

· 研究论文 ·

doi: 10.16801/j.issn.1008-7303.2022.0122

6-戊基-2H-吡喃-2-酮对草坪币斑病菌的 抑菌活性及其对病害的防治效果

刘曼, 牛启尘, 尹淑霞*, 王子玥

(北京林业大学 草业与草原学院, 北京 100083)

摘要: 由 *Clariireedia* spp.引起的草坪币斑病是对草坪最具有破坏性的病害之一, 6-戊基-2H-吡喃(6-pentyl-2H-pyran-2-one, 6PP)是木霉菌属(*Trichoderma* spp.)重要的抗菌次生代谢产物。为探究6PP对草坪币斑病菌的抑菌活性、防治效果以及草坪币斑病菌对6PP的生理响应,本研究采用菌丝生长速率法测定了6PP对草坪币斑病菌的抑制活性,分别采用室内离体叶片和盆栽试验测定了6PP对草坪币斑病的预防和治疗作用,并分析了在6PP影响下草坪币斑病菌菌丝结构及抗逆相关酶活性的变化。结果显示,6PP对两种草坪币斑病菌 *C. jacksonii* 和 *C. monteithiana* 均具有高抑制活性,其中对 *C. monteithiana* 的平均有效抑制中浓度(EC_{50})为0.37 $\mu\text{g/mL}$,对 *C. jacksonii* 的 EC_{50} 值为0.04 $\mu\text{g/mL}$;经6PP处理后, *C. jacksonii* 和 *C. monteithiana* 菌丝生长异常,细胞膜通透性增加,相对电导率上升,细胞膜脂过氧化,细胞膜受损; *C. jacksonii* 过氧化物酶(POD)的活性显著上升,但pH值不变,而 *C. monteithiana* 超氧化物歧化酶(SOD)活性、pH值和胞外多糖(EPS)显著上升。1 $\mu\text{g/mL}$ 的6PP在离体条件下对币斑病的预防效果为91.14%;盆栽条件下,防治效果为72.21%。6PP对草坪币斑病菌抑制作用显著,且在离体和盆栽条件下对病害均有良好的防治效果,具备开发成生态友好型杀菌剂的潜力。

关键词: 草坪币斑病菌; 6-戊基-2H-吡喃; 抑菌活性; 草坪币斑病; 防治效果; 病原生理响应
中图分类号: S482.7; TQ458 文献标志码: A

Inhibitory activity of 6-pentyl-2H-pyran-2-one against the pathogenesis fungi of dollar spot and its control efficacy

LIU Man, NIU Qichen, YIN Shuxia*, WANG Ziyue
(School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Turf dollar spot, caused by *Clariireedia* spp., is one of the most destructive fungal diseases on turf. 6-Pentyl-2H-pyran-2-one (6PP) is a critical antifungal secondary metabolite produced by *Trichoderma* spp. In order to explore the antifungal activity of 6PP against *Clariireedia* spp. and its control efficacy to Turf dollar spot, the inhibition activity of 6PP on *Clariireedia* spp. was measured by

收稿日期: 2022-03-18; 录用日期: 2022-10-11; 网络首发日期: 2022-10-14.

Received: March 18, 2022; Accepted: October 11, 2022; Published online: October 14, 2022.

URL: <https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2022.0122>

<http://www.nyxxb.cn/cn/article/doi/10.16801/j.issn.1008-7303.2022.0122>

基金项目: 国家林业和草原局委托项目(2021045001); 国家自然科学基金(U20A2005).

Funding: Supported by Project Entrusted by the State Forestry and Grassland Administration (2021045001); National Natural Science Foundation of China (U20A2005).

第一作者(First author): 刘曼, 18734484602@163.com. *通信作者(Corresponding author): 尹淑霞, yinsx369@163.com.

The authors declare that they have no competing interests.



mycelial growth rate method, and the protective and curative activities of 6PP against the disease was measured on detached leaves and potted plants. The changes in mycelial structure and activities of stress resistance related enzyme of the pathogens under 6PP treatment were analyzed. The results showed that 6PP had efficient inhibition activity on *C. jacksonii* and *C. monteithiana*. The average effective inhibitory medium concentration (EC_{50}) of 6PP to *C. monteithiana* was 0.37 $\mu\text{g/mL}$, and the average EC_{50} value to *C. jacksonii* was 0.04 $\mu\text{g/mL}$. After being treated with 6PP, mycelial of both *C. jacksonii* and *C. monteithiana* grew abnormally, cell membrane permeability and relative conductivity as well as peroxidated cell membrane increased. The peroxidase (POD) activity of *C. jacksonii* increased significantly although its pH remained unchanged, while the superoxide dismutase (SOD) activity, pH and exopolysaccharides (EPS) of *C. monteithiana* increased significantly. The preventive effects of 1 $\mu\text{g/mL}$ 6PP on dollar spot were 91.14% *in vitro* and 72.21% in pots. 6PP has a significant inhibitory effect on Turf dollar spot and has a good control efficacy on the disease *in vitro* and in pots. The study revealed the potential of 6PP to be an eco-friendly fungicide preventing Turf dollar spot.

Keywords: *Clariireedia* spp.; 6-pentyl-2H-pyran-2-one; antifungal activity; Turf dollar spot; control efficacy; pathogen physiological response

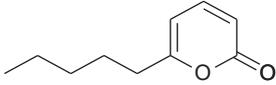
草坪币斑病是温带地区精细化养护草坪上最严重的真菌性病害之一。研究显示, 草坪币斑病的致病菌为 *Clariireedia* 属真菌, 共有 6 个种, 其中 *C. jacksonii* 和 *C. monteithiana* 在世界范围内分布广泛, 其寄主范围广, 几乎能侵染所有的草坪草^[1-2]。

近年来, 广泛使用多菌灵、二甲酰亚胺、脱甲基抑制剂 (DMI) 和琥珀酸脱氢酶抑制剂 (SDHI) 等化学杀菌剂保护草坪草免受草坪币斑病菌侵害, 但已有文献表明, 币斑病菌株对上述杀菌剂均产生了不同程度的抗性^[3-5]。此外, 化学杀菌剂可能通过地表径流和土壤入渗进入地下水, 对环境、动物以及人类健康产生危害^[6-7], 因此亟需开发绿色、安全、高效的新型杀菌剂防治草坪币斑病。

自 20 世纪 30 年代以来, 木霉菌 *Trichoderma* spp. 以其优良的抑菌效果引起了研究学者们的广泛关注^[8-10]。木霉菌具有对环境友好、病菌不易产生抗药性等优点, 但在实际生产应用中易受立地条件影响, 导致田间防治时存在防治效果不稳定的问题^[11-12]。木霉菌次生代谢物与木霉菌的生物活性功能密切相关^[13-14]。研究表明, 木霉菌代谢产物可以激活葡萄藤对霜霉病病原菌 *Plasmopara viticola* 的防御机制^[15]。康宁木霉 *T. koningii* 和哈茨木霉 *T. harzianum* 产生的哈茨酮内酯具有抗真菌活性和调节植物生长的双重作用^[16]。木霉菌产

生的可溶性代谢物对由 *Colletotrichum falcatum* 引起的甘蔗红腐病表现出良好的生防效果, 且在大田条件下防治效果依然高效稳定^[17]。使用人工合成或提取的木霉菌抑菌代谢物代替木霉菌防治植物病害, 可以减少活体微生物在田间使用过程中出现的效果不稳定的问题, 同时兼具利用木霉菌活体生物防治病害的优势。

6-戊基-2H-吡喃-2-酮 (6-pentyl-2H-pyran-2-one, 以下简称 6PP, 结构式见图式 1) 于 1972 年在绿色木霉 *T. viride* 中首次发现并分离提纯。它是一种无毒的、具有椰子香味的不饱和内酯, 能从多种木霉菌的培养物中分离得到, 包括橘绿木霉 *T. citrinoviride*、哈茨木霉、康宁木霉、深绿木霉 *T. atroviride* 和绿色木霉 *T. viride*。6PP 具有广谱性抗真菌活性, 对菜豆大斑病菌 *Macrophomina phaseolina*、立枯丝核菌 *Rhizoctonia solani*、罗氏菌核 *Sclerotium rolfsii*、尖孢镰刀菌 *Fusarium oxysporum*、辣椒疫霉 *Phytophthora capsica* 和甜瓜疫霉 *P. melonis* 具有良好的抑菌作用, 极具应用潜力^[18-21]。目前尚未见有关利用 6PP 防治草坪币斑病的相关报道, 其抑菌活性、防治效果和机理有待验证和探索。本文研究了 6PP 对 2 种草坪币斑病菌的抑菌活性和防治效果, 并通过一系列生理生化指标的测定, 探究 6PP 对草坪币斑病菌的抑菌活性以及对病害的防治效果, 旨在为草坪币斑病的低毒科学防治提供参考。



