

沙针种子 GA₃+KT 化学激活与物理破皮萌发效应研究



贺相田¹, 何欣雨², 吴亚妮¹, 张泽雨¹, 孟庭耀³, 牟凤娟^{1,4,*}

¹西南林业大学林学院, 云南昆明 650224

²中国林业科学研究院高原林业研究所, 云南昆明 650233

³西南林业大学生物与食品工程学院, 云南昆明 650224

⁴红河学院生物科学与农学学院, 云南蒙自 661199

摘要: 针对沙针 (*Osyris lanceolata*) 种子萌发特性复杂导致的培育成本高、资源可持续利用受限等问题凸显, 本研究旨在系统解析其萌发特性, 建立分级萌发策略, 降低其人工培育的产业化成本, 为规模化繁育与资源保护提供解决方案, 推动相关特色产业链的开发。以自然结实种子为材料, 通过剥种皮、热激、剥除果皮阴干等机械处理与 GA₃+KT 组合浸种, 浓度梯度 500-1500 mg/L 等化学浸种处理方法, 结合萌发率 (GP)、萌发指数 (GI)、同步性 (GV) 等萌发指数, 以及萌发差异性 (Anova、Duncan's)、效应量 (η^2 、Cohen's f) 评估, 筛选最优萌发方案。化学浸种最优处理方案为 1500 mg/L GA₃+20 mg/L KT 浸种 24 h (GK9), 萌发率达 79.77%; 物理最优处理方案为剥除种皮, 萌发率 67.60% ($p<0.001$)。为提升沙针种子萌发效果, 需采用场景适配的分级策略——精细化育苗采用剥除种皮以规避化学污染, 规模化生产首选 GK9, 逆境栽培探索热激+低浓度 GA₃ 协同增效。

关键词: 沙针; 种子萌发; 物理处理; 化学处理

DOI: [10.57237/j.jaf.2025.04.002](https://doi.org/10.57237/j.jaf.2025.04.002)

Seed Germination of *Osyris lanceolata*: Chemical Induction and Scalable Strategies

He Xiangtian¹, He Xinyu², Wu Yani¹, Zhang Zeyu¹, Meng Tingyao³, Mou Fengjuan^{1,4,*}

¹College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

²Institute of Highland Forest Science, Chinese Academy of Forestry, Kunming 650233, China

³College of Biology and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

⁴College of Biological and Agricultural Sciences, Honghe University, Mengzi 661199, China

Abstract: As the problems of high cultivation costs and restricted sustainable resource utilization, resulting from the complex germination characteristics of African sandalwood (*Osyris lanceolata*), have become prominent, this research is designed to systematically analyze these characteristics and develop a graded germination strategy. This initiative seeks to lower industrial production costs, offer solutions for mass cultivation and conservation, and facilitate the growth of associated specialty industries. Using naturally matured seeds, mechanical treatments (seed-coat removal,

*通信作者: 牟凤娟, moufengjuan@126.com

heat shock, pericarp removal followed by shade-drying) and chemical soaking with GA₃+ kinetin (KT) at 500-1500 mg/L were evaluated. Germination percentage (GP), germination index (GI), and synchrony (GV) served as metrics, while ANOVA, Duncan's test, and effect sizes (η^2 , Cohen's f) were employed to identify the optimal dormancy-breaking protocol. The optimal chemical treatment was soaking seeds in 1500 mg/L GA₃ + 20 mg/L KT for 24 h (GK9), achieving a germination rate of 79.77%; the optimal mechanical treatment was seed coat removal, resulting in a germination rate of 67.60% ($p < 0.001$). To enhance the germination performance of *O. lanceolata* seeds, a scenario-specific, graded strategy is recommended. For precision nursery cultivation, the M1 method is adopted to avoid chemical contamination. Large-scale production should prioritize the GK9 protocol. For cultivation under stressful conditions, the synergistic effect of heat shock combined with a low concentration of GA₃ is recommended for further exploration.

Keywords: *Osyris lanceolata*; Seed Germination; Physical Treatment; Chemical Treatment

1 引言

沙针 (*Osyris lanceolata*) 为檀香科 (Santalaceae) 常绿灌木或小乔木, 具较高经济价值, 如心材可作为檀香的替代品, 提取的精油广泛用于化妆品和香料工业; 植株不同部位在传统医药中具有重要治疗用途; 同时作为耐旱贫瘠的乡土树种在生态恢复中潜力巨大[1]。然而, 由于对野生资源的盗采盗伐以满足市场对檀香油的需求, 其野生种群数量锐减, 现已在东非被列为濒危物种, 并预计到 2040 年面临该地区野生灭绝的风险[2]。

