

花椒镰刀菌的生物学特性及杀菌剂室内筛选

钟思雨 焦嘉卉 赵乐 汤俊杰 李培琴*

(西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 由花椒镰刀菌 *Fusarium zanthoxyli* X. Zhou, T. Aoki, O'Donnell & Z.M. Cao 引起的花椒干腐病严重影响花椒的生长和产量。本研究旨在探究花椒镰刀菌的生物学特性并筛选有效的药剂, 为花椒干腐病防治提供理论依据。结果表明: 花椒镰刀菌在胡萝卜固体培养基(CA)上的生长速率最快, 菌落生长速率为 4.37 mm/d; 在不同的固体和液体培养基中均以产小型分生孢子为主; 25℃ 为该病原菌的最适生长温度; 3种光照条件对花椒镰刀菌菌落生长速率影响不显著, 但全暗处理有利于其在 CA 液体培养基中产孢。采用菌落生长速率法测定 17种杀菌剂对花椒镰刀菌的室内毒力, 发现生物源杀菌剂中以 3% 多抗霉素的抑菌作用最强, EC_{50} 值为 0.28 mg/L; 单一化学杀菌剂中, 50% 多菌灵、10% 苯醚甲环唑和 50% 甲基硫菌灵抑菌作用较强, EC_{50} 值分别为 0.61、1.02 和 2.90 mg/L; 复配化学杀菌剂中, 72% 霜脲·锰锌和 30% 唑醚·戊唑醇抑菌效果较强, EC_{50} 值分别为 1.23 和 1.44 mg/L。

关键词: 干腐病; 花椒; 镰刀菌; 产孢

中图分类号: S763.11; S432.4+4

文献标识码: A

文章编号: 2097-5279(2025)04-0042-08

Biological characteristics and fungicides screening *in vitro* of *Fusarium zanthoxyli*, the pathogen causing stem canker in prickly ash

ZHONG Siyu JIAO Jiahui ZHAO Le TANG Junjie LI Peiqin*

(College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Stem canker, caused by *Fusarium zanthoxyli* X. Zhou, T. Aoki, O'Donnell & Z.M. Cao, seriously affects the growth and yield of prickly ash. This study aims to explore the biological characteristics of *F. zanthoxyli* and screen the effective fungicides, thereby providing a theoretical basis for the prevention and control for stem canker of prickly ash. The results showed that the growth rate of *F. zanthoxyli* was the fastest on carrot agar(CA), with a colony growth rate of 4.37 mm/d. *F. zanthoxyli* mainly produced microconidia in different solid and liquid media, and the optimal growth temperature for *F. zanthoxyli* was 25°C. Three light treatments did not significantly affect the colony growth rate, but the full dark treatment is conducive to the spore production of the *F. zanthoxyli* in the CA liquid medium. The virulence of 17 fungicides against *F. zanthoxyli* was determined by colony growth rate method. Among biofungicides, 3% polyoxin exhibited the most pronounced antifungal activity, with an EC_{50} value of 0.28 mg/L. For single-component chemical fungicides, 50% carbendazim, 10% difenoconazole and 50% thiophanate-methyl demonstrated superior efficacy, recording EC_{50} values of 0.61, 1.02 and 2.90 mg/L, respectively. Regarding formulated chemical fungicides, 72% cymoxanil·mancozeb and 30% pyraclostrobin·tebuconazole showed notable inhibitory effects, with EC_{50} values of 1.23 and 1.44 mg/L in sequence.

Keywords: *Fusarium*; *Zanthoxylum bungeanum* Maxim; fungicides; sporulation

花椒 *Zanthoxylum bungeanum* Maxim. 是芸香科花椒属木本植物, 是我国重要的经济树种之一, 不仅在调味品领域得到广泛使用 (Zhang et al., 2020), 在植物化学、药物及资源开发等领域也具有重要价值。我国的花椒栽培面积和产量均居世界首位, 花椒产业也是陕西、甘肃、四川等地乡村振兴的重要支柱产业 (Bao et al., 2023)。然而, 花椒在生长过程中容

易受到病虫害的侵袭, 干腐病是广泛发生于花椒种植区的一种严重枝干病害, 又称流胶病。早在 20 世纪 90 年代, 相关研究已发现, 花椒干腐病会引起中国北方多个花椒品种的枝干腐烂, 严重时可造成整株死亡 (曹支敏等, 1992; 曹支敏等, 1994)。该病害的发病部位主要是花椒的主枝和主干。发病初期树皮湿软腐烂, 略微有凹陷, 同时出现流胶; 发病后期可见

收稿日期: 2025-07-17; 修回日期: 2025-09-09。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32471877)。

* 通信作者: 李培琴 (E-mail: lipq@nwsuaf.edu.cn), 副教授。

橘红或粉红色的无性繁殖体突出树皮(曹支敏等, 1990)。发病严重时, 树冠中、上部枝条也会受到损害, 严重影响花椒的产量和质量。

引起花椒干腐病的病原菌最早于1992年由曹支敏等(1992)鉴定, 他们根据形态学特征, 将其鉴定为子囊菌门的鼠状赤霉 *Gibberella pulicaris*(Fries) Sacc., 其无性阶段被鉴定为接骨木镰刀菌 *Fusarium sambucinum* Fuckel。Zhou等(2016)通过对我国陕西、甘肃、山西、山东和河北等花椒主产区的干腐病菌的形态学特征及其 ITS rDNA、*TEF1*、*RPB1* 和 *RPB2* 基因序列分析, 记述了分离自花椒干腐病的2个镰刀菌属新种, 即花椒镰刀菌 *F. zanthoxyli* X. Zhou, T. Aoki, O'Donnell & Z. M. Cao 和连续镰刀菌 *F. continuum* X. Zhou, T. Aoki, K. O'Donnell & Z. M. Cao。其中, 花椒镰刀菌的分离频率为65.8%, 主要分布在陕西、甘肃和山西等地, 是优势病原菌; 连续镰刀菌的分离频率仅为13.2%, 主要分布在山东; 未能从干腐病中分离到接骨木镰刀菌。目前, 对于花椒干腐病菌的关键生物学特性, 如营养适应性、产孢规律以及对温度和光照的偏好等, 仍缺乏系统研究。在防治方面, 仅对甘肃地区引起花椒干腐病的三线镰刀菌 *F. tricinctum*(Corda) Sacc.进行了杀菌剂的室内毒力测定(王斌等, 2018), 而化学防治仍以田间经验用药为主; 大田药效试验也较为有限, 仅在陕西渭北和甘肃陇南等地明确了少数药剂的大田防效(曹支敏等, 1992)。因此, 本研究选择分离频率较高的花椒镰刀菌, 分析其在不同培养基、温度及光照处理下的菌落生长和产孢情况等生物学特性, 并测定17种杀菌剂对花椒镰刀菌的抑制效果, 为防治花椒干腐病提供理论基础, 对于保障花椒产业可持续发展具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 材 料

