

李东振, 马健, 马帅, 等. 树干注药技术的基本原理与应用[J]. 中国森林病虫, 2024, 43(4): 28-35.

树干注药技术的基本原理与应用

李东振^{1,2}, 马健³, 马帅⁴, 理永霞^{1,2}, 杨灿^{1,2}, 张星耀^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 国家林业和草原局森林保护学重点实验室, 北京 100091;

2. 南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 胶州市自然资源和规划局,

山东 胶州 266300; 4. 中国林业科学研究院, 北京 100091)

摘要: 树干注药技术具有施用精准、药物利用率高、接触风险低和环境污染少等优点。当喷洒和灌根施药等手段难以发挥作用或对环境造成污染时, 树干注药是更为合适的手段, 其开发和应用已引起国内外广泛关注。概述树干注药技术的树木生理学原理和影响树干注药的因素, 系统介绍国内外无压力注射、打孔压力注射和微孔压力注射的技术设备和特点, 以及树干注药技术在防治松材线虫病等病虫害中的应用, 旨在为树干注药技术的发展和优化提供参考。

关键词: 松材线虫病; 树干注药; 森林保护; 树木健康

中图分类号: S763.16 文献标志码: A 文章编号: 1671-0886(2024)04-0028-08

DOI: 10.19688/j.cnki.issn1671-0886.20240021

Basic principles and applications of trunk injection technique

LI Dongzhen^{1,2}, MA Jian³, MA Shuai⁴, LI Yongxia^{1,2}, YANG Can^{1,2}, ZHANG Xingyao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Forest Protection of National Forestry and Grassland Administration, Ecology and Nature Conservation Institute,

Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Co-Innovation Center for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing

Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. Jiaozhou Natural Resources and Planning Bureau, Jiaozhou 266300, China;

4. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Trunk injection technique has the advantages of accurate application, high utilization efficiency, low contact risk and less environmental pollution. When spraying and root irrigation of chemicals are difficult to play a role or cause pollution to environment, trunk injection is a more suitable method, and its development and application have attracted wide attention at home and abroad. The tree physiological principles of trunk injection technique and factors affecting trunk injection were summarized, the equipments and characteristics of non-pressure injection, pressure injection with drilling and micro-pressure injection both domestically and internationally were systematically introduced. Furthermore, the application of trunk injection in the prevention and control of diseases and pests such as pine wilt disease was also introduced, aiming to provide a reference for the development and optimization of trunk injection technique.

Keywords: pine wilt disease; trunk injection; forest protection; tree health

树干注药是一种向植物体内递送药物的技术, 营养物质或其他活性成分, 以实现植物的病虫害防治、营养补充和生长调节等目的^[1-3]。笔者针对树干

收稿日期: 2024-02-05; 修回日期: 2024-06-14; 网络首发: 2024-06-19

基金项目: 国家重点研发计划“松材线虫病灾变机制与可持续防控技术研究”(2021YFD1400900)

第一作者: 李东振(1991—), 男, 山东滕州人, 博士, 助理研究员, 主要从事森林保护研究, E-mail: lidongzhen@caf.ac.cn

通信作者: 理永霞, 研究员, 主要从事森林保护研究, E-mail: lyx020419@caf.ac.cn。

注药技术的树木生理学基础、影响树干注药的因素、常见的技术设备以及在病虫害防治中的应用进行系统介绍,以期为推动树干注药技术的发展提供参考。

树干注药技术的发展由来已久。20世纪初,人们开始探索通过注射方式治疗植物营养缺乏症和防治植物病虫害^[3-5]。榆树枯萎病的暴发促使人们对树干注药法的防治效果和对环境的负面影响进行更深入研究^[6]。目前,树干注药法的研究主要包括不同化合物对树木病虫害的防治效果、注射系统的优化、药物在树体内的运动规律、对树木健康和生长的影响,以及如何降低对树木的伤害等^[7-9]。

近年来,无人机施药为药物的高效利用提供了新的解决方案,但喷洒和灌根过程中的药物流失仍是关键问题。药物流失不仅降低了药物利用率,还污染环境,影响非靶标生物的安全。而树干注药技术可以直接将药物注入目标植物内,施用精准,以避免药物污染和浪费。此外,树干注药有利于药物的快速吸收和传导,可提高治疗和防治效果,特别是在松材线虫病防治上,使用树干注药技术是有效的手段,其在古树名木和景观树木保护中的作用尤为突出^[10]。尽管树干注药存在时间和劳动力成本问题,但因其精准施药等特点仍然是当下不可替代的施药手段之一,并受到越来越多的重视。

