioides* after 7 days
CK: Control group; CB: Bacterial suspension treatment group. ** $P<0.01$. Bar=1 cm

由此可知, 贝莱斯芽孢杆菌能有效抑制芒果炭疽病病斑生长。

表1 发酵液对胶孢炭疽菌孢子萌发率的影响

Table 1 Effect of fermentation broth on spore germination rate of *Colletotrichum gloeosporioides*

Treatments	Spore germination rate (%)		
	6 h	8 h	10 h
CK	39.60±4.27 a	79.80±1.92 a	95.80±1.30 a
CF	25.80±1.98 b	50.60±7.05 b	63.60±3.36 b

CK: 对照组; CF: 发酵液处理组。同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

CK: Control group; CF: Fermentation broth treatment group. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

2.5 贝莱斯芽孢杆菌对芒果果实保鲜效果的影响

为验证贝莱斯芽孢杆菌对芒果采后炭疽病发生的抑制作用, 我们将芒果果实随机分为2组。处理组果实

表2 发酵液对胶孢炭疽菌孢子芽管长度的影响

Table 2 Effect of fermentation broth on the length of spore germ tube of *Colletotrichum gloeosporioides*

Treatments	Germ tube length (mm)		
	6 h	8 h	10 h
CK	78.86±7.15 a	128.59±6.63 a	183.15±8.67 a
CF	57.11±4.73 b	97.06±8.42 b	114.54±6.85 b

CK和CF同表1。同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

CK and CF are the same as shown in Table 1. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$).

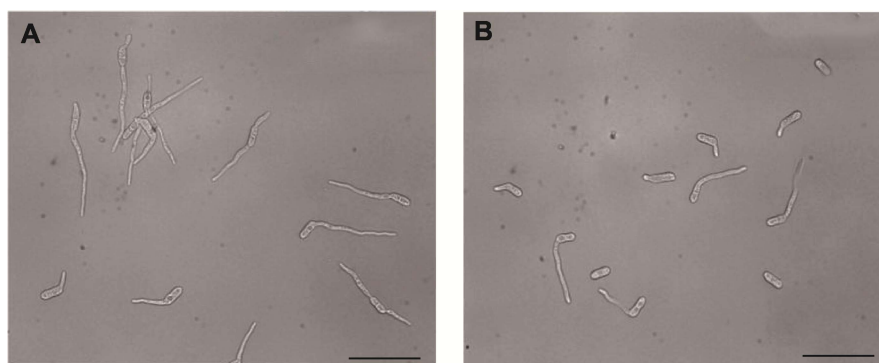


图2 发酵处理10小时对胶孢炭疽菌孢子萌发的影响

(A) 对照组; (B) 发酵液处理组。Bars=50 μm

Figure 2 Effect of 10 hour fermentation treatment on spore germination of *Colletotrichum gloeosporioides*

(A) Control group; (B) Fermentation broth treatment group. Bars=50 μm

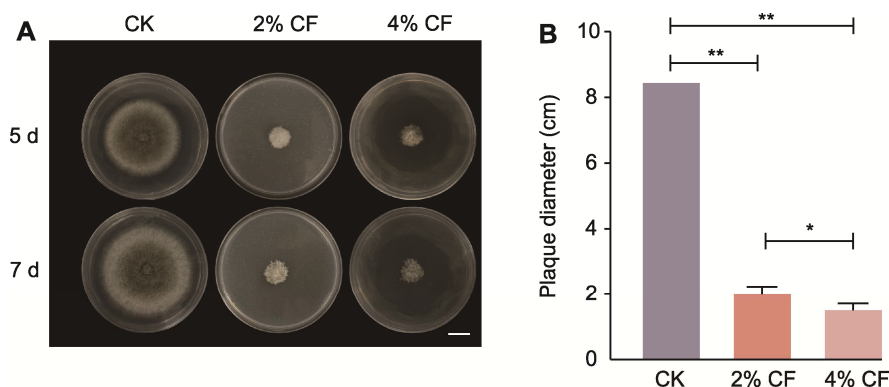


图3 发酵液对胶孢炭疽菌菌丝生长(A)和病斑直径(B)的影响

CK和CF同表1。* $P<0.05$; ** $P<0.01$ 。Bar=1 cm

Figure 3 Effect of fermentation broth on mycelial growth (A) and plaque diameter (B) of *Colletotrichum gloeosporioides*