1.1.1 供试病原菌

花椒镰刀菌菌株来源于西北农林科技大学西部森林生物灾害治理国家林业和草原局重点实验室所采集分离菌株(登录号为GCA_025919635.1, 菌株号为FZ001)。从-80℃超低温冰箱中取出菌株, 接种于马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基上, 于25℃暗活化培养5~7 d, 活化培养2~3次, 保存备用。

1.1.2 培养基

配制10种供试培养基。其中: 胡萝卜琼脂培养基(carrot agar, CA)和低营养合成琼脂培养基(synthetic

nutrient-poor agar, SNA)参考 Krishna等(2018)的制备方法; V8蔬菜汁琼脂培养基(V8 juice agar, V8A)、玉米粉琼脂培养基(cornmeal agar, CMA)、燕麦片琼脂培养基(oatmeal agar, OA)和马铃薯葡萄糖琼脂培养基(potato dextrose agar, PDA)参考 Thomas等(2017)的方法制备; 营养琼脂培养基(nutrient agar, NA)参考刘丙花等(2024)的方法制备; 羧甲基纤维素钠琼脂培养基(CMC Agar, CMCA)参考 Zhang等(2022)的方法制备。马铃薯-葡萄糖-花椒汁液琼脂培养基(potato-dextrose-Zanthoxylum bungeanum agar, PDZA)的制备方法为: 将200 g马铃薯洗净去皮, 切成1 cm³的小块, 加水煮烂后, 再加入6 g研碎的新鲜花椒叶片煮20 min, 用双层纱布过滤获得滤液, 再加入20 g葡萄糖和20 g琼脂, 加去离子水定容至1 000 mL。花椒汁液琼脂培养基(*Zanthoxylum bungeanum* agar, ZA)的制备方法为: 将新鲜花椒叶片100 g研碎, 加水煮沸20 min, 用双层纱布过滤获得滤液, 再添加琼脂粉20 g, 加去离子水定容至1 000 mL。制备上述液体培养基则无需添加琼脂部分, 液体培养基名称分别为胡萝卜汁液体培养基(carrot broth, CB)、低营养合成液体培养基(synthetic nutrient-poor broth, SNB)、V8蔬菜汁液体培养基(V8 juice broth, V8B)、玉米粉液体培养基(cornmeal broth, CMB)、燕麦片液体培养基(oatmeal broth, OB)、马铃薯葡萄糖液体培养基(potato dextrose broth, PDB)、营养肉汤液体培养基(nutrient broth, NB)、羧甲基纤维素钠液体培养基(CMC broth, CMCB)、马铃薯-葡萄糖-花椒汁液液体培养基(potato-dextrose-Zanthoxylum bungeanum broth, PDZB)、花椒汁液液体培养基(*Zanthoxylum bungeanum* broth, ZB)。所有培养基配置完成后, 经121℃高压蒸汽灭菌后备用。

1.1.3 杀 菌 剂

供试杀菌剂共17种。其中, 生物源杀菌剂为3%多抗霉素可湿性粉剂(WP, 山东新势力生物科技有限公司)、5%香芹酚可溶性液剂(SL, 成都新朝阳作物科学有限公司)、0.4%蛇床子素可溶性液剂(SL, 杨凌馥稷生物科技有限公司)、0.3%苦参碱乳油(EC, 杨凌馥稷生物科技有限公司)、0.5%小檗碱悬浮剂(SC, 杨凌馥稷生物科技有限公司); 单一化学杀菌剂为50%多菌灵可湿性粉剂(WP, 北京中保绿农科技集团有限公司)、10%苯醚甲环唑水分散粒剂(WG, 江苏耕农化工有限公司)、50%甲基硫菌灵悬浮剂(SC, 陕西上格之路生物科学有限公司)、25%腈菌唑乳油(EC, 陕西标正作物科学有限公司)、25%吡唑醚菌酯悬浮剂(SC, 山东恒利达生物科技有限公司)、

29%石硫合剂水剂(AS, 宜宾川安高科农药有限责任公司); 复配化学杀菌剂为72%霜脲·锰锌可湿性粉剂(WP, 北京中保绿农业科技集团有限公司)、30%唑醚·戊唑醇悬浮剂(SC)、30%戊唑·多菌灵悬浮剂(SC, 深圳诺普信农化股份有限公司)、40%唑醚·甲硫灵悬浮剂(SC, 江苏明德立达作物科技有限公司)、6%丙唑·多菌灵悬浮剂(SC, 四川润尔科技有限公司)、12%腈菌·三唑酮乳油(EC, 四川润尔科技有限公司)。

1.2 花椒镰刀菌营养习性的测定

从培养10 d的花椒镰刀菌菌落边缘, 用无菌打孔器采集多个直径为5 mm的圆形菌丝块样本, 将菌丝块分别接种于不同固体培养基正中央(直径9 cm)。每个处理3个重复, 于25℃暗培养15 d。采用十字交叉法测量菌落直径(Li et al., 2020), 计算菌落生长速率。

$$\text{菌落直径}(D) = (D_1 + D_2) / 2 \quad (1)$$

式中, D_1 为菌落的长轴直径, D_2 为与长轴方向垂直的直径。

1.3 花椒镰刀菌的产孢量测定

1.3.1 固体培养基上的产孢量

向菌落平板中添加7 mL无菌水, 用无菌棉签轻轻涂抹洗下孢子, 用灭菌纱布过滤至锥形瓶中, 用移液器吸取20 μ L, 利用普通光学显微镜和血球计数板观察测定产孢量。试验设置3个生物学重复, 每个重复在显微镜下独立计数3次。