1 树干注药的生理学原理

树干是树木的主要支持和输导结构,由外向内主要由皮层、韧皮部、木质部和髓组成。韧皮部运输叶片通过光合作用产生的营养至根部,而木质部则负责根部至地上部分的水分纵向运输。被子植物主要依赖木质部导管运输水分,而如松树等裸子植物大多数不含导管,是通过木质部管胞运输水分^[11]。树干内水分的横向运输依赖于木质部射线细胞,他们形成辐射状结构,连接树木的中心与外围,并通过细胞间隙或细胞间交换传输水分^[11]。

蒸腾拉力是根系吸水 and 水分沿导管或管胞上升的主要动力,由叶片蒸腾作用形成的叶、茎和根系之间的连续水势梯度,使根系从土壤中吸水,将水分抬升至树木的每个组织中,此过程无需能量,为被动吸水^[12]。同时,水分子间的内聚力及与导管纤维素间的附着力可抵抗水柱因本身重力而产生的张力,使水分上升过程保持连续不断^[13]。

在树干注药过程中,通常要求将药物直接注射

到木质部中,在蒸腾拉力的作用下,进入木质部的药物一部分通过导管或管胞向树冠运输,另一部分通过射线细胞从边材向心材进行横向运输。

2 影响树干注药的因素

2.1 药物运输方向和速率

药物在树木体内的运输受到多种环境因素影响。水分运输的路径和速率是药物分布的关键。生长旺盛的树木在蒸腾作用强烈时,药物运输更为迅速;而休眠期的树木运输速度则较慢。天气和水分条件也起到重要作用,晴朗且水分充足的条件下,药物吸收和传导效果更佳。对于某些树种,如松树,还需考虑季节因素,避开树脂分泌旺盛期以优化注射效果。注射时间和位置的选择还需结合病虫害发生规律和药剂持效期。

注射部位也影响药物的输导和分布。通常选择树木根部或茎下部注射。在对不同森林树种的研究中发现,向根部注入染料,染料向下移动并穿过整个根部木质部,而向茎部注入染料则大部分染料向上移动,在秋季注入染料会使更多的染料向下移动^[14]。注射孔口的方位也会影响药剂在树体内的分布,注药孔与树木第一分支在同一侧面时,药剂在叶部的残留更高。有些注射到木质部的药物,可以从顶端组织向下运输至树干韧皮部和根部。

2.2 药物特性

不同药物在树体内的传导和分布不同。对牛油果 *Persea americana* 树干注药表明,吡虫啉、呋虫胺、乙酰甲胺磷等药剂在植物组织中存留时间不同^[15];在不同季节对苹果 *Malus pumila* 树进行甲维盐和吡虫啉注干,甲维盐在秋季注干后次年检测不到,而吡虫啉在秋季注干后次年仍可检测到^[16]。树干注药过程中,药物可能对木质部造成不同程度的破坏,导致导管或管胞空化,影响水分和药物的运输。不同药物的理化性质也可能导致其在运输方向和速度上存在差异,这些影响尚需深入研究。

2.3 树干注药与CODIT反应

树干注药可能引发CODIT (compartmentalization of decay in trees) 反应,即损伤诱导的树木自我保护机制,受伤部位会形成坚固的厚壁,将损伤前的木质部与损伤后的木质部分割开,防止其腐烂蔓延^[17-20]。钻孔深度和位置的选择对树木损伤和CODIT反应程度有重要影响。较深的钻孔虽能提高药物吸收率,但损伤更大,可能导致木质部腐烂

更广泛。除了注入木质部中,还可将液体注入木质部和树皮的交界面附近,控制液体逐渐被运输吸收,以减少对树木的损伤,但这种方式可能导致树皮的分离和腐烂^[9,21]。对于大型林木,注射口的直径小于25 mm可能不会对树木的生长产生影响,直径小于12 mm的伤口一般在一年内可以愈合^[9]。而对于经济作物,钻孔造成的伤口可能会导致树干生长畸形或形成树瘤。

3 树干注药方法

3.1 无压力注射

3.1.1 植入式胶囊

植入式胶囊是直接插入钻孔内的类似胶囊形状的装置,直径10 mm、长30 mm左右,内置有杀虫剂等药物,如美国Creative sales公司的Acccap胶囊和Mauget公司的胶囊^[10]。药物的吸收通过树木的自然蒸腾作用。这种注药方式操作简便,但是药物吸收速度较慢,也无法做到药物的均匀分布。这些装置被放置后,通常被永久留在树木体内。

3.1.2 树干输液袋

该方法仿照人体输液注射的方式,将不同体积不同设计的输液袋悬挂在高处,通过输液管和针头连接树体内部,通过重力作用将药液注入树体内^[22]。优点是打孔数量少,对树体损伤较小,同时可进行大剂量的注射,但是注药速度慢,进药时间长。其被广泛应用于城市绿植和古树名木的营养调节和病虫害防治。

