

甲维盐注干剂在我国松材线虫病防控中的应用与展望

晏文峰¹ 徐红梅^{2*} 乐祥明³ 杨秋芬³ 潘成军⁴

(1. 湖北红安倒水河湿地公园管理服务中心, 湖北 黄冈 438400; 2. 湖北省林业科学研究院, 湖北 武汉 430000; 3. 湖北省太子山林场管理局林业科学研究所, 湖北 京山 431800; 4. 红安县国有天台山林场, 湖北 黄冈 438400)

摘要: 松材线虫病是由松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle 侵染引发, 依靠媒介昆虫传播扩散, 受环境条件和人为因素共同影响的多元生态病害系统, 对松林资源、森林生态系统及区域社会经济具有毁灭性危害。打孔注干施药是防控该病害的有效、安全的技术, 其中甲维盐注干剂以安全、高效和环保等优势, 应用效果显著。本文系统梳理中国松材线虫病防控实践, 从树干注射施药技术和甲维盐的化学特性两方面阐述了防控作用机理, 总结甲维盐注干剂相关剂型, 分别阐述甲维盐单剂和复配剂在实际应用中的防控效果; 并从甲维盐注干剂在松材线虫病防控中的应用策略、剂型创新和复配剂研发三个方面进行了展望, 以期对松材线虫病防控提供参考。

关键词: 松材线虫病; 甲维盐; 注干剂; 复配剂

中图分类号: S763.11

文献标识码: A

文章编号: 2097-5279(2026)02-0034-06

DOI: 10.27035/j.cnki.issn2097-5279.20260204

Advancements in emamectin benzoate trunk injection technology for management of pine wilt disease in China

Yan Wenfeng¹ Xu Hongmei^{2*} Yue Xiangming³ Yang Qiufen³ Pan Chengjun⁴

(1. Hong'an Daoshuihe Wetland Park Management Service Center, Huanggang 438400, China; 2. Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430000, China; 3. Taizishan Forest Management Bureau of Hubei Province forestry institute, Jingshan 431800, China; 4. Hong'an State-owned Tiantai Mountain Forest Farm, Huanggang 438400, China)

Abstract: Pine wilt disease is a multi-component ecological disease system caused by infection with *Bursaphelenchus xylophilus*, spread by vector insects, and influenced by both environmental conditions and human activities. This disease causes devastating damage to pine forest resources, forest ecosystems, and regional socioeconomic systems. Trunk injection is an effective and safe technique for the prevention and control of pine wilt disease, among which the emamectin benzoate injectable formulation has shown significant effects due to its safety, high efficacy, and environmental friendliness. This paper systematically reviews the practical prevention and control efforts against pine wilt disease in China, elaborates on the mechanisms of action from the perspectives of trunk injection technology and the chemical properties of emamectin benzoate, summarizes the relevant formulation of emamectin benzoate injectables, and describes the control effects of both emamectin benzoate alone and its compound formulations in practical applications. Finally, prospects are discussed in terms of application strategies, formulation innovation, and the development of compound formulations of emamectin benzoate for the control of pine wilt disease, aiming to provide a reference for the management of pine wilt disease.

Keywords: pine wilt disease; emamectin benzoate; trunk injection formulation; compound formulation

松材线虫病 (pine wilt disease, PWD) 是一种系统侵染性病害, 其发生以松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhrer) Nickle 为主导因素, 由媒介昆虫自然传播, 在环境因素和人为影响等多种因素共同作

收稿日期: 2025-03-24; 修回日期: 2025-07-04。

基金项目: 2025 年中央财政林草科技推广示范项目 (鄂 [2025]TG17 号); 大别山特色资源开发湖北省协同创新中心开放课题基金 (202140604)。

* 通信作者: 徐红梅 (E-mail: 876190291@qq.com), 副研究员。

引文格式: 晏文峰, 徐红梅, 乐祥明, 等. 2026. 甲维盐注干剂在我国松材线虫病防控中的应用与展望[J]. 树木医学, 3(2): 34-39.

Yan W F, Xu H M, Yue X M, et al. 2026. Advancements in emamectin benzoate trunk injection technology for management of pine wilt disease in China[J]. Tree Health, 3(2): 34-39.