CK and CF are the same as shown in Table 1. * $P<0.05$; ** $P<0.01$. Bar=1 cm

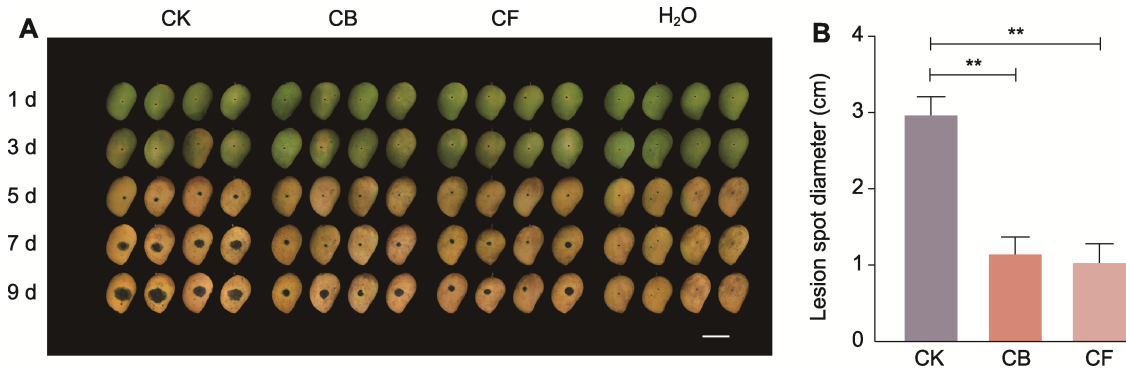


图4 不同处理下芒果接种处炭疽病抑制效果(A)及其病斑直径(B)

CK: 对照组; CB: 菌悬液处理组; CF: 发酵液处理组。 ** $P < 0.01$ 。 Bar=5 cm

Figure 4 The inhibitory effect of anthrax at mango inoculation site (A) and its lesion spot diameter (B) under different treatments CK: Control group; CB: Bacterial suspension treatment group; CF: Fermentation broth treatment group. ** $P < 0.01$. Bar=5 cm

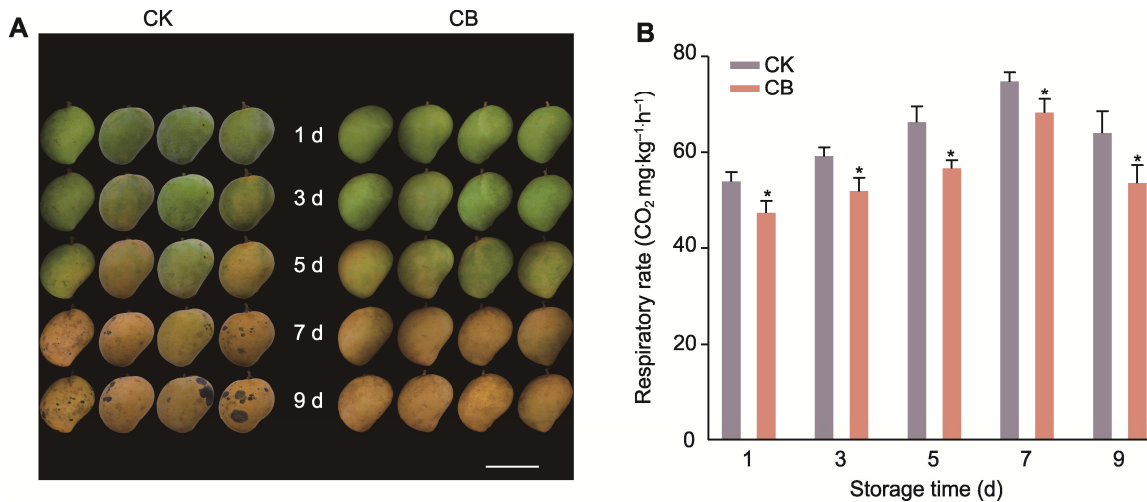


图5 贝莱斯芽孢杆菌对贮藏期芒果果实保鲜效果(A)及呼吸速率(B)的影响 CK和CB同图1。 * $P < 0.05$ 。 Bar=5 cm

Figure 5 Effect of *Bacillus velezensis* on preservation effect (A) and respiration rate (B) of mango fruits during storage period CK and CB are the same as shown in Figure 1. * $P < 0.05$. Bar=5 cm