沙针种子萌发促进技术的瓶颈在于对其内在调控机制的认知尚不全面。现有研究表明, 物理手段如剥皮或热激可将萌发率提升至约 40%, 但未能充分证实种皮浸提液中潜在化感物质的抑制作用[3]。更为关键的是, 沙针可能存在与如具有酚酸介导萌发调控机制的黄连木 (*Pistacia chinensis*) 等植物相似的物理-化学复合调控系统, 但缺乏系统性验证[4], 导致当前萌发促进技术面临困境: 人工剥皮法的成本过高, 难以规模化; 外源激素处理的作用机理模糊[5]; 模拟野火等自然干扰以改善种皮透性的生态方法潜力未被重视[6]。这种理论与实践的脱节严重制约了沙针种苗的规模化生产。

因此, 亟需全面解析沙针种子萌发调控网络, 特别是潜在的化学抑制和复合调控特性, 并据此开发高效、低成本、可规模化的种子萌发促进技术, 以支撑其资源保护与可持续利用。本研究旨在通过多维度实验, 构建沙针种子萌发的综合调控方案。

2 材料与方法

2.1 材料

沙针种子采集于昆明市盘龙区呼马山森林公园 (约 25°N, 103°E), 该区域属亚热带高原季风气候, 年均温 15.2℃, 降水 1035 mm (雨季集中) [7]; 山地红壤, pH 5.8~6.3; 植被为半湿润常绿阔叶林, 优势种滇青冈 (*Quercus glaucooides*) 和云南松 (*Pinus yunnanensis*)。样点海拔 1890 m, 沙针多生于林缘及岩石裸露区[8]。

采集方法: 在沙针分布区 (1.2 km²) 基于 GIS 生成网格, 分层随机抽取 20 个代表不同微生境的样方 (阳坡、阴坡等)。于盛果期 (2024 年 9-10 月) 晨间连续收集自然落果, 剔除发育不良果实, 备用。种子于室温下干燥, 待含水量降至 18-20% 后, 4℃ 冷藏保存备用。

2.2 方法

2.2.1 种子形态指标测定

随机选取沙针种子 50 粒, 用游标卡尺测量种子的长度、宽度、体积、表面积并计算其平均值, 3 次重复; 种子百粒重测定, 用电子天平进行称重, 5 次重复[9]。

2.2.2 种子生活力测定

为快速评估沙针种子胚组织的代谢活性, 解决常规发芽实验周期长, 尤其对发芽缓慢种子环境干扰大的问题, 为后续萌发研究及播种提供可靠依据[10]。本研究将保存的沙针种子于 30℃ 温水中浸泡 24 h, 去除

种皮后完全浸没于 0.5%氯化三苯基四氮唑（TTC, 2,3,5-Triphenyltetrazolium chloride）后，于 30 ℃ 恒温培养箱避光染色 12 h。参照国际种子检验规程，纵切种子暴露胚部，立即观察胚部着色情况，着色面积≥50%的种子判定为有生活力。生活力（V, Viability）一般以着色胚数（SEC, Stained Embryo Count）与检测总粒数（TTS, Total Tested Seeds）的比例来表示[11]，计算公式如下：

$$V=(\frac{SEC}{TTS})\times100\% \tag{1}$$

2.2.3 种子物理处理

将沙针种子用 0.5%的 K₂MnO₄ 溶液消毒 30 min 后用蒸馏水冲洗 3 次，阴干备用。之后分别进行剥离种皮、热水浸种等物理处理。每种处理方式选 50 粒，3

次重复，3 种处理方式总计 450 粒种子（表 1）。评估不同处理方法对种子发芽的萌发率（GP, germination percentage）、萌发指数（GI, germination index）、萌发同步性（GV, germination synchrony）等指标的影响。

2.2.4 种子化学浸种处理

赤霉素（GA₃）是一种常见的植物生长激素，能够促进种子萌发，而激动素（KT）在调控细胞分裂和生长方面具有重要作用[12]。本研究使用不同浓度的赤霉素（GA₃）和激动素（KT）溶液对种子进行不同时长浸泡处理（表 1），测试其对种子发芽的 GP、GI、GV 等指标的影响。每种处理 50 粒，3 次重复，9 种处理方式共 1350 粒种子。