用下,致使松树维管系统失去水分输导功能,进而导致松树快速萎蔫死亡,且传播速度较快(叶建仁和吴小芹, 2022; 叶建仁, 2019)。感染松材线虫病的松树大多在 1~3 个月就会死亡;松林一旦染病, 3~5 年即可毁灭。1982 年,我国首次在江苏省南京市中山陵发现松材线虫病, 40 多年来该病害不断扩散蔓延,截至 2025 年 12 月 31 日,全国 17 个省(直辖市、自治区) 626 个县(区、市) 4 183 个乡镇(镇、街道) 16.83 万个松林小班发生疫情,疫情面积 98.51 万 hm^2 、病死松树 433.84 万株(张晨书等, 2026; 国家林业和草原局第 4 号公告, 2025),对生态环境造成了重大威胁(叶建仁, 2019),也给林业产业带来了巨大的经济损失。

在此背景下,经过多年研究和实践,我国逐步建立了以病害检疫、监测、疫木除治为主,药剂防治(含媒介昆虫)为辅的综合防控体系(苗力等, 2023)。近年来,我国松材线虫病疫情防控取得明显成效,自 2023 年起,该病害发生面积呈下降趋势(张晨书等, 2026; 刘冰等, 2024)。松材线虫分布在树体内部,常规制剂很难与其接触,因此常采用树干注药技术进行防治,该技术具有药液利用率高、防治效果显著、适用范围广且环境友好等优点(Berger and Laurent, 2019; 黄俊等, 2014)。对未感病的松树进行注干预防,效果尤为显著,尤其适用于重点风景名胜区和自然文化遗产地等重要生态区的松材线虫病防控工作(李兰英等, 2006; Takai et al., 2000)。

20 世纪 80 年代,日本投入大量物力、财力和人力研究预防松材线虫病的注干剂,成功登记注册 Nemanon、Greenguard 和 Century 3 种注干剂; 20 世纪

90 年代后期,又登记注册 1 种新型注干剂 Megatop,进一步推动了松材线虫病注干预防药物的广泛应用(Takai et al., 2000; 梁细弟, 1997)。我国最早在 20 世纪 90 年代采用树干注药法防治松材线虫病, 21 世纪后加强了对松材线虫病防治药物的筛选研究(来燕学等, 2016)。目前对松材线虫病防治效果较好的树干注干药剂,主要有效成分为甲维盐(Emamectin Benzoate)、阿维菌素(Abamectin)、吡虫啉(Imidacloprid)等(殷涛等, 2024),尤其是以甲维盐为主要成分的新型半合成杀虫剂,因其杀虫谱广、作用高效、生物活性强等特点,兼具低毒、安全、无公害、无残留等环保优势,现已广泛应用于林业害虫防治(Elabasy et al., 2019; 来燕学等, 2016)。

本文系统梳理了树干注药技术防控松材线虫病的作用机理,以及甲维盐的化学特性、作用机理、剂型,同时总结单剂与复配药剂在实践中的应用效果,并从甲维盐注干剂在松材线虫病防控中的应用策略、剂型改良创新和复配药剂研发等 3 个维度进行展望,以期对松材线虫病科学防控提供参考。

1 树干注药技术防控松材线虫病的作用机理

树干注射施药技术具有用药量少、副作用小、生态友好和靶标害虫明确等优势,适用于防控林木钻蛀性害虫、线虫及维管束病害等病虫害(张扬等, 2017)。如图 1 所示,防控松材线虫病的主要作用机理是将内吸性药剂注入松树的木质部,药剂随蒸腾作用传导并分布到树体各个部位。当松材线虫或天牛幼虫在树体内取食后,药剂会随之进入其体内,导



图 1 树干注药技术防控松材线虫病的作用机理

Fig. 1 Mechanism of action of trunk injection technology for controlling pine wilt disease

致其中毒死亡,进而阻止线虫在树体内繁殖和扩散,降低松树的死亡率(殷涛等, 2024; 赵正萍等, 2023)。因此,注干药剂若要发挥最大效能,需满足两个条件:一是药剂需对松材线虫具有良好的防效,二是药剂在松树体内具有良好的传导性能。

