

天麻育种研究进展

崔丽丽¹, 金美伶¹, 罗 婧¹, 陈 曦¹, 王继阳², 常 彤¹, 冯志伟^{2*}, 赵 卉^{1*}

1. 中国农业科学院特产研究所, 吉林 长春 130112

2. 吉林参王植保科技有限公司, 吉林 白山 134504

摘 要: 天麻 *Gastrodia elata* 作为我国重要的药食同源植物, 其干燥块茎是传统名贵中药材, 天麻素可通过抑制 β -淀粉样蛋白聚集、减少神经元凋亡等机制, 在阿尔茨海默病、帕金森病等神经退行性疾病治疗中发挥关键作用, 市场需求持续攀升。目前天麻人工栽培已形成规模, 年产量超 3 万 t、产值突破 40 亿元, 但产业发展受到种质退化、产量和质量不稳定等核心问题的制约。以“资源现状-生产育种需求-品种选育研究”为主线, 系统梳理天麻育种研究进展, 并总结当前成果与未来方向, 为构建高效天麻育种体系提供理论框架。

关键词: 天麻; 天麻素; 神经元凋亡; 种质资源; 栽培; 育种需求

中图分类号: R286.2 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)20-7657-08

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.20.034

Research advances in breeding research of *Gastrodia elata*

CUI Lili¹, JIN Meiling¹, LUO Jing¹, CHEN Xi¹, WANG Jiyang², CHANG Tong¹, FENG Zhiwei², ZHAO Hui¹

1. Institute of Special Wild Economic Animal and Plant Science, CAAS, Changchun 130112, China

2. Jilin Shenwang Plant Protection Co., Ltd., Baishan 134504, China

Abstract: As an important medicinal and edible plant in China, Tianma (*Gastrodia elata*) has its dried tubers as traditional precious Chinese medicinal materials. Gastrodin can play a crucial role in the treatment of neurodegenerative diseases such as Alzheimer's disease and Parkinson's disease through mechanisms including inhibiting the aggregation of β -amyloid protein and reducing neuronal apoptosis, leading to a continuous rise in market demand. At present, the artificial cultivation of *G. elata* has formed a scale, with an annual output exceeding 30 000 tons and an output value surpassing 4 billion yuan. However, its industrial development of *G. elata* is constrained by core issues such as germplasm degeneration and unstable yield and quality. This article systematically reviews the progress in *G. elata* breeding research along the framework of “resource status-production and breeding demands-cultivar development studies”, summarizes current achievements and future directions, and provides a theoretical framework for constructing an efficient *G. elata* breeding system.

Key words: *Gastrodia elata* Bl.; gastrodin; neurodegenerative; germplasm resources; cultivation; breeding demand

天麻 *Gastrodia elata* Bl. 作为一种重要的药用植物, 其干燥块茎是我国传统名贵中药材。近年来研究表明, 天麻素可通过抑制 β -淀粉样蛋白聚集、减少神经元凋亡等机制, 在神经退行性疾病 (如阿尔茨海默病和帕金森病) 治疗中发挥重要作用^[1-4], 市场需求持续增长。当前人工栽培虽已具规模, 年产量超 3 万 t, 产值超 40 亿元, 然而因过度采挖、气候变化和生境破坏, 野生天麻资源濒危, 被列入世

界自然保护联盟红色名录和我国国家二级保护植物)。与此同时, 人工栽培长期依赖无性繁殖, 导致种群遗传多样性锐减, 引发种性退化, 表现为产量递减、有效成分含量下降等问题, 严重制约产业发展。育种作为提升种质质量的核心手段, 近年来在技术创新和品种选育上取得进展。本文结合国内外研究, 从资源现状、生产育种需求、育种研究进展等方面进行综述。

收稿日期: 2025-03-05

基金项目: 吉林省科技发展规划项目 (20210202088NC)

作者简介: 崔丽丽 (1984—), 硕士, 副研究员, 主要从事药用植物资源与质量评价研究。E-mail: cbscui@126.com

*通信作者: 冯志伟, 高级农艺师, 从事药用植物病害防治研究。E-mail: cbsfeng@126.com

赵 卉, 女, 副研究员, 从事检验检测及质量评价研究。E-mail: 308297222@qq.com

1 天麻资源现状

1.1 资源分布

全世界天麻属植物主要分布于东经 43~179 °C, 北纬 50 °C 至南纬 47 °C 范围内的热带、亚热带、温带及寒温带的山地。到目前为止, 全世界已发现的天麻属植物约有 30 余种, 在我国发现的天麻属植物有天麻 *G. elata* Bl.、原天麻 *G. angusta* S. Chow et S. C. Chen、细天麻 *G. gracilis* Bl.、南天麻 *G. javanica* (Bl.) Lindl.、疣天麻 *G. tuberculata* F. Y. Liu et S. C. Chen 和 *G. flabilabella* S. S. Y ing^[5-9]。