表 1 种子物理和化学处理设置

组别	列号	处理
物理处理	M1	剥除果皮后阴干 24 h，再剥离种皮
	M2	干种子（室温避风 48 h）后，80 ℃ 热水浸种 10 min
	M3	剥除果皮后阴干 48 h，直接用于萌发实验
	GK1	GA ₃ 溶液 500 mg/L+ KT 溶液 0 mg/L，浸种 12 h
化学处理	GK2	GA ₃ 溶液 500 mg/L + KT 溶液 10 mg/L，浸种 24 h
	GK3	GA ₃ 溶液 500 mg/L + KT 溶液 20 mg/L，浸种 36 h
	GK4	GA ₃ 溶液 1000 mg/L + KT 溶液 0 mg/L，浸种 24 h
	GK5	GA ₃ 溶液 1000 mg/L + KT 溶液 10 mg/L，浸种 36 h
	GK6	GA ₃ 溶液 1000 mg/L + KT 溶液 20 mg/L，浸种 12 h
	GK7	GA ₃ 溶液 1500 mg/L + KT 溶液 0 mg/L，浸种 36 h
	GK8	GA ₃ 溶液 1500 mg/L + KT 溶液 10 mg/L，浸种 12 h
	GK9	GA ₃ 溶液 1500 mg/L + KT 溶液 20 mg/L，浸种 24 h

2.2.5 种子萌发

物理处理组与化学浸种组处理后的种子萌发基质为红土（腐殖土与苗圃土的比例为 1:1），控温（25±2 ℃）和自然散射光条件下培养[13]。为了准确判断种子的萌发情况，定义“萌发”标准为胚根突破种皮≥2 mm。实验期间，每日记录并统计萌发数，并持续观察 28 天。

2.2.6 数据分析

通过观察和记录，计算以下几项萌发相关指标。

萌发率（GP）：通过计算萌发种子数（NGS, Number of germinated seeds）与种子总数（TNS, Total number of seeds）的比例，得出萌发率[14]。

$$GP=(\frac{GS}{GC})\times100\% \tag{2}$$

萌发指数（GI）：反映了每日（Day）种子萌发（GS_d）的综合情况[15]。

$$GI=\sum \left(\frac{GS_d}{Day}\right) \tag{3}$$

萌发同步性（GV）：用于衡量种子发芽的均匀性[16]。

$$GV=\left(\frac{\sum GI}{Day}\right)\times\frac{GP}{10} \tag{4}$$

3 结果与分析

3.1 种子特征及萌发指数

本研究沙针种子长度（5.73±0.34 mm）与宽度（4.94±0.25 mm）的离散度均低于 6%，证实种子发育均匀；百粒重达 6.06±0.16 g，明显低于植物种子常规

变异阈值(>5%),揭示本批次种子的饱满度高度齐整,暗示成熟过程养分分配均衡。生活力方面,TTC 染色显示胚部着色率达 88.6%,其中完全着色种子占比超七成(72.4%),说明多数种子的胚组织活性功能完整。综合及生活力指标,该批次种子低变异系数、高物质积累效率及强代谢活性的核心特征,符合优质种源标准。

不同处理方式下沙针种子萌发特性数据对比结果,化学浸种显著优于物理处理,能更有效提升沙针种子萌发率和整齐度:

- (1) 物理方法(如剥除种皮)效果有限且不稳定,无法精准调控种子生理状态以促进萌发(图 1a-b)。
- (2) 最优方案为 1500 mg/L GA3 + 20 mg/L KT 浸种 24 h (GK9),萌发率达 79.8%(图 2a),萌发指数 2.37(图 2b)。GA3 有效促进萌发,KT 协同促进代谢。