图式 1 6-戊基-2H-吡喃-2-酮结构式

Scheme 1 Structural formula of 6-pentyl-2H-pyran-2-one

1 材料与amp;方法

1.1 供试材料

供试菌株来自北京林业大学草地保护实验室, 菌株编号为 N8、N13、N14、N18、73 和 112, 其中 N8、73、112 为 *Clariireedia jacksonii*, N13、N14、N18 为 *C. monteithiana*; 供试草坪草为匍匐翦股颖 A4 *Agrostis stolonifera* L. 'A4'。基本培养基 (MM): 10 g 葡萄糖、1.5 g K_2HPO_4 、2 g KH_2PO_4 、1 g $(NH_4)_2SO_4$ 、0.5 g $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 、2 g 酵母提取物、15 g 琼脂粉加去离子水定容到 1 L, 灭菌; 马铃薯葡萄糖液体培养基 (PDB): 20 g 葡萄糖、6 g 马铃薯浸粉加去离子水定容到 1 L, 灭菌。6PP 购自北京迈瑞达科技有限公司, 纯度为 97%。

1.2 仪器

DZF-6020MBE 真空干燥箱 (上海博讯有限公司); DL-CJ-2ND I 型超净工作台 (北京东联哈尔滨仪器制造有限公司); SX700 高压灭菌锅 (天美科学仪器有限公司); SPX 型智能生化培养箱 (宁波江南仪器厂); DDSJ-318 型电导率仪 (北京扬海伟业科技公司); FE28 pH 计 (大连贝尔分析仪器有限公司); 岛津 UV-2600i 型紫外分光光度计 (上海滴冠有限公司); Multifuge X1R 型高速冷冻离心机 (赛默飞世尔科技有限公司); ECLIPSE E100 型电子显微镜 (南京江南永新光学有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 菌株的鉴定 参照 Hu 等^[22]的方法, 将 6 株供试菌株在 MM 平板上于 25 °C 下黑暗培养 3 d 后, 刮取菌丝, 使用 OMEGA 真菌 DNA 提取试剂盒 (百迈客生物科技有限公司) 提取病原菌 DNA。随后利用真菌通用正向引物 ITS-1(5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') 和反向引物 ITS-4(5'-AACTTGCAATGTGG-3') 对币斑病菌的 ITS 基因进行扩增和测序, 将测序结果进行拼接后, 于 NCBI (National Center for Biotechnology Information) 上进行 BLAST 序列相似性搜索。利用 MEGA7.0 软件和基于 1000 次重复的引导值构建系统发育树。标准菌株编号及其参考文献见附加材料表 S1。

1.3.2 6PP 对菌株的抑制效率 采用菌丝生长速率法^[23]测定 6PP 对 6 株病菌的有效抑制中浓度 (EC_{50})。菌株在 MM 培养基上预培养 3 d 后, 在菌落边缘取直径 6 mm 的菌饼, 分别接种到最终质量浓度为 0、0.025、0.05、0.075、0.1、0.125、0.15、0.175、0.2、0.225、0.25 和 0.275 $\mu g/mL$ 6PP 的 MM 平板上, 接菌后将平板置于 25 °C 黑暗条件下培养, 以不含 6PP 的平板为对照。对照组菌落直径超过培养皿直径 2/3 时, 采用十字交叉法测量各处理的菌落直径, 计算 6PP 对币斑病菌菌丝生长的抑制率, 求出毒力回归方程。每个浓度重复 3 次, 试验重复 2 次。

1.3.3 6PP 对币斑病菌菌丝形态的影响 在培养 2 d 的菌落 (菌株 N8 和 N18) 的边缘取菌饼转移到含有 0.075 $\mu g/mL$ 6PP 的 MM 培养基上, 以不含 6PP 的培养基为对照。在 25 °C 下培养 3 d 后, 取适量菌丝在光学显微镜下观察菌丝形态。每个菌株设 3 个重复, 试验重复 2 次。

1.3.4 免疫组织化学染色 币斑病菌 N8 和 N18 用于对活性氧 (ROS)、过氧化氢 (H_2O_2) 进行染色, 参照 Mojicak 等^[24]方法。Tris-HCl 缓冲液 (0.1 mol/L, pH = 7.6)、质量浓度为 0.3% 的氯化钴 ($CoCl_2$) 按照体积比 9 : 1 混合, 将不同处理的菌丝浸泡在 3 mL 1 mg/mL 的 3,3'-二氨基联苯胺 (3,3'-diaminobenzidine) 染液中, 显色时加入 5~10 mL 30% H_2O_2 , 染色 8 h 后, 将菌丝浸泡在无水乙醇中脱色 12 h, 光学显微镜下观察染色后的菌丝。

1.3.5 6PP 对币斑病菌细胞膜通透性的影响 参照 Duan 等^[25]的方法, 将币斑病菌 N8、N18 接种于 MM 上, 25 °C 培养 3 d 后, 打取 5 个直径 6 mm 的菌饼, 接种于含有 100 mL PDB 的 250 mL 摇菌瓶中, 于 25 °C、175 r/min 恒温摇床上摇培 36 h 后, 处理组添加 0.075 $\mu g/mL$ 的 6PP, 对照组添加等量的无菌水, 继续培养 36 h。于 5000 r/min 下离心 10 min 后收集菌丝, 上清液备用。称取菌丝 0.3 g, 悬浮于 20 mL 的无菌水中, 分别在 0、5、10、20、40、60、80、100、120、140、160 和 180 min 时使用电导率仪测定溶液的电导率。之后将溶液煮沸 5 min, 并测定最终的电导率。每个菌株设 3 个重复, 试验重复 2 次。按照公式 (1) 计算菌体的相对电导率。

$$R_C/\% = \frac{R_1}{R_2} \times 100 \quad (1)$$

式中: R_C 为相对电导率, %; R_1 为某时间的

电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$; R_2 为再放入恒温水浴中加热 5 min, 取出冷却至室温后再测定的电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.3.6 6PP 对币斑病菌 pH 值的影响 按照 1.3.5 节方法培养草坪币斑病菌 N8 和 N18, 打取 5 个直径 6 mm 的菌饼, 接种于含有 100 mL PDB 的 250 mL 摇菌瓶中, 于 25 °C、175 r/min 恒温摇床上摇培 36 h 后, 处理组添加 0.075 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 6PP, 对照组添加等量的无菌水, 继续培养 36 h。于 10000 r/min 下离心 10 min, 收集上清液, 测定菌液 pH 值。每个菌株设 3 个重复, 试验重复 2 次。

1.3.7 币斑病菌胞外多糖 (EPS) 含量测定 参照文献方法测定^[26]。取 1 mL 上清液 (同 1.3.5 节) 至 5 mL 无菌离心管中, 加入 3 倍体积的无水乙醇, 于 10000 r/min 下离心 60 min, 弃去无水乙醇, 将沉淀物在 60 °C 真空下干燥 60 min, 之后溶解于 8 mL 无菌水中, 水解后取 2 mL 溶液, 加入 1 mL 5% 苯酚溶液和 5 mL 浓硫酸, 涡旋 10 s 后在 25 °C 放置 30 min, 在 490 nm 处测量溶液的吸光值, 并用葡萄糖标准曲线定量。以无菌水为对照。每处理设 3 个重复, 试验重复 2 次。

1.3.8 丙二醛 (MDA) 含量测定 采用硫代巴比妥酸法^[27]测定。按照 1.3.5 节方法处理并收集菌丝。将菌丝与 Tris-HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH = 7.5) 按体积比 1 : 5 研磨均质化, 于 15000 r/min 下冷冻离心 20 min。以 2 mL 上清液和 2 mL 0.5% 硫代巴比妥酸为反应液, 混匀后将试管放入沸水中煮 10 min, 冷却后以 5000 r/min 离心 10 min。以 0.5% 硫代巴比妥酸溶液为对照组, 分别于波长 532、600 和 450 nm 处测量吸光度值, 计算 MDA 含量。每处理设 3 个重复, 试验重复 2 次。

1.3.9 币斑病菌对 6PP 的生理响应 按照 1.3.5 节方法收集菌丝, 称取 0.5 g 菌丝于预冷的研钵中, 加入 1 mL 预冷 0.05 mol/L 磷酸缓冲液 (pH = 7.8), 于 12000 r/min 下离心 10 min, 上清液用于过氧化物酶活性 (POD) 和超氧化物歧化酶 (SOD) 的测定。采用愈创木酚法^[28]测定 POD 活性, 以每分钟内 A_{470} 变化 0.01 为 1 个过氧化物酶活性单位 (U)。采用氮蓝四唑 (NBT) 光还原法^[29]测定 SOD 活性, 以抑制 NBT 光化还原的 50% 为 SOD 酶的一个活力单位 (U)。