用贝莱斯芽孢杆菌浸泡, 对照组则不做此处理, 随后将2组芒果置于相同的贮藏环境中, 定期观察果实的发病情况与色泽变化。结果表明, 未用贝莱斯芽孢杆菌浸泡的对照组芒果果实第9天开始出现病斑; 而处理组果实第11天仍未表现出发病症状, 且保持较好的色泽(图5A)。由此表明, 贝莱斯芽孢杆菌能有效抑制芒果采后炭疽病的发生。

研究发现, 在贮藏前期2组芒果的呼吸速率均逐渐增高, 第7天开始下降。但在整个贮藏过程中, 处理组果实的呼吸速率均显著低于对照组($P < 0.05$)。该结果表明, 贝莱斯芽孢杆菌处理能够显著降低芒果果实

的呼吸速率, 从而有助于延缓果实成熟和衰老。第7天, 处理组和对照组果实均出现呼吸高峰(图5B), 呼吸速率分别为68.70和75.39 $\text{CO}_2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, 之后呼吸速率逐渐下降, 原因可能是芒果达到成熟状态后, 呼吸强度逐渐降低, 即进入衰老状态。

2.6 贝莱斯芽孢杆菌对芒果品质的影响

本研究显示, 在贮藏过程中芒果可滴定酸含量总体呈下降趋势, 贮藏期间处理组高于对照组(图6A); 随着贮藏时间的延长, 所有样品的可溶性固形物含量均呈先升高后缓慢降低的趋势(图6B), 第5天, 处理组果

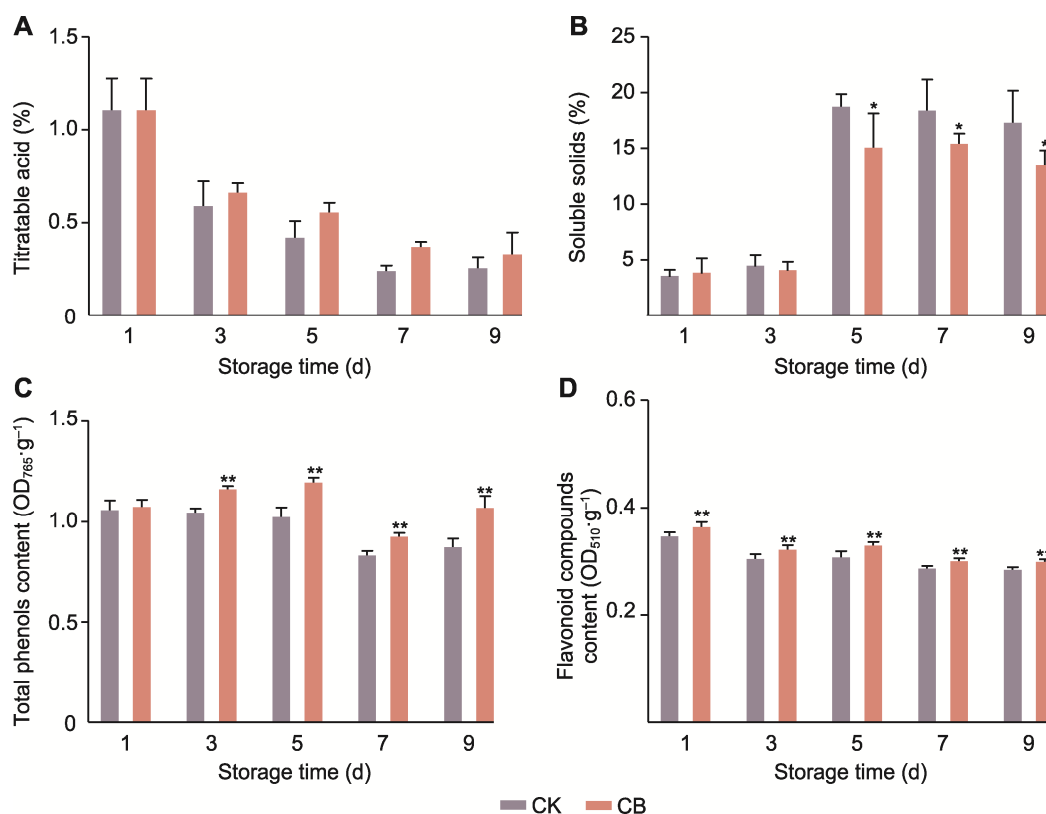


图6 贝莱斯芽孢杆菌对芒果果实可滴定酸(A)、可溶性固形物(B)、总酚(C)和类黄酮(D)含量的影响
CK和CB同图1。* $P<0.05$; ** $P<0.01$

