

枯草芽孢杆菌对烟草白粉病抑制及控病效果研究

蔡 璘¹, 刘忠伟², 周为华³, 陈飞飞³, 丁 伟^{1*}

(1. 西南大学植物保护学院, 重庆 北碚 400716; 2. 贵州大学生命科学院, 贵州 贵阳 550025; 3. 贵州省遵义市烟草公司桐梓县分公司, 贵州 桐梓 563200)

摘要:【目的】本文探究了枯草芽孢杆菌对白粉病的抑制作用及其防治效果。【方法】采用扫描电子显微镜(SEM)观察枯草芽孢杆菌对白粉菌菌丝的抑制作用,同时结合田间及烘烤对比实验测定烟草生长期和烘烤过程中枯草芽孢杆菌对白粉病的防控效果。【结果】枯草芽孢杆菌对白粉菌菌丝生长和分生孢子萌发均有明显的抑制作用,其能使白粉菌菌丝顶端肿胀变形呈球状,导致新生分生孢子的个数显著减少;田间实验显示,枯草芽孢杆菌对烟草白粉病的田间防效可达70%以上,与化学药剂甲基硫菌灵相当,且对烟草叶片有一定的促生作用;烘烤前在发病烟叶上喷施枯草芽孢杆菌,可有效降低烘烤过程中白粉病的发病程度,其防效为36.59%,而甲基硫菌灵则不具备这种作用。【结论】枯草芽孢杆菌不仅对田间防治白粉病具有重要应用价值,而且在烘烤过程中也能降低白粉病原菌的再侵染,其控病作用的机制可能是对病原菌孢子萌发具有一定的抑制作用。

关键词: 烟草白粉病; 枯草芽孢杆菌; 抑制作用; 防效

中图分类号: S467 文献标识码: A

Inhibitive and Control Efficacy of *Bacillus subtilis* against Powdery Mildew on Tobacco

CAI Lin¹, LIU Zhong-wei², ZHOU Wei-hua³, CHEN Fei-fei³, DING Wei^{1*}

(1. College of Protection, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. College of Life Science, Guizhou University, Guizhou Guiyang 550025, China; 3. Tongzi Tobacco Branch Company, Zunyi Tobacco Company, Guizhou Tongzi 563200, China)

Abstract 【Objective】In this paper, the inhibition and control efficacy of *Bacillus subtilis* against powdery mildew were explored. 【Method】The inhibition of *Bacillus subtilis* to powdery mildew hyphae by scanning electron microscope (SEM) was observed, combined with contrast test in the field and curing, the damaging effects of *Bacillus subtilis* on powdery mildew during tobacco growth and curing were determined. 【Result】*Bacillus subtilis* significantly exhibited inhibitory effect on the growth of powdery mildew hypha and its conidium germination, causing the top of the powdery mildew hyphae deformation and became swelling and spherical and leading to the significant reduce of new born identify spores. Further study displayed that the control effect of *Bacillus subtilis* on tobacco powdery mildew in the field was more than 70%, similar to Thiophanate-methyl, and the growth of tobacco leaves was promoted. It was effective to reduce the occurrence of powdery mildew spraying *Bacillus subtilis* on tobacco leaf before curing, the control effect was up to 36.59%. However, thiophanate-methyl did not exhibited this effect. 【Conclusion】The results indicated that *Bacillus subtilis* not only had important application value for prevention and control of powdery mildew in the field, but also could reduce the infection of powdery mildew. The inhibitory on spore germination may be the main disease control mechanism.

Key words: Tobacco powdery mildew; *Bacillus subtilis*; Inhibitive effect; Efficacy

【研究意义】烟草是我国重要的经济作物之一,在国民经济中占有举足轻重的地位,但病虫害的发生给烟草生产带来巨大的经济损失,其中烟草白粉

病是由二孢白粉菌(*Erysiphe cichoracearum* DC.)引起的一种灾难性真菌病害,对烟草产量和品质均有严重影响^[1]。烟草白粉菌产生的孢子常能借助空气大范围传播,且可多次重复侵染寄主植物,是我国西南烟草栽培区的重要病害之一。其侵染烟草的过程通常是老叶先发病,然后自下而上逐渐蔓延^[2-3]。在温度适宜的条件下白粉病孢子快速扩散,并随着空气相对湿度增高发病速度加快。当前,培育抗病

收稿日期: 2016-11-13

基金项目: 国家烟草专卖局重点科技项目(110201502019); 中央高校基本业务费专项资金(XDJK2016E152)

作者简介: 蔡 璘(1993-),女,贵州遵义人,硕士研究生,主要从事农药学研究; *为通讯作者: 丁 伟,教授,博士,从事天然产物农药与烟草有害生物系统控制研究, E-mail: dwing818@163.com。