1.3.10 6PP 对草坪离体叶片币斑病的防治作用

采用离体叶片法测定 6PP 对草坪币斑病的预防和治疗作用^[30]。

预防作用测定: 选取位于同一位置, 大小相仿, 健康且展开的草坪叶片作为试验试材, 将具有相似长度 (7 cm) 的叶片切下并放在无菌培养皿 (直径 9 cm) 中被无菌水完全浸湿的定性滤纸上。将 6PP 用 0.1% 的吐温 20 稀释, 药液的最终质量浓度为 0、0.1、0.5 和 1 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 喷洒到叶片表面, 直到液体在叶片表面自由流动。24 h 后, 将 5 mm 币斑病菌的菌饼 (菌株 N8 和 N18) 放置在叶片表面 (每片叶一个菌饼), 用封口膜密封并放置于光照培养箱 (25 °C、光照 16 h、湿度 80%)。2 d 后, 十字交叉法测量叶片上病斑的直径。

治疗作用测定: 先用币斑病菌 N8 和 N18 接种叶片, 接种方法、培养条件同预防作用, 在接种 24 h 后喷施最终质量浓度分别为 0、0.5 和 2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 6PP 药液。2 d 后测量病变长度, 并按照公式 (2) 计算防治效果 (E)。每处理使用 10 片叶。

$$E/\% = \frac{L_1 - L_2}{L_1} \times 100 \quad (2)$$

式中: L_1 为对照的病变长度, cm; L_2 为 6PP 处理的病变长度, cm。结果为 10 个重复的平均值 \pm 标准差。

1.3.11 6PP 对草坪植株的防治效果 选择生长状况大致相同的健壮草坪植株, 测定 6PP 对草坪币斑病的预防和治疗作用。

预防作用测定: 分别用 0.25、0.5 和 1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 6PP 进行整株喷雾处理, 每株喷施 2 mL, 叶面均匀挂满雾滴不流淌即可, 诱导处理 24 h 后, 将草坪币斑病菌 N8 和 N18 的 1 个菌饼 (10 mm) 分别接种到经过 6PP 处理过的草坪上, 并放置于光照培养箱 (25 °C、光照 16 h、湿度 80%), 培养 7 d 后, 统计病情指数。以此接种点为中心调查周围的 100 枚叶片。以无菌水只接菌为对照, 每个处理 4 株, 重复 3 次。

治疗作用测定: 先用币斑病菌 N8 和 N18 接种草坪植株, 接种方法、培养条件同预防作用, 在接种 24 h 后喷施最终浓度分别为 0、0.5、1 和 2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 6PP 药液。7 d 后测量病变长度, 并计算防治效果。按公式 (3) 计算病情指数 (D_1)。

$$D_1 = \frac{\sum(N_i \times i)}{(N_t \times 9)} \times 100 \quad (3)$$

式中: N_i 为各级病株数; i 为相应的级数值; N_t 为调查总株数。

1.4 统计分析

通过 SPSS16.0 软件对试验数据进行统计分

析, 应用 Duncan 氏新复极差法进行差异显著性检验, 采用 prism9.0 软件 (GraphPad 公司) 进行数据处理和图形制作。

2 结果与分析

2.1 菌株鉴定

根据系统发育关系, 6 株菌株划分为 2 个种, 其中 N8、112、73 菌株为 *C. jacksonii*, N18、N13、N14 菌株为 *C. monteithiana*。供试菌株与币斑病菌模式菌株 (Type strain) 的同源性均达到了 98% 以上 (图 1)。

2.2 6PP 对币斑病菌抑制效果

6PP 对各菌株菌丝的生长具有抑制作用 (图 2-A), 较高质量浓度的 6PP ($> 0.2 \mu\text{g/mL}$) 有效抑制

了 *C. monteithiana* 3 株菌株菌丝的生长, 径向生长抑制率为 60.72%、85.20% 和 97.71%, 并完全抑制了 *C. jacksonii* 3 株菌株菌丝的生长, 径向生长抑制率为 100%。6PP 对 *C. jacksonii* 的抑菌效果较好, 在较低质量浓度 ($0.05 \mu\text{g/mL}$) 时, 对 N8、73 和 112 的抑制率分别达到 80.40%、99.50% 和 97.77%, 对 *C. monteithiana* 的 N13、N14 和 N18 的抑制率分别是 20.10%、19.80% 和 32.72% (图 2-B)。6PP 对 *C. jacksonii* 的 EC_{50} 值显著低于 *C. monteithiana* ($P < 0.05$), 其中 6PP 对 *C. monteithiana* 3 株菌株的平均 EC_{50} 值为 $0.37 \mu\text{g/mL}$, 对 *C. jacksonii* 3 株菌株的平均 EC_{50} 值为 $0.04 \mu\text{g/mL}$ (表 1)。

2.3 6PP 对平板培养条件下币斑病菌菌丝形态的影响

菌株 N8 和 N18 的对照组菌丝呈现出完整、

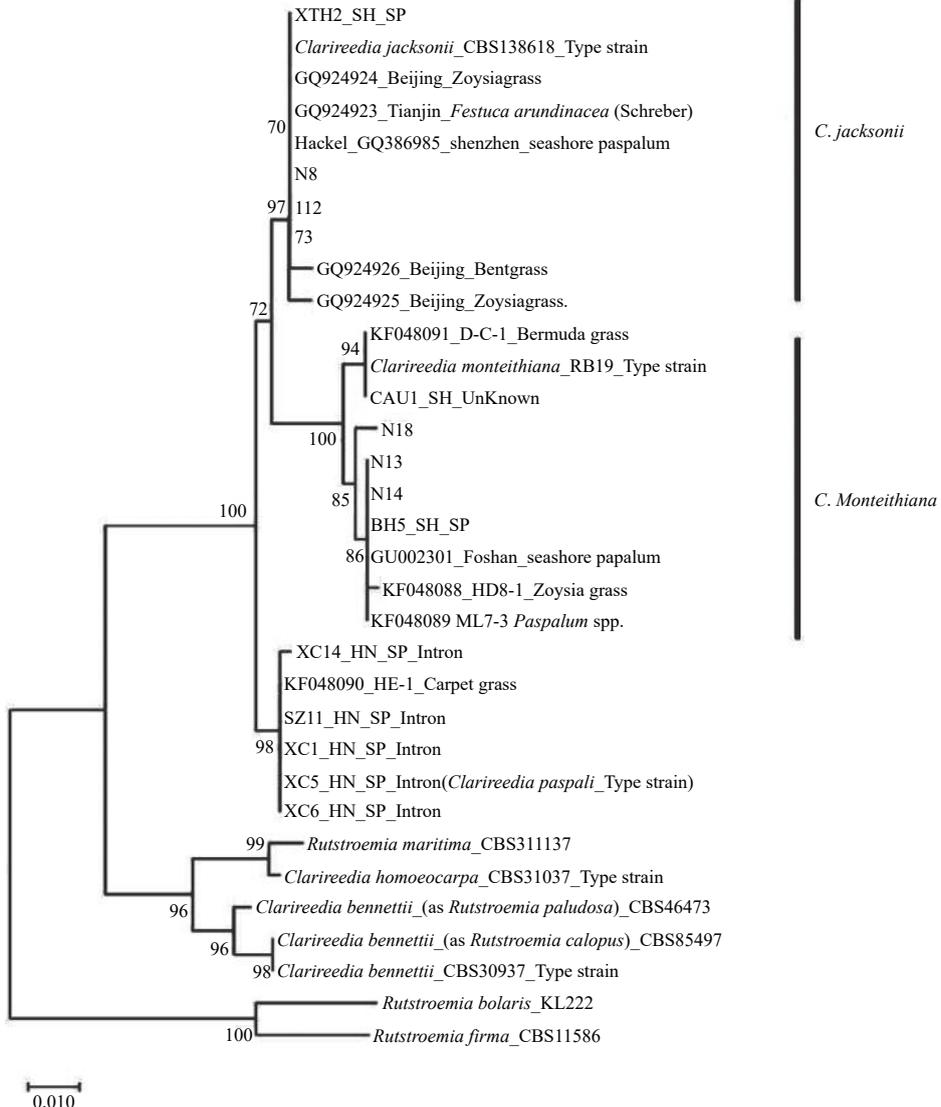


图 1 基于 ITS-rDNA 序列采用邻接法 (NJ) 构建的系统发育树

Fig. 1 Phylogenetic tree constructed using neighbor-joining method based on ITS rDNA sequences