Figure 6 Effect of *Bacillus velezensis* on titratable acid (A), soluble solids (B), total phenols (C) and flavonoid compounds (D) contents of mango fruits
CK and CB are the same as shown in Figure 1. * $P<0.05$; ** $P<0.01$

实可溶性固形物含量显著低于对照组($P<0.05$)。上述结果表明,贝莱斯芽孢杆菌处理在一定程度上减缓了果实营养物质的分解速度。

为探究贝莱斯芽孢杆菌对贮藏期芒果总酚和类黄酮含量的影响,我们将芒果分为对照组和CB处理组,在相同的贮藏环境下,定期对2组芒果的总酚和类黄酮含量进行测定。在第1天,对照组与CB处理组芒果总酚含量相近,随后CB处理组总酚含量先上升后下降,而对照组呈先下降后上升趋势。从第3天开始,处理组芒果总酚含量均显著高于对照组(图6C)。在整个贮藏期间,芒果类黄酮含量处理组显著高于对照组(图6D)。

3 讨论

随着生活水平的不断提高,人们对绿色果蔬产品的需求更加强烈,因此研发推广安全的植物病害生物防治

方法尤为重要。贝莱斯芽孢杆菌生物安全性高、对环境无毒害,且其广泛分布于自然界的水体、土壤、空气、植物根系、植株表面和动物肠道中,具有较强的环境适应性,这使得其在不同的场景中都具有潜在的应用价值。贝莱斯芽孢杆菌不仅能够拮抗病原菌,还可诱导植物产生系统性抗性、促进植物生长以及改善动物肠道健康,其在生物防治方面具有很好的应用前景,已成为植物抗病研究热点。

本研究探讨了贝莱斯芽孢杆菌及其发酵液对胶孢炭疽菌的抑制作用。结果表明,芽孢杆菌及不同浓度发酵液对胶孢炭疽菌均具有显著的抑制作用,对孢子萌发率和芽管长度也表现出显著的抑制效果。因此,我们推测贝莱斯芽孢杆菌发酵液中存在抗菌效果显著的活性成分。前人研究表明,贝莱斯芽孢杆菌发酵液中含有明显的抑菌活性物质(杨可等, 2018; 杨然迪等, 2024),这些活性物质可能是 β -葡聚糖酶、羊毛硫抗生素、表面活性素、芬原素及伊枯草菌素等(杨

可等, 2019)。此外, 本研究利用贝莱斯芽孢杆菌及其发酵液进行芒果保鲜实验, 结果显示, 用贝莱斯芽孢杆菌菌悬液浸泡芒果, 对照组从第9天开始发病, 第11天芒果失去食用价值, 而处理组第11天仍保持较好的色泽。这表明用贝莱斯芽孢杆菌菌悬液浸泡芒果果实能有效抑制芒果采后炭疽病的发生。

同时, 芒果的呼吸速率也是影响其货架期的重要因素。在采后贮藏过程中, 芒果的呼吸强度增高加速内部物质消耗, 导致芒果出现皱缩等外观缺陷, 进而降低其营养和商品价值(杨林杰, 2023)。姜爱丽等(2009)用纳他霉素处理采后樱桃, 维持其低水平呼吸强度, 可有效延长贮藏期10天以上。研究表明, 经贝莱斯芽孢杆菌处理的芒果果实, 在整个贮藏过程中其可滴定酸含量总体呈下降趋势, 且处理组高于对照组; 处理组果实可溶性固形物含量显著低于对照组($P < 0.05$)。以上表明贝莱斯芽孢杆菌处理在一定程度上减缓了果实营养物质的分解速度, 缓解了总酚与类黄酮含量的降低。