在我国天麻分布区, 主要分布的是天麻 *G. elata* Bl.。野生资源主要分布于四川、云南、陕西、安徽、河南、辽宁、吉林、湖北、湖南、贵州、甘肃、西藏及台湾等省区, 另外, 黑龙江、河北、山西、江西、山东、广西、浙江、内蒙古等省区也有野生天麻分布和引种栽培^[5, 10]。野生天麻多生长于海拔 1 200~1 800 m 的温带至亚热带山地, 人工栽培可扩展至 500~2 200 m, 坡度 0°~50°、郁闭度 30%~70%, 且依赖蒙古栎、化香等宿主树种为蜜环菌提供生存基质^[11-12]。天麻与蜜环菌 *Armillaria* spp. 和萌发菌(如紫萁小菇)的共生关系是天麻生长的核心, 同时森林群落的完整性对维持野生天麻资源至关重要。

1.2 资源现状

随着气候变化、种植条件改变野生天麻产生很多优良变异, 周铨等学者根据花的颜色、花茎的颜色、块茎的形状等植物学性状, 将天麻划分为不同变型, 红天麻 *G. elata* Bl. f. *elata*、乌天麻 *G. elata* Bl. f. *glauca* S. Chow、绿天麻 *G. elata* Bl. f. *viridis* Mak.、和黄天麻 *G. elata* Bl. f. *flavida* S. Chow、毛天麻 *G. elata* Bl. f. *pilifera*. Tuyama 和松天麻 *G. elata*

Bl. f. *alba* S. Chow^[7-8]。我国野生天麻以红天麻、乌天麻和绿天麻资源较多见, 在生产上天麻栽培目前形成了以西南、西北、华中、东北等几个主产地, 各地多以生长快, 适应性强, 耐旱力强、产量较高的红天麻栽培为主, 云南昭通小草坝地区和东北长白山地区则以优质的乌天麻栽培为主。

2 生产育种需求

随着天麻人工栽培技术的普及与产业规模的扩大, 成为药食同源植物领域的重要支柱。然而, 生产上还是存在很多问题, 如长期依赖无性繁殖导致栽培群体遗传多样性锐减、种性退化加剧, 进一步推高生产风险; 野生资源的过度采挖与生境破碎化, 使得优质种质保护与可持续利用迫在眉睫。

2.1 遗传多样性下降

多位学者的研究表明^[13-17], 野生天麻和栽培天麻存在显著的种内遗传多样性, 且不同产地和海拔的天麻在遗传上表现出明显差异。丁家玺^[18]研究指出, 尽管天麻在物种水平上具有较高的遗传多样性, 但部分栽培品种的遗传多样性指数已显著下降, 表明天麻种质资源正面临严重威胁。

2.2 种质退化

天麻的一代生活史从上一代种子播种到下一代种子成熟所经历的整个生长过程, 即从天麻从种子→原球茎→米麻→白麻→箭麻→种子^[19](图 1)。一代生活史需要经历种子萌发、营养生长、生殖生长 3 个阶段, 自然繁殖周期长达 2~3 年^[19-20]。天麻种子微小且无胚乳致使自然繁殖率极低, 长期以来主要依靠无性繁殖, 虽能保持亲本的某些优良形状, 但容易导致种性退化, 箭麻产量下降, 天麻素含量降低, 病毒感染率升高, 抗病性减弱^[21]。



图 1 天麻生活史

Fig. 1 Life cycle of *G. elata*

天麻的生长离不开蜜环菌和萌发菌，天麻的种质退化不仅与其自身长期依赖无性繁殖有关，还与其共生菌（蜜环菌和萌发菌）的种质退化密切相关。天麻种子靠同化侵入胚细胞内的萌发菌获得营养萌发完成有性繁殖。天麻没有根、叶，也不存在叶绿体，无法进行光合作用，天麻原球茎开始无性繁殖后的生长过程中，它只能依赖蜜环菌作为唯一的营养来源，通过消化蜜环菌侵入的菌索获取养分。然而，长期人工传代培养导致蜜环菌出现菌丝生长速率减缓、木质素降解能力下降，研究表明高温胁迫显著影响蜜环菌的菌丝和菌索形态，抑制菌索伸长的同时可能促进菌丝增殖，这会损害蜜环菌感染天麻和为其提供营养的能力^[22]。萌发菌菌种退化表现为萌发和生长极其缓慢或菌种块不萌发或只萌发而不“吃料”生长^[23]。“两菌”的退化形成“低效共生—种质退化”的恶性循环，直接影响天麻的生长发育和品质形成。