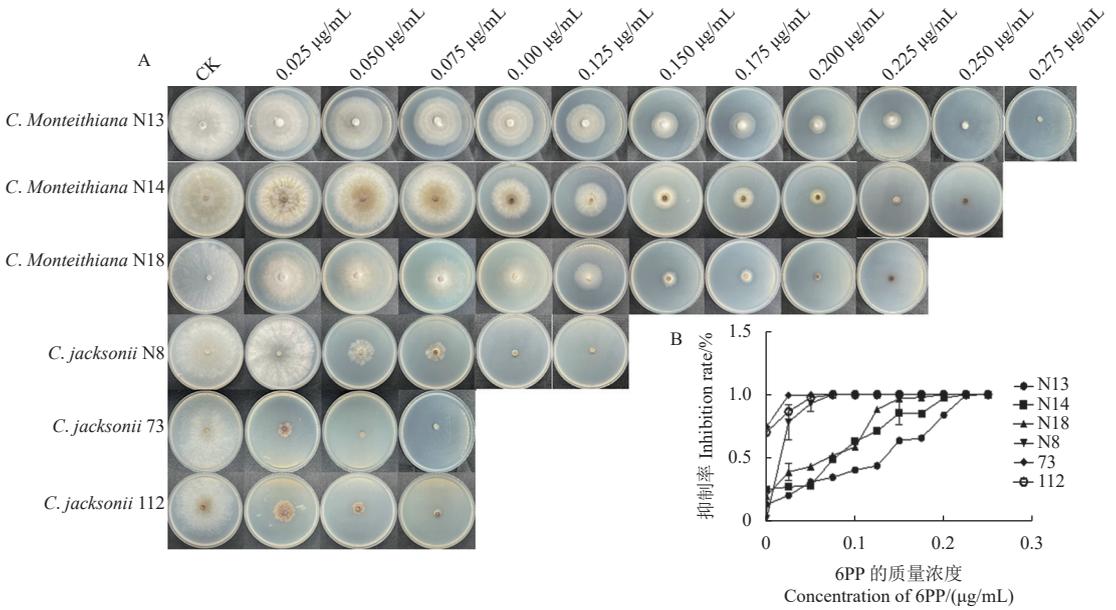


图 2 不同浓度 6PP 对币斑病菌 N13、N14、N18、N8、112 和 73 的抑制作用

Fig. 2 The inhibition effect of 6PP against *Clarireedia* spp. strains N13, N14, N18, N8, 112 and 73

表 1 6PP 对币斑病菌的 EC₅₀ 值

Table 1 EC₅₀ value of 6PP to *Clarireedia* strains

菌株 Strain	毒力回归方程 Toxicity regression equation	相关系数 Correlation coefficient	EC ₅₀ / (µg/mL)	95% 置信限 95% CL/(µg/mL)
<i>C. monteithiana</i> N13	$y = 0.85 + 0.48x$	0.976	0.83	0.50 ± 1.16
<i>C. monteithiana</i> N14	$y = 0.71 + 0.40x$	0.924	0.15	0.11 ± 0.18
<i>C. monteithiana</i> N18	$y = 0.71 + 0.45x$	0.979	0.12	0.11 ± 0.13
<i>C. jacksonii</i> N8	$y = 3.12 + 3.43x$	0.901	0.03	0.02 ± 0.04
<i>C. jacksonii</i> 73	$y = 0.28 + 0.31x$	0.890	0.03	0.01 ± 0.04
<i>C. jacksonii</i> 112	$y = 0.27 + 0.28x$	0.989	0.05	0.03 ± 0.06

均匀的形态，菌丝表面光滑且能自然延展 (图 3-a, 3-c)，而在 0.075 µg/mL 的 6PP 处理下，N8 和 N18 显示出不同的形态变化。其中 N8 菌株，菌丝顶部的分支增加，菌丝细胞膨大 (图 3-b)，菌丝浆液凝结外渗，菌丝浆分布均匀；而 N18 菌丝变细且聚集，隔膜变短 (图 3-d)。

2.4 6PP 对币斑病菌过氧化物积累的影响

DAB 染色结果显示，菌株 N8 与 N18 的 6PP 处理组菌丝与 DAB 孵化时生成棕色产物 (图 4-a, 4-c)，而对照组没有发现色素沉积。

2.5 6PP 对菌丝体相对电导率的影响

两种草坪币斑病菌株 (N8 和 N18) 菌丝的相对电导率随着时间的推移大致呈现先增加后逐渐稳定的趋势。经 6PP 处理后，N8 和 N18 菌丝的相对电导率高于对照组 (图 5)，N8 和 N18 对照组和处理组在 180 min 内相对电导率均显著上升 ($P < 0.05$)，其中 N8 对照组以及 6PP 处理在 180 min 内

变化值均显著大于 N18 菌株 (表 2)。

2.6 6PP 对币斑病菌菌液 pH 值的影响

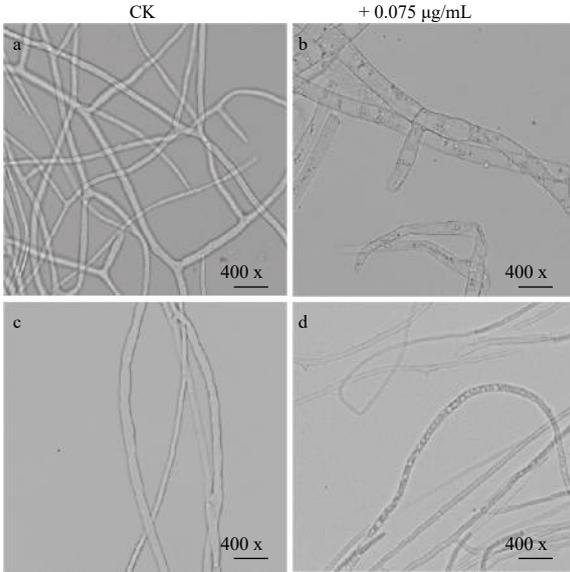
6PP 处理币斑病菌 36 h 后，N8 对照组菌液的平均 pH 值为 5.08，处理后的菌液 pH 平均值与对照组菌液无显著差异 ($P > 0.05$)。N18 对照组菌液的平均 pH 值为 4.84，处理后的菌液 pH 平均值为 5.20，N18 处理菌株的菌液 pH 变化显著高于对照组的菌液 ($P < 0.05$) (图 6)。

2.7 6PP 对币斑病菌 MDA 的影响

与对照组相比，经过 6PP 处理的草坪币斑病菌 MDA 含量均显著升高 ($P < 0.05$)。N8 对照组 MDA 含量为 0.74 µmol/g，处理后为 1.91 µmol/g。N18 对照组 MDA 含量为 0.82 µmol/g，处理后为 1.64 µmol/g (图 7)。

2.8 6PP 对 EPS 含量的影响

N8 对照组的 EPS 含量为 8.09 mg/L，处理后为 19.27 mg/L，增长率为 58.02%；N18 对照组的



注: a、b: 分别为 *C. jacksonii* N8 对照组和处理组币斑病菌菌丝; c、d: 分别为 *C. monteithiana* N18 对照组和处理组币斑病菌菌丝。

Note: Mycelia of the *C. jacksonii* N8 control group(a) and the treatment group(b); Mycelia of *C. monteithiana* N18 control group(c) and treatment group(d).

图 3 6PP 对 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 菌丝形态的影响

Fig. 3 Effect of 6PP on the mycelial morphology of *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18

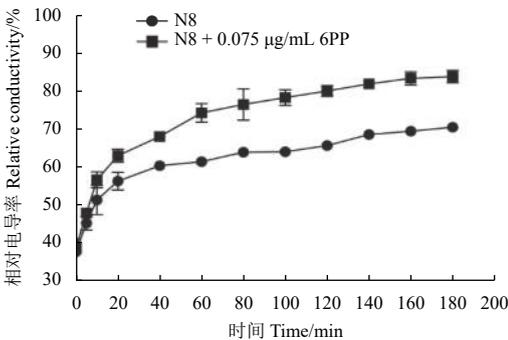


图 5 6PP 对 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 菌丝体相对电导率的影响

Fig. 5 Effect of 6PP on the relative conductivity of mycelia of *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18

表 2 180 min 内 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 的相对电导率的变化

Table 2 The changes of the relative conductivity of *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18 within 180 min

处理 Treatment	180 min 内相对电导率的变化 Change of relative conductivity within 180 min
<i>C. jacksonii</i> N8	32.87 ± 1.10 b
N8 + 0.075 µg/mL 6PP	45.21 ± 0.90 a
<i>C. monteithiana</i> N18	21.77 ± 1.23 B
N18 + 0.075 µg/mL 6PP	26.78 ± 1.56 A

注: 不同字母表示 0.05 水平上的差异显著性。表中数据为 3 次独立重复试验的平均值 ± 标准误差。

Note: Different letters represent significant differences between different treatments ($P < 0.05$). The data in the table are the mean ± SE from the three independent replicates.