4 结论

研究表明, 贝莱斯芽孢杆菌对芒果采后炭疽菌具有较好的拮抗作用, 可有效抑制胶孢炭疽菌的菌丝生长, 同时抑制炭疽菌分生孢子的萌发, 进而有效防止芒果采后胶孢炭疽病的发病。无菌发酵液滤液浓度为2%和4%时, 对炭疽菌菌丝的抑制率分别为75.18%和80.96%; 芽孢杆菌菌悬液及其发酵液对活体芒果炭疽病病斑的抑制率分别为44.33%和65.00%; 且处理后芒果在常温贮藏条件下品质未发生改变。综上, 贝莱斯芽孢杆菌能够有效防治芒果采后炭疽病的发生。研究结果为挖掘芒果炭疽病生物防治菌资源奠定了基础。

作者贡献声明

曹慧: 完成实验及撰写论文; 羊尾燕: 核对数据; 纳琦婷, 朱长松: 分析数据; 孟兰环: 参与实验设计; 宋海超: 参与实验设计及撰写论文; 史学群: 参与实验设计并对论文进行修订和审阅。

利益冲突: 所有作者均声明不存在利益冲突

Conflict of interests: The authors declare that there is no conflict of interests

©The author(s) 2026. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

参考文献

- 褚睿, 李昭轩, 张学青, 杨东亚, 曹行行, 张雪艳 (2023). 黄瓜枯萎病拮抗芽孢杆菌的筛选、鉴定及其生防潜力. 生物技术通报 39(8), 262–271.
- 甘林, 代玉立, 刘晓菲, 兰成忠, 杨秀娟 (2024). 香蕉枯萎病高效拮抗土著细菌的筛选及其防效. 西北农林科技大学学报(自然科学版) 52(6), 95–105.
- 高爱平, 陈业渊, 朱敏, 何业华, 杜中军 (2006). 中国芒果科研进展综述. 中国热带农业 (6), 21–23.
- 胡孝贵 (2013). 2,6-二氯靛酚法测赣南脐橙中V_c含量的研究. 硕士论文. 南昌: 南昌大学. pp. 1–42.
- 姜爱丽, 胡文忠, 李慧, 田密霞, 范圣第 (2009). 纳他霉素处理对采后甜樱桃生理代谢及品质的影响. 农业工程学报 25(12), 351–356.
- 李其利, 卜俊燕, 唐利华, 黄穗萍, 郭堂勋, 莫贱友 (2020). 芒果炭疽菌研究进展. 微生物学杂志 40, 117–124.
- 梁松, 孟祥坤, 于新, 徐文凤, 邢芳芳, 郑树林, 李新柱, 王亮 (2023). 草莓叶枯病生防芽孢杆菌的分离鉴定及防效研究. 河南农业科学 52(10), 92–99.
- 皮娜娜, 王玺茜, 罗建军, 翁群芳 (2024). 贝莱斯芽孢杆菌防控植物病害的研究进展. 广东农业科学 51(6), 48–59.
- 田中欢, 杜玉杰, 卢永清, 纪思蓉, 龙超安 (2023). 贝莱斯芽孢杆菌w176对柑橘采后青霉病的防治. 见: 中国植物病理学会2023年学术年会论文集. 泰安: 中国植物病理学会. pp. 637.
- 王文静, 罗睿雄, 黄建峰, 赵志常, 高爱平 (2020). 芒果炭疽病研究进展. 云南农业科技 (6), 42–45.
- 许家辉, 余东, 许玲, 刘惠玉 (2007). 福建芒果产业状况及发展对策. 福建果树 (3), 21–22.
- 杨建波, 欧阳秋飞, 黄战威 (2019). 芒果采后主要真菌病害及其抗病机理研究进展. 热带农业科学 39(10), 106–110.
- 杨可, 司文, 林海, 林方锐, 袁静, 陈杰 (2019). 利用响应面分析法优化贝莱斯芽孢杆菌TCS001的发酵条件. 农药学报 21, 444–452.
- 杨可, 郑柯斌, 黄晓慧, 袁静, 陈杰 (2018). 海洋生境贝莱斯芽孢杆菌TCS001的鉴定及抑真菌活性. 农药学报 20, 333–339.

