

· 研究论文 ·

doi: 10.16801/j.issn.1008-7303.2024.0104

乙磷铝在香榧体内的传导分布及对 香榧根腐病防治效果

初 楚¹, 姜 壮², 张昌朋³, 左璐莹⁴, 毛赞来¹, 尹易平¹, 陈安良^{*1}

(1. 浙江农林大学 生物农药高效制备技术国家地方联合工程实验室, 杭州 311300; 2. 贵州省湄潭县林业局, 贵州 遵义 564100; 3. 浙江省农业科学院农产品质量安全与营养研究所, 杭州 310021; 4. 浙江省安吉县林业局, 浙江 湖州 313300)

摘 要: 为明确乙磷铝在香榧体内传导分布及对香榧根腐病的田间防治效果, 将 0.5% 乙磷铝水剂 (SL) 对 3 年生香榧注干施药 7、14 和 21 d 后, 采用 HPLC-MS 测定了乙磷铝在香榧体内各部位的分布; 并将 0.5% 乙磷铝 SL 对 13 年生香榧连续注干施药 3 年, 每年 3 月中旬施药 1 次。第 3 年施药 90 和 180 d 后测定了乙磷铝在香榧体内各部位的残留, 第 3 年施药 15、45 和 180 d 后检测香榧叶片光合作用的变化。结果显示: 0.5% 乙磷铝 SL 注干施药 7 d 后, 乙磷铝已传导至香榧的根、干、枝、叶等部位, 枝干及根部乙磷铝含量分别为 0.51、0.15 mg/kg; 施药 3 年对香榧根腐病的防治效果达 89.41%; 乙磷铝注干施药, 可以增加香榧叶片的光合色素和叶绿素含量, 降低热耗散量和类胡萝卜素含量, 增强叶片的光合作用, 使叶片萌发正常、复壮复绿。综上, 乙磷铝注干施药后, 在香榧体内可双向传导, 有效防治香榧根腐病。

关键词: 香榧根腐病; 注干施药; 乙磷铝; 传导分布; 防治效果

中图分类号: S436.44

文献标志码: A

Conductance distribution of fosetyl-aluminum in *Torreya grandis* and control efficacy on root rot

CHU Chu¹, JIANG Zhuang², ZHANG Changpeng³, ZUO Luying⁴,MAO Yunlai¹, YIN Yiping¹, CHEN Anliang^{*1}

(1. National Local Joint Engineering Laboratory of High efficiency preparation Technology of Biopesticide, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou 311300, China; 2. Meitan Forestry Bureau, Zunyi 564100, Guizhou Province, China; 3. Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 4. Anji Forestry Bureau, Huzhou 313300, Zhejiang Province, China)

Abstract: To elucidate the systemic distribution of fosetyl-aluminum in *Torreya grandis* and its field efficacy against root rot, HPLC-MS was employed to trace the presence of the compound across different parts of three-year-old *T. grandis* at 7, 14, and 21 days after trunk injection. A 0.5% SL was applied to 13-year-old *T. grandis* through trunk injection, once annually in mid-March, over a 3-year period. At the end of the third year, the residue levels of fosetyl-aluminum in different *T. grandis* tissues and changes in leaf photosynthesis activity were assessed. Seven days after the 0.5% fosetyl-aluminum

收稿日期: 2024-06-14; 录用日期: 2024-09-19; 网络首发日期: 2024-11-11.

Received: June 14, 2024; Accepted: September 19, 2024; Published online: November 11, 2024.

URL: <https://doi.org/10.16801/j.issn.1008-7303.2024.0104>

<http://www.nyxxb.cn/cn/article/doi/10.16801/j.issn.1008-7303.2024.0104>

基金项目: 浙江省重点研发项目 (2019C02024).

Funding: Supported by Supported by Key RD Projects in Zhejiang Province (No. 2019C02024).

第一作者 (First author): 初楚, E-mail: 1524893422@qq.com. *通讯作者 (Corresponding author): 陈安良, E-mail: anlchen@126.com.

The authors declare that they have no competing interests.



SL trunk injection, the compound was systemically distributed to the roots, stems, branches, and leaves, with concentrations reaching 0.51 mg/kg in the branches and stems, and 0.15 mg/kg in the roots. The three-year application achieved a remarkable 89.41% control efficacy against root rot in *T. grandis*. Furthermore, the trunk injection of fosetyl-aluminum increased photosynthetic pigments, including chlorophyll, while reducing heat dissipation and carotenoid content in the leaves, thereby enhancing photosynthetic capacity. This led to normal leaf sprouting, rejuvenation, and re-greening. Collectively, fosetyl-aluminum, when applied via trunk injection, can move bi-directionally within *T. grandis* and is an effective treatment for root rot control.

Keywords: *Torreya grandis* root rot; trunk injection; fosetyl-aluminum; conduction distribution; control efficacy

香榧 (*Torreya grandis* cv. *Merrillii*) 为红豆杉科 (Taxaceae) 榧树属 (*Torreya*) 榧树 (*Torreya grandis*) 优良变异嫁接栽培品种^[1], 主要种植在浙江嵊州、诸暨、东阳、绍兴、临安等地^[2-3]。香榧集经济、绿化、药用、观赏等多用途于一体, 具有极高的营养和经济价值^[4], 近年来, 香榧根腐病日趋严重, 目前已明确其病原菌主要为紫纹羽卷担菌 (*Helicobasidium purpurum*) 和镰孢菌属的尖孢镰孢菌 (*Fusarium oxysporum*)^[5]、腐皮镰孢菌 (*Fusarium solani*)^[6]。感染根腐病后香榧一般表现为叶片发黄枯萎, 不抽新芽, 根部形成层和木质部呈浅棕色、伴有棕黑色坏死, 根系腐烂脱皮后死亡^[7]。香榧幼苗感染后在 4 月萌发新芽新梢时出现发芽缓慢、新芽变黄, 整株萎蔫症状; 树龄 20 年以上的香榧受侵染后, 叶片开始逐渐失绿变黄易脱落, 果实瘦小并大幅减产, 10 月份叶片就全部变黄脱落, 甚至死亡; 树龄 50 年以上的香榧受病原菌侵染后, 会出现叶片不正常掉落的现象, 但不会造成整株死亡。目前, 国内外关于香榧根腐病及其防治技术方面的报道较少, 生产中主要通过土壤撒石灰、施用化学农药^[8]等方式进行防治, 但因缺乏针对性施药技术, 田间防治效果差^[9], 还存在农药使用不当污染环境以及食品安全等问题。