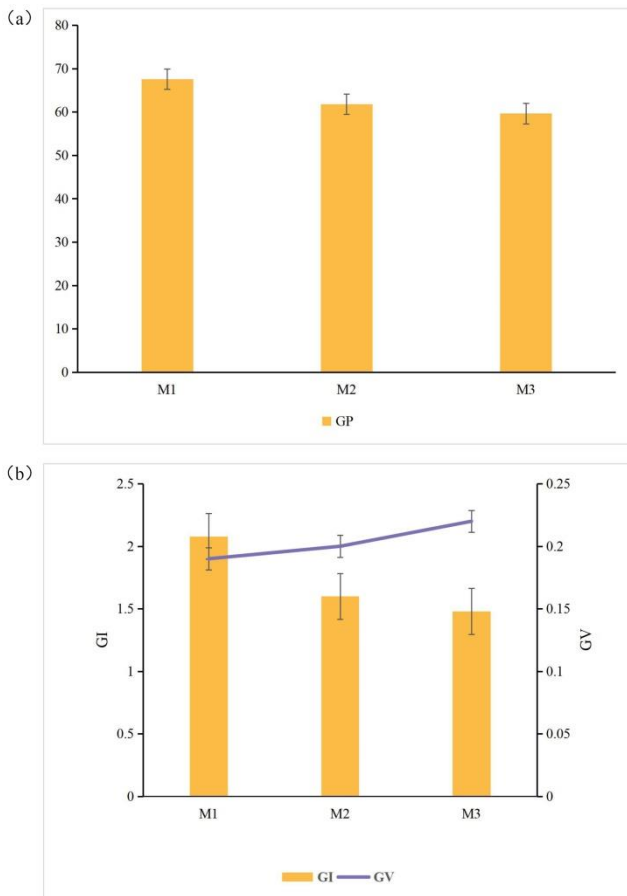


图 1 物理处理沙针种子萌发

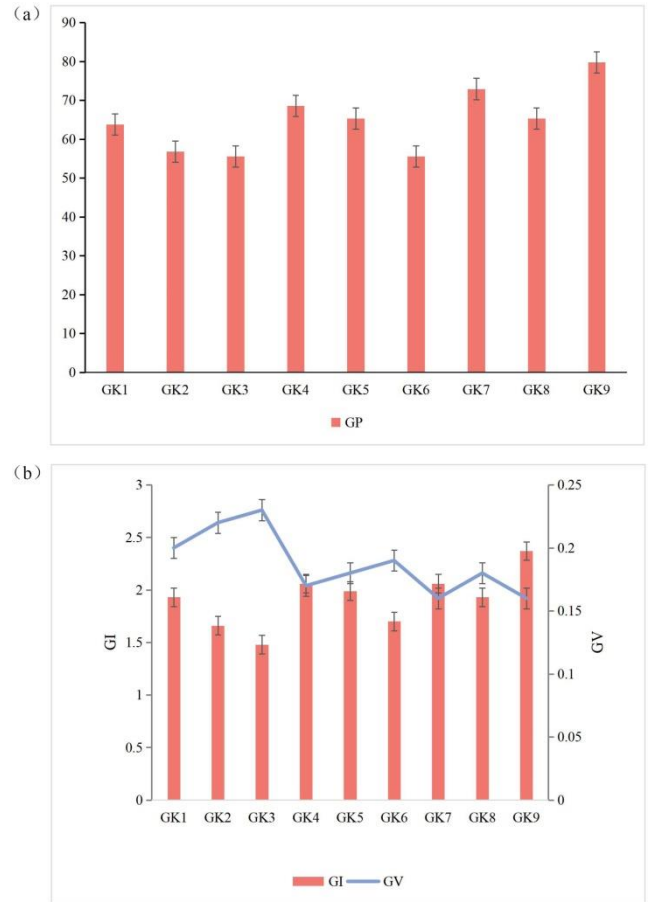


图 2 化学处理 (GA3+KT 溶液) 沙针种子萌发

3.2 不同处理下的种子萌发差异性分析

3.2.1 物理处理方式下种子萌发差异性分析

单因素方差分析分析结果表明分析结果表明,三种物理处理在 GP、GI 与 GV 上存在极显著差异 ($p<0.001$),剥除种皮处理 (M1) 效果最优,其萌发率 ($67.60\% \pm 0.092$) 比热激处理 (M2) 提高 9.4%,萌发指数 (2.08 ± 0.312) 比 M2 提高 30.0%,同时, M1 组还表现出最佳的萌发同步性 ($GV=0.19 \pm 0.06$)。

基于物理处理组的 Duncan's 检验结果, M1 处理对发芽率 (GP) 的提升效果最显著,显著高于 M2 和 M3,表明其物理处理方式能有效突破种子萌发屏障(图 3a)。值得注意的是,发芽指数 (GI) 与发芽同步性 (GV) 在各组间虽存在数值差异,但未实现显著性分组,说明不同物理处理对萌发速度和整齐度的影响未达统计学差异(图 3b)。