1.3.2 液体培养基上的产孢量

采用1.2的方法制备花椒镰刀菌菌丝块, 将菌丝块分别接种于含有30 mL不同液体培养基的玻璃三角瓶中(三角瓶体积为100 mL), 放置于恒温振荡培养箱中25℃、150 r/min条件下振荡培养15 d。每个处理设置3个重复。用移液器吸取20 μ L, 使用普通光学显微镜和血球计数板观察测定产孢量。试验设置3个生物学重复, 每个重复在显微镜下独立计数3次。

1.4 花椒镰刀菌的温度适应性分析

基于1.3的实验结果, 发现花椒镰刀菌在CB、V8B和PDZB液体培养基中产孢量较多, 而在SNB液体培养基中产孢量最少, 因此选择CA、V8A、PDZA和SNA 4种培养基分析花椒镰刀菌的温度适应性。采用1.2的方法制备花椒镰刀菌菌丝块, 将菌丝块分别接种于4种固体培养基中央, 放置于15、20、25、30和35℃条件下暗培养15 d, 每个处理3个重复, 比较花椒镰刀菌于不同温度处理下的菌落生长速率和产孢量。

1.5 花椒镰刀菌光照适应性的测定

选择与1.4相同的4种培养基, 采用1.2的方法制备花椒镰刀菌菌丝块, 将菌丝块分别接种于4种固体培养基中央, 放置于25℃条件下并设置3种光照处理条件, 分别为全明处理、全暗处理和光照与黑暗交替处理(12 h光照/12 h黑暗), 每个处理3个重复, 比较花椒镰刀菌在4种培养基上于不同光照处理条件下的菌落生长速率和产孢量。

1.6 室内杀菌剂筛选

采用菌落生长速率法(阮钊等, 2022)测定供试杀菌剂对花椒镰刀菌的抑菌活性, 根据杀菌剂的性质用不同的溶剂将每种杀菌剂配置成母液, 稀释5个梯度浓度, 其中, 3%多抗霉素WP和50%多菌灵WP的测定浓度为0.1、0.2、0.4、0.8和1.6 mg/L; 5%香芹酚SL、25%腈菌唑EC、25%吡唑醚菌酯SC和29%石硫合剂AS的测定浓度为1.5、3.0、6.0、12.0和24.0 mg/L; 0.4%蛇床子素SL的测定浓度为3.0、6.0、12.0、24.0和48.0 mg/L; 0.3%苦参碱EC和12%腈菌·三唑酮EC的测定浓度为7.5、15.0、30.0、60.0和120.0 mg/L; 0.5%小檗碱SC的测定浓度为12.5、25.0、50.0、100.0和200.0 mg/L; 50%甲基硫菌灵SC、30%戊唑·多菌灵SC、40%唑醚·甲硫灵SC和6%丙唑·多菌灵SC的测定浓度为1.0、2.0、4.0、8.0和16.0 mg/L; 10%苯醚甲环唑WG、72%霜脲·锰锌WP和30%唑醚·戊唑醇SC的测定浓度为0.2、0.4、0.8、1.6和3.2 mg/L。分别将不同浓度的药剂用22 μ m的无菌滤头进行过滤除菌, 并按照1:9的体积比加入高压灭菌后冷却至50~60℃的PDA培养基中, 混匀后倒入直径为9 cm的无菌培养皿中, 制成系列浓度的含药培养基, 以添加无菌水的PDA培养基作为对照, 所有处理均设置3个重复。接种后的病原物放置在25℃恒温下黑暗培养, 15 d后采用十字交叉法测量菌落直径, 计算抑制率。

$$\text{抑制率}(\%) = (R_{CK} - R) / (R_{CK} - R_0) \times 100 \quad (2)$$

式中, R_{CK} 为空白对照的病原菌的菌落直径, R 为药剂处理的病原菌的菌落直径, R_0 为初始菌饼直径。抑制率对应的机率值为因变量 y , 农药各浓度的对数值为自变量 x , 建立毒力回归方程, 计算各农药对花椒根腐病菌的有效中浓度(effective medium concentration, EC_{50})。

2 结果与分析

2.1 花椒镰刀菌营养习性分析

花椒镰刀菌在10种固体培养基上均能生长

(图 1A)。在 CA、V8A、CMA、OA、PDZA 和 ZA 培养基上, 花椒镰刀菌的菌落生长速率无显著性差异, 平均生长速率为 3.74~4.37 mm/d, 其中在 CA 培养基上菌落生长最快, 平均生长速率为 4.37 mm/d; 在 SNA、NA、PDA 和 CMCA 培养基上, 花椒镰刀菌菌落生长速率为 2.08~3.61 mm/d, 其中在 CMC-Na 培养基上菌落生长最慢, 平均生长速率为 2.08 mm/d (图 1B)。

2.2 花椒镰刀菌的产孢量分析

在 10 种固体和液体培养基中分别培养 15 d 时, 花

椒镰刀菌在固体培养基中的产孢量 ($0.1 \times 10^6 \sim 1.8 \times 10^6$ 个/mL) 少于在液体培养基中的产孢量 ($5.1 \times 10^6 \sim 25.6 \times 10^6$ 个/mL)。其中, 在 CA、OA、SNA 和 PDZA 固体培养基中, 花椒镰刀菌产生大型分生的孢子占比为 28.7%、28.2%、50.0% 和 6.4%, 其余均为小型分生孢子, 不产生厚垣孢子; 在 V8A、CMA、NA、PDA 和 ZA 固体培养基中, 花椒镰刀菌均只产生小型分生孢子, 不产生大型分生孢子和厚垣孢子; 在 CMCA 固体培养基中, 未观察到孢子产生 (图 2A)。在 V8B、CMB 和 NB 液体培