2 甲维盐化学特性及其注干剂防控作用机理

2.1 化学特性

甲维盐全称甲氨基阿维菌素苯甲酸盐,是一种由阿维菌素 B1 发酵产物通过化学修饰合成的半合成大环内酯类化合物(White et al., 1997),属于十六元大环内酯化合物中的阿维菌素类衍生产品(徐勇, 2023; White et al., 1997)。其化学结构决定了该物质具有较高的脂溶性和一定程度的水溶性,可有效渗透至植物木质部导管,实现内吸传导。甲维盐原药呈淡黄色,在常规贮存条件下表现出良好的稳定性,尤其对热稳定。该药剂在树体内降解缓慢,持效期长达 6~12 个月,且毒性较低,对哺乳动物、鸟类及非靶标昆虫安全性高,环境友好。

2.2 作用机理

甲维盐注干剂对蔬菜、果树等作物上的鳞翅目 Lepidoptera、同翅目 Homoptera、鞘翅目 Coleoptera 害虫及多种线虫等有害生物,均具有良好防控效果。其作用靶标主要是昆虫和线虫神经系统中的谷氨酸门控氯离子通道(GluCl)和 γ -氨基丁酸门控氯离子通道(GABACl)。这些离子通道是神经信号传递的关键功能组分,甲维盐能够与这些通道结合,促进氯离子内流,干扰神经正常传导、阻断信号传递,进而造成昆虫或线虫麻痹、衰竭直至死亡,最终达到驱虫或杀虫的目的(殷涛等, 2024; 卢枫, 2021)。

3 甲维盐剂型及不同剂型防控松材线虫病的应用实践

3.1 甲维盐剂型

当前,甲维盐剂型呈现多元化发展趋势。截至 2024 年 12 月 21 日,全国共登记甲维盐相关制剂产品 1 253 个,其中单剂 687 个、混剂 566 个(张正炜等, 2025)。具体来看,甲维盐单剂主要为微乳剂(ME)、乳油(EC)和水分散粒剂(WG);甲维盐混剂产品则主要以悬浮剂(SC)开发登记为主,共有 280 个,约占混剂产品的 50.0%;在所有登记的甲维盐相关制剂产品中,微乳剂、水分散粒剂、悬浮剂、水乳剂(EW)等环境友好型剂型占比已超过 70.0%(张正炜等, 2025)。近年来,关于甲维盐常温注干剂和颗粒剂等新型制

剂的研究不断增多,突破了传统剂型受季节和温度限制等瓶颈,解决了林木树脂分泌造成药剂吸收受阻、利用率偏低的难题(江雪峰, 2023; 毛杨军, 2022)。

3.2 甲维盐单剂在松材线虫病防控中的应用

甲维盐单剂可直接作用于松材线虫,从多个方面对其产生抑制作用,从而控制松材线虫病传播。室内使用低剂量的甲维盐可抑制松材线虫生长繁殖。甲维盐乳油在亚致死剂量浓度(LC_{20} , 即 20% 致死浓度)下,可显著提高松材线虫卵和幼虫的致死率,缩小种群规模,并抑制其生长发育,缩短幼虫和成虫的体长(Bi et al., 2015; 黄小娟, 2014);甲维盐微乳剂对松材线虫的产卵量、卵孵化率及发育进程有显著抑制作用,影响其种群繁衍和寄生行为(黄小芳等, 2024; Wang et al., 2022; 卢枫, 2021)。此外,不同剂量和剂型的甲维盐在杀线活性上也存在差异,松树对药剂的吸收效果越好,防治效果越显著。2.0% 甲维盐乳油对松材线虫的半数致死浓度(LC_{50})为 41.81 mg/L,显著低于 2.0% 甲维盐微乳剂的 75.96 mg/L(徐勇, 2023)。注射 5.7% 甲维盐乳油,马尾松 *Pinus massoniana* Lanb. 生长正常,其对松材线虫的防治效果达 100.0%;而注射 2.3% 甲维盐微乳剂的防治效果为 90.1%,说明 5.7% 甲维盐乳油的防治效果优于 2.3% 甲维盐微乳剂(徐颂明等, 2024)。