2.3 连作障碍

天麻连作障碍的形成机制涉及多因素协同作用，主要包括：（1）土壤理化性质恶化（如养分失衡、pH 值改变）；（2）微生物群落结构失调（细菌与真菌多样性降低，病原微生物相对丰度升高）；（3）自毒物质持续积累。研究表明，长期连作显著降低土壤微生物群落的稳定性，导致土赤壳属 *Ilyonectria* spp.、镰刀菌属 *Fusarium* spp. 等病原菌丰度增加^[24-26]，进而加剧土传病害发生。同时，天麻根系分泌的酚酸类化感物质（如对羟基苯甲酸）随种植年限延长呈剂量相关性累积^[27-28]，通过抑制共生菌活性、干扰天麻次生代谢等途径，形成“自毒效应—共生抑制—种质退化”的恶性循环。这种连作障碍不仅直接降低天麻块茎产量与药用成分含量，还通过削弱共生菌功能加剧栽培群体遗传多样性流失，最终制约新品种选育进程。



图 2 连作天麻病害情况

Fig. 2 Disease status of *G. elata* under continuous cropping

3 品种选育

品种选育是提高天麻品质、解决在长期无性繁殖过程中出现品种退化问题最重要最有效的途径之一。通过整合传统选育手段与现代生物技术，定向培育高产、稳产、品质优、抗逆性强的突破性品种，已成为实现天麻产业提质增效的核心路径。

3.1 系统选育

基于表型性状（块茎大小、产量等）筛选优良单株，经多代定向选择培育新品种。例如，从野生群体或栽培群体中筛选出抗逆性强、产量高的株系，通过连续选择稳定遗传性状，缩短育种周期。西南交通大学等单位从四川盆地周山地川天麻主产区红天麻栽培混杂群体中，经过系统选育，育成‘川天麻金乌 1 号’和‘川天麻金红 1 号’（TMJH-2）^[29]，植株群体生长整齐，遗传性状稳定，单位面积块茎总产量高。西南交通大学以青川县青溪镇野生天麻混杂群体为材料，经联合选育‘青乌 1 号’通过四川省农业农村厅新品种认定（编号为川认药 2025006）^[30]。五峰农业科学研究所等机构组成的专家团队，以牛庄乡野生天麻为基础进行选育，2023 年 11 月新品种通过湖北省种子协会的鉴定初审，定名‘峰麻 1 号’^[31]，该品种具有体型大、适应高海拔等优点，且天麻素和对羟基苯甲醇含量高。云南省林业和草原技术推广总站苏为耿等培育出天麻优良品种‘林麻 1 号’（编号：云 R-SV-GE-059-2021）^[32]，该品种在适应性、丰产性和稳定性方面表现优异。

经过多年发展系统选育技术也在不断创新，昭通市天麻研究院与云南农业大学等单位运用表型与品质相结合的系统选择育种方法，以外观表形、折干率、有效成分含量等指标进行筛选，打破了仅依靠形态颜色分类的传统方式，更加注重内在品质与外在表型的综合考量，成功培育出‘昭乌’‘滇乌’‘翡翠’系列 5 个乌天麻品种，口感糯润甜，麻型圆润饱满，其有效成分含量均大于 0.39%，以‘滇乌麻 2 号’和‘翡翠麻 1 号’为例，‘滇乌麻 2 号’亩产量 2 245.38 kg（1 亩=0.066 7 hm²）、亩产值 32.56 万元；‘翡翠麻 1 号’亩产量 1 920 kg、亩产值 21.72 万元，已在当地大面积推广示范^[33-34]。

3.2 杂交育种

杂交育种是提升天麻产量与品质的关键技术之一，其核心在于通过不同种质（如红天麻与乌天麻）的遗传互补，实现优良性状（高产、高天麻素

含量、抗逆性)在子代中的整合与表达^[35]。研究表明,亲本选择对杂交效率具有决定性影响:钱润等^[36]基于数量分类法量化分析了红天麻、乌天麻及其杂交后代的农艺性状差异,明确了亲本表型特征对子代性状的调控规律;刘樊等^[37]通过调控定植升温时间优化花粉萌发与受精过程,使杂交种子萌发率提升至 82.3%;唐兴国等^[38]和崔丽丽等^[39]分别从开花习性与地理适应性角度,揭示了环境因子对杂交天麻生殖发育的影响机制,为跨区域育种提供了理论依据。