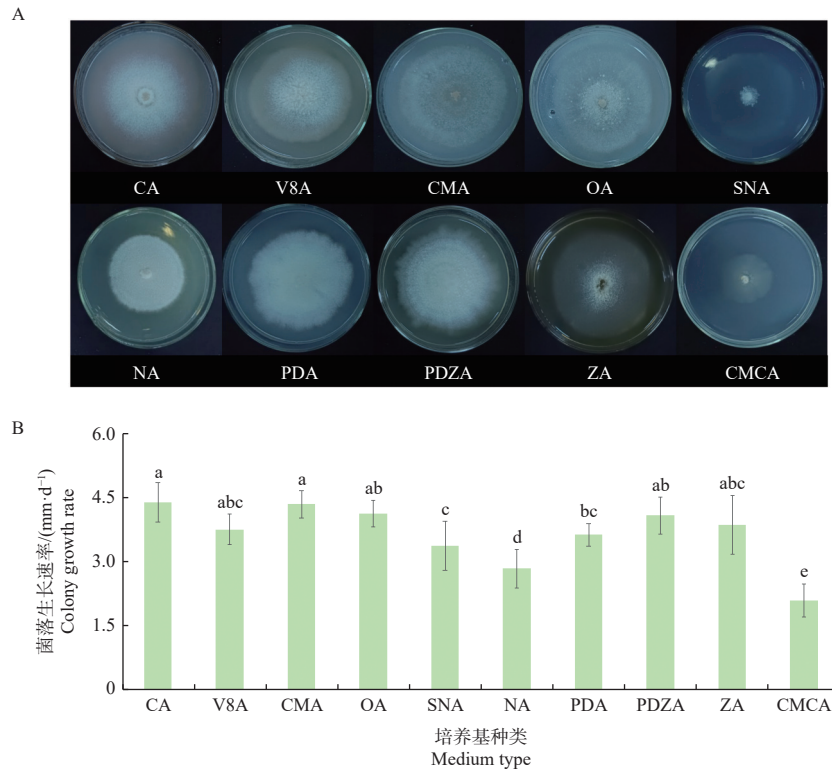


图 1 花椒镰刀菌在 10 种固体培养基上的菌落形态和生长速率

Fig. 1 Colony morphology and growth rate of *F. zanthoxyl* on ten solid media

注: A. 菌落形态(15 d); B. 菌落生长速率。不同小写字母表示差异显著, $P < 0.05$, 下同。

Notes: A. Colony morphology (15 d); B. Colony growth rate. Different lowercase letters indicated significant differences at a level of $P < 0.05$. The same as below.

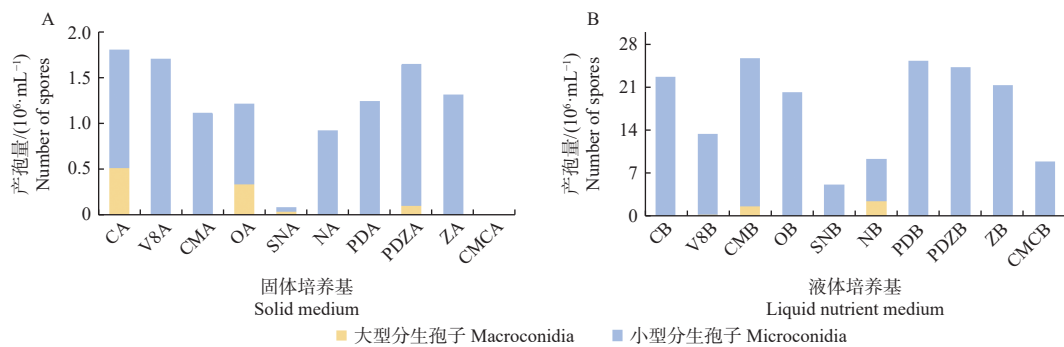


图 2 花椒镰刀菌在不同培养基上的产孢情况

Fig. 2 Sporulation of *F. zanthoxyl* on different type of media

注: A. 在不同固体培养基中的产孢量(15 d); B. 在不同液体培养基中的产孢量(15 d)。

Notes: A. Number of spores on different solid media (15 d); B. Number of spores of on different liquid media (15 d).

培养基中, 花椒镰刀菌产生大型分生孢子的占比分别为 2.3%、6.3% 和 20.0%, 其余均为小型分生孢子, 不产生厚垣孢子; 其余 7 种液体培养基中, 只产生小型分生孢子, 不产生大型分生孢子和厚垣孢子(图 2B)。

2.3 花椒镰刀菌的温度适应性分析

通过分析花椒镰刀菌在不同温度条件下的菌落生长情况, 发现在 25℃ 条件下菌落生长速率最快, 其

在 CA、V8A、PDZA 和 SNA 固体培养基平板上的菌落生长速率分别为 3.30、3.38、3.84 和 3.16 mm/d, 说明 25℃ 是 5 种温度条件中菌落生长的最适温度; 在 15、20 和 30℃ 条件下菌落生长速率较慢, 而在 35℃ 条件下菌落几乎不能生长(图 3A、B)。此外, 还发现在 15~30℃ 条件下, 花椒镰刀菌在 CB 液体培养基中产孢较多, 产孢量为 $0.5 \times 10^6 \sim 2.1 \times 10^6$ 个/mL(图 3C)。