品种、加强田间栽培管理、采用药剂防治是防治烟草白粉病病害的主要措施。培育出的抗病强的烟草品种,因产量和质量问题,难以大规模用于实际生产,而通过加强田间栽培管理的方法防治烟草白粉病,因田间温湿度等自然气候因素的不可控制,也逐渐丧失了优势。当前生产上频繁施用百菌清、腈菌唑等化学杀菌剂对烟草白粉病进行大田防治,效果均不太理想,且化学药剂的长期使用会增强病原菌抗性,导致农药残留增加,影响烟草安全,对环境造成很大污染;而生物防治因其无污染、无残留、成本低等优点,逐渐成为烟草病害防治的有效措施。【前人研究进展】近年来,有益微生物对植物真菌性病害显示出较好的防治效果,使得生物防治日益成为控制真菌性病害的一条很有发展前景的途径。枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)是目前常用的生防菌之一,诸多研究表明其对多种植物病原菌均具有抑制作用^[4-5]。回云静等发现施用枯草芽孢杆菌生物菌剂对五味子白粉病的防治效果高达78.9%,并能使叶片增厚^[6]。宋双采用灵芝菌丝体液体发酵后,测试出该发酵产物对烟草白粉病菌有显著的体外钝化和预防作用,对烟草白粉病也有很好的抑制侵染效果^[7-8]。防治烟草白粉菌并不能仅仅局限于大田生长阶段防治,在烘烤过程中,白粉菌也会继续侵染。卢志伟等研究表明,烘烤过程中,由于烤房环境达到烟草白粉菌生长的温度和湿度,白粉菌在散叶堆放阶段和鲜烟装炕阶段均可侵染烟叶,导致其病斑第二次扩散^[9]。但是目前的研究着重于大田防治烟草白粉病,对于防治白粉菌在烘烤过程中对烟叶的侵染尚未见报道。【本研究切入点】本实验研究枯草芽孢杆菌对烟草白粉病的抑制作用及其防治效果,以甲基硫菌灵为对照,观察到枯草芽孢杆菌能通过影响烟草白粉菌菌丝形态继而抑制分生孢子萌发,进一步研究了枯草芽孢杆菌对烟草白粉病的田间防治效果及对烟草叶片的促生作用,同时结合枯草芽孢杆菌对白粉菌在烟叶烘烤过程中二次侵染的影响,全方位评估枯草芽孢杆菌对烟草白粉菌的抑制效果。【拟解决的关键问题】该研究以期在烟草白粉病病害的大面积防治奠定基础,并为烘烤过程中防治烟草白粉病提供安全可行性方法。

1 材料与方法

1.1 供试材料

室内盆栽供试菌株:将在贵州采到的烟草白粉病新鲜病样,单分生孢子梗接种后分离纯化、扩繁,采用活体烟株保存在西南大学天然产物农药研究

室。

实验地及栽培情况:本次实验在贵州省遵义市桐梓县九坝镇湖南中烟集团芙蓉王品牌九坝烟叶基地单元内进行,实验地海拔1205 m,28.23778°N,106.73861°E,常年植烟土,实验地肥力中等,为白粉病高发地区。烟苗采用集约化漂浮育苗,苗龄一致,健壮无病,由贵州省遵义市烟草公司桐梓县分公司统一提供。株行距1.1 m×0.7 m,供试品种于4月25日统一移栽,7月20日统一打顶。其它大田管理措施均按优质烟生产规范进行。用于烘烤阶段白粉病防治实验的烟叶以中部烟叶为实验材料,依据成熟采收标准,在烟叶成熟时单叶采收。

烟草品种:南江三号;药剂:1000亿孢子·g⁻¹枯草芽孢杆菌(江西顺泉生物科技有限公司);50%甲基硫菌灵(江苏剑牌农化股份有限公司);扫描电子显微镜:日立S-3400N型扫描电子显微镜;烤房:采用气流上升式密集烤房进行烘烤,装烟密度为72 kg·m⁻³,参照“三段式烘烤工艺”正常烘烤。

1.2 试验方法

1.2.1 枯草芽孢杆菌对烟草白粉菌菌丝形态的影响 用毛笔将新鲜烟叶上的白粉菌刷到烧杯中,用蒸馏水稀释成到10×显微镜下每个视野含有10~15个孢子的悬浮液。使用喷雾器将分生孢子悬浮液均匀喷洒到每株幼苗叶片上接种白粉菌。7 d后对叶片喷施枯草芽孢杆菌(1:600)、药剂对照甲基硫菌灵(1:600)、清水,各处理药剂以厂家推荐浓度进行稀释,施用方式为叶面两面喷施。采集用药后7 d的叶片,PBS(磷酸缓冲液,pH7.4,0.01 M)清洗2次,2.5%戊二醛固定4 h,PBS清洗1~2次,1%锇酸固定1 h,PBS清洗1~2次,30%、50%、70%、90%、100%酒精梯度脱水,10 min/次,临界点干燥,日立E1010离子溅射仪镀膜,日立S-3400N型扫描电子显微镜观察白粉菌菌丝、分生孢子梗和分生孢子形态变化。