遗传互补效应在杂交后代中表现显著,例如曲宾等^[40]通过乌天麻 *G. elata* Bl. f. *glauca* S.Chow 与红天麻 *G. elata* Bl. f. *elata* 正反交实验,培育出块茎质量提高 20%、天麻素含量达 1.5 mg/g 的强抗逆品系;张泽志等^[41]进一步发现,高海拔(1 800 m)低温环境可促进杂交天麻次生代谢物积累,其天麻素与对羟基苯甲醇含量较低海拔(500 m)品种提高 35%以上^[42],提示生态适应性是杂交育种需平衡的关键因素。

应用层面,我国首个杂交天麻品种‘鄂天麻 1 号’和‘鄂天麻 2 号’(2002 年审定)^[43-45],通过整合宜昌红麻与云南乌麻的优良特性,实现了产量与抗性的协同提升。此外,王秋颖等^[44]选育的 2 个高产杂交品种、曲宾团队的长白山地理远缘杂交品系,以及王风敏等^[46]的乌红杂交种,均显著拓展了天麻种质资源的遗传多样性,为不同生态区种植提供了适配品种。

3.3 分子生物学技术的应用

分子育种技术为天麻种质资源的精准鉴定与亲本选配提供了重要工具。简单重复序列间标记(inter-simple sequence repeat, ISSR)和简单序列重复标记(simple sequence repeat, SSR)凭借操作简便、高多态性和强重复性等优势,已广泛应用于天麻遗传多样性分析与杂交后代鉴定。研究表明,地理隔离显著影响天麻种群的遗传结构^[47],而 ISSR 技术可高效验证杂交后代纯度(准确率 98%),突破传统形态学鉴定的局限性^[48]。基于 EST-SSR 标记的遗传分析进一步支持红天麻与乌天麻作为独立变种的分类地位(遗传距离 0.38)^[49]。云南天麻种群的高精度 SSR 分析显示,红天麻的遗传多样性显著高于乌天麻和绿天麻^[50-51]。此外,转录组衍生的高多态性 SSR 标记可区分不同变型种质的细微差异^[52-53]。

尽管当前分子技术仍以理论研究为主,尚未直接育成新品种,但其与常规育种技术的协同应用潜力显著。例如,ISSR 标记可快速筛选潜在亲本,结合 SSR/SNP 标记解析遗传背景,形成“效率-精度”双优的技术体系。未来需推动分子标记与关键农艺性状(产量、天麻素含量、抗逆性)的关联研究,构建“标记筛选-性状关联-品种设计”一体化流程,突破分子育种“只鉴不育”的瓶颈,加速培育遗传稳定、品质优良的天麻新品种。

4 蜜环菌与萌发菌研究进展

不同蜜环菌和萌发菌菌株对天麻产量和品质的影响存在显著差异,因此,加强对“两菌”生长特性及代谢产物的研究,明确其与天麻相互作用的分子机制,成为协同育种的关键。

4.1 共生机制

蜜环菌 *Armillarilla* 是天麻营养吸收的核心共生菌。其侵染过程可分为 3 个阶段:首先,菌索附着于天麻表皮并分化出菌丝侵入皮层细胞,同时释放漆酶等化学物质以降解宿主细胞壁^[54-55];随后,天麻启动防御机制,诱导内皮层细胞分泌水解酶类,将入侵菌丝分解为可吸收的小分子营养物质^[56]。值得注意的是,蜜环菌与天麻的互作不仅是单向寄生,更体现为双向物质交换。例如,兰进等^[57]发现蜜环菌能主动吸收环境中的³H-葡萄糖,并通过菌丝转移至天麻细胞中分布;徐锦堂^[58]进一步通过超微结构观察证实,蜜环菌侵染可激活天麻细胞壁降解酶(如几丁质酶 Chi3),显著提升菌丝穿透效率。

基因组学研究为解析共生机制提供了分子证据。昆明理工大学对蜜环菌 M3 菌株的全基因组测序(83.33 Mb)显示,其基因组中糖苷水解酶(GHs)和糖基转移酶(GTs)等碳水化合物活性酶(CAZymes)显著富集^[59],这些酶类通过分解植物细胞壁,为天麻释放必需营养物质。王贺等^[60]利用细胞化学定位技术,明确了天麻皮层细胞的消化层是吸收蜜环菌营养的核心区域。

环境胁迫对共生效率的影响亦受到关注。贵州中医药大学通过转录组分析发现,耐高温蜜环菌株(GZ1)通过动态调控糖代谢信号通路和热激蛋白(HSPs)表达响应高温^[22],这为筛选适应性菌株提供了理论依据。上述研究系统揭示了蜜环菌与天麻共生的分子机制,并强调了环境因素在维持共生体系稳定性中的重要作用。