乙磷铝是一种有机磷类高效、低毒、广谱的内吸性杀菌剂, 有效成分为三乙磷酸铝, 对多种病害防治效果良好^[10]; Schutte^[11] 对柑橘树树干注射乙磷铝防治柑橘疫霉病, 发现施药 42 d 后乙磷铝残留在柑橘根部中的含量达到峰值 (约 200 mg/kg), 之后再缓慢降低, 持效期约 60 d, 表明乙磷铝具有向下传导作用, 与苟春林等^[12] 研究结果一致。三乙磷酸铝在基质中解离后以乙基磷酸和亚磷酸分子两种形式存在^[13], 基于此, 本研究

配制了适合注干施用的 0.5% 乙磷铝水剂 (SL), 打孔注干施药, 采用高效液相色谱-质谱联用 (HPLC-MS/MS) 测定了乙磷铝在香榧体内的传导分布, 从香榧叶片光合作用的变化, 明确了对香榧根腐病的防治效果。以期探索出绿色、环保、高效的香榧根腐病防治方法, 为香榧根腐病及其他林木根部病害的防治提供参考。

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

仪器: YZQ-500 动态荧光仪 (翼鬃麒科技有限公司); UPLC/XEVO TQ-MS 高效液相色谱质谱联用仪、色谱柱 ACQUITY UPLC®BEH HILIC (2.1 mm × 50 mm, 1.7 μm) (沃特世科技有限公司); 多功能粉碎机 (德清拜杰电器有限公司); KQ-500E 型超声波清洗器 (昆山市超声仪器有限公司); 多管旋涡混合器 (泰州诺米医疗科技有限公司); SN-LSC-40S 离心机 (上海尚普仪器设备有限公司); 数显恒温水浴锅 HH-4 (国华电器有限公司); TU-1810 分光光度计 (北京普析通用仪器有限责任公司)。

试剂: 97% 乙磷铝原药 (山东大成生物化工有限公司); 磷酸二氢钾、乙二胺四乙酸二钠盐·二水、无水硫酸镁 (国药集团化学试剂有限公司); 亚磷酸钾 (广东翁江化学试剂有限公司); 硫酸锰一水合物 (源叶生物科技有限公司); 二甲基亚砜、色谱级甲酸、色谱级乙腈 (上海麦克林生化科技有限公司); 0.22 μm 水系聚醚砜 (天津市津腾实验设备有限公司)

0.5% 乙磷铝 SL 配制: 称取 0.5 g 乙磷铝原药溶于 500 mL 纯净水, 配制成 1000 mg/L 的乙磷铝母液, 待用; 称取 1.0 g 乙二胺四乙酸二钠盐·二

水溶于 500 mL 纯净水, 依次加入 0.1 g 无水硫酸镁、0.1 g 一水硫酸锰、1.5 g 硫酸锌、1.0 g 磷酸二氢钾, 完全溶解后, 按体积比 1: 1 与乙磷铝母液均匀混合。配制成 0.5% 乙磷铝 SL, 用于注干施药。

1.2 试验方法

1.2.1 乙磷铝在香榧体内的传导分布试验 试验在香榧苗圃开展: 浙江省杭州市临安区板桥镇香榧种植基地, 共 1 亩, 种植香榧苗 300 株。

采用 0.5% 乙磷铝 SL 注干施药。于 2021 年 4 月初, 在板桥镇香榧种植基地, 选取 9 棵长势基本一致、健康状况良好、试验前从未施过任何药剂、胸径 3~5 cm 的 3 年生香榧, 在树干基部与水平夹角斜 45°向下钻孔 (孔径 4.0 mm) 施药, 施药量为 50 mL/棵。分别于注干施药 7、14 和 21 d, 随机选取 3 棵香榧连根整株挖出, 注药孔以上为地上部, 以下为根部。注药孔上下 2 cm 为注药孔。以香榧枝条分布规律分成 2 段, 地上部分为

主干、侧枝和针叶。根分为主根和侧根。

1.2.2 乙磷铝残留检测方法

1.2.2.1 样品前处理 于 2023 年施药后 90、180 d 随机选取 3 棵香榧, 分别从树体东南西北 4 个方位剪取枝条、针叶和果实。将样品粉碎后准确称取 5 g, 加入 20 mL 水/二甲基亚砜 (4: 1, *V/V*) 溶液静置 30 min, 振荡 30 min, 于 4000 r/min 下离心 5 min, 取 1 mL 上清液于装有 9 mL 水的 15 mL 离心管中, 得稀释液; 吸取 1 mL 稀释液, 过 0.22 μm 水相滤膜。每部分重复 3 次。

1.2.2.2 HPLC-MS/MS 检测条件 色谱条件: 柱温 35 ℃, 流速 0.25 mL/min, 进样量 4 μL。流动相为 *V* (乙腈): *V* (0.1% 甲酸水溶液)=40: 60, 洗脱时间 5 min。

质谱条件: 电喷雾负离子 (ESI⁻) 扫描; 多反应监测 (MRM) 模式; 雾化气压力 379.225 kPa; 喷雾电压 4500 kV。其他质谱参数见表 1。