3.1.3 直插瓶

直插瓶注药是直接药瓶插入钻孔内的注药方式。先在树干上斜向下打孔,将装有药物的塑料瓶向下插入孔内,通常这种直插瓶的盖子呈细长尖嘴状。这种方式利用了树木蒸腾作用形成的负压和药液重力,使药物自流入树体内并被运输至树体的其他部位^[23]。优点是操作简便,药瓶方便运输和携带,注药速度快于输液袋。但蒸腾作用形成的负压不稳定,可能会导致药液回流或溢出,影响药物的摄入。直插瓶被广泛用于我国松材线虫病防治中,通常需要回收以避免污染环境。

3.1.4 手动无压力注射

在树干上钻孔后,直接用注射器将药液注入孔内,之后用塞子将孔口塞住,这是比较简单的注药方式。所使用的注射器可以是常见的医疗用注射器,也可以是兽用连续注射器。注药量取决于钻孔

大小,在注射过程中容易发生药液飞溅和溢出现象。

3.2 钻孔压力注射

目前有很多压力注射的装置,按照是否打孔可分为钻孔压力注射和微孔压力注射。按照压力注射的动力来源,分为手动压力注射、电动压力注射和气动压力注射。上述分类没有严格区分,简单介绍几种常见的钻孔压力注药装置。

3.2.1 手动压力注射

该方法钻孔后先塞入孔塞,使钻孔内密闭,再插入注射器手动注药。例如中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所设计的自封闭孔塞,孔塞中间含有硅胶,方便针头的插入。因为钻孔封闭,在药液充满后继续注射,药液会被挤压进木质部组织内,从而实现压力注射。注射完成后拔出针头,硅胶自动封闭,药液不会飞溅和溢出^[24]。其优点在于设备简单,成本低;缺点是手动注射效率低,需一定力量,工作强度较高。

3.2.2 电动压力注射

该方法的注药设计与手动压力注射类似,采用电动攻螺纹或钻头自身密封孔洞,以电动推杆和活塞泵为动力,从而实现压力注射。这类设备的最大特点是将药液注射系统同钻孔所用的手电钻整合成一个整体,既可以通过手电钻钻孔,也可以通过手电钻注药。代表性产品有澳大利亚的电动注射器Sidewinder Tree Injector和我国绿友机械集团股份有限公司的电动打孔注药机^[25]。作业过程分为打孔、注药、封孔3个步骤。钻孔后取下钻头,打开注药开关,然后将手电钻上的螺纹头钻入树干内实现对孔洞的封闭,之后进行压力注射,注射完成后通过手电钻将螺纹头退出,再将螺纹孔塞装在钻头上,利用手电钻塞入孔口。在此基础上,国内公司正在进一步改进,如改用带有注药孔的钻头,使钻孔和注药经由同一个钻头,省去更换钻头的步骤,同时改用不同规格的电机以提高注药压力。此外,为提高人机交互性,也正在研究将注药量和压力调节设置在手电钻上等。电动压力注射的显著优点在于减少手动注药的劳动强度,具有更大的注药压力,可满足绝大多数树种的注射需求;主要缺点是注药枪手持和药液泵等部件背负较为沉重,设备在不装入药液的情况下总体质量达10 kg。打孔和注药的动力均来自大容量锂电池,用电消耗较大,需额外携带备用电池。此外,设备的电动系统部件较多,结构复杂,且容易受到药液侵蚀,不仅设备成本

和维护成本较高,其稳定性也受到一定的影响。尽管如此,电动注药仍是目前效率较高的注药方式。

3.2.3 气动压力注射

该方法的注药设计同手动压力注射类似,采用空气动力推动活塞推杆注药。代表性产品有美国 Arborjet 公司的 Arborjet Quik-Jet Air, Rainbow Ecoscience 公司的 Q-Connect 和 Macro Infusion Pump Kit。其中 Rainbow Ecoscience 公司的两款产品采用打气管装置手动加压, Arborjet 公司的产品采用高压气罐提供压缩空气动力。中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所在此基础上,进一步提升了气动系统的稳定性和注药压力,推出国内

首款气动压力注射产品——联邦注药机(图1)^[24]。在钻孔后,将上述的自封闭孔塞锤入孔洞内进行封闭,插入注药机针头,利用气瓶提供的空气动力快速完成注药,注药后即可拔出针头。其主要优点在于轻量化设计,注药机、气瓶和药瓶总体质量不足 2 kg,且设备结构简单,不含电路系统,耐腐蚀,不仅设备成本和维护成本较低,而且对恶劣环境的适应性强。相对电动注射,其主要缺点是工作压力较低。目前电动注射的工作压力最高可以达到 4 MPa,该气动产品目前最大工作压力为 1 MPa,当树木材质较为紧致或树体内压力较高时,气动产品的注药量相对电动设备较少。