萌发菌(如紫萁小菇 *Mycena osmundicola*

Lange、石斛小菇 *M. dendrobii* Fan et Guo) 是天麻种子萌发的必需共生真菌，其与天麻的互作机制研究可分为功能发现与分子解析 2 个阶段。功能发现层面，徐锦堂团队^[21,61]首次揭示了萌发菌通过营养供给显著提升天麻种子发芽率及产量的核心作用，奠定了共生研究的理论基础。分子机制层面，曾旭等^[62]通过转录组分析发现，石斛小菇侵染可特异性激活天麻种子的苯丙烷代谢通路，关键基因 *PAL* 和

C4H 表达量上调 5 倍，驱动酚类物质的合成，从而增强种子抗逆性并维持共生平衡。

天麻与两菌共生示意图见图 3。天麻与蜜环菌、萌发菌的共生体系通过阶段特异性分工与动态调控机制，实现了从种子萌发到营养吸收的全周期高效协作，不仅为天麻栽培中菌株适配与接菌时序优化提供了理论支撑，也为解析其他植物-微生物互作机制开辟了新视角。



图 3 天麻与两菌共生示意图

Fig. 3 Schematic diagram of symbiosis between *G. elata* and two fungi

4.2 两菌筛选

蜜环菌与萌发菌的筛选及应用研究已取得显著进展，徐锦堂于 1965 年利用野生蜜环菌首次实现天麻人工栽培，并于 1972 年筛选出高产菌株 Am-234。当前主流菌种包括 A9、M1、京 234 等，其中部分菌株通过定向改良展现出独特优势^[63]。例如‘陕蜜 2009’：菌丝浓密、菌索粗壮（直径 3.52 mm），伴栽红天麻产量提升 35.24%，天麻素含量增加 20%，且抗污染能力强（污染率 5.5%）；贵州 M-05 菌株：生长速度快（0.34 cm/d）、纤维素酶活性高（10047.9 U/L），伴栽天麻产量达 2.98 kg/m²，有效成分超药典标准^[64]；吉林 JMG 菌株：通过优化土壤微生物群落和营养代谢功能，显著提升天麻产量与品质^[65]。上述研究不仅验证了菌株适配对天麻生产的直接影响，还为生态调控（如土壤微生物管理）提供了实践依据，推动天麻栽培向高效、标准化方向发展。

天麻种子萌发菌主要属于小菇属 *Mycena*，包括紫萁小菇、石斛小菇和开唇小菇 *M. anoetochila* S. X. Guo, L. Fan, W. Q. Cao, J. T. Xu & Pei G. Xiao 等^[66]，其分布呈现明显地域特异性：

黔西北以紫褐小菇 *M. purpureofusca* (Peck) Sacc. 为优势菌种；长白山地区是紫褐小菇与高卢蜜环菌共存；而陕西以黄缘小菇 *M. citrinomarginata* Gillet 为主力菌株。

生产常用菌株包括 F0、GSF-8104、天汉 4 号等，其中陕西 F0/8 号菌株：适应性强，在温度/pH 波动下萌发率达 71.26% 和 67.99%^[67]；黔西北 M3/长白山 JFGL-06 菌株：萌发促进能力突出，可显著提升产量^[68-69]。上述菌株的筛选兼顾生物学特性（如萌发率）与田间表现（如产量），为天麻栽培的菌种优化提供了科学依据。

5 结语与展望

天麻作为重要的药用植物，具有息风止痉、平

抑肝阳、祛风通络的功能^[70-71]，随着大健康产业的发展，天麻的应用越来越广泛，但其产业发展面临野生资源濒危、人工栽培种性退化及连作障碍等严峻挑战。近年来，天麻育种研究通过整合传统方法与现代技术，取得显著进展。

在资源保护与利用方面，明确了天麻的全球分布格局及我国主产区的资源特征，针对野生资源锐减问题，提出通过保护生境和优化栽培模式实现可持续利用。

在共生菌协同优化方面，蜜环菌与萌发菌的筛选及共生机制研究取得重要进展，耐高温菌株（如‘陕蜜 2009’）和高效萌发菌株（如紫褐小菇 M3）的应用显著提高了天麻产量与品质，为破解“低效共生—种质退化”恶性循环提供了实践方案。

在品种选育突破方面，系统选育成功培育出‘川天麻金乌 1 号’‘青乌 1 号’等高产、高抗逆性新品种；杂交育种通过亲本性状互补，开发出‘鄂天麻 1 号’等优质杂交品种，显著提升产量与有效成分含量。