1.2.2 枯草芽孢杆菌对田间烟草白粉病防治效果

共设3个处理组:枯草芽孢杆菌处理组、甲基硫菌灵处理组、清水对照组。各处理田间随机区组排列,3次重复,共计9个小区,每个小区面积约40 m²,四周设保护行。喷施枯草芽孢杆菌、甲基硫菌灵、清水,施用方式参照1.2.1。调查每棵烟株上的所有展开的叶片,记载各处理药害情况。记总叶数及各级病叶数,严重度分级应符合GB/T23222的规定。首次施药前田间基本无病斑,调查时间定为第2次施药前、第3次用药前和第3次用药后7、15 d调查病情。并计算病情指数、防效。

病情指数 =

$$\frac{\sum(\text{发病叶数}) \times (\text{病级代表值})}{(\text{调查总叶数}) \times (\text{病级最高值})} \times 100 \quad (1)$$

防治效果(%) =

$$\frac{(\text{对照病情指数} - \text{处理病情指数})}{\text{对照病情指数}} \times 100 \quad (2)$$

1.2.3 枯草芽孢杆菌对烟草叶片生长的影响 调查对象与“1.2.2”相同,每个小区选择中间2行去2头烟株后,每小区定点调查8株,按YC/T 142-1998《烟草农艺性状调查方法》标准,定点定株在烟草现蕾期和打顶后7d测定烟株的最大叶长、最大叶宽,并利用公式(3)计算叶面积。

叶面积(cm^2) =

$$0.6345 \times \text{叶长}(\text{cm}) \times \text{叶宽}(\text{cm}) \quad (3)$$

1.2.4 枯草芽孢杆菌对烟叶烘烤阶段白粉菌再侵染的抑制效果 实验面积约400 m^2 ,烟株种植期间未喷施任何杀菌药剂,只施用清水保持田间湿度使烟株发病,采摘后烟叶按白粉病发病“0、1、3、5、7、9级”分类,喷施不同药剂,于自然通风处晾干后烘烤。共设3个处理,各3次重复,各处理药及剂稀释倍数为依次为:枯草芽孢杆菌(1:600)、甲基硫菌灵(1:600)和清水,每个重复分别选取“0、1、3、5、7、9级”烟叶各20片烟叶挂牌(标记烤前病级、处理和编号)挂杆烘烤。处理间随机排列,重复之间用健康烟叶隔开。对烤后烟叶白粉病病级进行分级。记录采收前和烘烤后总叶数及各级病叶数,严重度分级应符合GB/T23222的规定,计算病情指数和防治效果,参照公式(1)和公式(2)。并测定不同处理烟叶产量和产值相关指标。

1.3 数据处理

Origin8.0、Excel和SPSS18.0进行相关实验数据处理与统计分析,差异显著性应用LDS及T检验进行分析。

2 结果与分析

2.1 枯草芽孢杆菌对烟草白粉菌菌丝形态的影响

采集用药后7d的叶片进行扫描电镜观察,如

图1所示。枯草芽孢杆菌均对白粉菌分生孢子萌发及菌丝生长有抑制作用,其作用与甲基硫菌灵相当,都表现为孢子不萌发,菌丝顶端肿胀变形膨大呈球状,新生分生孢子的个数显著减少(图1c、1d、1e、1f),而对照清水处理组无抑制作用。清水处理组菌丝完整、粗壮、表面光滑,有明显的分生孢子梗,每个分生孢子梗上串生孢子个数多为5~6个(图1a、1b),而2个药物处理组白粉菌丝有变形、凹陷,甚至扭曲现象,菌丝没有分生孢子梗或分生孢子梗上的串生孢子大多表现为不萌发,少部分个数为1个。喷施枯草芽孢杆菌和甲基硫菌灵的病菌发育受到阻滞,表明其对白粉菌菌丝有显著破坏作用而阻止孢子萌发。

2.2 枯草芽孢杆菌对田间烟草白粉病防治效果

数据显示枯草芽孢杆菌对烟草白粉病的防治效果与甲基硫菌灵相当,表现枯草芽孢杆菌对烟草白粉病较好的抑制作用(表1)。第1次施药前,田间基本无病斑,3次施药分别间隔7d。相比清水处理,枯草芽孢杆菌对病原菌的防治效果在调查时期内依次为44.93%、64.87%、69.54%和71.58%,随时间呈现上升趋势,而甲基硫菌灵则无此现象,且第3次用药后两种药剂处理后的防治效果皆无显著性差异。