多项林间试验表明,甲维盐注干剂对松材线虫病具有显著的预防效果且持效期较长(Kim, 2024; Zhang et al., 2023)。1)健康松树注射甲维盐注干剂可有效预防松材线虫病。5 年生马尾松注射 2.0% 甲维盐乳油 10 d 后,药剂即传导至树体各部位,抑制松材线虫对松树的侵染(潘伟华等, 2014);黑松 *Pinus thunbergii* Parlatores 注射 2.0% 甲维盐微乳剂 1.5 年后,防效最高可达 91.7%(李长强等, 2022)。2)向人工接种松材线虫的松树注射甲维盐后,松树死亡率显著降低。马尾松注射 2.0% 甲维盐乳油 10 d 后,植株存活率达到 100.0%(潘伟华等, 2014);注射 5.0% 甲维盐可溶性液剂 1 年后,防效仍为 100.0%(孙国宏等, 2025);黑松注射 9.7% 的甲维盐水溶剂后,所有松树在 2 年内均存活(Lee et al., 2020)。3)甲维盐对于自然感染松材线虫的松树也有良好的防治效果。20 年生海岸松 *Pinus pinaster* Aiton 注射甲维盐后,试验组松树无一死亡,而未注射的对照组死亡率高达 33.0%(Sousa et al., 2013);来燕学等(2016)采用自配甲维盐注干剂对自然感染松材线虫的马尾松和黑松进行打孔注射,松树死亡率仅为 2.7%;树干注射 10.0% 甲维盐可溶剂后,东湖村试验区马尾松死亡率从 6.1%

降至0, 仙公山试验区马尾松死亡率从10.8%降至1.7%(张欣伟等, 2019)。4)在温度较高的疫区, 可使用甲维盐新型制剂注射树干, 便于树体吸收药剂。34.0%甲维盐颗粒剂可有效在松树体内传导, 1年后松树死亡率降至2.0%以下(毛杨军, 2022); 1.1%甲维盐常温注干剂在2—7月(28~30℃)能被松树完全吸收, 林间平均绝对预防效果可达99.5%(江雪峰, 2023)。

3.3 甲维盐复配剂在松材线虫病防控中的应用效果

长期使用单一药剂, 病原容易产生抗性, 且增加防控成本, 使用复配药剂能够进一步提升松材线虫病的防控效果。针对松材线虫病持续扩散传播, 科研人员不断研发出新的甲维盐复配制剂, 目前应用较多的为甲维盐与吡虫啉、氟吡菌酰胺的复配制剂。在林间应用甲维盐与吡虫啉复配剂可有效降低马尾松的死亡率, 具有一定的应用潜力。0.1%甲维盐+4.0%吡虫啉的药剂组合对防控松材线虫病具有增效作用, 防效达到100.0%且持效期可达2年(陈晓等, 2009)。施用1.0%甲维盐+9.0%吡虫啉可溶性注干液剂后, 马尾松的死亡率仅为1.25%(徐小源等, 2021); 在江苏省使用该复配剂施药75 d后, 防效最高可达到100.0%(向帆等, 2024)。甘肃省的林间防效试验表明, 注干使用10%甲维·吡虫啉可溶液剂, 药后1年和2年的防效分别为84.12%和86.14%(张印海, 2023)。氟吡菌酰胺与甲维盐的复配制剂也常用于防控松材线虫病, 混合使用时毒力强于单剂。3.0%氟吡菌酰胺+5.0%甲维盐自制复配微乳剂能被马尾松完全吸收, 且具备良好的输导性能, 接种松材线虫270 d后, 注射过该药剂的马尾松均保持健康(张娇等, 2025); 10.0%氟吡菌酰胺悬浮剂+1.0%甲维盐微乳剂的复配组合对松材线虫的毒力强于氟吡菌酰胺单剂, 且能有效抑制线虫的生殖和发育(黄小芳等, 2024)。

4 展望

4.1 甲维盐注干剂的应用策略

甲维盐注干剂作为一种高效、环保的杀虫药剂, 在松材线虫病防控中展现出巨大潜力(黄俊等, 2014)。为了充分发挥其防控作用, 在施药前, 需根据松材线虫病的发病规律制定精准的施药方案, 确定最佳的施药时间和频率, 并结合松树树干直径等具体数值确定差异化的注射剂量, 从而进行针对性防控, 提高防控效果(叶建仁和吴小芹, 2022)。此外, 注干施药应作为松材线虫病综合防控体系中的关键环节, 与其他措施协同应用。在病害发生严重的区域, 采取以疫木除治为核心防治措施; 在重要生态区和疫情