分子生物学技术（如 ISSR、SSR 标记）的应用为精准鉴定种质资源和加速育种进程提供了技术支撑。但目前天麻分子育种仍停留在种质评价阶段，缺乏与关键农艺性状（如产量、天麻素含量、抗逆性）紧密关联的功能性标记，导致分子标记技术难以直接指导新品种选育。未来需聚焦分子标记与育种实践的深度融合，构建“标记筛选-性状关联-品种设计”的一体化技术体系，突破分子标记技术“只鉴不育”的现状，为培育兼具高产、优质、抗逆特性的突破性品种提供核心技术支撑，助力天麻产业升级与可持续发展。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Zhu C H, Wang S T, Ma S Y, *et al.* Gastrodin reduces A β brain levels in an Alzheimer's disease mouse model by inhibiting P-glycoprotein ubiquitination [J]. *Phytomedicine*, 2024; 33: 156229
- [2] 冯超, 姜霁芳, 唐美霞, 等. 天麻素对 A β ₁₋₄₂ 致痴呆大鼠模型的保护作用及机制探究 [J]. *临床药物治疗杂志*, 2018, 16 (1): 1-6.
- [3] 贾凡凡, 王蓓蓓, 康思锐, 等. 天麻镇静催眠作用研究进展 [J]. *中草药*, 2024, 55(13): 4555-4564.
- [4] 杨艺娜, 王蓓蓓, 金徽, 等. 天麻素的结构修饰及生物活性研究进展 [J]. *中草药*, 2024, 55(23): 8245-8255.
- [5] 徐锦堂. 中国天麻栽培学 [M]. 北京: 北京医科大学中国协和医科大学联合出版社, 1993: 56.
- [6] 沈涛, 刘鸿高, 王元忠. 天麻本草考证与现代资源利用问题探讨 [J]. *中草药*, 2023, 54(18): 6106-6117.
- [7] 周铨, 杨兴华, 梁汉兴, 等. 天麻形态学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [8] 刘瑶, 赵素霞, 王季俊, 等. 基于“以效识性”对天麻药性的再认识 [J]. *中草药*, 2025, 56(3): 1028-1036.
- [9] 杨文权. 天麻种质资源的研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2005.
- [10] 袁崇文. 中国天麻 [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2002: 23.
- [11] 罗夫来, 刘威, 张博华, 等. 地理与植被因子对云贵高原仿野生栽培天麻的影响 [J]. *北方园艺*, 2023, (09): 97-103.
- [12] 石子为, 马聪吉, 康传志, 等. 基于空间分析的昭通天麻生态适宜性区划研究 [J]. *中国中药杂志*, 2016, 41(17): 3155-3163.
- [13] 陶钧. 天麻遗传分化与天麻素含量的相关性及其 DNA 分子标记的研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- [14] 关萍. 药用植物天麻 *Gastrodia elata* Bl 遗传多样性及化学成分的初步研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [15] 程纪伦, 范爱辉, 苟占平, 等. 贵州野生天麻遗传多样性的 AFLP 指纹分析 [J]. *时珍国医国药*, 2009, 20(11): 2866-2868.
- [16] 赵永亮, 傅体华, 范巧佳, 等. 野生天麻·栽培天麻的 RAPD 和 AFLP 标记遗传多态性分析 [J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(17): 7119-7123.
- [17] 赵熙, 李艳萍, 李顺英, 等. 野生天麻和栽培天麻的 DNA 指纹图谱分析 [J]. *国医论坛*, 2006, 21(6): 43-45.
- [18] 丁家玺. 天麻种质资源的 DNA 指纹图谱研究 [D]. 汉中: 陕西理工大学, 2019.
- [19] 陈顺芳, 黄先敏, 王锐, 等. 天麻的一代生活史 [J]. *昭通师范高等专科学校学报*, 2009, 31(5): 36-39.
- [20] 徐锦堂, 冉砚珠, 郭顺星. 天麻生活史的研究 [J]. *中国医学科学院学报*, 1989, 11(4): 237-241.
- [21] 徐锦堂, 郭顺星, 范黎, 等. 天麻种子与小菇属真菌共生萌发的研究 [J]. *菌物系统*, 2001, (1): 137-141.
- [22] Xu J, Huang X, Wang X, *et al.* Comparative transcriptome analysis reveals the role of sugar signaling in response to high temperature stress in *Armillaria gallica* [J]. *BMC Microbiol*, 2025, 25: 247.
- [23] 王绍柏, 余昌俊, 许启新, 等. 栽培天麻种群的退化及防控对策 [J]. *中药材*, 2011, 34(10): 1490-1494.
- [24] 张进强, 唐鑫, 郭兰萍, 等. 天麻连作障碍与土赤壳属真菌的关联分析及改善措施 [J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(9): 2296-2303.
- [25] 徐娇, 黄萱, 周涛, 等. 天麻种植对土壤微生物群落结构的影响分析 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2020, 26(19):