图1 联邦注药机

Fig.1 Federal tree injector

无论动力来源是手动、电动或气动,这些设备的共同特点是需要对树干进行钻孔,会对树干造成一定的损伤。通常会在注药结束后,在孔口塞入孔塞,避免病原体 and 昆虫的侵害,然而孔塞的使用是否真的会起到保护作用尚存在一定争议。短时间观察,塞入孔塞确实避免了病虫害侵入,避免了孔口的感染和畸形。然而塑料塞会增大孔口的尺寸,增加树皮开裂的概率,也可能干扰树木的自然愈合能力。

3.3 微孔压力注射

为了避免钻孔对树干造成的损伤,微孔注射设备受到普遍关注。该设备采用更细的针头设计,直接扎入树干内进行注射。国外的微孔压力注射设备有美国 Kerrville 公司的 Chemjet, Arcadia 公司的 Mauget 和 Omaha 公司的 ArborSystems,其中以 ArborSystems 为代表。这些设备主要通过手动杠杆挤压或弹簧系统,在相对较低的压力下推动药液推杆注射。国内也已经推出多款 ArborSystems 类似产

品。此外,由徐州市惠通生态园林科技工程有限公司生产的 6HZ-w1020 型树干注射机也是微孔压力注射的代表产品。类似的微孔注射设备注射过程分为进针和注射 2 步。进针主要通过滑锤或电动设备敲击,将注射针头敲入树干内,然后接上注药机,手动操作杠杆,在单向阀等防回退结构的作用下,将药液注入树干内。这种方法的优点是最大限度地减少了对树木的损伤,此外设备结构简单,携带方便,成本低,稳定性好;但作业效率相对较低,工作强度相对偏高。

4 树干注药防治病虫害

4.1 松材线虫病

松材线虫 *Bursaphelenchus xylophilus* 是国际重大检疫性有害生物,是国家重点管理的外来入侵物种。树干注药防治松材线虫病是目前普遍采用的防治方法。截至 2024 年 4 月,中国农药信息网以松材线虫为防治对象登记的药剂共 58 种,有效成分包

括阿维菌素、甲氨基阿维菌素苯甲酸盐(甲维盐)、甲维·吡虫啉、苦参碱、苦参提取物和依维菌素。其中阿维菌素和甲维盐广泛使用,主要剂型为微乳剂、乳油和水乳剂,还登记有阿维菌素微囊悬浮剂、甲维盐悬浮剂。阿维菌素的总含量为1%,1.8%,3.2%,5%。甲维盐的总含量为0.5%,2%,3%,5%。此外,10%甲维·吡虫啉可溶液剂、1%苦参提取物可溶液剂、0.3%苦参碱水剂、5%伊维菌素微乳剂也有登记。此外氟吡菌酰胺作为登记的杀线虫剂也可用于松材线虫病的防治,主要剂型为悬浮剂。这些药剂在对松材线虫病防治时,施用方法均要求打孔注射,直插瓶是目前主要的注药方式。

研究表明,多种药剂对松材线虫病的防治效果得到普遍认可。苦豆碱在每株0.210 g的剂量下几乎可以完全控制病害发生,同时在树体内还展现出良好运输和传导性能,其具有内吸性,且对树木本身、人类和动物都安全无害^[26]。阿维菌素乳油注入黑松 *Pinus thunbergii* 和马尾松 *Pinus massoniana* 体内,其效果可持续长达2 a;第一年防治效果达100%,第二年防效达88%,且药剂能够扩散到树顶部,大剂量使用时对黑松生长没有负面影响^[27]。甲维盐是目前防治松材线虫病最常用的药剂,对松材线虫具有显著的毒杀效果,并且能够影响松墨天牛 *Monochamus alternatus* 卵孵化和幼虫生长。例如,2.2%甲维盐和10%甲维·吡虫啉可溶液剂防效均在70%以上,预防效果可持续2~3 a^[28]。同时,甲维盐也具有良好的治疗效果,在接种松材线虫后10 d,树干注射甲维盐,治疗效果可达100%^[29]。林间注干施用5%依维菌素微乳剂,用量为2.0 mL/cm胸径时对松材线虫病预防效果为100%^[30]。氟吡菌酰胺悬浮剂在林间的防效达90.48%,持效期为3 a^[31]。 α -三嗪吩是一类具有显著杀虫活性的植物源化合物,以恶唑酸为溶剂制备的注干液剂在山东、江西等地被应用于松材线虫病的预防试验^[32],该化合物尚未登记。

