

小粒材小蠹伴生真菌的分离鉴定及其致病性研究

梁 甜¹, 章 宇¹, 巨云为^{1*}, 廖菘凯², 周洁璐¹

(1. 南京林业大学 林学院, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 2. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘 要:为明确树状月季害虫小粒材小蠹伴生真菌的种类及其致病性,采用组织分离法分别对小粒材小蠹的成虫、幼虫、坑道、寄主变色边材和维管束进行真菌分离培养,结合形态学和分子生物学对所得菌株进行分类鉴定,通过柯赫氏法则进一步验证伴生菌的致病性。结果表明,5种分离材料共分离出伴生真菌10株,其中腐皮镰刀菌在不同分离材料中的分离率均为最高,是小粒材小蠹伴生菌的优势种群;腐皮镰刀菌、层出镰刀菌、藤仓镰刀菌对月季均有致病性,接种后的月季叶片和茎干出现病斑,叶片发病率分别为89.73%、34.15%、63.24%,发病面积分别为1.62、0.20、0.28 cm²;茎干发病率分别为55.56%、27.78%、30.00%,变色反应区长度分别为4.74、2.98、4.33 cm。该结果为进一步揭示伴生真菌与小粒材小蠹的相互作用关系提供了基础,为小粒材小蠹的综合防治提供科学的理论依据。

关键词:树状月季;小粒材小蠹;伴生真菌;分离鉴定;致病性

中图分类号:S763.15

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)03-0123-07

Isolation, Identification and Pathogenicity of Fungi Associated with *Xyleborus saxeseni*

LIANG Tian¹, ZHANG Yu¹, JU Yun-wei^{1*}, LIAO Song-kai², ZHOU Jie-lu¹

(College of Forestry, Nanjing Forestry University, Co-innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: The aim of this study was to identify species and pathogenicity of fungi associated with *Xyleborus saxeseni*, a pest of tree rose. The fungi were isolated and cultured from adults, larvae, tunnels, discolored sapwood and vascular bundles. The obtained strains were classified and identified based on morphological and molecular biological features. The pathogenicity was tested by Koch's rule. Ten 10 fungi were isolated in total, and *Fusarium solani* had the highest incidence and was dominant among all the isolated materials. The inoculation to rose plants revealed that *F. solani*, *F. proliferatum* and *F. fujikuroi* were all pathogenic. Disease spots appeared in the leaves and stems of rose after inoculation, and leaf incidences were 89.73%, 34.15% and 63.24%, respectively, and disease areas were 1.62, 0.20, and 0.28 cm², respectively. Incidences of stem were 55.56%, 27.78% and 30.0%, respectively, and lesion length of discoloration were 4.74, 2.98, and 4.33 cm, respectively. The results further reveal the interaction between associated fungi and *X. saxeseni*, and provide a theoretical basis for integrated control of this beetle. In addition, it is also the first time to report *X. saxeseni* as a pest on rose.

Key words: tree ros; *Xyleborus saxeseni*; associated fungus; isolation and identification; pathogenicity

树状月季(*Rosa chinensis*)也称树月季,是蔷薇科(Rosaceae)植物,观赏价值和经济价值极高,南京

收稿日期:2022-04-11 修回日期:2022-05-30

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目(LYKJ[2021]27, LYKJ[2021]1)。

第一作者:梁 甜。研究方向:森林保护。E-mail:youjiunian@163.com

* 通信作者:巨云为,副教授,博士。研究方向:森林保护。E-mail:656898633@qq.com

许多地区将其作为重要的园林观赏植物,对其外观要求很高,故害虫防治是月季栽培管理的重要内容。本研究于2020年5月在南京市苗圃引种的树状月季上发现小粒材小蠹(*Xyleborus saxeseni*)危害,被害月季出现了落叶、枝枯等现象,给当地苗圃带来了严重的经济损失。