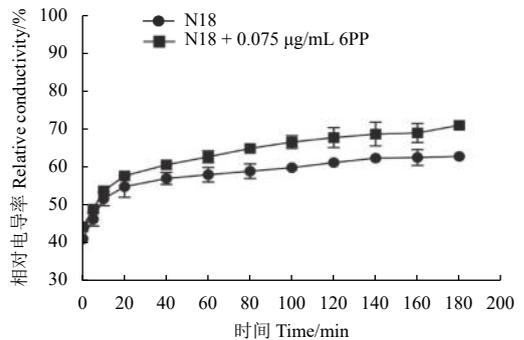


注: a、b: 分别为 *C. jacksonii* N8 对照组和处理组币斑病菌菌丝; c、d 分别为 *C. monteithiana* N18 对照组和处理组币斑病菌菌丝。

Note: Mycelia of the *C. jacksonii* N8 control group(a) and the treatment group(b); Mycelia of *C. monteithiana* N18 control group(c) and treatment group(d).

图 4 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 的 DAB 染色结果图

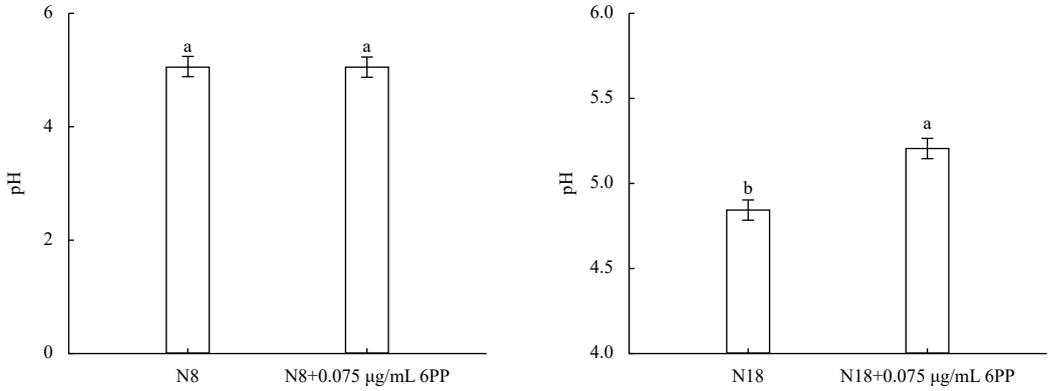
Fig. 4 DAB staining of *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18



EPS 含量为 5.20 mg/L, 处理后为 21.30 mg/L, 增长率为 75.59%。6PP 处理后 N8 和 N18 菌株的 EPS 含量均显著高于对照组 ($P < 0.05$), 其中 N18 的增长率高于 N8 (图 8)。

2.9 6PP 对抗氧化酶活性的影响

6PP 处理后 N8 和 N18 菌株 SOD 活性均显著高于对照组 ($P < 0.05$), N8 对照组的 SOD 活性为 7.69 U/g, 处理后为 12.76 U/g, 增长率为 39.73%; N18 对照组的活性为 6.90 U/g, 处理后为 12.75 U/g, 增长率为 45.88%, 即 N18 的增长率高于 N8。

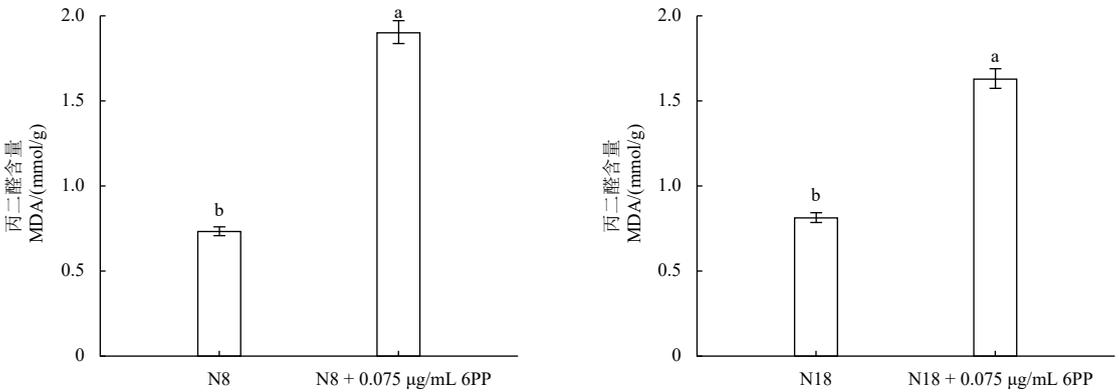


注:不同小写字母代表不同处理之间在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图 6 6PP 对 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 菌液 pH 值的影响

Fig. 6 Effect of 6PP on bacterial fluid pH of *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18

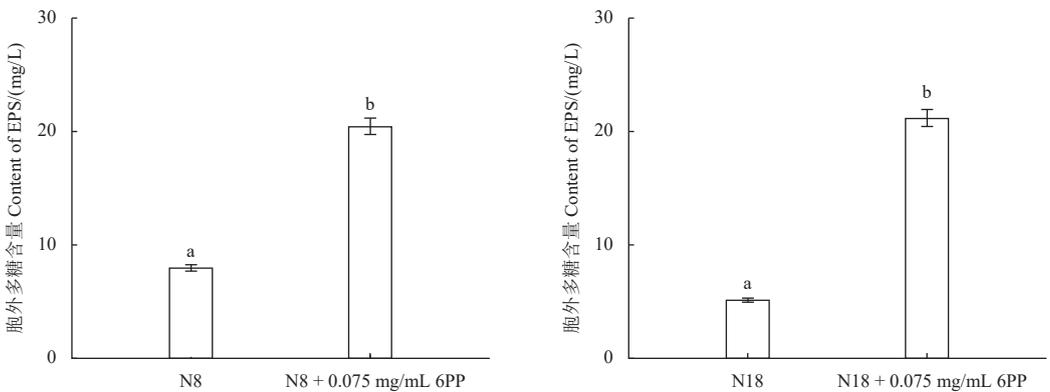


注:不同小写字母代表不同处理之间在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图 7 6PP 对 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 菌丝体 MDA 含量的影响

Fig. 7 Effect of 6PP on MDA of *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18 mycelium



注:不同小写字母代表不同处理之间在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图 8 6PP 对 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 菌丝体 EPS 含量的影响

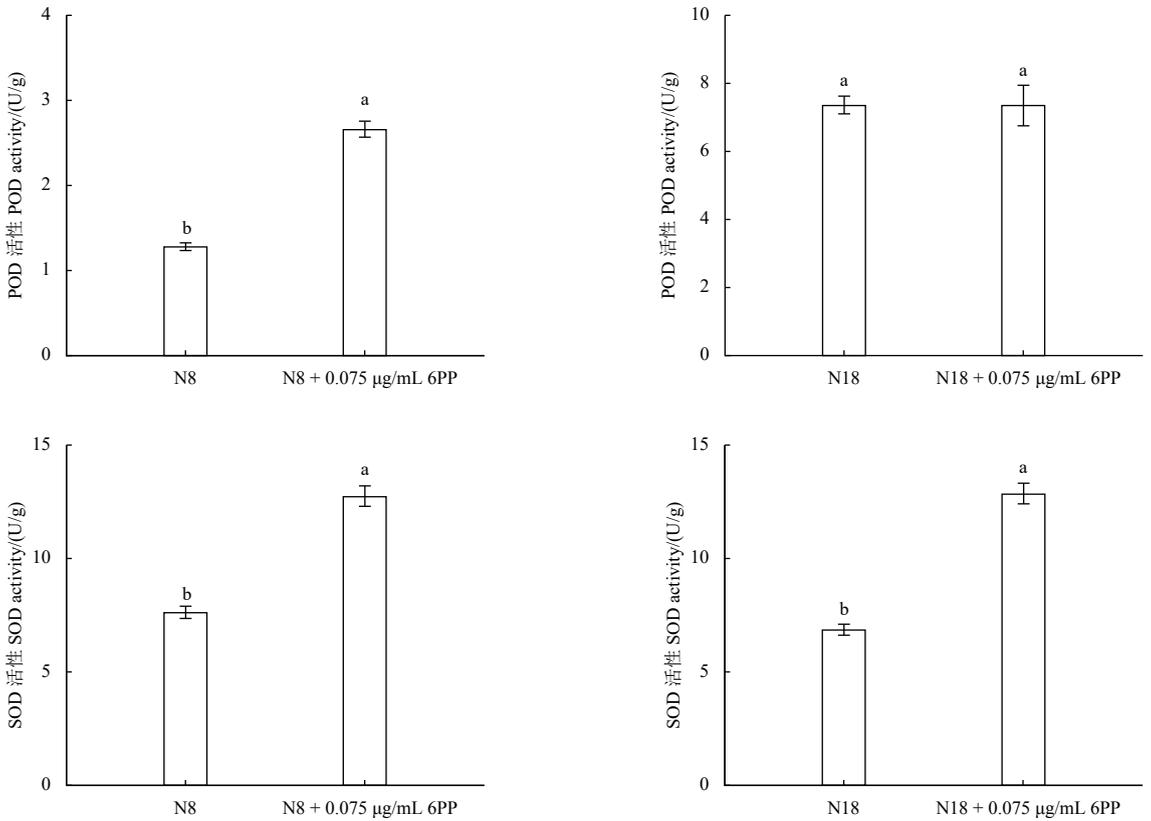
Fig. 8 Effect of 6PP on the EPS content of *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18 mycelium

N8 对照组的 POD 活性为 1.31 U/(g·min), 处理后为 2.40 U/(g·min), 其增长率为 45.42%, 两者存在显著性差异 ($P < 0.05$)。N18 对照组 POD 活性为 6.46 U/(g·min), 处理后 POD 活性为 6.90 U/g·min,

差异并不显著 ($P > 0.05$) (图 9)。

2.10 6PP 对草坪离体叶片币斑病的预防和治疗

离体条件下, 以草坪币斑病菌株 N8 和 N18 作为侵染源。预防试验中, 6PP 对 N8 和 N18 引



注:不同小写字母代表不同处理之间在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different treatments ($P < 0.05$).