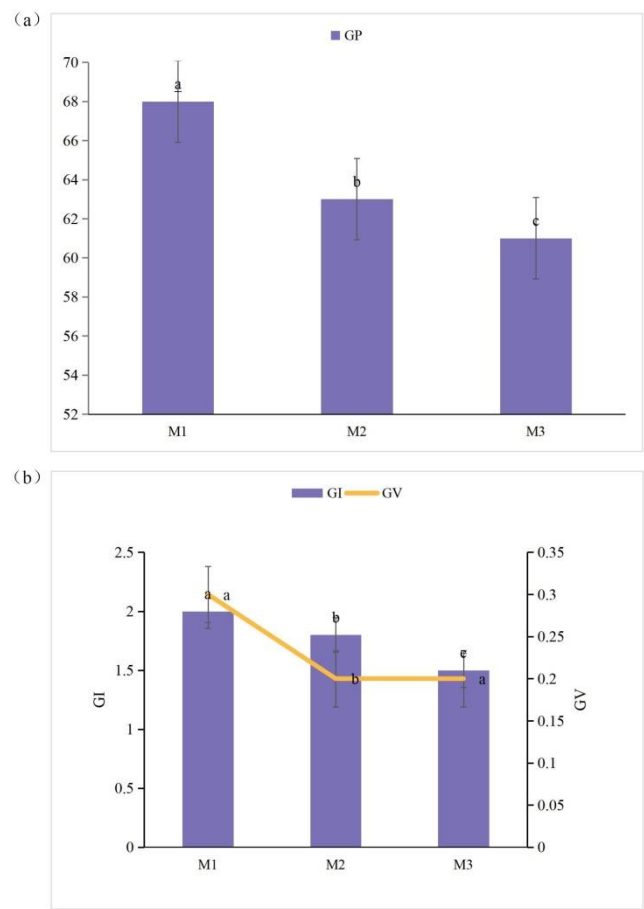


图 3 物理处理组 Duncan's 检验结果

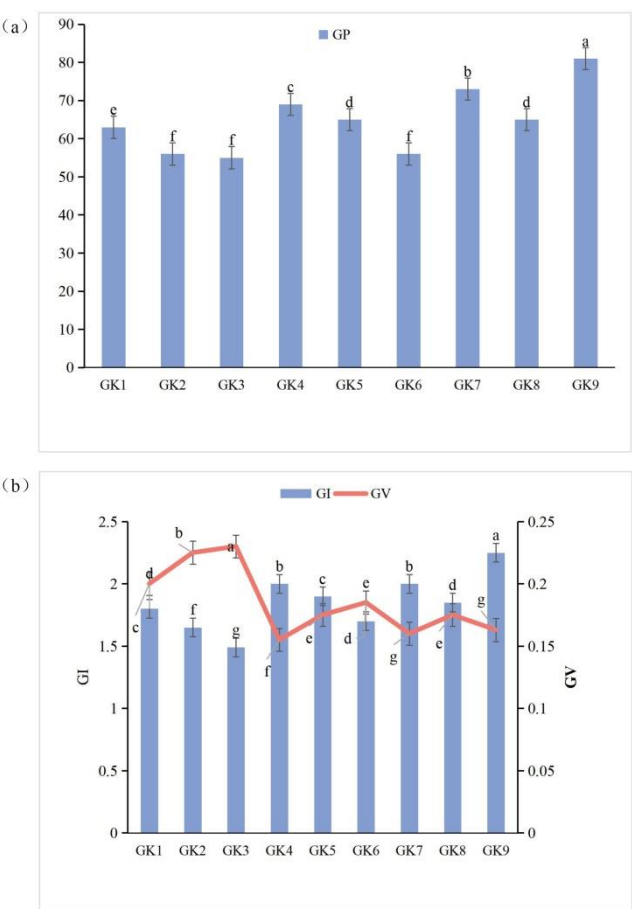


图 4 化学浸种（GA3+KT 溶液）处理 Duncan's 检验结果

3.2.2 化学处理方式下种子萌发差异性分析

单因素方差分析结果表明，不同化学浸种处理在 GP、GI 与 GV 上均存在极显著差异 ($p < 0.001$)，GK9 处理 (1500 mg/L GA3 + 20 mg/L KT 浸种 24 h) 效果最优：其萌发率 ($79.77\% \pm 0.057$) 比最差的 GK3 处理 ($55.54\% \pm 0.067$) 提高 43.7%，萌发指数 (2.37 ± 0.411) 比 GK3 提高 60.1%，且同步性为最优之一 ($GV = 0.16 \pm 0.01$)。

Duncan 多重检验确认结果表明，GK9 组在萌发率 (图 4a) 和萌发指数 (图 4b) 上均极显著高于其他多个处理组 (***)，证实其提升萌发效率和过程的有效性最优。虽 GV 存在显著差异，但组间区分度相对较低 (图 4b)。

3.3 不同处理方式的影响效应分析

如图 5 所示，虽然两种处理对所有指标的效应强度均达到“极大效应” ($f > 0.8$ 且所有组合 $f > 0.35$)，但化学浸种在所有萌发指标 (GP、GI、GV) 的效应量 (η^2 、Cohen's f) 上均显著高于物理处理，具体如下：

- (1) 萌发率 (GP)：化学组 $\eta^2 = 0.72$ (效应量 $f = 1.6$) 显著高于物理组 ($\eta^2 = 0.63$, $f = 1.3$)，可解释变异的差异达 23%。
- (2) 萌发指数 (GI)：化学组 $\eta^2 = 0.67$ ($f = 1.43$) 也显著高于物理组 ($\eta^2 = 0.55$, $f = 1.11$)，效应强度提升 28.8%。
- (3) 萌发同步性 (GV)：化学组效应量优势同样显著 ($\eta^2 = 0.61$ vs 0.51 , $f = 1.25$ vs 1.01)，与其能获得更低 GV 值 (如 0.16 vs 0.28) 的结果相符。