较轻的区域, 则采取甲维盐注干剂注射, 并结合应用天敌或微生物制剂等协同措施, 实现松材线虫病可持续防控。未来应进一步聚焦注干施药技术与其他防控措施, 如疫木清理、媒介昆虫诱杀、生物防治、抗性品种选育等技术集成应用研究, 探索最佳的组合策略和应用时机, 从而更高效且可持续地防控松材线虫病。

4.2 甲维盐注干剂剂型创新

农药剂型的创新与优化仍是减药增效、提高农药利用率的最佳途径。目前使用的甲维盐药剂多为水溶剂、乳油、可溶粒剂、微乳剂等传统剂型, 这些液体制剂在高温季节应用时, 易受松脂分泌影响, 导致药剂吸收受阻, 从而限制了甲维盐注干剂的全年应用(张欣伟等, 2019)。新型常温注干剂和颗粒剂的研发取得了一定进展(江雪峰, 2023; 毛杨军, 2022), 仍需进一步探索合适的载体和制备工艺, 提高药剂在不同树种、不同生长阶段和不同环境条件下的吸收效率和稳定性。

未来研究应深化药剂理化特性与树木生理机制的适配性探索, 具体可聚焦两大方向: 1)开发纳米制剂, 将甲维盐颗粒微细化至纳米级别, 利用其小尺寸效应、高比表面积及缓释特性, 实现药剂在木质部的高效传导; 2)将药剂制成微胶囊, 通过物理屏障规避光解, 既延长有效成分的持效周期, 又降低对非靶标生物及生态系统的潜在风险。最终目标是设计兼具靶向性与控释功能的注干制剂, 在提升树体内药物分布精准度的同时, 减少浪费并延长持效期。

4.3 探索甲维盐复配注干剂

将作用机制不同的两种单剂进行科学合理的复配使用, 既可有效延缓害虫产生抗药性, 又能显著提升单一药剂有效成分的杀虫活性、延长药剂使用寿命、降低农药施用剂量, 对治理抗性害虫、拓宽杀虫范围、增强药效及降低农药成本具有重要意义(唐丽华, 2016)。甲维盐复配剂在松材线虫病防控中已展现出良好的效果, 但不同复配组合的增效作用、在树体内的输导特性、持效期以及对树体的安全性仍需深入研究和全面评估。未来的研究应系统筛选与甲维盐复配具有协同增效作用的药剂, 特别是针对松材线虫不同生命阶段或兼治媒介昆虫的药剂。重点研究复配药剂在树体内的联合输导和残留动态, 通过室内毒力测定、增效分析和林间试验, 筛选出高效、广谱、低毒、不易产生抗性且在树体内输导性能优异的复配配方, 确保各组分都能有效到达作用靶标并维持有效浓度。同时, 还应关注复配剂对非靶标