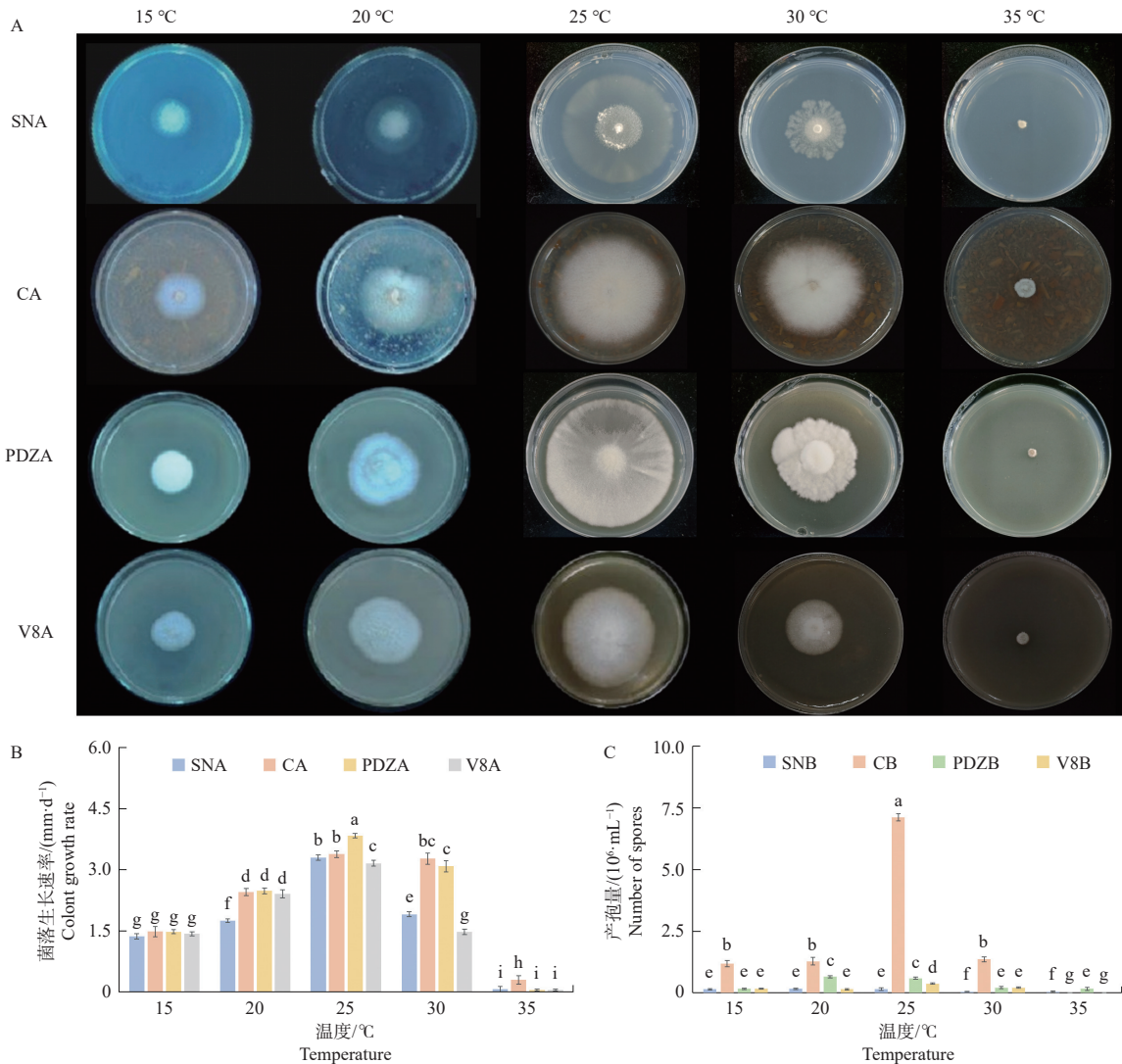


图 3 花椒镰刀菌在不同温度条件下的菌落生长情况

Fig. 3 Colony growth of *F. zanthoxyli* at different temperatures

注: A. 菌落形态(15 d); B. 菌落生长速率; C. 产孢量(15 d)。

Notes: A. Colony morphology (15 d); B. Colony growth rate; C. Number of spores (15 d).

2.4 花椒镰刀菌的光照适应性分析

通过分析花椒镰刀菌在不同光照条件下的菌落生长情况, 发现花椒镰刀菌在全明处理、全暗处理和光照与黑暗交替处理(12 h 光照/12 h 黑暗)3 种不同的光照处理下均能生长(图 4A)。在 SNA、CA、PDZA 固体培养基中, 花椒镰刀菌在 3 种光照条件下的菌落

生长速率并无显著差异, 生长速率为 4.13~4.53 mm/d(图 4B); 而在 V8A 固体培养基中, 花椒镰刀菌在全明处理和光照与黑暗交替处理 2 种光照条件下生长较慢, 菌落生长速率分别为 3.87 和 3.85 mm/d。在 3 种不同光照条件下, 花椒镰刀菌在 CB 液体培养基中的产孢量为 $3.53 \times 10^6 \sim 8.12 \times 10^6$ 个/mL, 均显著多于相同光照