图 9 6PP 对 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 菌丝体 SOD 和 POD 的影响

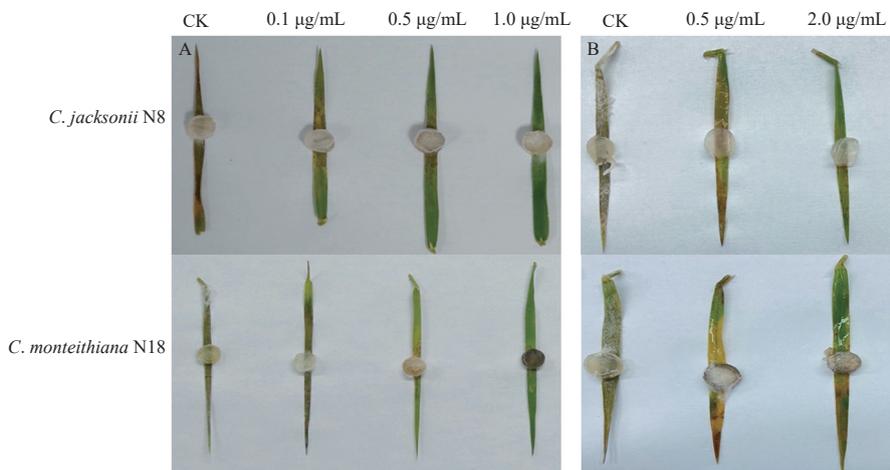
Fig. 9 Effect of 6PP on SOD, and POD of *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18 mycelium

起的币斑病均有良好的预防效果 (图 10-A, 表 3)。在接种前喷施 1 µg/mL 的 6PP, 与喷施无菌水的对照组相比, 预防效果分别达到 92.40% 和 89.88%。治疗试验中, 币斑病菌 N8 和 N18 接种 24 h 后, 2 µg/mL 的 6PP 治疗效果分别为 61.86% 和 53.53%

(图 10-B, 表 3)。

2.11 6PP 对草坪币斑病的预防和治疗

盆栽条件下, 以草坪币斑病菌株 N8 和 N18 作为侵染源。6PP 在不同剂量浓度下对草坪币斑病都表现出一定程度的保护和治疗作用效果。在



注: A 预防; B 治疗。

Note: A. Preventive effect; B. Curative effect.

图 10 6PP 对匍匐剪股颖离体叶片币斑病的预防与治疗

Fig. 10 Preventive and curative effect of 6PP on creeping bentgrass detached leaves against *Clariireedia* spp.

表 3 6PP 对匍匐翦股颖离体叶片币斑病 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 的预防与治疗Table 3 Preventive and curative effects of 6PP against *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18 on leaves

币斑病菌类型 Type of <i>Clariireedia</i> spp.	6PP 质量浓度 Concentration/($\mu\text{g}/\text{mL}$)	保护作用 Preventive effect/%	6PP 质量浓度 Concentration/($\mu\text{g}/\text{mL}$)	治疗作用 Curative effect/%
<i>C. jacksonii</i> N8	0	—	0	—
	0.1	37.91 \pm 6.90 c	0.5	40.64 \pm 8.30 b
	0.5	57.15 \pm 10.30 b	2	61.86 \pm 4.20 a
	1	92.40 \pm 3.30 a	—	—
<i>C. monteithiana</i> N18	0	—	0	—
	0.1	27.55 \pm 1.30 C	0.5	31.14 \pm 1.35 B
	0.5	54.28 \pm 3.40 B	2	53.53 \pm 1.40 A
	1	89.88 \pm 4.50 A	—	—

注: 表中数据为 10 次独立重复试验的平均值 \pm 标准误差。同列数据后不同字母表示经 LSD 法检验在 0.05 水平上差异显著。

Note: The data in the table are the mean \pm SE from the ten independent replicates. Different letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level by LSD test.

接种前喷施 1 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 6PP, 与喷施无菌水的对照组相比, 预防效果分别达到 74.65% 和 69.77%。在治疗试验中, 币斑病菌 N8 和 N18 接种 24 h

后, 2 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的 6PP 治疗效果分别为 63.44% 和 63.06% (表 4)。

表 4 6PP 对匍匐翦股颖植株币斑病 *C. jacksonii* N8 和 *C. monteithiana* N18 的预防与治疗Table 4 Preventive and curative effects of 6PP against *C. jacksonii* N8 and *C. monteithiana* N18 on plant

币斑病菌类型 Type of <i>Clariireedia</i> spp.	6PP 质量浓度 Concentration/($\mu\text{g}/\text{mL}$)	预防作用 Preventive effect/%		6PP 质量浓度 Concentration/($\mu\text{g}/\text{mL}$)	治疗作用 Curative effect/%	
		病情指数 Disease index	防治效果 Control efficacy/%		病情指数 Disease index	防治效果 Control efficacy/%
<i>C. jacksonii</i> N8	0	80.64 \pm 9.81a	—	0	83.36 \pm 11.01 a	—
	0.25	55.24 \pm 5.17 b	31.50	0.5	63.95 \pm 6.90 b	23.28
	0.5	40.63 \pm 4.86 c	49.62	1	48.65 \pm 2.65 c	41.63
	1	20.44 \pm 5.05 d	74.65	2	30.47 \pm 6.00 d	63.44
<i>C. monteithiana</i> N18	0	91.31 \pm 2.10 A	—	0	95.14 \pm 1.51 A	—
	0.25	65.11 \pm 4.90 B	28.69	0.5	79.07 \pm 4.05 B	16.79
	0.5	50.12 \pm 4.88 C	45.11	1	62.48 \pm 5.36 C	34.32
	1	27.60 \pm 4.64 D	69.77	2	35.17 \pm 7.61 D	63.06

注: 表中数据为 3 次独立重复试验的平均值 \pm 标准误差。同列数据后不同字母表示经 LSD 法检验在 0.05 水平上差异显著。

Note: The data in the table are the mean \pm SE from the three independent replicates. Different letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level by LSD test.

3 结论与讨论

3.1 6PP 对草坪币斑病菌的抑菌活性和防治效果

本研究中两种币斑病菌在 6PP 处理下 EC_{50} 值范围为 0.03~0.83 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 均值为 0.20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。Hu 等^[31] 对 24 个高尔夫球场和 1 个研究基地收集分离的 358 株币斑病菌的研究中发现, 在丙环唑、异菌脲、啶酰菌胺处理下, 币斑病菌平均 EC_{50} 值分别为 0.0307、0.2598 和 2.067 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。同样, 胡健等^[32] 在 114 株币斑病菌的研究中发现, 病菌在异菌脲处理下 EC_{50} 值为 0.0121~1.2644 $\mu\text{g}/\text{mL}$, 均值为 (0.5663 \pm 0.2144) $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。与目前广泛用于

草坪币斑病防治的多种杀菌剂相比, 6PP 具有更为高效的抑菌作用。离体条件下, 6PP 对草坪币斑病菌的防治效果随着施用剂量的增加而增加。盆栽条件下, 6PP 各处理的病情指数均低于对照组。

3.2 6PP 破坏细胞膜的屏障作用, 引发病菌的胁迫反应

过氧化物的产生是细胞受到逆境胁迫的典型特征, 本研究中两株币斑病菌 MDA 含量显著上升并出现大量 DAB 染色位点。MDA 是膜脂过氧化产生的重要生物标志物, 其浓度用于准确反映