生物和生态环境的潜在影响,开展全面的风险评估,确保实现绿色防控。

参 考 文 献

- 陈晓,潘江灵,沈涛,等. 2009. 注干施药防治松材线虫的药剂筛选与林间防治效果研究[J]. 江西林业科技, 37(2): 28–30.
- Chen X, Pan J L, Shen T, *et al.* 2009. Screening of trunk-injection pesticides on *Bursaphelenchus xylophilus* and effect of pesticides on the field[J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 37(2): 28–30. (in Chinese)
- 国家林业和草原局. 国家林业和草原局公告(2025年第4号)[EB/OL]. (2025-03-03)[2025-04-03]. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkzfwj/612545.jhtml>.
- 黄俊,张娟,李明江,等. 2014. 树干注药技术预防松材线虫病的效果评价[J]. 林业科技开发, 28(4): 118–120.
- Huang J, Zhang J, Li M J, *et al.* 2014. Evaluation on the effects of trunk-injection technique against the pine wood nematode disease[J]. China Forestry Science and Technology, 28(4): 118–120. (in Chinese)
- 黄小芳,刘文义,梅明鹏,等. 2024. 五种药剂对松材线虫生殖发育的胁迫作用[J]. 中国森林病虫, 43(3): 14–20.
- Huang X F, Liu W Y, Mei M P, *et al.* 2024. Stress effects of five pesticides on reproduction and development of *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. Forest Pest and Disease, 43(3): 14–20. (in Chinese)
- 黄小娟. 2014. 化学胁迫下松材线虫的繁殖与交配行为[D]. 杭州: 浙江农林大学.
- Huang X J. 2014. Chemical Stress against the reproduction and mating behavior of *Bursaphelenchus xylophilus*[D]. Hangzhou: Zhejiang Agricultural and Forestry University. (in Chinese)
- 江雪峰,李敏,张林平,等. 2023. 1.1% 甲维盐常温注干剂预防松材线虫病侵染试验与林间施药效果研究[J]. 生物灾害科学, 46(3): 360–365.
- Jiang X F, Li M, Zhang L P, *et al.* 2023. Control Effects of 1.1% Emamectin Benzoate at room temperature to prevent pine wilt disease and the investigation of application effects in forest[J]. Biological Disaster Science, 46(3): 360–365. (in Chinese)
- 来燕学,何月秋,池树友,等. 2016. 高效松材线虫病预防注射药剂配制与林间药效研究[J]. 江西农业大学学报, 38(5): 871–878.
- Lai Y X, He Y Q, Chi S Y, *et al.* 2016. Concoction of two high effect anti-nematode drugs injected into pine tree for prevention of pine wilt disease and their effect in forest[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 38(5): 871–878. (in Chinese)
- 李兰英,高岚,温亚利,等. 2006. 松材线虫病研究进展[J]. 浙江林业科技, 26(5): 74–80.
- Li L Y, Gao L, Wen Y L, *et al.* 2006. Advances of pine wilt disease[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 26(5): 74–80. (in Chinese)
- 李长强,叶建仁,张婉君,等. 2022. 注干施用甲维盐防治松材线虫病的研究[J]. 中国植保导刊, 42(3): 16–19.
- Li C Q, Ye J R, Zhang W J, *et al.* 2022. Study on the control efficacy of trunk injection with Emamectin Benzoate microemulsion against pine wilt disease[J]. China Plant Protection, 42(3): 16–19. (in Chinese)
- 梁细弟. 1997. 日本树干注入剂的应用及最新进展[J]. 林业科技通讯(8): 33–34.
- Liang X D. 1997. Application and latest progress of trunk injection agents in Japan[J]. Forestry Science and Technology Communication, (8): 33–34. (in Chinese)
- 刘冰,闫佳钰,王朵,等. 2024. 2023 年全国主要林业有害生物发生情况及 2024 年趋势预测[J]. 中国森林病虫, 43(1): 41–45.
- Liu B, Yan J J, Wang D, *et al.* 2024. Occurrence of major forest pests in China in 2023 and prediction for trend in 2024[J]. Forest Pest and Disease, 43(1): 41–45. (in Chinese)
- 卢枫. 2021. 甲维盐对松材线虫作用机理初探[D]. 杭州: 浙江农林大学.
- Lu F. 2021. Study on action mechanism of Emamectin Benzoate on *Bursaphelenchus xylophilus*[D]. Hangzhou: Zhejiang Agricultural and Forestry University. (in Chinese)
- 毛杨军. 2022. 34% 甲维盐颗粒剂防治松材线虫病使用技术研究[D]. 杭州: 浙江农林大学.
- Mao Y J. 2022. Study on application technology of 34% Emamectin Benzoate granules to control *Bursaphelenchus xylophilus*[D]. Hangzhou: Zhejiang Agricultural and Forestry University. (in Chinese)
- 苗力,王禹,李瑞红,等. 2023. 松材线虫病的危害、传播途径和防控措施[J]. 吉林林业科技, 52(1): 44–45.
- Miao L, Wang Y, Li R H, *et al.* 2023. Harm, transmission route and control measures of pine wilt disease[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 52(1): 44–45. (in Chinese)
- 潘伟华,吴继来,贾进伟,等. 2014. 甲维盐注干施用对松材线虫病的防治效果分析[J]. 中国森林病虫, 33(6): 41–44.
- Pan W H, Wu J L, Jia J W, *et al.* 2014. Control effect of trunk injection of Emamectin Benzoate against pine wilt disease[J]. Forest Pest and Disease, 33(6): 41–44. (in Chinese)
- 孙国宏,张婉君,叶建仁,等. 2025. 3 种松材线虫病预防注干剂在马尾松树体内残留动态及防病效果[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 49(6): 64–72.
- Sun G H, Zhang W J, Ye J R, *et al.* 2025. Residue dynamics and disease prevention efficacy of three pine wilt disease preventive trunk-injection agents in masson pine trees[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 49(6): 64–72. (in Chinese)
- 唐丽华. 2016. 精细化学品复配原理与技术[M]. 北京: 中国石化出版社: 252.
- Tang L H. 2016. Principles and technologies of compounding fine chemicals[M]. Beijing: China Petrochemical Press: 252. (in Chinese)
- 向帆,叶建仁,张婉君. 2024. 注干施用 3 种药剂防治松材线虫病研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 49(6): 95–101.
- Xiang F, Ye J R, Zhang W J. 2024. Study on the control of *Bursaphelenchus xylophilus* by trunk injection with three kinds of agents[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 49(6): 95–101. (in Chinese)
- 徐颂明,刘元靖,潘洪峰,等. 2024. 2 种甲维盐剂型在松树中的溶脂性、吸收及其对松材线虫病的防效[J]. 世界农药, 46(10): 51–55.
- Xu S M, Liu Y J, Pan H F, *et al.* 2024. The liposolubility and absorption of two emamectin benzoate formulations in pine trees and their control efficacy against *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. World Pesticide, 46(10): 51–55. (in Chinese)
- 徐小源,王晓丽,吴呈侠. 2021. 注干药剂对松材线虫病的预防效果[J].