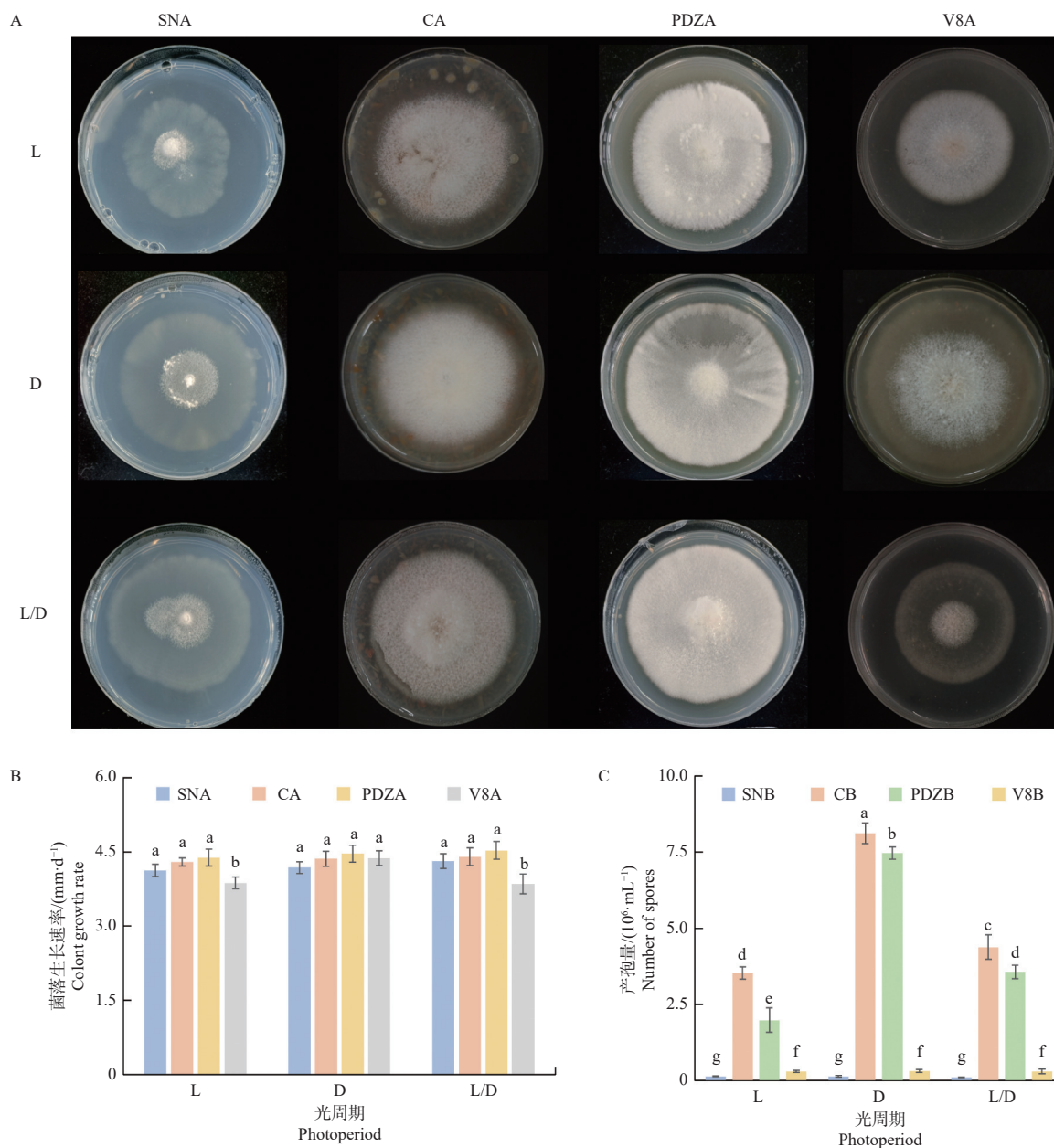


图4 花椒镰刀菌在不同光照条件下的菌落生长情况

Fig. 4 Colony growth of *F. zanthoxyl* at different lighting conditions

注: A. 菌落形态(15 d); B. 菌落生长速率; C. 产孢量。L: 全明处理; D: 全暗处理; L/D: 12 h 光照/12 h 黑暗。

Notes: A. Colony morphology (15 d); B. Colony growth rate; C. Number of spores. L stands for full light treatment; D. stands for full dark treatment; L/D stands for 12 h light and 12 h dark alternating treatment.

处理下在 SNB、PDZB 和 V8B 液体培养基中的产孢量; 花椒镰刀菌在 PDZB 液体培养基中的产孢量次之, 为 $1.98 \times 10^6 \sim 7.47 \times 10^6$ 个/mL, 而在 SNB 和 V8B 培养基中的产孢量较少, 仅为 $0.10 \times 10^6 \sim 0.31 \times 10^6$ 个/mL(图 4C)。

2.5 花椒镰刀菌室内杀菌剂筛选结果

供试的 17 种杀菌剂对花椒镰刀菌的菌落生长均表现出不同程度的抑制作用(表 1)。其中, 生物源杀菌剂中, 3% 多抗霉素 WP 抑菌作用最强, EC_{50} 值为 0.28 mg/L; 单一化学杀菌剂中, 50% 多菌灵 WP 的抑菌作用最强, 其 EC_{50} 值为 0.61 mg/L, 10% 苯醚甲环唑

WG 和 50% 甲基硫菌灵 SC 次之, 其 EC_{50} 值分别为 1.02 和 2.90 mg/L; 复配化学杀菌剂中, 72% 霜脲·锰锌 WP 和 30% 唑醚·戊唑醇 SC 的抑菌活性较强, 其 EC_{50} 值分别为 1.23 和 1.44 mg/L。

3 讨论

探明花椒镰刀菌的生物学特性对揭示其致病机理、预测流行规律以及制定精准防控策略具有重要意义。本研究中, 花椒镰刀菌在 CA、V8A、CMA、OA、PDZA 和 ZA 6 种“多碳源-高有机氮”的培养基上生

表1 供试杀菌剂对花椒镰刀菌的抑菌活性

Tab. 1 Antifungal activity of the tested fungicides against *F. zanthoxyli*

药剂 Fungicides	毒力回归方程 Toxicity equation	相关系数 Correlation coefficient	有效中浓度 EC ₅₀ /(mg·L ⁻¹)
3%多抗霉素可湿性粉剂3% Polyoxin WP	$y=1.810 4x+5.120 3$	0.989 3	0.28
5%香芹酚可溶性液剂5% Carvacrol SL	$y=1.650 8x+3.187 1$	0.954 7	12.28
0.4%蛇床子素可溶性液剂0.4% Osthole SL	$y=1.601 3x+2.552 4$	0.971 9	22.67
0.3%苦参碱乳油0.3% Matrine EC	$y=2.019 1x+1.846 4$	0.987 1	37.74
0.5%小檗碱悬浮剂0.5% Berberine SC	$y=2.313 7x+2.564 5$	0.981 8	83.74
50%多菌灵可湿性粉剂50% Carbendazim WP	$y=1.943 2x+5.420 4$	0.941 9	0.61
10%苯醚甲环唑水分散剂10% Difenconazole WG	$y=2.746 2x+3.886 7$	0.959 4	1.02
50%甲基硫菌灵悬浮剂50% Thiophanate-methyl SC	$y=2.470 3x+4.416 0$	0.998 4	2.90
25%腈菌唑乳油25% Myclobutanil EC	$y=1.730 7x+3.031 0$	0.998 0	9.56
25%吡唑醚菌酯悬浮剂25% Pyraclostrobin SC	$y=1.653 8x+3.074 1$	0.984 3	10.87
29%石硫合剂水剂29% Lime sulfur AS	$y=1.624 0x+3.120 8$	0.971 2	11.07
72%霜脲·锰锌可湿性粉剂72% Cymoxanil·Mancozeb WP	$y=2.154 8x+4.550 1$	0.993 4	1.23
30%唑醚·戊唑醇悬浮剂30% Pyraclostrobin Tebuconazole SC	$y=2.187 8x+4.012 5$	0.988 4	1.44
30%戊唑·多菌灵悬浮剂30% Tebuconazole Carbendazim SC	$y=1.817 9x+2.676 0$	0.967 0	4.55
40%唑醚·甲硫灵悬浮剂40% Pyraclostrobin Thiophanate-Methyl SC	$y=1.736 7x+3.016 3$	0.996 5	7.78
6%丙唑·多菌灵悬浮剂6% Prothioconazole Carbendazim SC	$y=1.754 2x+3.047 6$	0.974 5	8.08
12%腈菌·三唑酮乳油12% Myclobutanil Triadimefon EC	$y=1.603 7x+2.206 4$	0.967 0	42.46

