林玲,张孟文,陈飞飞,等.国家二级保护植物降香黄檀繁育技术研究进展[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(2):1-9.
Lin L, Zhang M W, Chen F F, et al.Research progress on breeding techniques of national grade II protected plant, *Dalbergia odorifera* T. Chen[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(2):1-9.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202312001

国家二级保护植物降香黄檀繁育技术研究进展

林玲,张孟文*,陈飞飞,黄川腾,董晓娜,陈琳

(海南省林业科学研究院/海南省红树林研究院,海南 海口 571100)

摘　要:降香黄檀(*Dalbergia odorifera* T. Chen)为豆科黄檀属常绿半落叶乔木,仅天然分布于海南岛,现为国家二级保护植物。它既是中国重要的战略资源,又是特有的名贵药材和香料树种。由于人类不合理的采伐以及大量的盗伐,降香黄檀的野生资源几近枯竭。同时,全球范围内降香黄檀的销售一直以来出现供不应求的现象,这也导致降香黄檀的市场价格持续攀升,已经达到"以斤计价"、"稀缺难寻"的地步。此外,降香黄檀心材在野外自然条件下的形成时间也比较漫长,一般7年左右才开始形成心材,而成熟需要30年以上的漫长时间。因此,开展降香黄檀繁育技术研究,不仅可以满足不断增长的市场需求,还可以减轻对其残留天然资源的盗伐压力。近年来,国内外学者对降香黄檀的繁育技术进行了大量研究,并取得了丰硕成果。基于此,文章从有性繁殖(种子萌发、幼苗生长)、无性繁殖(扦插、嫁接、组织培养)以及人工林定向培育(注射生长调节剂、接种微生物、种植管理措施)等方面,综述了降香黄檀繁育技术的研究进展;同时分析了降香黄檀产业发展中存在的主要问题,如优良种质资源不足、高效栽培技术和定向培育技术缺乏、新品种物质基础研究不足、活性成分挖掘不系统等,提出了加大新品种选育工作力度、创新栽培技术体系以及突破产业链结构升级等研究展望,以期为降香黄檀的优质种苗繁育技术研究提供参考。

关键词:珍贵树种; 降香黄檀; 无性繁殖; 有性繁殖; 人工林培育
中图分类号:S723.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)02-0001-09

珍贵树种资源是我国重要的、可再生的战略性资源,随着社会的不断进步、经济的快速发展以及人民生活水平和鉴赏能力的日益提高,人们对珍贵树种的需求也越来越大[1]。然而目前珍贵树种存在科研力度不够、优良品种缺乏以及扶持政策滞后等问题[2]。因此,有必要加大珍贵树种高效栽培技术研究,以推动珍贵树种产业的发展。

降香黄檀(*Dalbergia odorifera* T. Chen)属豆科(Leguminosae)蝶形花亚科(Papilionoideae)黄檀属(*Dalbergia*)常绿半落叶乔木[3],在中国仅天然分布于海南岛,是国家二级保护植物[4]。降香黄檀因其优质的心材品质和高昂的价格而享有盛誉,被广泛应用于高端家具、精美工艺品、珍贵乐器和装饰品制作[5]。降香亦可入药,属国家药典正品收录,在治疗心脑血管疾病及抗氧化、抗炎、抗肿瘤等方面具有独特疗效,药用潜力巨大[6]。因此,降香黄檀既是国家重要的战略资源,又是中国特有的名贵药材和香料树种。

降香黄檀的主要经济价值在于其心材中所蕴含的化学成分,通过人为措施培育高质量的心材也是目前降香黄檀研究的主要内容[7]。然而,由于人类不合理的开发和利用,降香黄檀的天然资源急剧减少[8]。同时,全球范围内降香黄檀的销售一直供不应求,这也导致其市场价格持续攀升,已经达到"以斤计价"、"稀缺难寻"的地步[9-10]。此外,降香黄檀心材在野外自然条件下的形成时间漫长,一般7年左右才开始形成心材,而成熟需要30年以上漫长的时间[11]。因此,开展降香黄檀繁育技术研究,不仅可以满足不断增长的市场需求,还可以减轻对其残留天然资源的盗伐压力。基于