小蠹虫是一种重要的林业害虫,其携带真菌入侵寄主植物是自然界中普遍存在的一种生物学现象^[1],Hartig^[2]发现真菌和昆虫危害以及木质部变色这些现象之间存在联系,自此昆虫伴生菌的研究一直是植物保护生态研究的热点内容之一。华山松大小蠹(*Dendroctonus armandi*)自身携带的共生真菌(*Ophiostoma* sp. 和 *Leptographium* sp.)是华山松死亡的主要原因,这些真菌通过华山松大小蠹进入树体内,破坏树体的代谢系统和抗性系统,最终导致植株死亡^[3]。榆树荷兰病的病原真菌(*Ophiostoma ulmi* 和 *O. novo-ulmi*)与欧洲榆小蠹(*Scolytus multistriatus*)伴生攻击榆树,造成欧洲榆树的大面积死亡,严重影响生态环境的同时产生巨大的经济损失^[4]。红脂大小蠹(*D. valens*)的伴生真菌(*L. procerum*)协助红脂大小蠹成虫破坏寄主的抗性从而成功定殖寄主^[5]。以上小蠹类群虽利用真菌协同危害林木,但仍主要以植物韧皮部为食。而另一类小蠹钻蛀寄主的木质部内部,以坑道内的共生真菌及其他微生物的菌丝和孢子为食,这类小蠹被称为食菌小蠹。最早在斯里兰卡发现的小圆胸小蠹(*Eurwallacea fornicatus*)是食菌小蠹的一种,与镰刀菌——一类致病力极强的半知菌共生,造成寄主机械损伤、枝干枯死和木材腐烂^[6-7]。对欧洲木材业造成严重经济损失的光滑足距小蠹(*Xylosandrus germanus*)其幼虫和成虫均以虫道真菌为唯一食物,以雌成虫在寄主木质部中蛀坑为害,对林木造成严重危害^[8]。松树材小蠹(*X. festivus*)也是一种典型的食菌小蠹,目前研究已确定出 *Raffaelea* cf. *arxii* 为其储菌囊中的优势菌种^[9]。总之,食菌小蠹的危害与伴生菌的发生密不可分,因此伴生菌的研究已成为食菌小蠹防治研究的一个重要方面。

小粒材小蠹属鞘翅目(Coleoptera)小蠹科(Scolytidae)齿小蠹亚科(Ipinae)材小蠹属(*Xyleborus*),是一种食菌小蠹,通常与自身携带的伴生真菌协同危害寄主植物。其寄主范围较广,主要危害杨、栎、华山松、铁杉、云杉、无花果、桢楠、苹果、漆树、椴树、核桃等林木^[10-12]。由于其发生隐蔽,采集困难,因此国内外的相关研究较少,目前关于小粒材小蠹的研究主要集中于小粒材小蠹生物学特性及其形态学特征,而有关小粒材小蠹及其伴生真菌危害月季的研

究则鲜有报道。鉴于此,本试验以小粒材小蠹危害树状月季为研究背景,从小粒材小蠹虫体、坑道和月季组织上分离培养得到真菌,通过活体接种试验测定伴生真菌对寄主月季的致病性,结合形态观察和ITS序列分析比对鉴定致病菌株,明确小粒材小蠹伴生真菌的种类,探讨其对月季的致病性,为科学防控该小蠹提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2020年5月于江苏南京市浦口区月季苗圃(118°32'30"E, 32°7'10"N)内选择危害严重的月季20株,伐倒后对木段进行截取,取主干约60 cm进行解剖处理,收集坑道内小粒材小蠹成虫和幼虫。用无菌解剖刀取出小粒材小蠹成虫的坑道、月季变色边材和维管束组织,编号后保存于灭菌后的培养皿中。

1.2 试验方法

1.2.1 菌种的分离纯化 选取小粒材小蠹的成虫、幼虫、小蠹坑道(0.5 cm×0.5 cm)、寄主月季变色边材(0.5 cm×0.5 cm)和维管束为分离材料。用75%的酒精对5种分离材料进行浸泡消毒,消毒45 s后接种至PDA培养基中^[13],25℃恒温培养箱避光培养。待菌丝长出后划取菌落边缘的菌丝将其接到新的培养基上进行纯化,得到待试菌株,保存好备用。

1.2.2 致病性测定

1.2.2.1 叶片接种 将分离纯化所得菌株在无菌操作台上用直径0.6 cm打孔器提前打好菌饼,选择健康月季植株上的无伤叶片,用酒精擦拭消毒杀菌。接种方法分为有伤接种和无伤接种,有伤接种采用灭菌的接种针刺伤叶片后菌饼置于伤口处;无伤接种直接将菌饼接种于叶片中央。接种后的植株统一放置于温度25℃、湿度98%以上的室内花房。对照组接空白PDA培养基。共3组重复,每个重复接种6片叶子。

1.2.2.2 茎干接种 月季茎干采取孢子悬浮液接种。将分离纯化所得菌株制成浓度为 10^6 个·mL⁻¹的孢子悬浮液。选择健康生长植株上无伤茎干,用酒精擦拭消毒杀菌。移液器(0.5~10 μL)取10 μL孢子悬浮液,有伤接种用接种针刺伤茎干后移液器枪头直接插入茎干伤口处;无伤接种中,孢子悬浮液注入灭菌脱脂棉上,用封口膜将其包裹在月季茎干上。接种后的植株统一放置于温度25℃、湿度保持98%以上的室内花房。对照组接无菌水。共3组重复,每个重复接种同株月季3段茎干。