长较快,在CA培养基上生长速率最快,产孢量最多。花椒枝干韧皮部及木质部汁液恰好富含可溶性糖、多糖以及高浓度游离氨基酸和可溶性蛋白,可为病菌提供充足的碳源和氮源,促进菌丝扩展与早期定殖。由此可见,花椒镰刀菌的营养偏好可能是其成功定殖并引发病害的重要生态适应特征。在对温度的适应性方面,花椒镰刀菌的最适生长温度为25℃,与尖孢镰刀菌 *F. oxysporum* Schlecht.和茄病镰刀菌 *F. solani* (Mart.) Sacc.的适宜生长温度基本一致 (Somesh et al., 2019; Ramesha et al., 2019),该结果与寄主花椒枝条在5—7月平均气温22~26℃的田间发病高峰期高度吻合,表明温度是决定病害季节性流行的关键环境因素。不同镰刀菌对温度的适应性较为一致,但对光照的响应存在一定差异,如银杏内生镰刀菌 *Fusarium* sp. GI115在不同的光照处理下菌落生长未表现出显著差异 (陈凤美等, 2006),而木贼镰刀菌 *F. equiseti* (Corda) Sacc.在光照条件下菌落生长速度较快 (尚余平等, 2024);而本研究中,全明处理、全暗处理和光照与黑暗交替处理对花椒镰刀菌菌落生长速率的影响不显著,其中全暗处理最有利于花椒镰刀菌产孢,说明花椒镰刀菌在阴暗条件下生长能力最强,易在树冠内部无光或弱光环境下定殖。

通过开展杀菌剂对病原物的室内毒力测定,能够有针对性地筛选植物病原物的高敏感杀菌剂,为植物病害的田间防治提供用药方面的科学指导。目前,关于由花椒镰刀菌引起的花椒干腐病的防治研

究尚未见报道,针对尖孢镰刀菌的防治药剂筛选报道较多。例如,如腈菌酯·戊唑醇在412.5 μg/mL浓度下对尖孢镰刀菌番茄专化型 *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici* (FOL)的抑制效果最佳 (Devi et al., 2021);700 μg/mL的多菌灵对巴基斯坦辣椒镰刀菌枯萎病病原尖孢镰刀菌辣椒专化型 *F. oxysporum* f. sp. *capsici*的抑菌活性最强 (Bashir et al., 2018);甲基硫菌灵和苯醚甲环唑对尖孢镰刀菌也表现出较强的抑菌效果 (Shah et al., 2014; Xu et al., 2025)。其他镰刀菌,例如花椒根腐病菌 *F. solani* (Mart.) Sacc.对50%多菌灵WP表现出较强的敏感性 (阮钊等, 2022),对禾谷镰刀菌 *F. graminearum* Schwabe的抑菌活性较强的主要为三唑类杀菌剂 (Autunes de Chaves et al., 2022)。本研究测定的17种杀菌剂对病原菌的生长均有抑制作用,50%多菌灵WP、10%苯醚甲环唑WG、72%霜脲·锰锌WP、30%唑醚·戊唑醇SC以及50%甲基硫菌灵SC对花椒镰刀菌的生长均表现出显著的抑菌活性,与文献报道的镰刀菌属的高敏感性杀菌剂基本一致。此外,本研究还发现,生物源杀菌剂中的3%多抗霉素WP对花椒镰刀菌表现出显著的抑菌活性。然而,农药制剂中的表面活性剂、稳定剂等助剂可能通过自身抑菌作用或促渗效应干扰毒力测定,导致表观EC₅₀偏离原药真实毒力。因此,本研究得到的EC₅₀仅反映制剂在室内条件下的总体抑菌效果,而非纯有效成分的真实毒力。基于该研究,后续可以改用原药或增设空白助剂对照,明确助剂干扰程度,并进

一步在温室或田间条件下验证其实际防效, 从而为花椒干腐病防控提供科学依据。

4 结论

本研究通过分析花椒镰刀菌在不同培养基、不同温度及不同光照处理下的菌落生长和产孢情况, 发现胡萝卜固体培养基(CA)最有利于花椒镰刀菌的菌落生长和产孢, 尤其是对大型分生孢子的形成具有积极作用。其菌落生长和产孢的最佳温度为25℃, 全暗处理有利于花椒镰刀菌的产孢; 3%多抗霉素WP、50%多菌灵WP和10%苯醚甲环唑WG对花椒镰刀菌的室内抑菌效果最为显著。本研究可为深入研究花椒干腐病的发生规律及开展田间防治工作提供参考。