安徽农业科学, 49(7): 149–150, 153.

Xu X Y, Wang X L, Wu C X. 2021. Preventive effect of trunk-injected pesticides on pine wilt disease[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 49(7): 149–150, 153. (in Chinese)

徐勇. 2023. 2% 甲维盐乳油对松材线虫病的防效测定及松材线虫生防真菌初步筛选[D]. 杨凌: 西北农林科技大学.

Xu Y. 2023. Determination of the Control Effect of 2% Emamectin Benzoate emulsifiable concentrate on pine wood nematode disease and preliminary screening of fungi for biocontrol of pine wood nematodes[D]. Yangling: Northwest Agricultural and Forestry University. (in Chinese)

叶建仁. 2019. 松材线虫病在中国的流行现状、防治技术与对策分析[J]. 林业科学, 55(9): 1–10.

Ye J R. 2019. Epidemic status of pine wilt disease in china and its prevention and control techniques and counter measures[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 55(9): 1–10. (in Chinese)

叶建仁, 吴小芹. 2022. 松材线虫病研究进展[J]. 中国森林病虫, 41(3): 1–10.

Ye J R, Wu X Q. 2022. Research progress of pine wilt disease[J]. *Forest Pest and Disease*, 41(3): 1–10. (in Chinese)

殷涛, 王义勋, 方海良, 等. 2024. 松材线虫病防控注干药剂研究进展[J]. 绿色科技, 26(5): 97–101, 107.

Yin T, Wang Y X, Fang H L, *et al.* 2024. Research progress on trunk injection pesticides for the prevention and control of pine wilt disease[J]. *Journal of Green Science and Technology*, 26(5): 97–101, 107. (in Chinese)

张晨书, 孙红, 陈怡帆, 等. 2026. 2025 年全国主要林业有害生物发生情况及 2026 年趋势预测[J/OL]. 中国森林病虫, 45(2): 69–74. <https://doi.org/10.19688/j.cnki.issn1671-0886.20260010>.

Zhang C S, Sun H, Chen Y F, *et al.* 2026. Occurrence of major forestry pests in china in 2025 and prediction of occurrence trends for 2026[J/OL]. *Forest Pest and Disease*, 45(2): 69–74. <https://doi.org/10.19688/j.cnki.issn1671-0886.20260010>. (in Chinese)

张娇, 叶建仁, 陈婷婷, 等. 2025. 松材线虫高效复配制剂的药效分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 49(6): 73–80.

Zhang J, Ye J R, Chen T T, *et al.* 2025. Analysis of the efficacy of efficient combined formulations against *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 49(6): 73–80. (in Chinese)

张欣伟, 韩群琦, 汪天娜, 等. 2019. 注干用 10% 甲氨基阿维菌素苯甲酸盐可溶粒剂的研制及对松材线虫病的防治效果[J]. 农药学报, 21(4): 538–544.