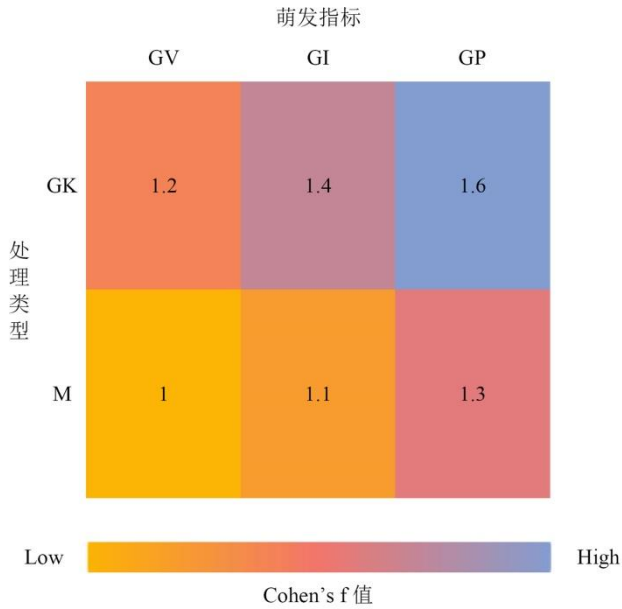


图5 不同处理方式对种子萌发指标的 Cohen's f 热力图

4 讨论

4.1 沙针种子的物理处理及萌发特性

沙针种子的物理处理促进萌发源于种皮结构对胚根生长的机械束缚，这种屏障通过阻碍水分渗透和气体交换抑制萌发启动[17]。物理破除处理的比较揭示干预效果差异的核心机制，本研究中剥除沙针种皮处理（M1）的高效性源于其彻底移除种皮角质层，可直接消除种皮物理屏障且规避脱水风险[18]；热激处理（M2）的局限性体现为温度对沙针种皮软化不彻底，导致无法有效解决胚根突破的结构阻力[19]；剥除果皮阴干处理（M3）引发的萌发异步性则归因于脱水过程干扰内源激素平衡，与半寄生植物对水分胁迫的敏感性特征相符[20, 21]。值得注意的是，沙针作为半寄生植物演化出的种皮结构可能兼具机械屏障与寄主识别信号传递的双重功能，为剥除种皮处理的特殊有效性提供了进化生物学解释——直接破除种皮不仅解除物理限制，还可能重置寄生识别机制[22]。因此，物理处理破除种子休眠以提高种子萌发策略需优先选择能彻底解除结构束缚的干预方式，而非间接改良手段。

4.2 外源激素对沙针种子萌发差异性影响

外源激素对沙针种子萌发的调控体现为 GA3-KT 信号级联的精密协作。1500 mg/L 赤霉素（GA3）的核心作用源于其激活胚乳代谢网络的能力——通过诱导

α -淀粉酶（ α -amylase）基因表达，加速淀粉转化为可溶性糖提供萌发能量[23]；同时上调 XET（Xyloglucan Endotransglucosylase）活性，弱化种皮纤维素结构屏障，该浓度阈值与半寄生植物的高激素响应特性相适应[31]。激动素（KT）在 20 mg/L 浓度下显示协同增效，其通过促进细胞周期蛋白 CycD1 表达，缩短分生组织 G1/S 期转换时程[24]。但低浓度 GA3 环境中 KT 与赤霉素受体 GID1 竞争性结合，诱发脱落酸合成基因 NCED3（9-cis-epoxycarotenoid dioxygenase）上调，形成激素比例失衡的拮抗效应[25]。值得注意的是 24 h 浸种时间的双重意义：既保障 GA3 信号充分传递，又可规避超时引发的线粒体电子漏，即活性氧爆发[26, 27]。因此，外援激素介入下，沙针种子破眠成功需满足三要素：GA3 驱动代谢爆发、KT 精准调控细胞周期、时控维持氧化还原稳态。

4.3 不同处理方式对沙针种子萌发的影响效应

沙针种子不同处理方式的效果差异主要源于生理响应机制的内在区别：化学浸种处理的良好效果与赤霉素和受体 GID1（Gibberellin Insensitive Dwarf 1）之间的有效互作有关，通过激活 α -淀粉酶和 XET，共同调节胚乳能量转化与种皮结构变化[28]；相对地，机械处理的局限在于其产生的机械能难以达到纤维素酶（Cellulase）结构变化所需能量水平[29]。萌发同步性的调控难度反映出更深层原因——干旱诱导的表观遗传差异，使种子群体自然形成生理特性分化[30]。因此，不同处理方式对沙针种子萌发的影响体现基本规律：化学浸种处理因同时协调多个生理过程而具有优势，机械作用则受限于能量传递方式的单一性。