2.3 枯草芽孢杆菌对烟草叶片生长的影响

生育期(现蕾期和打顶后7d)调查结果表明,喷施甲基硫菌灵和枯草芽孢杆菌对烟草叶片的生长都显示一定的促进作用,其中枯草芽孢杆菌效果较好(图2)。喷施枯草芽孢杆菌后,现蕾期和打顶后7d叶长依次为75.63和78.93cm,而对应甲基硫菌灵组仅为73.25和77cm;打顶后7d,枯草芽孢杆菌处理叶面积值高于甲基硫菌灵处理和空白对照。由此可见,喷施生防菌剂枯草芽孢杆菌对叶片长、宽和叶面积都具有一定程度的增大作用,其对枯草芽孢杆菌烟草叶片生长发育的促进能力高于甲基硫菌灵。

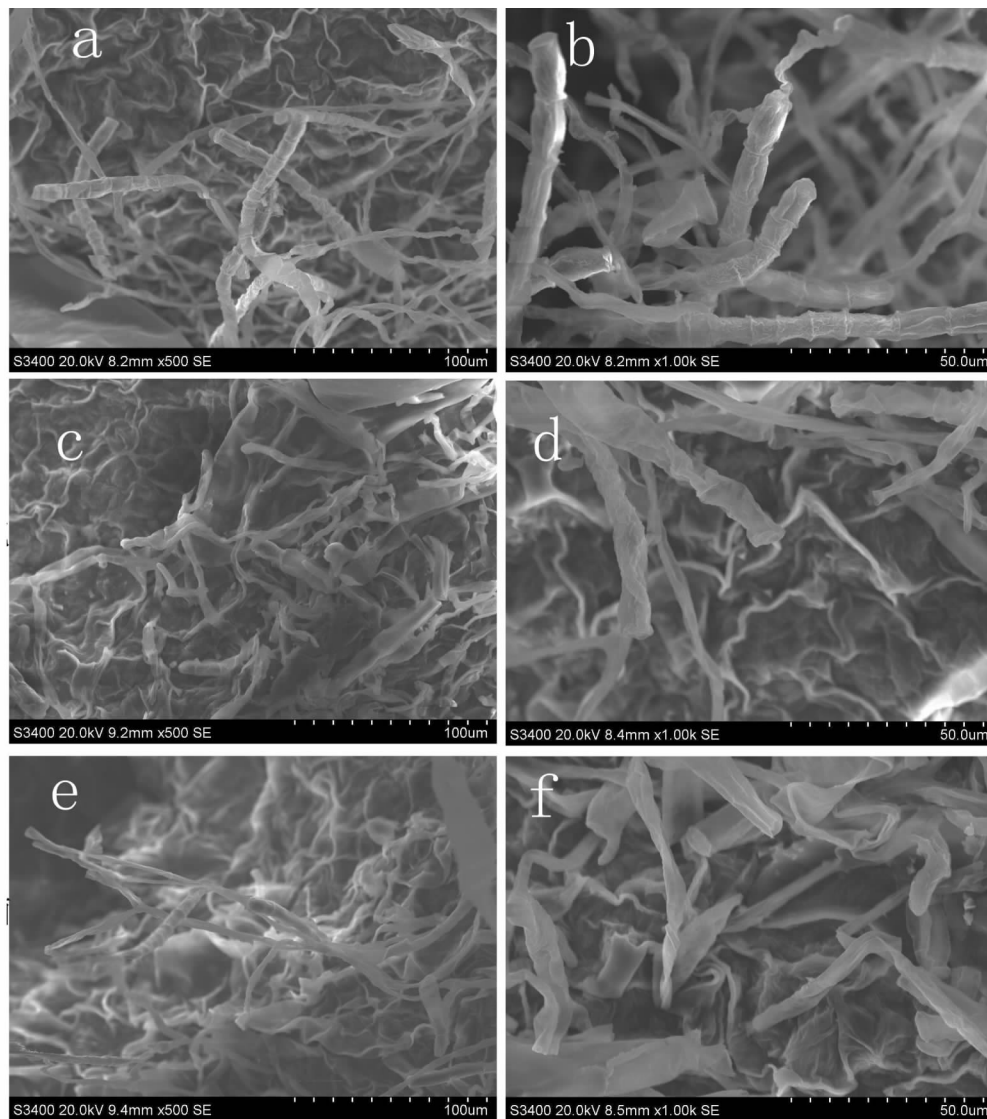
表1 不同药剂对烟草白粉病的田间防治效果

Table 1 Control efficacy of different pesticides against tobacco powdery mildew

处理 Treatment group	第2次施药前 Second medication before		第3次施药前 Third medication before		第3次施药后7d Third time after 7 days		第3次施药后15d Third time after 15 days	
	病情指数 Disease index	防治效果(%) Control effect	病情指数 Disease index	防治效果(%) Control effect	病情指数 Disease index	防治效果(%) Control effect	病情指数 Disease index	防治效果(%) Control effect
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	0.49	44.93 ± 4.90	2.41	64.87 ± 2.85	3.97	69.54 ± 2.32	4.60	71.58 ± 1.06
甲基硫菌灵 Thiophanate methyl	0.46	48.67 ± 3.94	1.46	79.48 ± 1.65*	3.41	74.11 ± 1.11	4.47	72.74 ± 1.35
水 Water	0.89	-	7.03	-	13.19	-	16.22	-

注: * 表示t检验法 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: * indicates significant difference at 0.05 level by t-test.



清水处理(a,b); 枯草芽孢杆菌处理(c,d); 甲基硫菌灵处理(e,f)

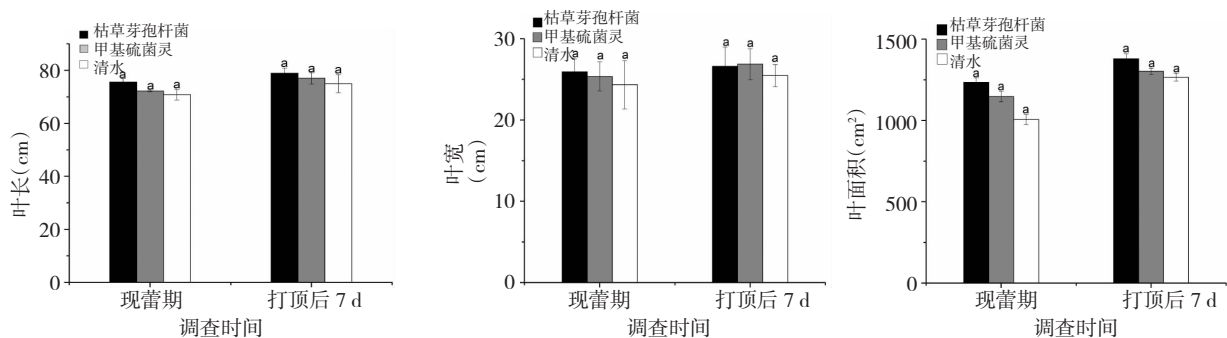
图 1 不同药剂对菌丝形态的影响

Fig. 1 Effects of different pesticides on powdery mildew characteristic