接种后逐日观察和记录叶片和茎干发病结果,记录发病症状和发病面积,检查茎干接种点外表皮韧皮部变色、坏死情况,剥去外表皮,观察木质部变色情况。对发病组织再次进行组织分离,根据柯赫氏法则验证,如果得到的致病菌株与原接种菌株一致则确定其对月季有致病性。

1.2.3 伴生真菌形态鉴定 形态鉴定参照文献^[14-16]进行,主要以菌落形态特征和孢子形态为依据,观察菌落形态、菌丝疏密情况、是否产生色素及色素颜色。待致病菌长出孢子后,用蔡司显微镜(Imager M2,Zeiss)观察孢子形态及其产孢结构。

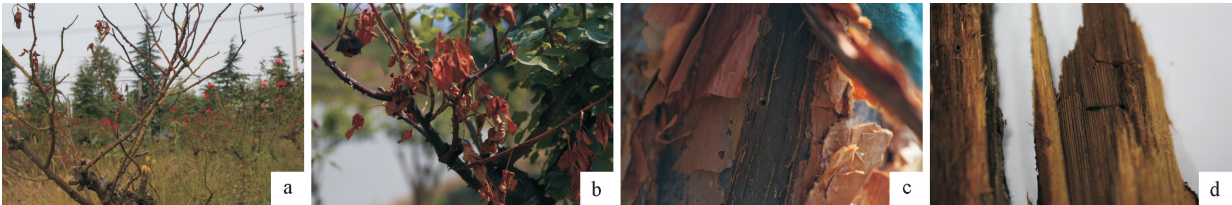
1.2.4 伴生真菌分子生物学鉴定 从菌落边缘挑取 40 mg 菌丝,采用 CTAB 法提取 DNA^[17]。将获得的 DNA 片段进行 PCR 扩增试验,引物采用 ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')、ITS4 (5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3'),扩增程序为

94 ℃ 4 min、94 ℃ 30 s、54 ℃ 30 s、72 ℃ 45 s,循环 33 次;72 ℃ 10 min。对 PCR 扩增产物进行 1% 琼脂糖电泳检测,出现目的条带则进行 DNA 测序,测序工作由上海杰李生物工程有限公司完成。将得到的 ITS 序列在 NCBI 上进行 BLAST 比对。对获得的同源序列用软件 MEGA X 进行序列分析,构建系统发育树。

2 结果与分析

2.1 田间病状

受害月季树势衰弱,叶片发黄枯萎甚至脱落,枝梢干枯,部分月季整株枯死(图 1a、图 1b)。茎干表面有蛀孔,多达 300 多个,蛀孔直径约 1 mm,蛀孔周围可以观察到有少量的黄白色蛀粉(图 1c)。解剖受害木,可以观察到木质部有许多不规则黑色虫道,木质部输导组织变褐色、发出浓浓的水臭味(图 1d)。



注:a、b. 受害月季;c. 受害月季枝干;d. 受害月季枝干解剖。

图 1 受害月季田间病状

Fig. 1 Field symptoms of infected rose

2.2 分离情况

从 5 种分离材料上分离得到伴生真菌 10 株,依次编号为:bs1~bs10,不同分离材料分离情况略有差别。由表 1 可知,变色边材分离得到的伴生真菌种类最多,共 8 种;其次是坑道组织,分离得到伴生菌 5 种;成虫体表分离到 4 种;维管束组织分离得到 3 种;幼虫体表上获得伴生菌 2 种。且在这 5 种分离材料中均能分离得到 bs1,分离率也均为最高,其在成虫体表、幼虫体表、坑道、变色边材和维管束的分离率分别为:86.11%、97.43%、82.85%、70.73%、75.00%,这表明 bs1 为小粒材小蠹伴生真菌的优势种。

2.3 致病性分析

2.3.1 叶片接种结果 接种 4 d 后,有伤接种中,接种菌株 bs1、bs2、bs3 的部分植株叶片出现不规则形病斑,接种 bs1 的叶片初期出现淡褐色小斑,后不断向外扩散,病斑中间叶片部分逐渐变薄变脆,边缘为红褐色,红褐色部分较窄,接种 bs1 的叶片发病面积最大,为 1.62 cm²(图 2a、图 2b),发病率为 89.73%;接种 bs2 的叶片发病症状不明显,病斑为不规则形状,中间薄,边缘红褐色,病斑面积为 0.20 cm²(图 2c、图 2d),发病率为 34.15%;接种 bs3 后

叶片病斑呈不规则形状,边缘红褐色范围较宽,中间稍厚不易破,病斑面积 0.28 cm²(图 2e、图 2f),发病率为 63.24%;接种 bs4~bs10 的叶片表面并未出现病斑,仅有一接种孔,其余部位与正常叶片无异;对照组叶片也无明显变化(图 2g、图 2h)。无伤接种中,所有接种叶片均无明显变化,与正常叶片无异。对发病植株进行致病菌分离,得到的致病菌与原接种菌株一致。