- 10-16.
- [26] 陈瑞, 杨德强, 赵长林. 基于高通量测序分析天麻种植土壤的真菌变化 [J]. 西南农业学报, 2024, 37(2): 362-372.
- [27] 代波. 天麻高效种植关键技术研究及连作障碍初探 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [28] 吴丽伟. 天麻、蜜环菌化感现象及天麻连作障碍原因探讨 [D]. 北京: 中国协和医科大学, 2009.
- [29] 乐山市科技局. 我国第二个国产天麻系统培育新品系川天麻金红 1 号已经顺利通过省专家的田间技术鉴定 [EB/OL]. (2012-12-18) [2025-04-24]. <https://kjt.lsj.gov.cn/kjt/lsj/2012/12/18/1950a096faac4812bbfe4677a05b010e.shtml>
- [30] 青川县农业农村局. 青川县成功培育出天麻新品种“青乌 1 号” [EB/OL]. (2025-02-17) [2025-04-24]. <https://www.cnqc.gov.cn/mobile/mshow.aspx?id=20250217103728587>
- [31] 湖北日报. [宜昌]生态天麻出武陵 [EB/OL]. (2024-11-21) [2025-04-24]. https://nyt.hubei.gov.cn/bmdt/yw/szdt/202411/t20241121_5421816.shtml
- [32] 昭通新闻网. 昭通市天麻研究院提升天麻“含金量” [EB/OL]. (2024-12-08) [2025-04-24]. <https://www.ztnews.net/article/show-449705.html>
- [33] 昭通新闻网. 经过 10 年 4 代选育昭通获得 5 种天麻新品种 [EB/OL]. (2024-12-09) [2025-04-24]. <https://www.ztnews.net/article/show-449778.html>
- [34] 西南中药材种质创新与利用国家地方联合工程研究中心. 云南高品质天麻产区突破种业瓶颈 [EB/OL]. (2024-01-10) [2025-04-24]. <https://www.ynau.edu.cn/info/1170/25975.htm>
- [35] 韦中强, 肖波, 韩如刚, 等. 天麻种间杂交优势利用研究 [J]. 现代农业科技, 2015, (13): 85-86.
- [36] 钱润, 李慧, 华中一, 等. 栽培天麻农艺性状的数量分类学研究 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(13): 3085-3090.
- [37] 刘樊, 颜鸿远, 徐阳晓, 等. 乌天麻与红天麻杂交制种中定植升温时间研究 [J]. 生物资源, 2023, 45(2): 177-184.
- [38] 唐兴国, 王伯诚, 赖小芳, 等. 乌天麻和红天麻在台州地区的开花习性及其人工繁种试验 [J]. 安徽农业科学, 2016, 44(34): 123-124.
- [39] 崔丽丽, 冯志伟, 郭鸿莹, 等. 不同变型天麻在长白山区有性繁殖特性研究 [J/OL]. 特产研究 [2025-03-02]. <https://doi.org/10.16720/j.cnki.tcyj.2023.240>.
- [40] 曲宾, 赵琨, 冯钰添, 等. 乌天麻×红天麻正反交杂种子代的选育研究 [J]. 吉林林业科技, 2016, 45(6): 1-4.
- [41] 张泽志, 陈盛虎, 周才华, 等. 红乌杂交天麻栽培及其不同海拔的质量比较 [J]. 湖北农业科学, 2024, 63(9): 114-118.
- [42] 杨婧, 王传华, 曾春函, 等. 海拔对乌红杂交天麻产量与品质的影响及其酶学作用机制 [J]. 西北植物学报, 2021, 41(2): 281-289.
- [43] 胡文华. 我国第一代杂交天麻-乌 X 红 [J]. 农村天地, 1997, 12(11): 38.
- [44] 王秋颖, 郭顺星. 天麻优良品种选育的初步研究 [J]. 中国中药杂志, 2001, 26(11): 744-746.
- [45] 鄂钟. 湖北审定两个天麻新品种 [J]. 农家顾问, 2003, 21(6): 28-29.
- [46] 王凤敏, 孙瑞泽, 王莹洁, 等. 汉中地区天麻品种筛选试验 [J]. 陕西农业科学, 2024, 70(2): 70-72.
- [47] 陈祖云, 王晓丽, 宋聚先. 贵州天麻遗传多态性的 ISSR 初步分析 [J]. 中华中医药杂志, 2007, 22(7): 436-439.
- [48] 崔丽丽, 冯志伟, 郭鸿莹, 等. 应用 ISSR 分子标记鉴定天麻杂交后代研究 [J/OL]. 特产研究 [2025-03-02]. <https://doi.org/10.16720/j.cnki.tcyj.2024.188>.
- [49] 何薇, 胡艺镠, 李胜男, 等. 基于 EST-SSR 分子标记对乌天麻和红天麻的鉴定 [J]. 耕作与栽培, 2024, 44(6): 57-62.
- [50] 王齐, 周天华, 王佳, 等. 镇巴天麻的遗传多样性与 SSR 指纹图谱分析 [J]. 分子植物育种, 2022, 20(13): 4425-4433.
- [51] 周天华, 丁家玺, 徐皓, 等. 天麻种质资源的 SSR 指纹图谱研究 [J]. 西北植物学报, 2018, 38(5): 830-838.
- [52] 徐哲, 钱华丽, 陈小磊, 等. 不同种质资源天麻转录组的 SSR、SNP 和 InDel 特征分析 [J/OL]. 分子植物育种, [2025-03-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20221102.1748.006.html>.
- [53] 张俊, 于涵, 李召辉, 等. 基于 SSR-HRM 技术的 4 种药用天麻变型遗传多样性及遗传结构分析 [J]. 中草药, 2023, 54(9): 2898-2906.
- [54] Curir P, Thurston C F, Daouil A F, *et al.* Characterization of a laccase secreted by *Armillaria mellea* pathogenic for *Genista* [J]. *Plant Physiol Biochem*, 1997, 35(2): 147-153.
- [55] Morrison D, Merler H, Norris D. *Detection, recognition and management of Armillaria and Phellinus root diseases in the southern interior of British Columbia* [M]. Berlin: Springer, 1991.
- [56] 王贺, 王震宇, 张福锁, 等. 天麻吸收蜜环菌营养机制的细胞学研究 [J]. 植物学报, 1997, 36(6): 500-504, 589-590.
- [57] 兰进, 徐锦堂, 李京淑. 蜜环菌和天麻共生营养关系的放射性自显影研究 [J]. 真菌学报, 1994, 13(3): 219-222.
- [58] 徐锦堂. 天麻营繁茎被蜜环菌侵染过程中细胞结构的变化 [J]. 中国医学科学院学报, 2001, 32(2): 150-153.
- [59] Luo C Y, Lu Y, Su L, *et al.* Whole genome sequencing and