2.4 枯草芽孢杆菌对烟叶烘烤阶段白粉菌再侵染的抑制效果

由表 2 可知, 烘烤前对有病斑的叶面喷施枯草

芽孢杆菌, 对离体叶片的烟草白粉病的防治效果可高达 36.59% 显著优于甲基硫菌灵处理组。除此之外, 枯草芽孢杆菌还具有生防菌剂安全的优点。



柱上不同字母表示 LSD 法检验 $P < 0.05$ 水平差异显著

Different letters on the bars indicate significant difference at $P < 0.05$ levels by LSD test, respectively

图 2 不同药剂对叶片的影响

Fig. 2 Effects of different pesticides on leaf traits

表 2 不同药剂对烘烤过程中烟草白粉病的防治效果

Table 2 Control efficacy of different pesticides against powdery mildew of flue-cured tobacco during curing

处理 Treatment group	病情指数 Disease index	防治效果(%) Control effect
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	37.25	36.59 ± 1.71*
甲基硫菌灵 Thiophanate methyl	49.29	16.54 ± 1.97
水 Water	58.80	-

注: * 表示 *t* 检验法 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: * indicates significant difference at 0.05 level by *t*-test.

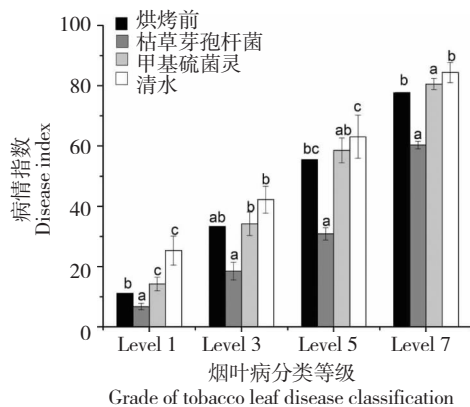
清水处理的烟叶烘烤后病情指数较烤前呈现明显上升趋势(图 3),但是枯草芽孢杆菌处理后显著降低。就烤前不同病级而言,喷施枯草芽孢杆菌烘烤后其病级都显示下降的现象,甲基硫菌灵则无此现象。相比清水处理 2 种药剂都有显著效果,其中以枯草芽孢杆菌最明显。当烤前病级为 1、3、5 级时,喷施枯草芽孢杆菌对白粉病都有较好抑制效果。烘烤前病级为 1、3、5 级时,使用枯草芽孢杆菌处理后病情指数能降低 40% 左右,7 级时变化率仅为 22%。然而使用相同方法喷施甲基硫菌灵后,3、5、7 级的病叶病情指数会升高 3%~5%,1 级时升高 28%。清水对照的病情指数变化率随病级升高而降低,其中 1 级时该升高率达 128%。因此,本实验通过对不同病级的白粉病烟叶使用枯草芽孢杆菌(生防菌剂)和甲基硫菌灵(化学药剂)处理后烘烤,表明烟叶烘烤前只有喷施生防菌剂能有效抑制烟叶烘烤后白粉菌的二次侵染。