表 1 乙基磷酸质谱检测参数
Table 1 MS parameters of ethanephosphonic acid

化合物名称 Compound name	母离子>子离子 Parent ion > Daughter ion/amu	碎裂电压 Fragmentation/V	碰撞电压 Collision voltage/V
乙基磷酸 Ethanephosphonic acid	109.00>62.81	20	20
乙基磷酸 Ethanephosphonic acid	109.00>80.81	20	10

1.2.2.3 标准曲线的绘制 用纯净水稀释乙磷铝母液, 配制成 1、0.5、0.1、0.05、0.01 mg/L 的标准溶液。按 HPLC-MS/MS 条件测定, 以乙基磷酸的质量浓度为横坐标, HPLC-MS 测定响应值为纵坐标绘制标准曲线。

1.2.2.4 乙磷铝添加回收试验 准确称取 5 g 香榧枝条, 分别加入 1、0.5、0.1、0.05、0.01 mg/L 乙磷铝标准溶液, 混匀, 每浓度重复 3 次; 按 1.2.2.1 节进行样品前处理; 按 HPLC-MC/MS 条件测定样本中乙磷铝含量。计算平均添加回收率和相对标准偏差 (RSD)。

1.2.3 林间乙磷铝对香榧根腐病防治试验 试验地点: 浙江省湖州市安吉县孝源街道《香榧根腐病防治技术研究及示范推广》实施基地。样地采用茶树和香榧套种, 共 100 亩, 每亩 20 株香榧。

选取 5 株胸径 10~15 cm 的 13 年生健康香榧为健康对照; 随机选取 10 株长势和黄化程度基本一致、胸径 10~15 cm 的 13 年生香榧树, 其中 5 株为黄化香榧对照, 5 株为注干处理组, 在距地

面 15 cm 处用 Φ6 mm 钻头在树主干基部, 向下倾斜 45°钻 5 cm 的深孔, 挂牌标记。于 2021—2023 年连续注干施用 0.5% 乙磷铝 SL, 每年 3 月中旬注干施药 1 次, 施药剂量为 250 mL/棵。

相比农作物, 香榧等乔木或灌木根部病害在地上部分病症不明显, 发病时间长, 不易发现且防治周期长。因此分别于 2022、2023 年的 5 月上旬和 7 月上旬, 调查香榧新梢萌发情况和叶片黄化程度, 按照香榧新叶萌发和叶片黄化程度对根腐病发病情况进行分级, 0 级: 枝叶无黄化, 有新芽; 1 级: 1/3 以下枝叶黄化, 有新芽; 3 级: 1/3~2/3 枝叶黄化, 无新芽; 5 级: 2/3 以上枝叶黄化, 无新芽; 7 级: 植株死亡^[7]。每组处理随机选取 3 株香榧, 每株随机选取顶端向下第 3 轮枝条的 2 个侧枝, 用直尺测量侧枝 1 年生枝条新梢萌发长度。按公式 (1) 和 (2) 计算病情指数和防治效果。按 1.2.2 节方法进行样品前处理和残留量测定。

$$DI = \sum (s \times n) / (N \times S) \times 100$$

(1)

式中：DI 为病情指数； s 为各病情级别代表数值； n 为各病情级别的株数； N 为调查总植株数； S 为最高病情级别的代表数值。

$$E/\% = (DI_{CK} - DI_T)/DI_{CK} \times 100 \tag{2}$$

式中： E 为防治效果； DI_{CK} 为对照区病情指数； DI_T 为施药处理组病情指数。

1.2.4 叶片光合作用测定 试验方法同 1.2.3 节，分别于 2023 年施药后 15、45、180 d 采样。每处理随机选取 3 株香榧，分别取 3 片顶端第 3 轮羽状复叶，以湿棉花包裹叶柄后立刻放入装有冰袋的泡沫箱中避光保存，于当日采用叶绿素荧光动态仪测定叶绿素荧光诱导动力学参数非光化学淬灭的耗散光能比率 (ϕD_0)；电子传递的量子产额 (ϕE_0)；叶片光合系统 II (PS II) 最大光化学量子产量 (ϕP_0)；捕获能量从单电子传递到双电子的效率 (Ψ_0)。于采样当日将叶柄包裹湿棉花的叶片置于无强光房间，取 7~9 片叶柄上的互生小叶，整齐且无缝隙的贴在透明胶上，并立即用动态荧光仪检测记录，每株香榧 9 次重复。

称取 0.1 g 针叶，研磨成匀浆，加入 10 mL 95% 乙醇继续研磨至组织变白。静置 3~5 min 过滤，用 95% 乙醇定容至 25 mL，摇匀后比色。以 95% 乙醇为空白，分别在波长 665、649 和 470 nm 下测定吸光度 (A)。按照公式 (3)~(5) 计算叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b) 和类胡萝卜素 (Caro) 含量：

$$C_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649} \tag{3}$$

$$C_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \tag{4}$$

$$C_x = (1000A_{470} - 2.05C_a - 114.8C_b)/245 \tag{5}$$

式中： C_a 、 C_b 、 C_x 分别为叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量，mg/g。

1.3 数据处理

数据经 Excel 2021 整理，采用 IBM SPSS Statistics 25.0 软件对数据进行单因素方差分析，采用 Duncan 氏新复极差法进行各处理间差异显著

性的多重比较，显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 乙磷铝标准曲线

在 0.001~1 mg/L 范围内，乙基磷酸的响应值与其质量浓度呈良好的线性关系，回归方程为 $y = 31\,750x + 1674.8$ ，相关系数为 1，满足定量分析的要求。

2.2 乙磷铝在香榧中添加回收率

如表 2 所示，在 0.01~1 mg/L 5 个添加水平下，乙磷铝在香榧中的添加回收率为 86%~94%，相对标准偏差为 0.27%~1.9%。方法的准确度和精密度均满足分析要求，说明此方法可用于乙磷铝在香榧体内的含量检测。