- analysis of the symbiotic *Armillaria gallica* M3 with *Gastrodia elata* [J]. *BMC Genomics*, 2025(324): 26.
- [60] 王贺, 徐锦堂. 蜜环菌侵染天麻皮层过程中酸性磷酸酶的细胞化学研究 [J]. *真菌学报*, 1993, 12(2): 152-157.
- [61] 徐锦堂, 范黎. 天麻种子/原球茎和营养繁殖茎被菌根真菌定殖后的细胞分化 [J]. *植物学报*, 2001, 40(10): 1003-1010.
- [62] 曾旭, 杨建文, 凌鸿, 等. 石斛小菇促进天麻种子萌发的转录组研究 [J]. *菌物学报*, 2018, 37(1): 52-63.
- [63] 谢海彬, 叶彦慧, 解修超, 等. 蜜环菌新品种“陕蜜 2009”的选育 [J]. *北方园艺*, 2022(5): 6.
- [64] 莫盛龙. 天麻三种变型和 11 份蜜环菌种质资源评价及优良种质筛选 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2025.
- [65] Yu E, Gao Y, Li Y, *et al.* An exploration of mechanism of high quality and yield of *Gastrodia elata* Bl. *f. glauca* by the isolation, identification and evaluation of *Armillaria* [J]. *BMC Plant Biol*, 2022(621): 22.
- [66] 王彩云, 侯俊, 王永, 等. 天麻种子萌发菌研究进展 [J]. *北方园艺*, 2017(12): 198-202.
- [67] 侯玉卿, 康钰颖, 张跃进, 等. 基于 rDNA-ITS 序列的不同来源天麻共生萌发菌的分类及优良菌株的筛选 [J]. *中药材*, 2024, 42(10): 2434-2440.
- [68] 柳敏, 周茂娣, 陈晓芳, 等. 黔西北红天麻种子萌发菌的鉴定及优良菌株筛选 [J]. *中国野生植物资源*, 2025, 44(1): 44-51.
- [69] 李雅琪. 长白山乌杆天麻萌发菌与蜜环菌的分离鉴定, 保存及其评价研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [70] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 486.
- [71] Zhang Z, Li X, Zhang Y, *et al.* Ecological factors impacting genetic characteristics and metabolite accumulations of *Gastrodia elata* [J]. *Chin Herb Med*, 2025, 17(3): 562-574.

[责任编辑 时圣明]

• 公益广告 •