4.4 沙针种子萌发特性的综合机制及最优处理策略

沙针种子的萌发特性源于种皮物理屏障与内源激素失调的复合机制，要求破除策略同步解决透性障碍与代谢激活问题[31, 32]。本研究结果表明：剥种皮处理通过彻底解除胚根机械束缚，实现高萌发率及最优同步性，但无法干预生理阻滞；而 1500 mg/L GA3+20 mg/L KT 浸种 24 h 通过激活水解酶与细胞壁降解酶，同步瓦解物理-生理屏障，达成突破性萌发率，且具有激素调控群体萌发的协调优势。具体而言，外源 GA3 与如 KT 等细胞分裂素类物质的配合使用，可显著促进胚乳及种皮中储藏物质的动员与细胞壁结构的松弛，

从而在解剖结构层面为胚根的伸出创造有利条件[33]。

基于此，沙针种子的萌发需结合场景需求构建层级化应用策略：对于精细化育苗则首选剥除种皮，保障萌发整齐度且规避化学风险；对于规模化生产则采用 1500 mg/L GA3+20 mg/L KT 浸种 24 h 方案，以萌发效率、同步性和操作便捷性形成代际优势；对于复合技术延伸场景则应基于化学浸种处理的高效剂量探索热激预处理+低浓度 GA3 的物理-化学协同范式，以适配特殊种源或逆境栽培。

5 结论

本研究明确了沙针种子萌发特性及其最优萌发方案和适用条件。化学浸种处理中的 1500 mg/L GA3 配合 20 mg/L KT 浸种 24 h 被确认为最有效方法，其萌发率和萌发指数均达最高水平，效应强度居于首位。物理处理中通过剥除果皮后阴干 24 h 再剥种皮的效果最佳，但其实际效益存在局限，仅建议用于特殊种质保存场景。

但本研究的激素配比优化集中于实验室环境，尚未验证田间育苗的稳定性，且未解析低浓度 KT 抑制萌发的分子通路，未来需进一步探索大田环境与复合条件下沙针种子萌发方案的环境适应性与种源地理变异，以及 KT 与 GA3 信号互作的阈值效应。

参考文献

[1] 曾凡江, 张文军, 刘国军, 等. 中国典型沙漠区主要优势植被的稳定修复途径与可持续经营技术 [J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(06): 709-716.
<https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20200420001>

[2] 陈红刚, 赵文龙, 晋玲, 等. 红花绿绒蒿种子休眠解除的生理生化响应 [J]. 草地学报, 2023, 31(12): 3697-3705.
<https://doi.org/10.11733/j.issn.1007-0435.2023.12.014>

[3] 陈月红, 汤晓辛, 石慰, 等. 喀斯特针阔混交林优势物种生态位与种间联结——以贵阳市为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2024, 38(11): 159-167.
<https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2024.234>

[4] 崔子佳. 林木种子休眠现象及催芽技术研究 [J]. 林业勘查设计, 2023, 52(4): 84-88.
<https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-4505.2023.04.022>

[5] 高耀辉, 马明, 魏光普, 等. 楔叶菊种子及幼苗对镉、铊耐受性及富集特性研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(04): 155-162. <https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2022.105>

[6] Sajeev N, Koornneef M, Bentsink L. A commitment for life: decades of unraveling the molecular mechanisms behind seed dormancy and germination [J]. The Plant Cell, 2024, 36(5): 1358-1376. <https://doi.org/10.1093/plcell/koad328>

[7] Meng T, Zhang Z, Han S, et al. Study on the distribution characteristics of *Osyris L.* Resources based on specimens [J]. Life Science and Technology, 2024, 3(1): 11-12.
<https://doi.org/10.57237/j.life.2024.01.002>

[8] 黄振英, 叶学华, 崔清国, 等. 长期生态学研究为沙地生态恢复和适应性管理提供理论与技术支撑 [J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(07): 1006-1013.
<https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20220629002>

[9] 井瑾, 王方贞, 张瑜, 等. 干旱胁迫下火棘种子萌发过程及其抗氧化酶活性变化 [J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(09): 135-139. <https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2017.293>

[10] 久西加, 陈红刚, 王惠珍, 等. 桃儿七种子休眠解除过程中细胞壁代谢及种皮超微结构的变化 [J]. 西北植物学报, 2023, 43(10): 1704-1715.
<https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-4025.2023.10.1704>

[11] 刘梅清, 徐镜文, 刘媛媛, 等. 药用植物种子休眠及萌发特性研究进展 [J]. 中兽医医药杂志, 2023, 42(04): 47-51.
<https://doi.org/10.13823/j.cnki.jtvcvm.2023.075>

[12] 麦尔耶姆古丽 阿布都瓦力, 阿马努拉 依明尼亚孜, 古丽尼哥 塔依尔, 等. 紫苞鸢尾种子萌发特性及其生态适应性 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(08): 172-177.
<https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2018.253>

[13] 董雪, 辛智鸣, 张冉浩, 等. 沙冬青种子形态和比叶面积沿降水梯度的变化特征 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 172-178. <https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2019.363>