- 杨林杰 (2023). 负载肉桂精油Pickering乳液活性膜的构建及保鲜应用研究. 硕士论文. 武汉: 华中农业大学. pp. 67.
- 杨然迪, 杨怡妍, 曹灏, 金京, 陈杰 (2024). 贝莱斯芽孢杆菌TCS001产脂肽类物质抑菌活性及发酵条件优化. 农药学报 26, 504–516.
- 杨芝霓, 鲁萌萌, 黄穗萍, 唐利华, 陈小林, 郭堂勋, 莫贱友, 张萌, 李其利 (2023). 产挥发性物质芽孢杆菌对芒果炭疽菌的抑制作用及对芒果炭疽病的防病效果. 植物病理学报 53, 1180–1191.
- 詹儒林, 李伟, 郑服丛 (2005). 芒果炭疽病菌对多菌灵的抗药性. 植物保护学报 (1), 71–76.
- 章乐乐, 王冠, 柳凤, 胡汉桥, 任磊 (2023). 芒果炭疽病拮抗菌分离、鉴定及生防机制研究. 生物技术通报 39(4), 277–287.
- 张晓勇, 李树江, 严凯, 翁贵英, 张韵霞, 龙巧芳, 梁文, 蒋芹娜, 杨友联 (2021). 芒果采后炭疽病生防菌株筛选及其培养特性研究. 园艺学报 48, 2171–2184.
- 赵焕兰 (2022). 贝莱斯芽孢杆菌对樱桃番茄采后灰霉病的抑制机理研究及保鲜效果评价. 硕士论文. 合肥: 合肥工业大学. pp. 91.
- 赵佳, 童凯, 李东, 邓孟胜, 雷雨 (2022). 芒果采后炭疽病生防菌研究进展. 保鲜与加工 22(8), 88–96.
- 赵鲁宁, 周秋阳, 杨慧慧, 郑鸿儒, 温新宇, 孙卫红 (2019). 季也蒙毕赤酵母Y35-1菌株对枇杷采后炭疽病的抑菌效果及保鲜作用. 食品科学 40(4), 170–177.
- Chanchaichaovivat A, Ruenwongsa P, Panijpan B (2007). Screening and identification of yeast strains from fruits and vegetables: potential for biological control of post-harvest chilli anthracnose (*Colletotrichum capsici*). *Biol Control* 42, 326–335.
- Choub V, Maung CEH, Won SJ, Moon JH, Kim KY, Han YS, Cho JY, Ahn YS (2021). Antifungal activity of cyclic tetrapeptide from *Bacillus velezensis* CE 100 against plant pathogen *Colletotrichum gloeosporioides*. *Pathogens* 10, 209.
- Dofuor AK, Quartey NKA, Osabutey AF, Antwi-Agyakwa AK, Asante K, Boateng BO, Ablormenti FK, Lutuf H, Osei-Owusu J, Osei JHN, Ekloh W, Loh SK, Honger JO, Aidoo OF, Ninsin KD (2023). Mango anthracnose disease: the current situation and direction for future research. *Front Microbiol* 14, 1168203.
- Droby S, Wisniewski ME, Cohen L, Weiss B, Touitou D, Eilam Y, Chalutz E (2007). Influence of CaCl₂ on *Penicillium digitatum*, grapefruit peel tissue, and biocontrol activity of *Pichia guilliermondii*. *Phytopathology* 87, 310–315.
- Li SP, Xiao QL, Yang HJ, Huang JG, Li Y (2022). Characterization of a new *Bacillus velezensis* as a powerful biocontrol agent against tomato gray mold. *Pestic Biochem Physiol* 187, 105199.
- Lima G, De Curtis F, Castoria R, De Cicco V (1998). Activity of the yeasts *Cryptococcus laurentii* and *Rhodotorula glutinis* against post-harvest rots on different fruits. *Biocontrol Sci Technol* 8, 257–267.
- Miguel MG, Gago C, Antunes MD, Lagoas S, Faleiro ML, Megías C, Cortés-Giraldo I, Vioque J, Figueiredo AC (2018). Antibacterial, antioxidant, and antiproliferative activities of *Corymbia citriodora* and the essential oils of eight *Eucalyptus* species. *Medicines* 5, 61.
- Pal RK (1998). Ripening and rheological properties of mango as influenced by ethrel and calcium carbide. *J Food Sci Technol* 35, 358–360.
- Wang LM, Zhu TH (2023). Strong opponent of walnut anthracnose-*Bacillus velezensis* and its transcriptome analysis. *Microorganisms* 11, 885.