根据药液在树体内的输送传导规律,树干注药防治松材线虫病通常选在天牛成虫羽化前春季或上一年的秋冬季进行,此时温度较低,松脂分泌相对较少,有利于药液顺畅注入树体^[23]。2022年9月,在广西地区对马尾松树干注射松线静时防治效果较差,原因是温度较高,松脂分泌旺盛,药剂未能被树体完全吸收^[33]。因此必须谨慎选择注药时间,以防松脂堵塞注入孔。注药时天气也影响药剂的吸

收和输导,晴天时药剂吸收和传导效率明显高于雨天,因此在晴天注药更为理想^[34]。注射部位一般选在距地面30~50 cm处,注射到近3 a生的新生木质层处,药液可随树液的蒸腾流自然上升到树冠和叶面,实现全面覆盖^[35-36]。在确定注药剂量和注药孔数量时,需综合考虑松树的胸径和所使用的药剂类型。为确保药液均匀分布,钻孔应采用螺旋上升排列方式围绕树周均匀分布,避免在同一高度集中钻孔,单孔的距离不少于20 cm。根据树种和具体防治需求确定注药量,通常建议按照0.3~1.0 mL/cm胸径注射药液。

注干剂在树木内的传导分布规律是松材线虫病防治技术的一个关键环节。树干注射氟吡菌酰胺后的分布动态研究表明,氟吡菌酰胺在树体内的传导既存在横向运输又存在纵向运输,在一周以内氟吡菌酰胺传导到马尾松全身,但药剂并不是均匀分布的,这说明药剂在传导过程中受到树干液流方向和树体内各种组织的影响^[36]。甲维盐在松树体内是向上运动且是在同一平面上呈逆时针运动^[35]。在对马尾松树干注射甲维盐后,药剂存留含量会先高后低,但在3 a内可维持较高的浓度,从而对松墨天牛和松材线虫起到长效控制作用^[27]。选用3%甲维盐微乳剂和3.2%阿维菌素乳油对马尾松树干注射结果表明,2种药剂持效性都在一年半以上,一年半后注干残留含量明显降低^[37]。 α -三嗪吩在注入黑松苗后,先随水分向顶部枝条运输,并在短时间内达到较高浓度,然后再向其他部位扩散^[38]。

如何在生长季节进行注药防治是目前面临的主要问题。生长季节的树木蒸腾旺盛,更有利于药剂的吸收和传导,同时有利于对早期发病阶段的松树进行及时治疗。然而松脂的大量分泌会堵塞注药口和直插瓶的瓶口,导致药液难以进入。改进注药技术手段和研发新的助剂剂型是解决该问题的重点。一方面通过钻孔注药,直接将药物快速注入松树体内,避免直插瓶这种缓慢的注药方式。由于松树材质较为紧致,要求注药设备具有更高的注药压力。另一方面,可通过研发对松树树脂的渗透性、溶解性、分散性更优的助剂,配合使用高浓度药剂,减少注药体积的同时,帮助药物快速分散与吸收。

4.2 其他植物病虫害

榆树枯萎病由榆长喙壳菌 *Ceratocystis ulmi* 引起,并通过蠹虫传播,丙环唑、噻菌灵等杀真菌剂可

用于树干注药防治^[39-40]。柑橘黄龙病是 *Candidatus liberibacter asiaticus* 引起柑橘毁的灭性病害,主要由柑橘木虱 *Diaphorina citri*、柑橘蚜虫 *Toxoptera citricidus* 等进行传播,目前主要通过防治媒介昆虫防治黄龙病。针对柑橘黄龙病的特效药物尚在研发中,树干注射土霉素、链霉素等抗生素类药物和植物诱抗剂可起到一定效果^[41-43]。

针对隐蔽性较强的害虫,树干注射杀虫剂是较为有效的防治方法。天牛幼虫在树体内取食、化蛹和羽化,喷洒药剂很难直接接触到。噻虫啉、吡虫啉、溴氰菊酯、甲维盐等药剂可用于松墨天牛^[44-45]、光肩星天牛 *Anoplophora glabripennis*^[46-47]、锈色粒肩天牛 *Apriona swainsoni*^[48]、青杨天牛 *Saperda populnea*^[49]的防治。蚱壳虫体表包裹角质壳,药物喷洒同样效果不佳,可采用树干注射杀虫剂防治,如朝鲜球坚蚱 *Didesmococcus koreanus*^[50]和日本壶链蚱 *Asterococcus muratae*^[51]的注药防治。此外,树干注药可用于杨小舟蛾 *Micromelalopha sieversi*^[52]、苹果黄蚜 *Aphis citricola*^[53]、椰心叶甲 *Brontispa longissima*^[54]、梨木虱 *Psylla chinensis*^[55]、木蠹蛾 *Zeuzera pyrina*^[56]、红棕象甲 *Rhynchophorus ferrugineus*^[57]等害虫的防治。