表 2 乙磷铝在香榧中的添加回收率及相对标准偏差

Table 2 Recovery rate and RSD of fosetyl-aluminium in *T. grandis*

添加水平 Spiked level/(mg/kg)	平均回收率 Average recovery/%	相对标准偏差 RSD/%
0.01	92	0.89
0.05	88	1.5
0.1	86	0.27
0.5	94	1.8
1	92	1.9

2.3 乙磷铝在香榧体内传导分布

结果 (表 3) 表明：注干施药后，乙磷铝被树体各部分组织吸收传导，药后 7 d，主干、根部平均残留量分别为 0.43、0.15 mg/kg，药后 14 d 分别为 0.54、0.56 mg/kg，药后 21 d 分别为 0.50、0.45 mg/kg。表明乙磷铝注干施用后，可向上和向下双向传导，并在短时间内快速将有效成分传导至树体各部位。

2.4 乙磷铝在香榧体内分布

在安吉县试验样地内注干施用 250 mL/株 0.5% 乙磷铝 SL，连续施药 3 年，第 3 年注药后

表 3 乙磷铝在香榧体内传导分布

Table 3 The distribution and translocation of fosetyl-aluminiumn in *T. grandis*

施药后采样时间 Time/d	乙磷铝平均残留量 Average residue of fosetyl-aluminiumn/(mg/kg)					
	主干 Trunk	侧枝 Branch	注药孔 Injection site	主根 Taproot	侧根 Branch roo	针叶 Needle
7	0.43 ± 0.22	0.08 ± 0.07	0.34 ± 0.18	0.08 ± 0.09	0.07 ± 0.21	0.02 ± 0.11
14	0.54 ± 0.23	0.37 ± 0.18	0.69 ± 0.27	0.34 ± 0.11	0.22 ± 0.14	0.18 ± 0.09
21	0.50 ± 0.16	0.33 ± 0.11	0.52 ± 0.24	0.28 ± 0.15	0.17 ± 0.32	0.11 ± 0.10

90、180 d 的香榧枝条、针叶和果实中乙磷铝残留量见表 4: 注干施药后随时间增加乙磷铝残留呈减少趋势, 180 d 在香榧侧枝、果实及针叶中均能检测到乙磷铝, 表明其在香榧中持效期至少 180 d。

表 4 乙磷铝在香榧体内残留

施药后采样时间 Time/d	平均残留量 Average residue/(mg/kg)		
	侧枝 Branch	果实 Fruit	针叶 Needle
90	0.30 ± 0.07	0.20 ± 0.22	0.25 ± 0.19
180	0.28 ± 0.12	0.18 ± 0.15	0.19 ± 0.13

2.5 对香榧根腐病的防治效果

2021 年注干施药前, 注药香榧与黄化香榧对照相比, 在叶片黄化程度、新梢萌发方面差异不明显 (表 5); 第 2 年施药后, 注药香榧新梢萌发情况有明显好转, 对根腐病的防治效果为 52.89% (表 6); 第 3 年注药香榧黄化叶片基本变绿, 新梢

萌发时间、长度和健康香榧基本一致, 防治效果为 89.41%, 药后第 3 年比第 2 年的防治效果增加 69.05%, 病情指数降低 76.74%。经 3 年防治, 0.5% 乙磷铝 SL 注干后有助于香榧黄化叶片复壮复绿, 促进新梢萌发生长。

表 5 2021 年施药前香榧根腐病病情指数

Table 5 Disease index of <i>T. grandis</i> root rot disease before 2021		
处理 Treatment	2021 年施药前 Before application in 2021	
	新梢长度 New tip length/cm	病情指数 Disease index
健康香榧 Healthy torreyia	2.65 ± 0.25	/
0.5% 乙磷铝 SL fosetyl-aluminium 0.5% SL	未发芽	75.18 ± 0.22 b
黄化香榧 Yellowing torreyia	未发芽	79.07 ± 1.41 a

注: 表格内同列中不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Different letters in the same column of the table indicate significant differences between treatments($P < 0.05$).

表 6 2022、2023 年施药后香榧根腐病防治效果

Table 6 Control efficacy of <i>T. grandis</i> root rot disease after 2022, 2023						
处理 Treatment	2022 年药后 90 d 90 days after medication in 2022			2023 年药后 90 d 90 days after medication in 2023		
	新梢长度 New tip length/cm	病情指数 Disease index	防治效果 Control efficacy/%	新梢长度 New tip length/cm	病情指数 Disease index	防治效果 Control efficacy/%
健康香榧 Healthy torreyia	9.48 ± 0.83 c	/	/	12.49 ± 0.30 b	/	/
0.5% 乙磷铝 SL fosetyl-aluminium 0.5% SL	5.12 ± 0.38 b	40.15 ± 0.23 b	52.89 ± 0.34	11.25 ± 0.42 b	9.34 ± 0.59 b	89.41 ± 0.62
黄化香榧 Yellowing torreyia	1.36 ± 0.09 a	85.23 ± 0.87 a	/	1.61 ± 0.56 a	88.21 ± 1.22 a	/

注: 表格内同列中不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Different letters in the same column of the table indicate significant differences between treatments($P < 0.05$).