Zhang X W, Han Q Q, Wang T N, *et al.* 2019. Preparation of 10% Emamectin Benzoate soluble granule for trunk injection and its control efficacy on pine wilt disease[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 21(4): 538–544. (in Chinese)

张扬, 杨鼎超, 张林平, 等. 2017. 注干施药技术防治松材线虫病的研究进展[J]. 生物灾害科学, 40(4): 213–218.

Zhang Y, Yang D C, Zhang L P, *et al.* 2017. Research progress on control of *Bursaphelenchus xylophilus* by dry injection and pesticide application[J]. *Biological Disaster Science*, 40(4): 213–218. (in

Chinese)

张印海. 2023. 树干注药技术对松材线虫病的预防效果[J]. 现代园艺, 46(4): 10–11, 30.

Zhang Y H. 2023. The preventive effect of trunk injection technology on pine wood nematode disease[J]. *Contemporary Horticulture*, 46(4): 10–11, 30. (in Chinese)

张正炜, 石小媛, 顾晟骅, 等. 2025. 我国甲氨基阿维菌素苯甲酸盐登记应用进展[J]. 世界农药, 47(3): 23–29.

Zhang Z W, Shi X Y, Gu S H, *et al.* 2025. Progress in the registration and application of emamectin benzoate in China[J]. *World Pesticide*, 2025, 47(3): 23–29. (in Chinese)

赵正萍, 夏永刚, 张敏, 等. 2023. 5% 依维菌素微乳剂注干预防松材线虫病效果评价[J]. 湖南林业科技, 50(5): 94–98.

Zhao Z P, Xia Y G, Zhang M, *et al.* 2023. Effect of trunk injection with 5% ivermectin microemulsion against pine wilt disease[J]. *Hunan Forestry Science & Technology*, 50(5): 94–98. (in Chinese)

Berger C, Laurent F. 2019. Trunk injection of plant protection products to protect trees from pests and diseases[J]. *Crop Protection*, 124: 104831.

Bi Z Z, Gong Y T, Huang X J, *et al.* 2015. Efficacy of four nematicides against the reproduction and development of pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. *Journal of Nematology*, 47(2): 126–132.

Elabasy A, Shoaib A, Waqas M, *et al.* 2019. Synthesis, characterization, and pesticidal activity of emamectin benzoate nanoformulations against *Phenacoccus solenopsis* tinsley (Hemiptera: Pseudococcidae)[J]. *Molecules*, 24(15): 2801.

Kim M J, Kim J, Yoo N S, *et al.* 2024. Spatiotemporal dynamics of trunk-injected pesticide residue for management of pine wilt disease in *Pinus koraiensis*[J]. *Forests*, 15(11): 1996.

Lee S C, Lee H R, Kim D S, *et al.* 2020. Emamectin benzoate 9.7% SL as a new formulation for a trunk-injections against pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. *Journal of Forestry Research*, 31(4): 1399–1403.

Sousa E, Naves P, Vieira M. 2013. Prevention of pine wilt disease induced by *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* by trunk injection of emamectin benzoate[J]. *Phytoparasitica*, 41(2): 143–148.

Takai K, Soejima T, Suzuki T, *et al.* 2000. Emamectin benzoate as a candidate for a trunk injection agent against the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. *Pest Management Science*, 56(10): 937–941.

Wang D Y, Wu C R, Xuan Z Q, *et al.* 2022. Biological pesticides and solvents with low toxicity reduce motility and activity of *Bursaphelenchus xylophilus*[J]. *Nematology*, 24(5): 481–490.

White S M, Dunbar D M, Brown R, *et al.* 1997. Emamectin Benzoate: a novel avermectin derivative for control of lepidopterous pests in cotton[C]//Proceedings of the 1997 Beltwide Cotton Conferences. Memphis: National Cotton Council; 1078–1082.

Zhang W J, Wu X Q, Ye J R, *et al.* 2023. Toxicity of an emamectin benzoate microemulsion against *Bursaphelenchus xylophilus* and its effect on the prevention of pine wilt disease[J]. *Forests*, 14(7): 1476.