树干注药也被用于植物营养补充和生长调节。注射药物包括氮、磷、钾、铁、锰、钙等矿物元素和生长素、赤霉素、细胞分裂素、吡啶乙酸、乙烯利等植物生长调节剂。通过注射这些药物治疗植物营养缺乏症、改善植物的生长状态、促进开花坐果^[58-61]。

5 问题与展望

树干注药技术以其精准施药等优势,在农业和林业等领域发挥了重要作用,特别是作为我国松材线虫病综合防控技术方案的重要技术手段,取得了良好的防治效果,得到广泛认可。尽管如此,树干注药技术仍存在一些需要解决的问题。1)树干注药技术的树木生理学基础研究不足。不同树种的密度不同,导致药液吸收和传导速率存在较大差异。相同树种也会因为自身生长状态和所处环境的不同,对药液的吸收和传导不同。因此,在进行树干注药前,需对树木进行系统研究,包括树龄、温度、湿度、光照、注药量等因子对药剂吸收和传导的影响,分析茎流量、蒸腾速率、光合速率等生理指标与药液吸收和传导速率的相关性,建立树干注药影响因子与注药效果关联分析模型,为树干注药工作的

开展提供理论指导。2)树干注药流程和设备尚需进一步优化。树干注药技术可被用于城市绿化、果园和山间林地等多种场景,不同应用场景对注药流程和设备的各要求各不相同。一方面,需要设计更为轻量化和自动化的产品设备、更加便捷快速的操作流程,在降低工作强度的同时提升注药效果;另一方面,在树干注药过程中,如何减少对树木的损伤,是目前行业内普遍关注的问题。目前市面上尚未有兼具这两项需求的技术和产品,如何实现自动化快速微创注药将是树干注药技术产品革新的重点。3)针对树干注药技术适用的药剂研究较少。尽管已有研究报道不同药剂通过树干注药防治不同植物病虫害的效果,但目前该技术主要在松材线虫病防治中被广泛使用。不同药剂在树木体内的吸收、传导、分布和残留,不同剂型和助剂对树干注药效果的影响,以及树干注药后药剂对土壤、水源等环境的影响仍缺乏研究,有待针对性地研发适用于树干注药用的药剂、剂型和助剂,监测和评估树干注药的安全性,促进树干注药技术向规范化、系统化方向发展。

树干注药技术因其精准施药等特点,符合绿色防控理念。通过加强理论研究和优化,提高树干注药的效果、效率 and 安全性,推动树干注药技术形成更为成熟的技术体系,使其在农林植物保护领域发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 唐光辉, 陈安良, 冯俊涛, 等. 树干注药技术研究进展[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(4): 117-120.
- [2] 张未仲, 赵龙龙, 胡增丽, 等. 树干注射法防治果树病虫害研究进展[J]. 农业技术与装备, 2020(11): 148-150.
- [3] SHANG Qingqing, LU Hongcai, YANG Mengdi, et al. The advancement and prospects of the tree trunk injection technique in the prevention and control of diseases and pests[J]. Agriculture, 2024, 14(1): 107.
- [4] ROACH W A. Plant injection as a physiological method[J]. Annals of Botany, 1939, 3(1): 155-226.
- [5] BERGER C, LAURENT F. Trunk injection of plant protection products to protect trees from pests and diseases[J]. Crop Protection, 2019, 124: 104831.
- [6] GRACA J V. Citrus greening disease[J]. Annual Review of Phytopathology, 1991, 29: 109-136.
- [7] HOLMES F. Distribution of dye in elms after trunk or root injection[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 1982, 8(9): 250-252.
- [8] SMITH K. Wounding, compartmentalization, and treatment tradeoffs[J]. Arboriculture & Urban Forestry, 1988, 14(9):