2.6 叶片光合作用测定

2.6.1 0.5% 乙磷铝 SL 注干对叶绿素荧光参数的影响 第 3 年施药后 15、45、180 d, 香榧叶片的最大光化学量子效率 (F_v/F_m) 均有不同程度的上升, 施药香榧与黄化香榧叶片的 F_v/F_m 差异显著, 但与健康香榧叶片差异不显著 (表 7)。表明乙磷铝注干有助于香榧叶片 PS II 原初反应及光合电子传递, 促进叶片光合作用。

黄化香榧叶片 PS II 耗散光能的比率 (ϕD_0) 显著高于施药香榧和健康香榧 (图 1A), 第 3 年药后 180 d, 施药香榧叶片的 ϕD_0 较黄化香榧降低 45.92%。施药香榧和健康香榧叶片的 ϕE_0 、 Ψ_0 较

黄化香榧均显著增加 (图 1B、1D), 药后 180 d 分别增加 104.74%、75.36%。第 3 年药后 45 d 和 180 d, 施药香榧和健康香榧叶片的最大光化学量子产量 ϕP_0 间无显著差异 (图 1C), 第 3 年药后 180 d, 施药香榧叶片的 ϕP_0 较黄化香榧叶片增加 18.65%。表明乙磷铝注干后香榧叶片复壮复绿, 能吸收较多光能, 主要以电子传递途径转换, 减少热耗散途径方式, 提高香榧叶片光合速率和光合产物合成。

2.6.2 0.5% 乙磷铝 SL 注干施用后香榧叶片叶绿素荧光动力曲线 第 3 年药后 15 d, 各处理组香榧叶片的叶绿素荧光动力曲线形状一致 (图 2A),

表 7 0.5% 乙磷铝 SL 注干的施药后香榧叶片光化学量子效率 (2023 年)

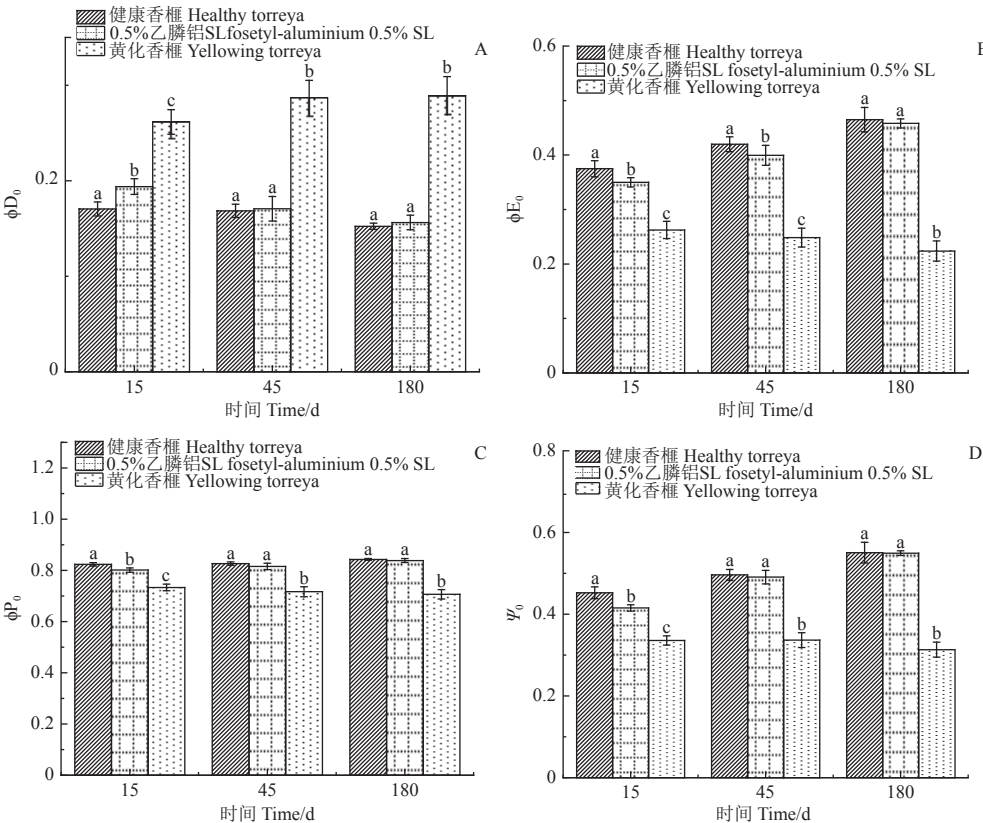
处理 Treatment	15 d	45 d	180 d
健康香榧 Healthy torreyia	0.78 ± 0.01 a	0.78 ± 0.01 a	0.80 ± 0.01 a
0.5% 乙磷铝 SL fosetyl-aluminium 0.5% SL	0.77 ± 0.02 a	0.78 ± 0.01 a	0.80 ± 0.01 a
黄化香榧 Yellowing torreyia	0.66 ± 0.01 b	0.63 ± 0.02 b	0.62 ± 0.02 b

注：表格内同列中不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Different letters in the same column of the table indicate significant differences between treatments($P < 0.05$).

在 O 点，施药香榧与健康香榧、黄化叶片的荧光值一致；在 J 点施药香榧叶片的荧光值低于健康香榧叶片的荧光值；在 I、P 点其叶片荧光值大小表现为：黄化香榧 < 施药香榧 < 健康香榧；总体