3 讨论与结论

白粉菌属植物专性寄生菌,温度和湿度等条件对其分生孢子萌发都有显著性影响,因此在人工培养基上很难得到准确的萌发率^[10]。本实验利用枯草芽孢杆菌处理白粉菌感染烟草叶片,采用扫描电镜观察枯草芽孢杆菌对白粉病分生孢子形成及菌丝

生长的影响,结果表明:枯草芽孢杆菌能抑制白粉菌孢子梗的产生,进而抑制分生孢子的萌发,初步推测其抑菌机理可能是枯草芽孢杆菌在叶面快速大量定殖,分泌抑菌物质,该抑菌物质能破坏菌丝形态,导致白粉菌菌丝畸形,同时抑制分生孢子产生。有研究表明枯草芽孢杆菌生长代谢过程中能够产生多种抑菌物质,包括低分子量抑菌肽^[11]、抑菌蛋白^[12]和挥发性抑菌物质^[13]等,但具体作用机制尚待研究。枯草芽孢杆菌作为植物体内常见的内生细菌,在自然界中广泛存在,对人畜无毒无害,不污染环境,主要通过营养和空间位点竞争、分泌抗菌等机制发挥生防功能^[6,13-14],对豌豆的根腐病、水稻纹枯病、三七根腐病、烟草黑胥病、黄瓜白粉病^[14-17]等都有较好防效,且芽孢杆菌是土壤和植物微生物区系的优势生物种群,在植物微生物区系繁殖能力较高。有文献报道多种生防药剂根施能综合提高植株的抗病能力^[19-22]。根据生防菌各自不同的作用方式合理复配,可达到增效的目的。本实验证明枯草芽孢杆菌对白粉病菌防治具有积极效果,以后的实践中可结合不同生防药剂及不同施药方式科学复配,增加防治效果。

通过大田阶段进一步调查,结果显示枯草芽孢杆菌对烟草白粉病的防治效果与甲基硫菌灵无显著性差异,且第 3 次施用枯草芽孢杆菌后防效最高可达到 70% 以上,再次验证了其对白粉病显著的防治

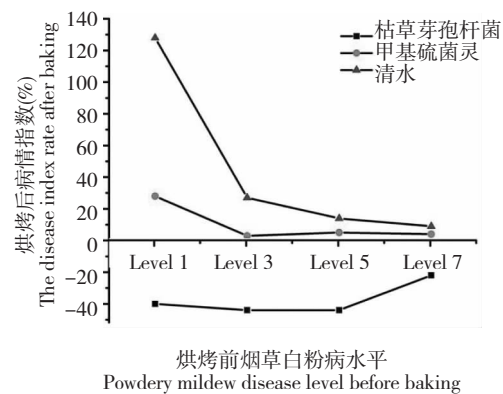


柱上不同字母表示 LSD 法检验 $P < 0.05$ 水平差异显著

Different letters on the bars indicate significant difference at 0.05 levels by LSD test, respectively

图 3 不同药剂对烘烤后白粉病病情指数的影响

Fig. 3 Effects of different pesticides on disease index growth rate of powdery mildew after flue-curing



作用。实验调查同时发现烟叶喷施枯草芽孢杆菌后叶面积增大,表明枯草芽孢杆菌在一定程度上促进了烤烟叶片生长发育的能力,这与相关研究报道一致^[23-25]。目前大多数研究认为生防菌是通过提高植物对氮、钾吸收和光合速率促进生长,因为光合速率与叶绿素含量密切相关,叶绿素含量增加促进植物光合速率增加,进而提高植物对营养物质吸收,促进植物生长^[24],由此可以推断,生防菌对植物的促生作用主要在生长期,对叶片有增大的效果。