- 226-229.
- [9] NEELY D. Tree wound closure[J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 1988, 14(6): 148-152.
- [10] ARCHER L, CRANE J H, ALBRECHT U. Trunk injection as a tool to deliver plant protection materials: an overview of basic principles and practical considerations [J]. *Horticulturae*, 2022, 8(6): 552.
- [11] 马炜梁, 王幼芳, 李宏庆. 植物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [12] 潘瑞焜. 植物生理学[M]. 7版. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [13] KIM H K, PARK J, HWANG I. Investigating water transport through the xylem network in vascular plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, 65(7): 1895-1904.
- [14] TATTAR T A, TATTAR S J. Evidence for the downward movement of materials injected into trees[J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 1999, 25(6): 325-332.
- [15] BYRNE F J, URENA A A, ROBINSON L J, et al. Evaluation of neonicotinoid, organophosphate and avermectin trunk injections for the management of avocado thrips in California avocado groves[J]. *Pest Management Science*, 2012, 68(5): 811-817.
- [16] COSLOR C C, VANDERVOORT C, WISE J C. Insecticide dose and seasonal timing of trunk injection in apples influence efficacy and residues in nectar and plant parts[J]. *Pest Management Science*, 2019, 75(5): 1453-1463.
- [17] JANICE K W, KEVIN T S. Hardwood management, tree wound response, and wood product value[J]. *Forestry Chronicle*, 2018, 94(3): 292-306.
- [18] STROOCK A D, PAGAY V V, ZWIENIECKI M A, et al. The physicochemical hydrodynamics of vascular plants [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2014, 46(1): 615-642.
- [19] SHIGO A, MONEY W, DODDS D. Some internal effects of mauget tree injections [J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 1977, 3(11): 213-220.
- [20] EYLES A, DAVIES N W, MOHAMMED C. Wound wood formation in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: anatomy and chemistry[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(12): 2331-2339.
- [21] JONES P W. Book review: Plant toxicology - 4th edition. Edited by Bertold Hock and Erich F. Elstner. 2005. 648 pp. Marcel Dekker, New York. ISBN 0824753232 [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2005, 112(3): 299-300.
- [22] 南京市园林局, 南京市绿化委员会办公室, 南京园林学会. 绿化造景与绿地的养护管理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [23] 王勇军, 唐光辉, 陈祖海, 等. 树干注药防治松材线虫病研究进展[J]. *中国森林病虫*, 2022, 41(3): 59-63.
- [24] 理永霞, 李东振, 刘振凯, 等. 一种气动树干注药设备: CN220571150U[P]. 2024-03-12.
- [25] 李玉洁, 张红, 涂爱斌, 等. 用于电动树干注射机的钻孔注射一体手持设备: CN211960198U[P]. 2020-11-20.
- [26] 赵博光. 苦豆碱对松材线虫的杀线活性[J]. *林业科学*, 1996, 32(3): 243-247.
- [27] 林茂松, 周明国. 2%阿维菌素乳油对松材线虫的生物活性测定[J]. *农药学学报*, 2001, 3(3): 40-44.
- [28] 张印海. 树干注药技术对松材线虫病的预防效果[J]. *现代园艺*, 2023, 46(4): 10-11.
- [29] 潘伟华, 吴继来, 贾进伟, 等. 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*, 2014, 33(6): 41-44.
- [30] 赵正萍, 夏永刚, 张敏, 等. 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*, 2023, 50(5): 94-98.
- [31] GUO Yajie, MA Jiayi, YOU Ziyi, et al. Field efficacy of fluopyram suspension concentrate against pine wilt disease and its distribution and persistence in pine tree tissues [J]. *Forests*, 2023, 14(2): 338.
- [32] 金明霞, 谢谷艾, 喻爱林, 等. α -三噻吩林间防治松材线虫病研究[J]. *生物灾害科学*, 2019, 42(4): 272-274.
- [33] 甘绍泽, 王晓飞, 陈旭华, 等. 注干施用“松线静”(5%阿维菌素乳油)防控松材线虫病研究[J]. *温带林业研究*, 2023, 6(3): 42-47.
- [34] ZAMORA M A S, ESCOBAR R F. Injector-size and the time of application affects uptake of tree trunk-injected solutions[J]. *Scientia Horticulturae*, 2000, 84(1): 163-177.
- [35] TAKAI K, SUZUKI T, KAWAZU K. Distribution and persistence of emamectin benzoate at efficacious concentrations in pine tissues after injection of a liquid formulation[J]. *Pest Management Science*, 2004, 60(1): 42-48.
- [36] GUO Yajie, MA Jiayi, SUN Yunzhu, et al. Spatiotemporal dynamics of fluopyram trunk-injection in *Pinus massoniana* and its efficacy against pine wilt disease [J]. *Pest Management Science*, 2023, 79(6): 2230-2238.
- [37] 尹华阳, 董广平. 两种注干药剂防治松材线虫病效果研究[J]. *安徽林业科技*, 2022, 48(6): 21-24.
- [38] 张志超, 徐维峰, 赵博光. 注药后黑松体内 α -三噻吩含量测定方法[J]. *林业科技开发*, 2013, 27(3): 110-111.
- [39] BRAZEE N, MARRA R. Incidence of internal decay in american elms (*Ulmus americana*) under regular fungicide injection to manage dutch elm disease[J]. *Arboriculture & Urban Forestry*, 2020, 46(1): 1-11.
- [40] POSTMA J, GOOSSEN-VAN DE GEIJN H. Twenty - four years of Dutch Trig® application to control Dutch elm disease [J]. *BioControl*, 2016, 61(3): 305-312.
- [41] VINCENT C I, HIJAZ F, PIERRE M, et al. Systemic uptake of oxytetracycline and streptomycin in huanglongbing-affected citrus groves after foliar application and trunk injection[J]. *Antibiotics (Basel)*, 2022, 11(8): 1092.
- [42] HU J, JIANG J, WANG N. Control of citrus huanglongbing via trunk injection of plant defense activators and antibiotics [J]. *Phytopathology*, 2018, 108(2): 186-195.
- [43] ARCHER L, KUNWAR S, ALFEREZ F, et al. Trunk injection of oxytetracycline for huanglongbing management in ma-