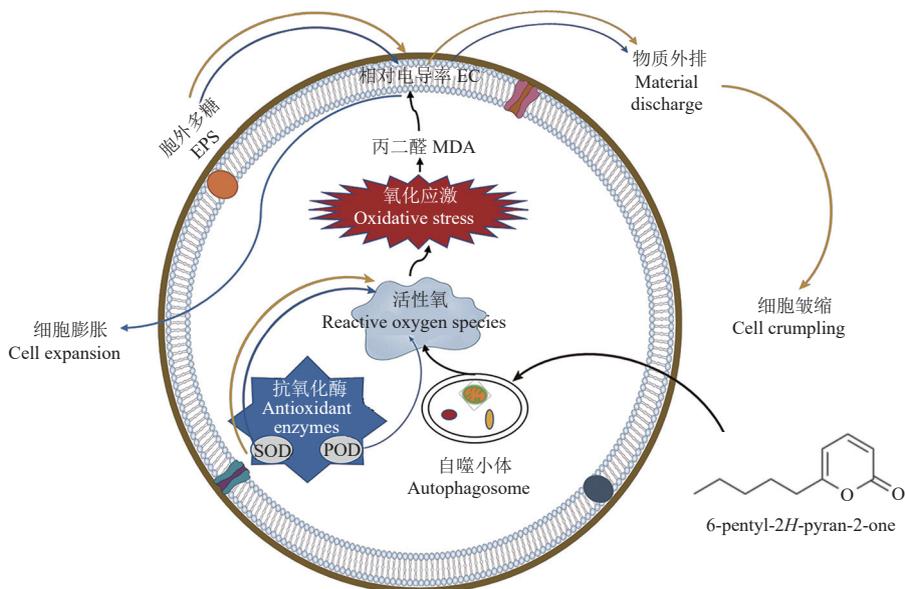
氧化应激诱导的细胞损伤,经 6PP 处理后,草坪币斑病菌产生大量的氧化自由基被 DAB 染色,这表明 6PP 处理使得病菌过氧化物积累,最终膜结构受损,菌丝浸泡液的相对电导率升高,pH 值上升也说明了这一问题。当微生物处在不利环境时,EPS 可以启用一种特殊机制来提供保护,以维持细胞膜的完整性并延长其存活时间^[33-34]。N8 和 N18 的 EPS 上升说明菌丝受到胁迫,开始分泌 EPS 来保护细胞膜和细胞壁^[35],以抵御 6PP 的干扰。病原菌受到外界胁迫时,会分泌 SOD 将胁迫信号转化为过氧化氢以调控细胞内的抗性反应^[36]。6PP 处理后 N8 和 N18 的 SOD 活性显著上升,说明病菌的抵抗反应被触发,病菌受到胁迫。

3.3 6PP 对两种不同草坪币斑病的胁迫强度

6PP 对两种不同草坪币斑病具有不同的胁迫强度。本研究中 *C. jacksonii* 对 6PP 抗性显著弱于 *C. monteithiana*。*C. jacksonii* 种的 N8 在 6PP 处理下菌丝变粗且顶端生长受到抑制,分支明显增多且分支短小,其末端局部膨大肿胀。*C. monteithiana* 菌株的 N18 菌丝缢缩褶皱,黏连在一起,形成片层状结构,菌丝干瘪变细。6PP 使得 N8 菌丝变粗,导致菌体扩张,胞外物质大量内流,菌体代谢受到影响。而 N18 菌丝变细,与 6PP 的接触面积降低,6PP 的抑菌作用相对较弱。本研究中,

6PP 处理后 N8 和 N18 的 SOD 显著上升,其中 N18 组 SOD 上升率高于 N8,这种响应程度的差异也很好解释了 N18 比 N8 更耐 6PP。N8 的 POD 活性显著上升,N18 的 POD 活性却没有显著变化,这表明 N8 中的 ROS 相较于 N18 显著富集,激活了大量的氧化清除反应,N8 更容易受到 6PP 的胁迫影响^[37]。Jin 等^[38] 在人参锈腐病 *Cylindrocarpon destructans* 的研究中发现外源 6PP 会导致自噬作用相关基因差异表达,而本研究中草坪币斑病菌过氧化、细胞膜破损等现象也符合自噬作用的特征^[39]。

整合本文研究数据和文献查阅,初步推测了 6PP 对两种不同草坪币斑病菌的作用过程以及两种草坪币斑病菌对 6PP 的响应,两种菌对 6PP 的抵抗响应为 6PP 与胞内自噬小体结合过氧化从而导致活性氧的积累,在氧化应激下产生 MDA,干扰细胞代谢促使膜脂过氧化,破坏细胞膜的屏障。当草坪币斑病菌受到 6PP 影响,菌体过氧化物积累,菌体防御反应启动,表现在抗氧化酶升高、物质外排,胞外多糖增加(图 11)。本研究仅测定了 6PP 对草坪币斑病菌的抑菌活性,还需进一步研究明确 6PP 抑制草坪币斑病菌的作用途径和代谢通路,并开展田间药效试验,为防治草坪病害提供理论依据。



注:黑色箭头代表 6PP 作用于草坪币斑病菌的过程;黄色箭头代表不敏感菌株 *C. monteithiana* 受到 6PP 胁迫作出的响应;蓝色箭头代表敏感菌株 *C. jacksonii* 受到 6PP 胁迫作出的响应。

Note: The black arrow indicates the action pathway of 6PP on dollar spot, the yellow arrow indicates the response of insensitive strain *C. monteithiana* to 6PP stress and the blue arrow indicates the response of sensitive *C. jacksonii* to 6PP stress.

图 11 6PP 作用于两种币斑病菌的过程以及两种草坪币斑病菌对 6PP 的响应推测图

Fig. 11 The proposed model of the 6PP action on dollar spot and the responses of two pathogens to 6PP

参考文献 (References):