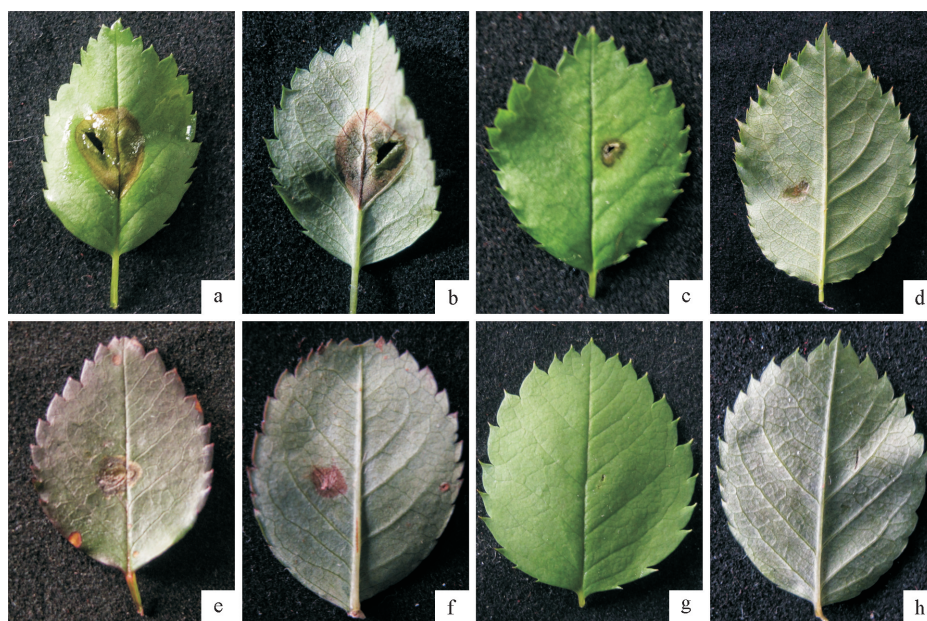
表 1 不同分离材料真菌分离结果

Table 1 Separation results of different separation materials

菌名	真菌分离率(%)				
	成虫体表	幼虫体表	坑道	变色边材	维管束
bs1	86.11	97.43	82.85	70.73	75.00
bs2	2.28	—	2.86	9.76	13.89
bs3	5.56	—	8.57	7.32	11.11
bs4	5.56	—	2.86	2.44	—
bs5	—	2.57	—	—	—
bs6	—	—	—	4.88	—
bs7	—	—	—	2.44	—
bs8	—	—	—	2.44	—
bs9	—	—	2.86	—	—
bs10	—	—	—	4.88	—

2.3.2 茎干接种结果 15 d后,有伤接种中,接种菌株 bs1、bs2、bs3 的月季茎干出现变色反应,接种后茎干发黑、干腐,表皮上有白色菌丝长出,剥开表皮,韧皮部内部和木质部发褐,变色部位自接种部位向外扩散,接种 bs1 的茎干变色反应区长度最长,为 4.74 cm(图 3a、图 3b),发病率为 55.56%;接种 bs2 的茎干发病率为 27.78%,变色反应区长度为 2.98

cm(图 3c、图 3d);接种 bs3 后茎干发病率为 30.00%,变色反应区长度为 4.33 cm(图 3e、图 3f);接种 bs4~bs10 的月季茎干无明显变化;对照组茎干也未出现明显变化,剥去表皮后,韧皮部和木质部呈现正常状态(图 3g、图 3h)。无伤接种的所有茎干外观无明显变化。对发病植株进行致病菌分离,得到的致病菌与原接种菌株一致。