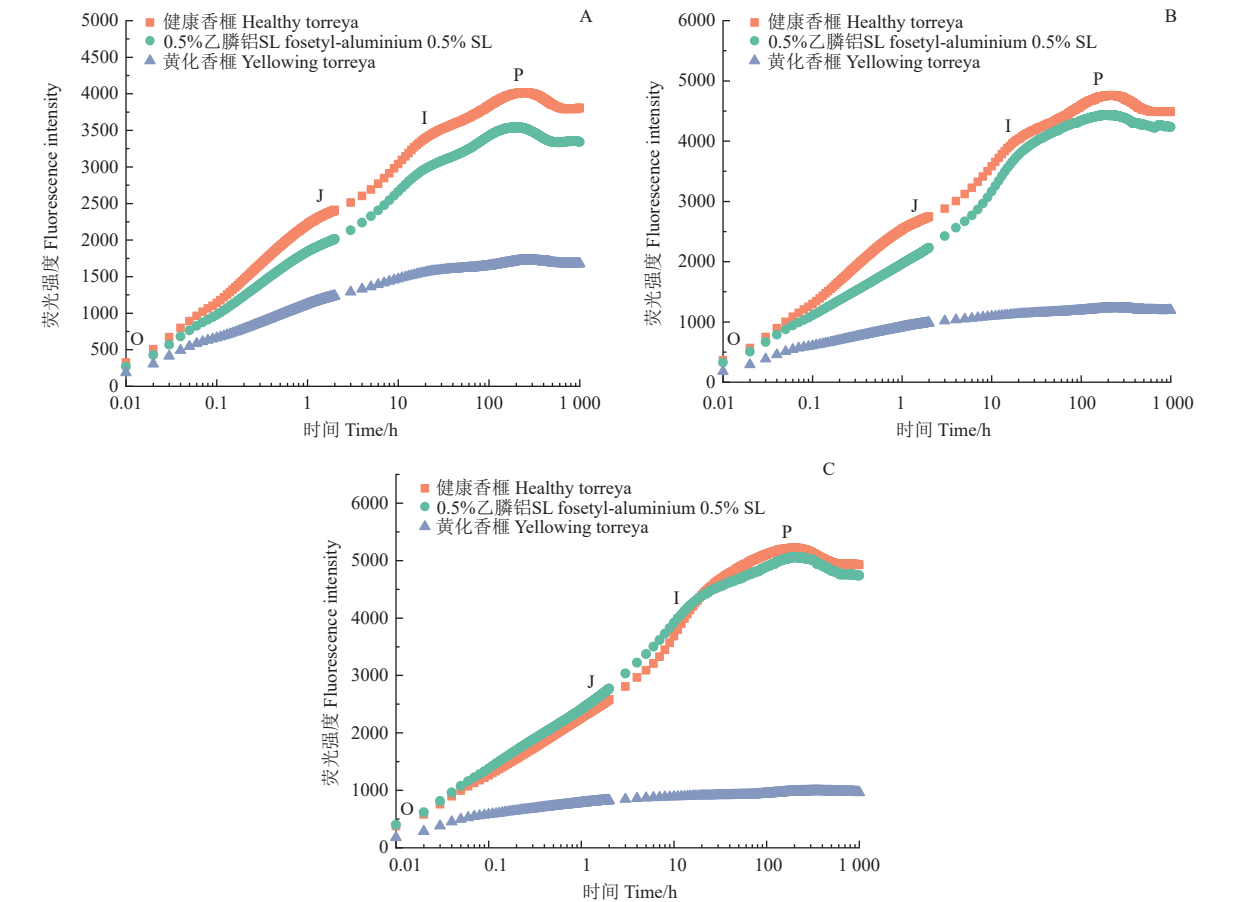
来看，施药香榧与健康香榧、黄化香榧叶片的 O-J-I-P 曲线在 O 点差异不大，经过 J、I 点的差异积累，到达 P 点时，健康香榧叶片的荧光值高于施药处理组且远高于黄化香榧组。药后 180 d 的测定曲线见图 2C，在 O 点，各处理荧光值一致；在 J 点其叶片荧光值大小表现为，黄化香榧 < 健康香榧 < 施药香榧，在 I、P 点施药香榧叶片与健康香榧叶片荧光值上升趋势一致。表明 0.5% 乙磷铝 SL 注干施用后在一定程度上改善了香榧叶片的叶绿素荧光动力学曲线特征，提高了香榧叶片 PS II 的光合作用。

2.6.3 0.5% 乙磷铝 SL 注干施用对香榧叶片光合色素含量的影响 第 3 年药后 15、45 和 180 d，黄化香榧与健康香榧相比，叶片的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素和总叶绿素含量均有显著差异(表 8)。施药后 180 d，施药香榧叶片的类胡萝卜素含量显著降低，其他色素含量总体和黄化香榧



A: ϕD_0 表示 PS II 耗散光能的比率; B: ϕE_0 表示初始时间点电子从单电子传递到质体醌的量子产额; C: ϕP_0 表示 PS II 捕获光能的效率; D: ϕ_0 捕获能量从单电子传递到双电子的效率。
注：不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。
A: ϕD_0 represents thermal dissipation quantum yield by PS II; B: ϕE_0 denotes the quantum yield (at time=0) for electron transport from Q_A -to plastoquinone; C: ϕP_0 denotes the maximum quantum yield for primary photochemistry; D: ϕ_0 capturing the efficiency of energy transfer from Q_A to Q_B .
Note: Different letters indicate significant differences($P < 0.05$).

图 1 0.5% 乙磷铝 SL 注干对香榧光合特性影响
Fig. 1 Effect of fosetyl-aluminium 0.5% SL trunk injection on photosynthetic characteristics of *T. grandis*



A. 3 年药后 15 d; B. 3 年药后 45 d; C. 3 年药后 180 d.

A. 15 d after application in the 3rd year; B. 45 d after application in the 3rd year; C. 180 d after application in the 3rd year.

图 2 0.5% 乙磷铝 SL 注干施用对香榧叶片叶绿素荧光动力曲线的影响 (2023 年)

Fig. 2 Effect of fosetyl-aluminium 0.5% SL trunk injection on the chlorophyll fluorescence kinetics curve of *T. grandis* leaves (2023 年)

表 8 0.5% 乙磷铝 SL 注干后对香榧叶片叶绿素含量的影响 (2023 年)

Table 8 Effects of fosetyl-aluminium 0.5% SL trunk injection on chlorophyll content of *T. grandis* leaves (2023 年)