[14] 全昌乾, 汤丹峰, 姜建萍, 等. 基于转录组测序分析两面针种子休眠解除的分子机制 [J]. 中国中药杂志, 2025, 50(01): 102-110. <https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjcm.20241014.103>

[15] 尚铁军, 王姝, 张梦醒, 等. 山桐子种子休眠解除及萌发过程中解剖结构分析 [J]. 种子, 2025, 44(01): 140-146.
<https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2025.01.140>

[16] Kim S, Ko C H, Kwon H C. Effect of temperature and covering structures in seed dormancy and germination traits of Manchurian striped maple (*Acer tegmentosum* Maxim.) native to Northeast Asia [J]. Plants, 2025, 14(5): 767.
<https://doi.org/10.3390/plants14050767>

[17] 宋松泉, 唐翠芳, 雷华平, 等. 种子休眠与萌发调控的研究进展 [J]. 作物学报, 2024, 50(1): 1-15.
<https://doi.org/10.3724/SP.J.1006.2024.34012>

[18] Nelson D C. The mechanism of host-induced germination in root parasitic plants [J]. Plant Physiology, 2021, 185(4): 1353-1373. <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab043>

- [19] Korell L, Sandner T M, Matthies D, et al. Effects of drought and N level on the interactions of the root hemiparasite *Rhinanthus alectorolophus* with a combination of three host species [J]. *Plant Biology*, 2020, 22: 84-92. <https://doi.org/10.1111/plb.12977>
- [20] 王艳梅, 张小雪, 朱秀征, 等. 林木种子休眠与萌发机制研究进展 [J]. *林业科学*, 2021, 57(10): 128-144. <https://doi.org/10.11707/j.1001-7488.20211013>
- [21] Sharma A, Verma K, Kumar A, Rani S, Chauhan K, Battan B, Kumar R. Delineating the role of host plants in regulating the water and salinity stress induced changes in sandalwood roots [J]. *3 Biotech*, 2024, 14(5): 133-133. <https://doi.org/10.1007/s13205-024-03979-8>
- [22] 吴羚靖. 帝国的知识生产: 20 世纪初全球檀香贸易与檀香植物属名之争 [J]. *世界历史*, 2022(2): 16-28. <https://doi.org/10.162810002,10003>
- [23] 吴玉, 周亚晶, 胡惠, 等. 种子休眠与解除的分子机制研究进展 [J]. *种子*, 2021, 40(05): 63-70. <https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2021.05.063>
- [24] Zagorchev L, Stöggel W, Teofanova D, et al. Plant parasites under pressure: Effects of abiotic stress on the interactions between parasitic plants and their hosts [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(14): 7418. <https://doi.org/10.3390/ijms22147418>
- [25] 徐宁伟, 路斌, 陈强, 等. 燕山地区叶底珠萌发期耐盐性综合评价 [J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(04): 178-185. <https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2023.101>
- [26] Watson D M, McLellan R C, Fontúrbel F E. Functional roles of parasitic plants in a warming world [J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2022, 53(1): 25-45. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102320-115331>
- [27] 杨琦琦, 蒋志荣, 黄海霞, 等. NaCl 和 Na₂SO₄ 胁迫对裸果木种子萌发的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(03): 171-176. <https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2019.092>
- [28] Madelaire C B, Franceschini L, Morais D H, et al. Helminth Parasites of Three Anuran Species during Reproduction and Drought in the Brazilian Semiarid Caatinga Region [J]. *The Journal of parasitology*, 2020, 106(3): 334-340. <https://doi.org/10.1645/16-130>
- [29] 杨永义, 倪强, 马瑞, 等. 混合盐 (NaCl+NaHCO₃) 和 NaCl 对黑果枸杞种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(07): 168-173. <https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2019.215>
- [30] 张爱英, 熊高明, 樊大勇, 等. 三峡水库蓄水对长江干流河岸植物组成的影响 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(1): 12. <https://doi.org/CNKI:SUN:CJLY.0.2018-01-017>
- [31] 赵丁洁, 纪永福, 张莹花, 等. 沙拐枣幼苗生理特性对风速变化的响应 [J]. *干旱区资源与环境*, 2019(9): 6. <https://doi.org/CNKI:SUN:GHZH.0.2019-09-028>
- [32] 赵娜, 贺梦璇, 李洪远. 混合基质添加对土壤种子库萌发特征的影响 [J]. *环境科学研究*, 2016, 29(12): 8. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2016.12.09>
- [33] Baskin C C, Baskin J M. Seed dormancy and germination in Myrtaceae: a palaeohistory, tribe, life cycle and geographical distribution perspective [J]. *Seed Science Research*, 2025: 1-31. <https://doi.org/10.1017/S0960258525000066>