注:a、b为bs1接种结果,c、d为bs2接种结果,e、f为bs3接种结果,g、h为空白对照结果。下同。

图2 伴生真菌对月季叶片的致病性

Fig. 2 Pathogenicity of associated fungi to rose leaves



图3 伴生真菌对月季茎干的致病性

Fig. 3 Pathogenicity of associated fungi to rose stems

2.4 伴生菌形态特征

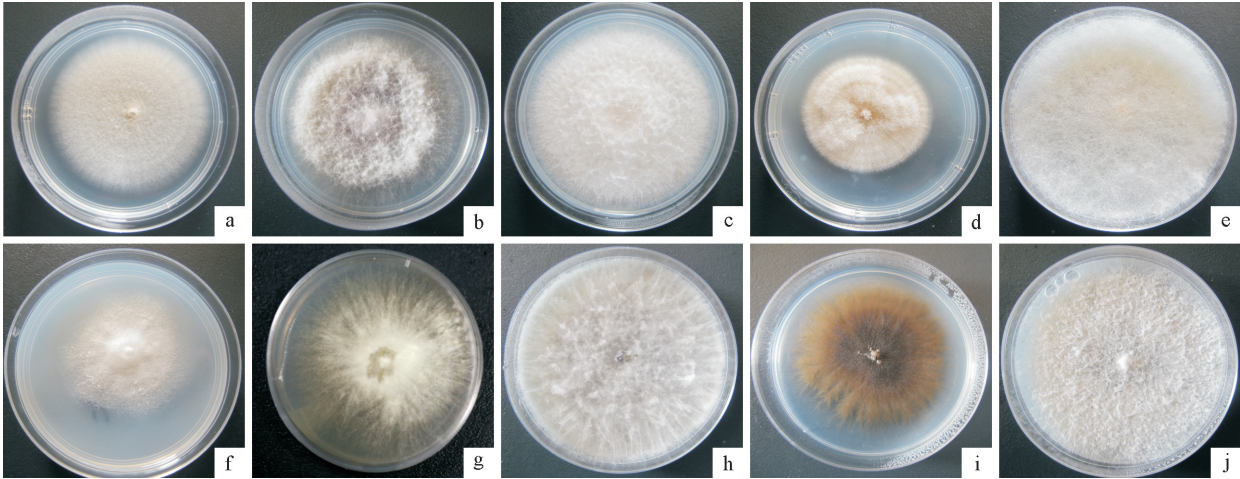
2.4.1 伴生菌菌落形态 培养一段时间后,伴生真菌菌落形态分别为:bs1,菌落疏松,菌丝绒毛状,气生菌丝较不发达(图 4a);bs2,菌落稠密,菌丝棉絮状,气生菌丝发达,表面微凸起,背面淡紫色(图 4b);bs3,菌落稠密,菌丝棉絮状或毛毡状,生长旺盛,气生菌丝发达,表面微凹,背面淡粉色(图 4c);bs4,菌落疏松,呈同心圆,菌丝绒毛状,表面背面均有淡黄色(图 4d);bs5,菌落疏松,菌丝棉絮状,生长迅速,最初呈白色,后来颜色加深逐渐变为灰褐色或黑褐色(图 4e);bs6,菌落疏松,菌丝绒毛状,白色

(图 4f);bs7,菌落白色,疏松,菌丝绒毛状,有间隔或分支,紧贴基质,显微镜下观察菌丝呈透明无色(图 4g);bs8,菌落稠密,菌丝羊毛状,生长迅速,开始呈白色,后逐渐变成灰褐色或黑褐色(图 4h);bs9,生长缓慢,菌落表面平滑,紧贴基质,表面深黄绿色(图 4i);bs10,菌落整体白色,蜡状,紧贴培养基,表面有微凸起(图 4j)。

2.4.2 致病菌孢子形态 利用蔡司显微镜对3种致病菌(bs1、bs2、bs3)的孢子进行观察。PDA培养基下,bs1大型分生孢子呈镰刀形,两端钝,略弯曲,(17~29) $\mu\text{m} \times (3.2 \sim 5.1) \mu\text{m}$,具3~5个隔膜,多

为 3 个,小型分生孢子卵圆形,(8~10) $\mu\text{m}\times(2.5\sim3)\mu\text{m}$,具 0~2 个隔膜(图 5a);bs2 大型分生孢子呈镰刀型或纺锤形,两端较 bs1 尖,(12~25) $\mu\text{m}\times(2.8\sim4.5)\mu\text{m}$,具 3~5 个隔膜,多为 3 个,小型分

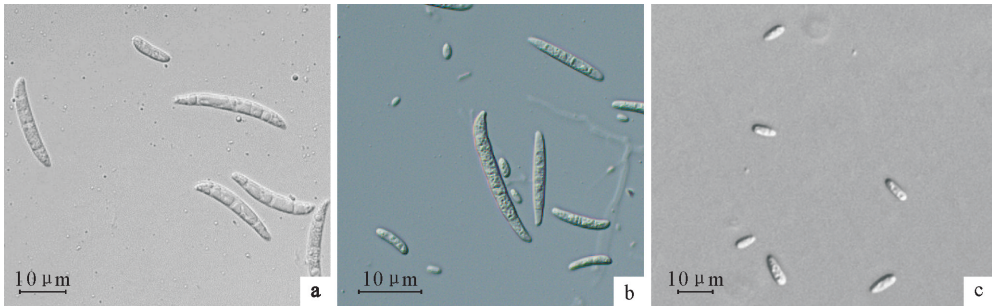
生孢子多为卵圆形、梨形等,(6~8) $\mu\text{m}\times(2.3\sim2.7)\mu\text{m}$ (图 5b);bs3 未观察到大型分生孢子,小型分生孢子卵圆形,(5~8) $\mu\text{m}\times(2.2\sim2.7)\mu\text{m}$,具 0~2 个隔膜(图 5c)。