对烘烤前的发病烟叶喷施枯草芽孢杆菌,烘烤后烟叶发病程度明显减轻,防效达到 36.59%,极大减少了白粉病带来的损失。本实验观察到在烟叶烘烤期间白粉菌仍有继续侵染的现象,这与其他学者的研究报道相一致^[9]。推测可能由于在堆放和烘烤过程中烟叶温度的升高和水分的蒸发,形成适宜白粉菌生长的温度和湿度,使得在散叶堆放阶段和鲜烟装炕阶段白粉菌对烟叶造成大幅度侵染。

在对叶面喷施枯草芽孢杆菌后,我们发现烘烤过程中白粉病菌的二次侵染得到了有效的抑制,这一特性可以显著降低烟叶烘烤期间白粉菌继续侵染所造成的损失,提高经济效益。有研究表明枯草芽孢杆菌在 100℃ 条件下仍然可以存活 29.4%^[24],而烟草烘烤期间最高温度为 68℃ 左右,就此可推测枯草芽孢杆菌在此过程中仍可大量存活,并分泌抗菌物质抑制白粉菌生长,同时在烟叶表面形成生物被膜,进一步抵御白粉菌对植物的侵害^[26-27]。

枯草芽孢杆菌还是一种公认的益生菌,安全性较高,已经广泛应用在食品、药品领域^[28-29],目前市场上已经有药品通过枯草芽孢杆菌以孢子的形式进入消化道抑制有害细菌生长,对腹泻、下痢等肠胃道疾病都具有很好预防效果^[30-32],且张玉芹等也得出浓度高达 5000 mg·kg⁻¹的枯草芽孢杆菌对实验动物无急性毒性和刺激性等,因此,烘烤后烟叶上枯草芽孢杆菌的残留不会增加安全隐患^[33-34]。

综上所述,枯草芽孢杆菌不仅对烟草生长期白粉病防治效果显著,而且能有效抑制烘烤过程中白粉病菌的二次侵染。枯草芽孢杆菌对白粉病防治效果显著,其对人畜安全、对环境无污染、不易产生抗药性、对作物生长有促进作用,这些优点更符合现代烟草绿色生产及有害生物综合防治的要求。

参考文献:

- [1] Antoun H, Beauchamp C J, Goussard N, et al. Potential of Rhizobium and Bradyrhizobium species as plant growth promoting rhizobacteria on non-legumes: effect on radishes (*Raphanus sativus* L.) [J]. *Plant and Soil*, 1998, 204(1): 57-67.
- [2] 周益林, 段霞瑜, 盛宝钦. 植物白粉病的化学防治进展[J]. *农药学报* 2001, 3(2): 12-18.
- [3] Chen H, Xiao X, Wang J, et al. Antagonistic effects of volatiles generated by *Bacillus subtilis* on spore germination and hyphal growth of the plant pathogen, *Botrytis cinerea* [J]. *Biotechnology Letters*, 2008, 30(5): 919-923.
- [4] 陈志谊, 高太东, 严大富. 枯草芽孢杆菌 B-916 防治水稻纹枯病的田间实验[J]. *中国生物防治*, 1997, 13(2): 75-78.
- [5] Darvishzadeh R, Alavi R, Sarrafi A. Resistance to powdery mildew (*Erysiphe cichoracearum* DC.) in oriental and semi-oriental tobacco germplasm under field conditions[J]. *Journal of Crop Improvement*, 2010, 24(2): 122-130.
- [6] Dunlap C A, Schisler D A, Price N P, et al. Cyclic lipopeptide profile of three *Bacillus subtilis* strains; antagonists of *Fusarium head blight* [J]. *The Journal of Microbiology*, 2011, 49(4): 603-609.
- [7] Hui Y J, Wu C B, Xu X M, et al. Biological control and growth effect of Bacterium *Bacillus subtilis* on Chinese Magnoliaceae Powdery Mildew [J]. *Journal of Fungal Research*, 2011, 9(2): 100-104.
- [8] 宋 双. 陕西省烟草白粉病生理小种鉴定及其防治研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2013.
- [9] 卢志伟, 杨 辉, 曾 荣, 等. 烟叶烘烤过程中白粉病菌的侵染情况[J]. *贵州农业科学* 2015(2): 14-17.
- [10] 唐秀丽, 范洁茹, 周益林, 等. 小麦白粉菌分生孢子离体后存活时间与温度的定量关系研究[J]. *植物病理学报* 2015, 45(6): 670-674.
- [11] Stein T. *Bacillus subtilis* antibiotics: structures, syntheses and specific functions [J]. *Molecular Microbiology*, 2005, 56(4): 845-857.
- [12] Serrano M, Zilhão R, Ricca E, et al. A *Bacillus subtilis* secreted protein with a role in endospore coat assembly and function [J]. *Journal of Bacteriology*, 1999, 181(12): 3632-3643.
- [13] Niu D D, Liu H X, Jiang C H, et al. The plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus cereus* AR156 induces systemic resistance in *Arabidopsis thaliana* by simultaneously activating salicylate and jasmonate/ethylene-dependent signaling pathways [J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2011, 24(5): 533-542.
- [14] León M, Yaryura P M, Montecchia M S, et al. Antifungal activity of selected indigenous *Pseudomonas* and *Bacillus* from the soybean rhizosphere [J]. *International Journal of Microbiology*, 2009.
- [15] Hwang S F, Chakravarty P. Potential for integrated control of Rhizoctonia root-rot of *Pisum sativum* using *Bacillus subtilis* and a fungicide [J]. *Journal of Plant Disease Protection*, 1992, 99: 626-636.
- [16] 张晓云, 李宝庆, 郭庆港, 等. 枯草芽孢杆菌 CAB-1 抑菌蛋白对黄瓜白粉病的防治作用[J]. *中国生物防治学报* 2012, 28(3): 375-380.
- [17] Lian C Q. Surface display of human growth hormone on *Bacillus subtilis* spores for oral administration and efficacy assessment [D]. Hangzhou: Jiangsu University, 2014.
- [18] 刘会清, 李世东. 植物生防菌剂对连作设施蔬菜的防病促生效果研究[D]. 中国农业科学院, 2010.
- [19] 刘玮琦, 蒯振川, 杨宇红, 等. 应用 16S rRNA 基因文库技术分析土壤细菌群落的多样性[J]. *微生物学报* 2008, 48(10): 1344-1350.
- [20] 李 晶, 杨 谦. 生防枯草芽孢杆菌的研究进展[J]. *安徽农业科学* 2008, 36(1): 106-111.
- [21] Istitico R, Cangiano G, Tran H T, et al. Surface display of recom-