药后采样时间 Sampling time after medication/d	处理组 Treatment group	叶绿素含量 Chlorophyll/(mg/g)			类胡萝卜 Carotenoid
		叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	叶绿素总含量 Total chlorophyll	
15	健康香榧 Healthy torreyia	5.76 ± 0.01 a	1.83 ± 0.02 a	7.59 ± 0.02 a	0.56 ± 0.04 a
	0.5% 乙磷铝 SL fosetyl-aluminium 0.5% SL	5.55 ± 0.01 a	1.80 ± 0.01 a	7.35 ± 0.02 a	1.26 ± 0.10 b
	黄化香榧 Yellowing torreyia	3.40 ± 0.07 b	1.19 ± 0.05 b	4.58 ± 0.15 b	1.71 ± 0.08 c
45	健康香榧 Healthy torreyia	9.37 ± 0.04 a	2.82 ± 0.01 a	12.19 ± 0.04 a	0.50 ± 0.01 a
	0.5% 乙磷铝 SL fosetyl-aluminium 0.5% SL	9.03 ± 0.48 a	2.52 ± 0.39 a	11.55 ± 0.67 b	1.18 ± 0.25 b
	黄化香榧 Yellowing torreyia	3.84 ± 0.72 b	0.87 ± 0.21 b	4.71 ± 0.74 c	1.80 ± 0.16 c
180	健康香榧 Healthy torreyia	9.41 ± 0.46 a	3.98 ± 0.32 a	13.39 ± 0.58 a	0.05 ± 0.05 a
	0.5% 乙磷铝 SL fosetyl-aluminium 0.5% SL	9.08 ± 0.03 a	2.98 ± 0.09 b	12.06 ± 0.12 b	0.13 ± 0.02 a
	黄化香榧 Yellowing torreyia	4.07 ± 0.03 b	1.40 ± 0.01 c	5.48 ± 0.03 c	1.84 ± 0.02 b

注：表格内同列中不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Different letters in the same column of the table indicate significant differences between treatments($P < 0.05$).

相比显著提高。表明 0.5% 乙磷铝 SL 注干有助于增加香榧叶片叶绿素含量，减少类胡萝卜素含量，提高光合速率。

3 结论与讨论

香榧根部病害因病症不明显一直是药剂研发的难点，筛选出针对性强的药剂，是防治香榧根腐病的关键。0.5% 乙磷铝 SL 注干施药后，对香榧根腐病的防治效果达 89.41%，同时能促进黄化香榧叶片的光合作用，使叶片复壮复绿。未来根据香榧根腐病发病的地势情况，还需继续扩大药剂筛选范围，获得更优药剂，以达到防治香榧根腐病的目的。

0.5% 乙磷铝 SL 注干施药后可有效传导至香榧树体内。Sharma 等^[14]对柑橘、金翅连续两年灌根施用乙磷铝后，柑橘果实中检测到乙磷铝残留；González 等^[15]对西班牙的成年栓皮栎林进行乙磷铝注干施药防治根腐病，发现一次注干施药后持效期至少可达 3 年。注干施用后乙磷铝在香榧体内含量先升高，随时间延长含量降低，在香榧体内持效期至少 180 d。果实中乙磷铝含量 (0.18 mg/kg)，远低于 2018 年欧盟及国际食品法典委员会 (CAC) 中树生坚果三乙磷酸铝的限量标准 (400 mg/kg)^[16]，符合食品中三乙磷酸铝限量标准。注干施药后 7、14、21 d 在香榧各部分均能检测到乙磷铝含量，表明乙磷铝在香榧树体内可以上下双向传导，能有效防治根腐病。

0.5% 乙磷铝 SL 注干施药能显著增强黄化香榧叶片的光合作用。乙磷铝注干施用后，叶片的光合色素和叶绿素含量增加，热耗散量和类胡萝卜素含量降低，增强了叶片的光合作用；传导至香榧根部，促进香榧叶片萌发、生长逐渐恢复正常，香榧叶片的光合作用逐渐增强，香榧生长进入了良性循环。叶绿素荧光参数能快速反映植物光合系统对光能的吸收和利用情况^[17]。刘东娜等^[18]研究表明，黄化茶树的光合色素含量、光合及叶绿素荧光诱导动力学特性显著低于对照，光合作用综合性能降低；屈魏蕾等^[19]研究表明，4 种微生物菌剂接种处理后小麦的生长、生理指标以及光合性能均有所提高；本试验研究结果与其一致。表明施药后病情好转，叶片由黄变绿，叶绿素含量增加，有助于提高植物光能转化，增强

香榧叶片的光合作用，促进香榧生长。

综上，乙磷铝具有上下双向传导作用，对香榧根腐病防治效果良好，果实中乙磷铝残留符合农药残留标准，表明乙磷铝注干施用可用于香榧根腐病的防治。本研究为林木根腐病的防治提供了新的途径。

参考文献 (References):

[1] 黎章矩, 程晓建, 戴文圣, 等. 香榧品种起源考证[J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(4): 443-448.
LI Z J, CHENG X J, DAI W S, et al. Origin of *Torreya grandis* 'Merrillii'[J]. J Zhejiang For Coll, 2005, 22(4): 443-448.

[2] 何祯, 王宗星, 张骏, 等. 浙江省香榧产业发展现状与对策[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(7): 1345-1347.
HE Z, WANG Z X, ZHANG J, et al. Present situation and countermeasures of *Torreya grandis* Merrillii industry development in Zhejiang Province[J]. J Zhejiang Agric Sci, 2020, 61(7): 1345-1347.

[3] ZHANG R, ZHAO Y X, LIN J H, et al. Biochar application alleviates unbalanced nutrient uptake caused by N deposition in *Torreya grandis* trees and seedlings[J]. For Ecol Manag, 2019, 432: 319-326.

[4] 韦国春, 肖庆来, 喻卫武, 等. 香榧枝叶黄化的生理生化特性及土壤理化性质分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(17): 5823-5836.
WEI G C, XIAO Q L, YU W W, et al. Analysis on the physiological and biochemical characteristics of yellowing branches and soil of *Torreya grandis* 'Merrillii'[J]. Mol Plant Breed, 2022, 20(17): 5823-5836.

[5] 张婷婷, 许贺, 蔡冬清, 等. 香榧壳生物炭/g-C₃N₄ 活化过硫酸盐的光催化性能[J]. 中国环境科学, 2022, 42(3): 1146-1156.
ZHANG T T, XU H, CAI D Q, et al. Study on photocatalytic performance of cephalotaxus shell biochar/g-C₃N₄ activated persulfate[J]. China Environ Sci, 2022, 42(3): 1146-1156.