注:a:bs1,b:bs2,c:bs3,d:bs4,e:bs5,f:bs6,g:bs7,h:bs8,i:bs9,j:bs10。

图 4 10 种伴生真菌菌落形态

Fig. 4 Colony morphology of 10 associated fungi



注:a:bs1,b:bs2,c:bs3。

图 5 致病伴生真菌孢子形态

Fig. 5 Spore morphology of associated fungi

2.5 伴生菌的分子鉴定

2.5.1 伴生真菌的 DNA 测序结果 对 DNA 测序结果进行序列分析,在 NCBI 官网上比对。分离得到的菌株经初步比对分别为腐皮镰刀菌(*F. solani*)、层出镰刀菌(*F. proliferatum*)、藤仓镰刀菌(*F. fujikuroi*)、烟管菌(*Bjerkandera adusta*)、米根霉属(*Rhizopus* sp.)、革孔菌(*Corioloopsis trogii*)、裂褶菌属(*Schizophyllum* sp.)、小新壳梭孢菌(*Neofusicoccum parvum*)、粘束梗霉属(*Graphium* sp.)、拟茎点霉属(*Phomopsis* sp.) (表 2)。

2.5.2 致病菌系统发育树的构建 分别从 GenBank 数据库中获取与供试 3 种致病菌具有较高同源性的 ITS 序列,构建系统发育树。由图 6 可知,菌株 bs1 与腐皮镰刀菌(MK110648.1、KT583184.1)聚为 1 个分支;菌株 bs2 与层出镰刀菌(MT441906.1、MN871574.1、MN871570.1、MG543689.1)同源性近,

聚为一个分支;菌株 bs3 与藤仓镰刀菌(MW016433.1、MN955526.1、MN955525.1、MF510817.1、MN871566.1、MZ648250.1)聚为一支,基本能说明问题,即菌株 bs1 为腐皮镰刀菌,bs2 为层出镰刀菌,bs3 为藤仓镰刀菌,这与我们前期测序结果一致。

表 2 伴生真菌比对结果

Table 2 Comparison results of associated fungi

菌株编号	菌名	覆盖度 (%)	相似度 (%)	登录号
bs1	<i>F. solani</i>	99	99.05	MN960016.1
bs2	<i>F. proliferatum</i>	98	97.88	KX595184.1
bs3	<i>F. fujikuroi</i>	99	99.42	MN871566.1
bs4	<i>B. adusta</i>	97	99.12	MN856332.1
bs5	<i>Rhizopus</i> sp.	100	100.00	LC514322.1
bs6	<i>C. trogii</i>	99	99.67	MW335162.1
bs7	<i>Schizophyllum</i> sp.	100	99.67	MN821481.1
bs8	<i>N. parvum</i>	97	97.25	JX096635.1
bs9	<i>Graphium</i> sp.	97	98.66	KF887074.1
bs10	<i>Phomopsis</i> sp.	81	100.00	MF800891.1

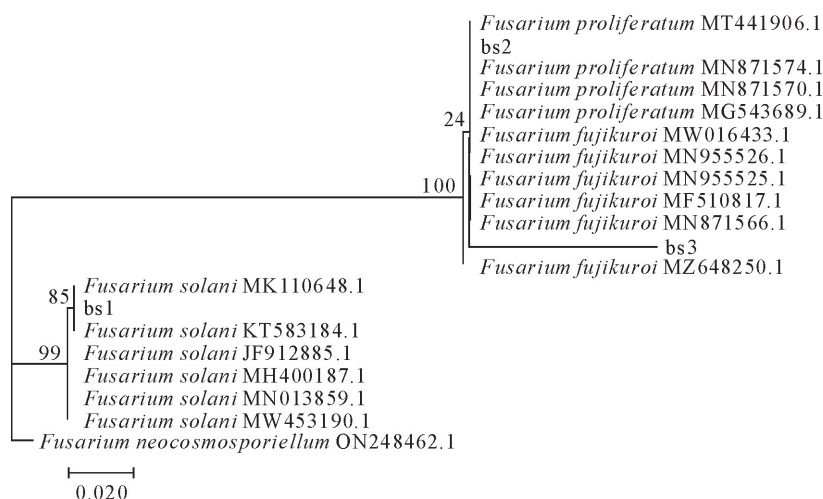


图6 致病伴生真菌系统发育树 (ML, Tamura-Nei model, Bootstrap 1 000)

Fig. 6 Phylogenetic tree of associated fungi (ML, Tamura-Nei model, Bootstrap 1 000)