- ture grapefruit and sweet orange trees [J]. *Phytopathology*, 2023, 113(6): 1010-1021.
- [44] 张爱良, 贾进伟, 张旭, 等. 甲维盐注干施用对松墨天牛种群的影响[J]. *中国森林病虫*, 2014, 33(1): 8-10.
- [45] 梁浩, 罗东升, 梁德太. 松墨天牛成虫聚集信息素与树干注射剂配套防治松材线虫病技术研究[J]. *绿色科技*, 2023, 25(15): 151-154.
- [46] 孙明哲, 王佩星, 徐华潮. 两种药剂对光肩星天牛化学防治试验[J]. *浙江林业科技*, 2015, 35(4): 74-76.
- [47] 鲁延芳, 占玉芳, 甄伟玲, 等. 树干注射化学药剂防治蛀干天牛效果研究[J]. *林业科技通讯*, 2017(4): 42-43.
- [48] 崔维. 三门峡地区国槐锈色粒肩天牛发生危害及化学防治技术研究[J]. *陕西农业科学*, 2019, 65(7): 83-86.
- [49] 敖特根, 于春, 张恩, 等. 树干打孔注药防治青杨天牛试验[J]. *内蒙古林业科技*, 2006, 32(1): 21-22.
- [50] 阿地力·沙塔尔, 潘存德, 叶尔江, 等. 新疆巴旦杏园朝鲜球坚蚧不同发育期的防治措施研究[J]. *林业科学研究*, 2008, 21(5): 681-685.
- [51] 杨意, 刘波, 唐尚杰, 等. 树干打孔注药防治危害广玉兰的日本壶链蚧[J]. *中国森林病虫*, 2006, 25(2): 34-37.
- [52] 路兵. 杨小舟蛾的发生与防治[J]. *中文科技期刊数据库(全文版)农业科学*, 2022(7): 54-56.
- [53] 张鹏九, 高越, 刘中芳, 等. 树干高压注射4种内吸性农药对苹果黄蚜的防治效果研究[J]. *中国果树*, 2019(4): 79-82.
- [54] 唐光辉, 江志利, 张文锋, 等. 树干注药防治椰心叶甲药效试验[J]. *中国森林病虫*, 2006, 25(4): 39-41.
- [55] WHEELER C E, VANDERVOORT C, WISE J C. Organic control of pear psylla in pear with trunk injection[J]. *Insects*, 2020, 11(9): 650.
- [56] MOKHTARYAN A, SHEIKHIGARJAN A, ARBAB A, et al. The efficiency of systemic insecticides and complete fertilizer by trunk injection method against leopard moth in infested walnut trees[J]. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 2021, 82(1): 1-5.
- [57] MASHAL M M, OBEIDAT B F. The efficacy assessment of emamectin benzoate using micro injection system to control red palm weevil[J]. *Heliyon*, 2019, 5(6): e01833.
- [58] 牛晓琳, 梁军, 马文凤, 等. 树干注射铁肥对金丝小枣产量及品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 155-160.
- [59] 张萍, 宋锋惠, 史彦江. 树干注射锰肥对新疆灰枣生长和品质的影响[J]. *经济林研究*, 2013, 31(4): 1018-1024.
- [60] 杨国才, 杨春民, 张亚军, 等. 树干注射NBH营养液对提高苹果坐果率的研究[J]. *河北农业科学*, 1996(1): 9-11.
- [61] 崔美香, 薛进军, 王秀茹, 等. 树干高压注射铁肥矫正苹果失绿症及其机理[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 133-136.

(责任编辑 王朵)