参 考 文 献

- 曹支敏, 梁英梅, 马晓. 1992. 花椒干腐病研究[J]. 植物保护学报, 19(4): 316, 330.
- Cao Z M, Liang Y M, Ma X. 1992. Studies on dry rot of prickly ash[J]. Journal of Plant Protection, 19(4): 316, 330. (in Chinese)
- 曹支敏, 田呈明, 梁英梅. 1990. 花椒六种叶部病害[J]. 森林病虫害通讯, 9(2): 9.
- Cao Z M, Tian C M, Liang Y M. 1990. Six leaf diseases of *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Forest Pest and Disease, 9(2): 9. (in Chinese)
- 曹支敏, 田呈明, 梁英梅, 等. 1994. 陕甘两省花椒病害调查[J]. 西北林学院学报, 9(2): 39-43, 54.
- Cao Z M, Tian C M, Liang Y M, et al. 1994. Investigation of diseases of prickly ash in Shaanxi and Gansu provinces[J]. Journal of Northwest Forestry University, 9(2): 39-43, 54. (in Chinese)
- 陈凤美, 冯友建, 曹小迎, 等. 2006. 银杏内生镰刀菌 G1115 的生物学特性[J]. 江苏农业科学, 34(6): 149-151.
- Chen F M, Feng Y J, Cao X Y, et al. 2006. Biological characteristics of endophytic *Fusarium* sp. G1115 in *Ginkgo biloba*[J]. Jiangsu Agricultural Science, 34(6): 149-151. (in Chinese)
- 刘丙花, 丁延芹, 刘方春, 等. 2024. 一株高产胞外多糖巨大芽孢杆菌的筛选鉴定、发酵条件优化及其对土壤团聚体的影响[J]. 微生物学报, 64(10): 3968-3979.
- Liu B H, Ding Y Q, Liu F C, et al. 2024. Screening, identification, fermentation condition optimization of an exopolysaccharide-producing strain and the influence on soil macro-aggregate formation[J]. Acta Microbiologica Sinica, 64(10): 3968-3979. (in Chinese)
- 阮钊, 丁俊园, 唐光辉, 等. 2022. 花椒根腐病的病原鉴定与防治药剂筛选[J]. 植物病理学报, 52(4): 630-637.
- Ruan Z, Ding J Y, Tang G H, et al. 2022. Pathogen identification of root rot of *Zanthoxylum bungeanum* and screening of fungicides[J]. Acta Phytopathologica Sinica, 52(4): 630-637. (in Chinese)
- 尚余平, 王一唯, 王冠, 等. 2024. 转录组揭示禾谷镰刀菌酸碱胁迫条件下的基因表达模式[J]. 微生物学报, 64(11): 4271-4289.
- Shang Y P, Wang Y W, Wang G, et al. 2024. Transcriptomics reveals gene expression patterns of *Fusarium graminearum* under pH stress[J]. Acta Microbiologica Sinica, 64(11): 4271-4289. (in Chinese)
- 王斌, 何静, 王秀娟, 等. 2018. 不同杀菌剂对花椒流胶病菌的室内毒力测定[J]. 甘肃农业大学学报, 53(5): 87-92.
- Wang B, He J, Wang X J, et al. 2018. Toxicity test on different fungicides against prickly ash gummosis in vitro[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 53(5): 87-92. (in Chinese)
- Antunes de Chaves M, Reginatto P, da Costa B S, et al. 2022. Fungicide resistance in *Fusarium graminearum* species complex[J]. Current Microbiology, 79(2): 62.
- Bao Y C, Yang L, Fu Q W, et al. 2023. The current situation of *Zanthoxylum bungeanum* industry and the research and application prospect. A review[J]. Fitoterapia, 164: 105380.
- Bashir M R, Atiq M, Sajid M, et al. 2018. Antifungal exploitation of fungicides against *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* causing *Fusarium* wilt of chilli pepper in Pakistan[J]. Environmental Science and Pollution Research, 25(7): 6797-6801.
- Devi N G, Sandhya D D, Lakshmi S, et al. 2021. Efficacy evaluation of chemical fungicides against *Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici* (FOL)[J]. International Journal of Botany Studies, 6(6): 1098-1103.
- Krishna V P, Suryawanshi A P, Prajapati S, et al. 2018. Effect of different culture media on growth and sporulation of *Alternaria dauci* causing carrot leaf blight[J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 7(6): 1789-1792.
- Li X, Fu L H. 2020. Fungal spore aerosolization at different positions of a growing colony blown by Airflow[J]. Aerosol and Air Quality Research, 20: 2826-2833.
- Ramesha V, Naik L K, Raj N D. 2019. Effect of physiological parameters on the growth of *Fusarium* sp[J]. The Pharma Innovation Journal, 8(1): 492-495.
- Shah N, Syed R N, Khanzada A M, et al. 2014. Influence of different inoculation methods and fungicides on the pathogenicity of *Fusarium oxysporum* on *Abelmoschus esculentus* L.[J]. Forensic Science International, 26(5): 2303-2308.
- Somesh, Singh N, Behera L, et al. 2019. Effect of temperature and pH on growth and sporulation of *Fusarium oxysporum* f. sp. *lini* (Bolley) Snyder & Hansen causing linseed wilt under environmental conditions[J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 8(2): 1427-1430.
- Thomas M K, Naik B G. 2017. Evaluation of different culture media, fungicides and bio control agents on the growth of *Phytophthora capsici* Leonian. Causing foot rot of black pepper in vitro[J]. Chemical Science Review and Letters, 6(21): 279-286.
- Xu D F, Wang K, Li T C, et al. 2025. In vitro activity of seven antifungal agents against *Fusarium oxysporum* and expression of related regulatory genes[J]. PLoS One. 20(4): e0322206.
- Zhang G Y, Dong Y J. 2022. Design and application of an efficient cellulose-degrading microbial consortium and carboxymethyl cellulase production optimization[J]. Frontiers in Microbiology, 13: 957444.
- Zhang X X, Zhou X Q, Xi Z Y, et al. 2020. Surfactant-assisted enzymatic extraction of the flavor compounds from *Zanthoxylum bungeanum*[J]. Separation Science and Technology, 55(9): 1667-1676.
- Zhou X, O'Donnell K, Aoki T, et al. 2016. Two novel *Fusarium* species that cause canker disease of prickly ash (*Zanthoxylum bungeanum*) in northern China form a novel clade with *Fusarium torreyae*[J]. Mycologia, 108(4): 668-681.