- [1] SALGADO-SALAZAR C, BEIRN L A, ISMAIEL A, et al. *Clarireedia*: a new fungal genus comprising four pathogenic species responsible for dollar spot disease of turfgrass[J]. *Fungal Biol*, 2018, 122(8): 761-773.
- [2] ZHANG H, DONG Y, ZHOU Y, et al. *Clarireedia hainanense*: a new species is associated with dollar spot of turfgrass in Hainan, China[J]. *Plant Dis*, 2022, 106(3): 996-1002.
- [3] POPKO J J, SANG H, LEE J, et al. Resistance of *Sclerotinia homoeocarpa* field isolates to succinate dehydrogenase inhibitor fungicides[J]. *Plant Dis*, 2018, 102(12): 2625-2631.
- [4] TIAN Z P, WANG R Y, AMBROSE K V, et al. The *Epichloë festucae* antifungal protein has activity against the plant pathogen *Sclerotinia homoeocarpa*, the causal agent of dollar spot disease[J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 1-15.
- [5] AYNARDI B A, JIMÉNEZ-GASCO M M, UDDIN W. Effects of isolates of *Clarireedia jacksonii* and *Clarireedia monteithiana* on severity of dollar spot in turfgrasses by host type[J]. *Eur J Plant Pathol*, 2019, 155(3): 817-829.
- [6] PUTMAN A I, JUNG G, KAMINSKI J E. Geographic distribution of fungicide-insensitive *Sclerotinia homoeocarpa* isolates from golf courses in the northeastern United States[J]. *Plant Dis*, 2010, 94(2): 186-195.
- [7] RIOUX R A, SHULTZ J, GARCIA M, et al. *Sclerotinia homoeocarpa* overwinters in turfgrass and is present in commercial seed[J]. *PLoS One*, 2014, 9(10): e110897.
- [8] DENNIS C, WEBSTER J. Antagonistic properties of species-groups of *Trichoderma*[J]. *Trans Br Mycol Soc*, 1971, 57(1): 41-IN4.
- [9] NIETO-JACOBO M F, STEYAERT J M, SALAZAR-BADILLO F B, et al. Environmental growth conditions of *Trichoderma* spp. affects indole acetic acid derivatives, volatile organic compounds, and plant growth promotion[J]. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 102.
- [10] RAJANI P, RAJASEKARAN C, VASANTHAKUMARI M M, et al. Inhibition of plant pathogenic fungi by endophytic *Trichoderma* spp. through mycoparasitism and volatile organic compounds[J]. *Microbiol Res*, 2021, 242: 126595.
- [11] TROIAN R F, STEINDORFF A S, RAMADA M H S, et al. Mycoparasitism studies of *Trichoderma harzianum* against *Sclerotinia sclerotiorum*: evaluation of antagonism and expression of cell wall-degrading enzymes genes[J]. *Biotechnol Lett*, 2014, 36(10): 2095-2101.
- [12] TOGHUEO R M K, EKE P, ZABALGOGEAZCOA Í, et al. Biocontrol and growth enhancement potential of two endophytic *Trichoderma* spp. from *Terminalia catappa* against the causative agent of Common Bean Root Rot (*Fusarium solani*)[J]. *Biol Control*, 2016, 96: 8-20.
- [13] VITTI A, PELLEGRINI E, NALI C, et al. *Trichoderma harzianum* T-22 induces systemic resistance in tomato infected by *Cucumber mosaic virus*[J]. *Front Plant Sci*, 2016, 7: 1520.
- [14] UMADEVI P, ANANDARAJ M, SRIVASTAV V, et al. *Trichoderma harzianum* MTCC 5179 impacts the population and functional dynamics of microbial community in the rhizosphere of black pepper (*Piper nigrum* L.)[J]. *Braz J Microbiol*, 2018, 49(3): 463-470.
- [15] LAZAZZARA V, VICELLI B, BUESCHL C, et al. *Trichoderma* spp. volatile organic compounds protect grapevine plants by activating defense-related processes against downy mildew[J]. *Physiol Plant*, 2021, 172(4): 1950-1965.
- [16] MANGANIELLO G, SACCO A, ERCOLANO M R, et al. Modulation of tomato response to *Rhizoctonia solani* by *Trichoderma harzianum* and its secondary metabolite harzianic acid[J]. *Front Microbiol*, 2018, 9: 1966.
- [17] JOSHI D, SINGH P, SINGH A K, et al. Antifungal potential of metabolites from *Trichoderma* sp. against *Colletotrichum falcatum* went causing red rot of sugarcane[J]. *Sugar Tech*, 2016, 18(5): 529-536.
- [18] ANDRIAMALISOA Z, GIRAUD M, LABIA R, et al. Chemical synthesis of 6-pentyl-2H-pyran-2-one: a natural antifungal biosynthesized by *Trichoderma* spp[J]. *Chem Ecol*, 2004, 20(1): 55-59.
- [19] 张量, 张敬泽. 渐绿木霉抑菌物质的分离纯化及其对植物病原菌的抑制作用[J]. 中国农业科学, 2015, 48(5): 882-888.
- ZHANG L, ZHANG J Z. Isolation and purification of active compound from *Trichoderma viridescens* and its inhibitory activities against phytopathogens[J]. *Sci Agric Sin*, 2015, 48(5): 882-888. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1328.S.20150302.0251.006.html>.
- [20] AHLUWALIA V, KUMAR J, RANA V S, et al. Comparative evaluation of two *Trichoderma harzianum* strains for major secondary metabolite production and antifungal activity[J]. *Nat Prod Res*, 2015, 29(10): 914-920.
- [21] HAMROUNI R, MOLINET J, MICHÉ L, et al. Production of coconut aroma in solid-state cultivation: screening and identification of *Trichoderma* strains for 6-pentyl- α -pyrone and conidia production[J]. *J Chem*, 2019, 2019: 1-7.
- [22] HU J, ZHANG H W, DONG Y L, et al. Global distributions of *Clarireedia* species and their *in vitro* sensitivity profiles to fungicides[J]. *Agronomy*, 2021, 11(10): 2036.
- [23] MEI X Y, LIU Y X, HUANG H C, et al. Benzothiazole inhibits the growth of *Phytophthora capsici* through inducing apoptosis and suppressing stress responses and metabolic detoxification[J]. *Pestic Biochem Physiol*, 2019, 154: 7-16.
- [24] MOJICA K, ELSEY D, COONEY M J. Quantitative analysis of biofilm EPS uronic acid content[J]. *J Microbiol Methods*, 2007, 71(1): 61-65.
- [25] DUAN Y B, GE C Y, LIU S M, et al. Effect of phenylpyrrole fungicide fludioxonil on morphological and physiological characteristics of *Sclerotinia sclerotiorum*[J]. *Pestic Biochem Physiol*, 2013, 106(1-2): 61-67.
- [26] NASSER A, R BHAI S. Inhibition of *Pythium myriotylum* by silicates and its impact on soft rot disease of ginger (*Zingiber officinale* Rosc.) [J]. *Arch Phytopathol Plant Prot*, 2021, 54(13-14): 702-721.
- [27] 王琳, 郑胜礼, 吕淑敏, 等. 3-卤苯基芳香胺去甲斑蝥素衍生物对油菜菌核病菌的抑菌机理[J]. 农药学报, 2021, 23(1): 107-116.

- WANG L, ZHENG S L, LV S M, et al. Inhibitory mechanism of cantharidin derivatives against *Sclerotinia sclerotiorum*[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2021, 23(1): 107-116. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=NYXB202101016&DbName=CJFQ2021>.
- [28] 刘尚可, 王越, 潘灿平, 等. 外源单宁酸对茶叶中农药胁迫作用的缓解效应[J]. *农药学报*, 2021, 23(6): 1150-1158.
- LIU S K, WANG Y, PAN C P, et al. Mitigating effect of exogenous tannic acid on the stress of pesticides in tea[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2021, 23(6): 1150-1158. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=NYXB202106013&DbName=CJFQ2021>.
- [29] ZHANG J X, KIRKHAM M B. Drought-stress-induced changes in activities of superoxide dismutase, catalase, and peroxidase in wheat species[J]. *Plant Cell Physiol*, 1994, 35(5): 785-791.
- [30] CHEN Y L, MAO X W, WANG J X, et al. Activity of the dinitroaniline fungicide fluazinam against *Bipolaris maydis*[J]. *Pestic Biochem Physiol*, 2018, 148: 8-15.
- [31] ZHANG H W, JIANG S, ZHAO Z Y, et al. Fungicide sensitivity of *Clavireedia* spp. isolates from golf courses in China[J]. *Crop Prot*, 2021, 149: 105785.
- [32] 胡健, 杨静雅, 李婕, 等. 草坪草币斑病菌对甲基硫菌灵、异菌脲和丙环唑的敏感性[J]. *农药学报*, 2017, 19(6): 694-700.
- HU J, YANG J Y, LI J, et al. Sensitivity of *Sclerotinia homoeocarpa* from turfgrass to thiophanate-methyl, iprodione and propiconazole[J]. *Chin J Pestic Sci*, 2017, 19(6): 694-700. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=NYXB201706009&DbName=CJFQ2017>.
- [33] NWODO U U, GREEN E, OKOH A I. Bacterial exopolysaccharides: functionality and prospects[J]. *Int J Mol Sci*, 2012, 13(11): 14002-14015.
- [34] PAN F, HOU K, LI D D, et al. Exopolysaccharides from the fungal endophytic *Fusarium* sp. A14 isolated from *Fritillaria unibracteata* Hsiao et KC Hsia and their antioxidant and antiproliferation effects[J]. *J Biosci Bioeng*, 2019, 127(2): 231-240.
- [35] GAO X Y, AVELLAN A, LAUGHTON S, et al. CuO nanoparticle dissolution and toxicity to wheat (*Triticum aestivum*) in rhizosphere soil[J]. *Environ Sci Technol*, 2018, 52(5): 2888-2897.
- [36] CHUNG K R. Stress response and pathogenicity of the necrotrophic fungal pathogen *Alternaria alternata*[J]. *Scientifica*, 2012, 2012: 635431.
- [37] SCHAFFER W M, BRONNIKOVA T V. Peroxidase-ROS interactions[J]. *Nonlinear Dyn*, 2012, 68(3): 413-430.
- [38] JIN X, GUO L W, JIN B H, et al. Inhibitory mechanism of 6-pentyl-2H-pyran-2-one secreted by *Trichoderma atroviride* T2 against *Cylindrocarpum destructans*[J]. *Pestic Biochem Physiol*, 2020, 170: 104683.
- [39] HOFIUS D, LI L, HAFRÉN A, et al. Autophagy as an emerging arena for plant-pathogen interactions[J]. *Curr Opin Plant Biol*, 2017, 38: 117-123.

(责任编辑: 张 莉)

· 书 讯 ·

一部农药新剂型加工与应用领域的高水平专著! 《农药新剂型加工与应用》(第二版)

陈福良 主编

化学工业出版社 出版

(1) 新增农药热点剂型, 顺应新剂型发展趋势

本书顺应现阶段农药使用的发展方向以及新剂型快速发展的趋势, 在第一版的基础上, 删除了一些较老的农药剂型, 增加了目前成为开发热点的农药新剂型。

(2) 延续第一版经典理论, 契合实际应用需要

本书科学地将干悬浮剂从水分散剂中分离出来, 将微米级的微囊剂与微球剂和毫米级的包膜颗粒剂拆分, 独立成章, 以适应实际应用需要。

(3) 响应“双减”战略, 助力农药智能制造

本书响应国家“双减”战略, 以期为提高农药新剂型制备水平和增强药效, 更好地配合无人机施药等农药施药新技术, 可大幅提高农药制剂加工水平的农药智能制造助力。

◆书 号: 978-7-122-42217-0 ◆定 价: 128.00 元 ◆出版时间: 2023 年 1 月 ◆开 本: B5 开

邮购地址: 北京市东城区青年湖 13 号, 化学工业出版社; 邮编: 100011; 当当、京东、天猫网店均有销售, 输入书号或书名搜索。也可联系出版社相关人员(电话: 010-64519154/17610529386)。约稿出书请联系(电话: 010-64519457/13810683813)。

(刘 军 提供)