[6] WU H S, ZHOU X D, SHI X, et al. In vitro responses of *Fusarium oxysporum* f. sp. *niveum* to phenolic acids in decaying watermelon tissues[J]. Phytochem Lett, 2014(8): 171-178.

[7] 张思琦, 沈黄莹, 庾金武, 等. 香榧根腐病病原菌分离鉴定及绿色药剂筛选[J]. 植物病理学报, 2022, 52(3): 499-503.
ZHANG S Q, SHEN H Y, YU J W, et al. Pathogen identification of *Torreya grandis* root rot and green fungicides screening[J]. Acta Phytopathol Sin, 2022, 52(3): 499-503.

[8] ZHANG C Q, ZHANG S Y, CHEN X L, et al. First report of *Fusarium* crown and root rot on *Torreya grandis* caused by *Fusarium oxysporum* species complex in China[J]. Plant Dis, 2016, 100(7): 1500.

[9] CHANDEL S, DEEPIKA R. Recent advances in management and control of *Fusarium* yellows in *Gladiolus* species[J]. J Fruit Ornament Plant Res, 2010, 18(2): 361-380.

[10] 郭雨, 施亚申, 吉如娜. 花生和南瓜籽中三乙磷酸铝残留量的测定方法分析[J]. 中国口岸科学技术, 2023, 5(11): 63-67.
GUO Y, SHI Y S, JI R N. Determination of fosety-aluminum residues in peanuts and pumpkin seeds[J]. China Port Sci Technol, 2023, 5(11): 63-67.

[11] SCHUTTE G. Timing of application of phosphonate fungicides using different application methods as determined by means of gas-liquid chromatography[J]. *Phytophylactica*, 1991, 23(1): 68-70.

[12] 苟春林, 葛谦, 刘元柏, 等. 苹果和土壤中三乙磷酸铝含量的气相色谱分析[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(6): 1686-1687.

GOU C L, GE Q, LIU Y B, et al. Determination of fosetyl-aluminium residue in apple and soil by gas chromatography[J]. *J Anhui Agric Sci*, 2014, 42(6): 1686-1687.

[13] 张晓梅, 黄翠玲, 张鸿伟, 等. 白菜中三乙磷酸铝不同提取方法的比较研究[J]. *中国食品添加剂*, 2021, 32(3): 51-56.

ZHANG X M, HUANG C L, ZHANG H W, et al. Comparative study on extraction methods of fosetyl-aluminum in Chinese cabbage[J]. *China Food Addit*, 2021, 32(3): 51-56.

[14] SHARMA S, SHARMA N, MANDAL K, et al. Residue studies of fosetyl aluminium in Citrus fruit on LC-MS/MS[J]. *Agric Res J*, 2021, 58(1): 93-98.

[15] GONZÁLEZ M, ROMERO M Á, SERRANO M S, et al. Fosetyl-aluminium injection controls root rot disease affecting *Quercus suber* in southern Spain[J]. *Eur J Plant Pathol*, 2020, 156(1): 101-109.

[16] Commission Regulation (EU) 2018/832[Z]. OJEU, 2018.

[17] 向芬, 李维, 刘红艳, 等. 氮素水平对不同品种茶树光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2018, 38(6): 1138-1145.

XIANG F, LI W, LIU H Y, et al. Characteristics of photosynthetic and chlorophyll fluorescence of tea varieties under different nitrogen application levels[J]. *Acta Bot Boreali Occidentalia Sin*, 2018, 38(6): 1138-1145.

[18] 刘东娜, 龚雪蛟, 李兰英, 等. 黄化茶树叶片光合及荧光特性分析[J]. *茶叶科学*, 2023, 43(6): 757-768.

LIU D N, GONG X J, LI L Y, et al. Analysis of photosynthetic and fluorescence characteristics of albino tea plants[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2023, 43(6): 757-768.

[19] 屈魏蕾, 田玉磊, 井方宇, 等. 微生物菌剂对于干旱胁迫下小麦生长生理和叶绿素荧光参数的影响研究[J]. *江西农业学报*, 2022, 34(10): 30-37.

QU W L, TIAN Y L, JING F Y, et al. Effects of microbial agents on growth, physiology and chlorophyll fluorescence parameters of wheat under drought stress[J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2022, 34(10): 30-37.

(责任编辑: 李 蕊)

• 书 讯 •

一部系统介绍世界植物生长调节剂的大型实用手册
《世界农药大全—植物生长调节剂卷》
(第二版)

张宗俭 武恩明 李斌 编著
化学工业出版社 出版



内容简介:

本书在第一版基础上, 简要介绍了植物生长调节剂的概念、类别, 以及登记、应用和发展情况, 精心收集并详细介绍了近 170 个植物生长调节剂品种及可以作为植物生长调节剂开发应用或具有植物生长调节剂性质的化合物, 同时对应用技术、合成方法以及参考文献进行了简要介绍。

图书特点:

(1) 延续经典, 内容全面

本书紧跟科学发展, 增加了近年开发的植物生长调节剂新品种, 删除了禁用、停用品种, 并对部分品种的登记和应用信息进行更新和补充。

(2) 信息量大, 重点突出

本书按照植物生长调节剂单剂和植物生长调节剂复配制剂分类, 分别详细介绍了品种名称、结构式、CAS 登录号、理化性质、毒性、作用机理等方面, 重点介绍了应用技术与合成方法。

(3) 数据详实, 索引完备

本书引用和列举了大量科学详实的数据, 详细介绍每种植物生长调节剂。在第一版基础上精简索引, 更利于检索, 方便读者阅读。

◆书 号: 978-7-122-45975-6 ◆定 价: 168.00 元 ◆出版时间: 2024 年 9 月 ◆开 本: 16 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、天猫网店均可销售, 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)