- binant proteins on *Bacillus subtilis* spores [J]. *Journal of Bacteriology*, 2001, 183(21): 6294 – 6301.
- [22] Molassiotis A N, Sotiropoulos T, Tanou G, et al. Antioxidant and anatomical responses in shoot culture of the apple rootstock MM 106 treated with NaCl, KCl, mannitol or sorbitol [J]. *Biologia Plantarum*, 2006, 50(1): 61 – 68.
- [23] Niu D D, Liu H X, Jiang C H, et al. The plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus cereus* AR156 induces systemic resistance in *Arabidopsis thaliana* by simultaneously activating salicylate and jasmonate/ethylene-dependent signaling pathways [J]. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 2011, 24(5): 533 – 542.
- [24] 钱静亚, 马海乐, 李树君, 等. 温度, 超声, nisin 协同脉冲磁场杀灭枯草芽孢杆菌的研究 [J]. *现代食品科技*, 2013, 29(12): 2970 – 2974.
- [25] 王傲雪, 张莉莉, 王 旭, 等. 粉红粘帚菌对番茄促生作用及施用方式研究 [J]. *东北农业大学学报*, 2015, 46(10): 37 – 44.
- [26] 周 翠, 乔鲁芹, 金 静, 等. 一株枯草芽孢杆菌挥发性物质的抑菌作用初步研究 [J]. *农药学报*, 2011, 13(2): 201 – 204.
- [27] 张成省, 孔凡玉, 刘朝科, 等. 枯草芽孢杆菌 Tpb55 挥发物对烟草的防病促生效应 [J]. *中国生物防治*, 2009, 25(3): 245 – 249.
- [28] Raupach G S, Kloepper J W. Mixtures of plant growth-promoting rhizobacteria enhance biological control of multiple cucumber pathogens [J]. *Phytopathology*, 1998, 88(11): 1158 – 1164.
- [29] 张玉芹, 高加明, 张成省, 等. 枯草芽孢杆菌菌株 Tpb55 的安全性毒理学研究 [J]. *中国生物防治学报*, 2013, 29(4): 601 – 606.
- [30] 唐秀丽, 范洁茹, 周益林, 等. 小麦白粉菌分生孢子离体后存活时间与温度的定量关系研究 [J]. *植物病理学报*, 2015, 45(6): 670 – 674.
- [31] 邢荷荷, 梁 晨, 于 静, 等. 烟草白粉病菌的生物学特性研究 [J]. *中国烟草学报*, 2015, 21(2): 85 – 89.
- [32] 庄敬华, 陈 捷, 杨长成, 等. 生防木霉菌生物安全性评价 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39(4): 715 – 720.
- [33] 汪 莹, 丁 伟. 抗烟草青枯病的药剂筛选与应用技术研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007.
- [34] 游摇偲, 张立猛, 计思贵, 等. 枯草芽孢杆菌菌剂对烟草根际土壤细菌群落的影响 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(11): 3323 – 3330.

(责任编辑 陈 虹)