3 结论与讨论

本研究对树状月季害虫小粒材小蠹的伴生真菌进行分离鉴定,从小粒材小蠹成虫、幼虫体表、坑道、寄主变色边材、维管束这5种分离材料中共分离得到10株伴生真菌。其中,腐皮镰刀菌的分离率最高,在以上几种分离材料中均被分离出。殷惠芬^[18]在关于材小蠹及其伴生真菌的研究中表明,镰刀菌属是材小蠹属最主要的伴生菌种类之一,这与本研究得到的结果相符。镰刀菌属的生态适应性极强,广泛分布在自然界当中,兼性寄生或腐生生活,通过侵染植物的维管束系统使其出现萎蔫、腐烂等症状,可引发多种病害,严重时导致整株坏死^[19]。茄孢镰刀菌能够使三七根部变色腐烂,甚至死亡,严重制约三七种植产业的发展,它也是甘肃枸杞根腐病的主要病原菌之一,导致枸杞产量下降、品质降低,对甘肃枸杞种植户造成极大经济损失^[20-21];镰刀菌复合种(*F. graminearum sensu lato*)侵染引起的小麦赤霉病对全世界范围内的小麦造成了严重的产量减少和食品安全等问题^[22-23];此外,相关研究表明,镰刀菌入侵植物后,会产生一系列的有毒物质,这类物质不仅对人、动物和植物等产生危害,同时也会对其他种类的真菌产生相应的抑制作用^[24],这在一定程度上解释了本研究分离得到的伴生菌种类相对较少的原因。

测定10种伴生菌对月季的致病性反应中,根据叶片病斑面积和茎干变色区反应长度初步判定出,腐皮镰刀菌作为小粒材小蠹的优势伴生菌株,致病力也相对最强。而华山松大小蠹伴生菌中的优势菌种 *O. shennongensis* 致病力相对较弱,属于弱致病性真菌^[25],这与本研究的结论相反,出现这种情况

的原因可能与真菌所伴生的昆虫种类有关,华山松大小蠹是秦岭巴山地区松林的先锋性害虫,攻击力强,伴生真菌只需在小蠹虫入侵寄主的过程中为小蠹虫提供营养,协助小蠹虫成功定殖,所以强致病力并非必需;而小粒材小蠹属于食菌小蠹,主要依靠伴生菌对寄主的病害作用,削弱入侵所造成的寄主植物组织结构变化和生理生化所产生的抗性反应达到有效定殖^[26],可能因此导致优势菌种致病力更强。基于本研究结果,应进一步研究伴生菌对月季的致病机制及月季对伴生菌的防御反应机制,深入理解“小蠹虫—伴生菌—寄主”互作体系内的相互关系和作用机制,为今后小粒材小蠹以及月季病害的综合防治提供理论基础。

参考文献:

- [1] SOLHEIM H, LÅNGSTRÖM B. Blue-stain fungi associated with *Tomicus piniperda* in Sweden and preliminary observations on their pathogenicity [J]. Annales Des Sciences Forestières, 1991, 48(2): 149-156.
- [2] HARTIG T. Ambrosia des bostrichus dispar [J]. Allgemeine Forst und Jagdzeitung, 1844, 13: 73.
- [3] 陈辉, 唐明. 华山松大小蠹共生真菌对华山松木质部危害的解剖学研究[J]. 西北植物学报, 2002, 22(6): 1391-1395.
CHEN H, TANG M. Microstructure of blue-stain fungi (*Leptographium terebrantis*) associated with *Dendroctonus armandi* in the xylem tissue of *Pinus armandi* [J]. Acta Botanica Borali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(6): 1391-1395. (in Chinese)
- [4] SANTINI A, FACCOLI M. Dutch elm disease and elm bark beetles: a century of association [J]. iForest Biogeosciences and Forestry, 2015(8): 126-134.
- [5] SCOTT J J, OH D C, YUCEER M C, et al. Bacterial protection of beetle-fungus mutualism [J]. Science, 2008, 322 (5898): 63-63.
- [6] TWIDDY D, FELL S, BEER Z W, et al. Screening for suscepti-