The Inhibitory Efficacy of *Bacillus velezensis* Against Mango Anthracnose and Its Influence on Fruit Fresh Preservation

Hui Cao¹, Weiyan Yang², Qiting Na¹, Changsong Zhu¹
Lanhuan Meng¹, Haichao Song², Xuequn Shi^{2*}

¹College of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; ²College of Life and Health Sciences, Hainan University, Haikou 570228, China

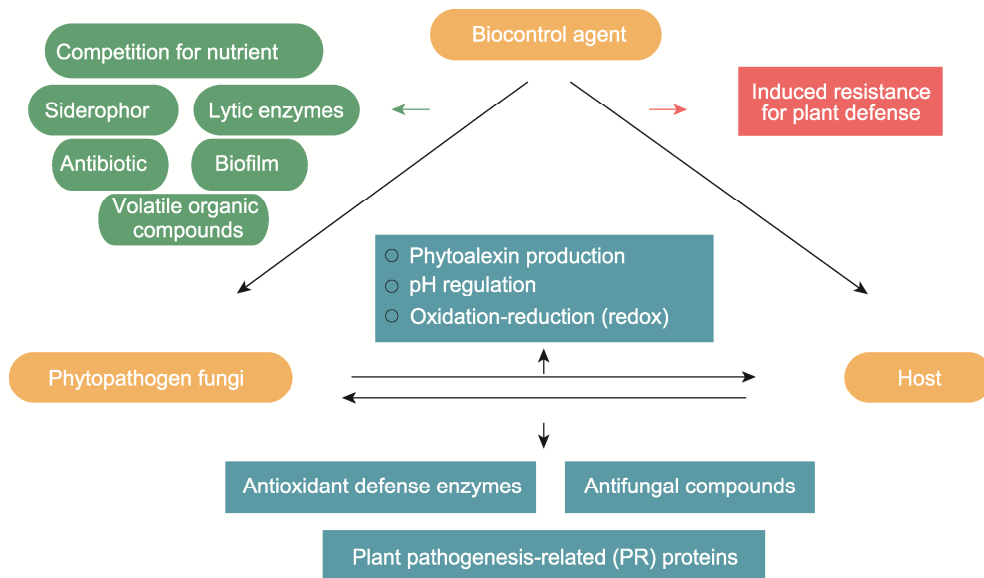
INTRODUCTION: Anthracnose, primarily caused by *Colletotrichum gloeosporioides* is a main disease affecting mangoes, leading to significant postharvest losses by deteriorating fruit quality and reducing shelf life.

RATIONALE: Addressing postharvest anthracnose is a critical challenge in the mango industry. Biological control me-

thods, such as utilizing antagonistic bacteria, offer sustainable alternatives to chemical treatments. This study investigates the efficacy of *Bacillus velezensis* in inhibiting *C. gloeosporioides* and its potential in preserving mango fruit quality.

RESULTS: The application of *B. velezensis* culture filtrate (CF) effectively inhibited spore germination and mycelial growth of *C. gloeosporioides*. At CF concentrations of 2% and 4%, mycelial inhibition rates were 75.18% and 80.96%, respectively. *In vivo* experiments demonstrated that both bacterial suspension (CB) and CF treatments significantly reduced lesion expansion on mangoes, with inhibition rates of 44.33% and 65.00%, respectively. Treated fruits exhibited a slower decrease in titratable acids and maintained higher levels of total phenols and flavonoids, indicating delayed ripening and extended shelf life.

CONCLUSION: *B. velezensis* exhibits strong antagonistic activity against *C. gloeosporioides*, effectively controlling mango anthracnose and preserving fruit quality. Its application as a biocontrol agent holds promise for sustainable postharvest management in mango production.



Mechanism of biological control of *Bacillus velezensis*

Key words *Bacillus velezensis*, biological control, *Colletotrichum gloeosporioides*, mango, fresh preservation

Cao H, Yang WY, Na QT, Zhu CS, Meng LH, Song HC, Shi XQ (2026). The inhibitory efficacy of *Bacillus velezensis* against mango anthracnose and its influence on fruit fresh preservation. *Chin Bull Bot* **61**, 68–77.

* Author for correspondence. E-mail: shixuequn@163.com

(责任编辑: 白羽红)

通讯作者简介

史学群, 博士, 海南大学生命健康学院教授, 博士生导师, 海南省拔尖人才。近20年致力于海南省芒果田间绿色栽培和采后病害防治科研工作。近5年主持国家自然科学基金、科技部“十三五”国家重点研发计划子课题、科技部国家科技重大专项子课题、海南省科技厅自然科学基金创新团队项目等近10项。发表学术论文40余篇, 参编教材8部。授权发明专利2项。