- bility of macadamia to *Eurwallacea fornicatus* and its fungal symbiont *Fusarium euwallaceae*[J]. Plant Disease, 2021, 105(4):739-742.
- [7] 李巧,韩春绪,孙江华.小圆胸小蠹及其虫菌共生体研究进展[J].生物安全学报,2018,27(3):164-170.
LI Q, HAN C X, SUN J H. Research advance on *Eurwallacea fornicatus* and its fungal symbionts[J]. Journal of Biosafety, 2018, 27(3):164-170. (in Chinese)
- [8] 杨群芳,王慧,李庆,等.温度对食菌小蠹光滑足距小蠹实验种群发育和繁殖的影响[J].昆虫学报,2010,53(12):1382-1389.
YANG Q F, WANG H, LI Q, et al. Influence of temperature on development and reproduction of the experimental population of the ambrosia beetle *Xylosandrus germanus* (Coleoptera: Scolytidae)[J]. Acta Entomologica Sinica, 2010, 53(12):1382-1389. (in Chinese)
- [9] 李猷,林伟,唐也,等.松树材小蠹 *Xyleborus festivus* Eichhoff (Scolytinae: Xyleborini) 在中国南方的发生及其共生真菌研究[J].植物保护,2020,46(3):147-151.
LI Y, LIN W, TANG Y, et al. *Xylebrous festivus* eichhoff (Scolytinae: Xyleborini) in southern China: distribution, host range and symbiotic fungi[J]. Plant Protection, 2020, 46(3):147-151. (in Chinese)
- [10] 殷蕙芬.中国经济昆虫志:第二十九册,鞘翅目小蠹科[M].北京:科学出版社,1984.
- [11] 谢文田,许庆亮,宋友文,等.危害核桃的小蠹种类及防治对策[J].中国森林病虫,2001(4):33-35.
XIE W T, XU Q L, SONG Y W, et al. Species and control of bark beetles attacking juglans regia[J]. Forest Pest and Disease, 2001(4):33-35. (in Chinese)
- [12] 李宗波,欧晓红.小粒材小蠹成虫触角结构与感受器的扫描电镜观察[J].西北林学院学报,2013,28(3):138-141.
LI Z B, OU X H. Antenne structure of *Xyleborus sa-xeseni* adult observed with scanning electron microscope[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(3):138-141. (in Chinese)
- [13] 任燕,姜海燕,爱华.红果型沙地云杉内共生真菌多样性[J].西北林学院学报,2018,33(6):180-187.
REN Y, JIANG H Y, AI H. Endophytic funguns diversity of red fruit type *Picea mongolica*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6):180-187. (in Chinese)
- [14] 魏景超.真菌鉴定手册[M].上海:上海科学技术出版社,1979.
- [15] BARNETT H L, HUNTER B B. Illustrated genera of imperfect fungi[J]. Transactions of the British Mycological Society, 1955, 38(4):480.
- [16] 王拱辰.常见镰刀菌鉴定指南[M].北京:中国农业科技出版社,1996.
- [17] 伏荣桃,王剑,陈诚,等.稻曲病菌基因组 DNA 提取方法比较与小文库构建[J].生物技术通报,2018,34(4):102-106.
FU R T, WANG J, CHEN C, et al. Comparing the methods of isolating genomic DNA and construction of its small genomic library of *Ustilaginoidea virens*[J]. Biotechnology Bulletin, 2018, 34(4):102-106. (in Chinese)
- [18] 殷蕙芬.材小蠹属与真菌共生关系的研究概况[J].森林病虫通讯,1983(2):26-30.
YIN H F. A research overview on the symbiotic relationship between *Xylebrous festivus* eichhoff and fungi[J]. Forest Pest and Disease, 1983(2):26-30. (in Chinese)
- [19] 李新风.山西镰刀菌种类鉴定及遗传多样性分析研究[D].太原:山西农业大学,2013
- [20] 汪静,梁宗锁,康冰,等.文山三七根腐病原真菌的鉴定与药剂防治[J].西北林学院学报,2015,30(1):158-163.
WANG J, LIANG Z S, KANG B, et al. Identification of root rot pathogen of *Panax notoginseng* from Wenshan[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(1):158-163. (in Chinese)
- [21] 张小彦.枸杞根腐病拮抗菌的筛选、生防作用及其抑菌机理研究[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
- [22] BAI G, SHANER G. Management and resistance in wheat and barley to fusarium head blight[J]. Annu. Rev. Phytopathol, 2004, 42:135-161.
- [23] GOSWAMI R S, KISTLER H C. Heading for disaster: fusarium graminearum on cereal crops[J]. Molecular Plant Pathology, 2004, 5(6):515-525
- [24] 黄晓静,王少敏,毛丹,等.镰刀菌属真菌毒素的毒性研究进展[J].食品安全质量检测学报,2017,8(8):3117-3128.
HUANG X J, WANG S M, MAO D, et al. Research progress on toxicity of *Fusarium* mycotoxin[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(8):3117-3128. (in Chinese)
- [25] 王甜甜.华山松大小蠹伴生长喙壳类真菌多样性及致病性研究[D].北京:中国林业科学研究院,2020.
- [26] 叶辉.小蠹虫伴生菌研究概况[J].世界林业研究,1997(1):31-36.
YE H. A research overview of fungi associated with bark beetles[J]. World Forestry Research, 1997(1):31-36. (in Chinese)