收稿日期:2023-12-01　　**修回日期**:2024-01-12
基金项目:海南省省属科研院所技术创新专项(SQKY2022-0026);海南省省属科研院所技术创新专项(SQKY2022-0029)
作者简介:林玲(ORCID:0009-0000-8761-0378),硕士,林业工程师,研究方向:热带珍贵树种保护及繁育,E-mail:lling008@163.com
*通信作者:张孟文(ORCID:0000-0003-0238-4573),博士,助理研究员,E-mail: 601565959@qq.com

此,本文系统综述了降香黄檀在有性繁殖、无性繁殖和人工林定向培育方面的主要研究成果,提出一些存在的问题以及未来研究的展望,以期为降香黄檀的优质种苗繁育技术研究提供参考,推动我国降香黄檀产业的可持续健康发展。

1 有性繁殖

1.1 种子萌发研究

降香黄檀的种子量较大,可采用种子进行有性繁殖。但其种子不易保存,自然繁殖能力弱,生长缓慢,过早和过晚采收的种子质量都较差[12]。一般选择盛花期后185~200 d作为降香黄檀种子的适宜采收期[13]。在种子采收后,如果不能及时播种,需要贮藏保存。研究发现,17 ℃的贮藏温度对于降香黄檀种子的规模育苗效果最佳。在播种之前,需要提前大约20 d对苗床杀菌消毒,覆膜和催芽处理后再播种,出苗率明显高于露地直播处理[14]。同时,与河沙和泥炭土相比,使用黄心土作为育苗基质可以显著提高降香黄檀种子的发芽率[15]。基于这些发现,未来的研究可以进一步探究种子贮藏温度和期限,细化苗床的杀菌消毒方法,探索更多育苗基质的替代方案。

不同的处理方法对种子的萌芽情况也有影响。例如,在播种前,将种子用60 ℃温水加入0.5%高锰酸钾溶液消毒处理30 min,再用蒸馏水浸泡24 h,能显著提高种子的发芽率[16]。选择适宜的植物生长调节剂也有助于种子的萌发。研究发现,3种植物生长调节剂处理可显著提高降香黄檀种子的发芽率和发芽势,2个指标大小顺序均表现为吲哚丁酸>赤霉素>6-苄氨基腺嘌呤>CK。其中,50 mg·L^{-1}赤霉素处理时发芽率最高,80 mg·L^{-1} 6-苄氨基腺嘌呤处理时发芽势最高[16-17]。另有试验表明,带荚直播比去荚播种具有更高的发芽率和发芽势,并且用40 mg·L^{-1}赤霉素溶液浸泡去荚的种子12 h后,发芽率可高达78%[15]。

此外,不同的环境因子也会影响降香黄檀种子的萌发。目前的研究主要集中于干旱胁迫和盐度胁迫等方面[18-19],降香黄檀种子的环境(光照、温度、水分、肥力等)适应性方面尚未开展深入研究。

1.2 幼苗生长研究

降香黄檀是典型的热带树种,仅天然分布于海南岛,但它的种植范围已经从原产地扩大至广东、广西、贵州、浙江等地[20]。尽管降香黄檀能够忍受轻霜和短时间的极端低温,但是温度依然是影响其幼苗生长的主要限制因子,选育抗寒品种已成为向北推广亟待解决的关键问题[21]。不同产地的降香黄檀幼苗抗寒性研究表明,8个产地降香黄檀叶片的抗逆酶活性指标均表现为随着胁迫温度的降低而升高。经过综合分析,得出各产地降香黄檀的抗寒能力大小排名为四川乐山>浙江温州>贵州罗甸>广东怀集>广东韶关>广西崇左>广东高要>海南尖峰[22]。通过低温驯化,可以提高降香黄檀幼苗的耐寒能力。在自然生长条件无法改变的情况下,也可以通过外源物质增强植物自身对逆境的抗性,平稳度过极端环境胁迫。例如添加600~700 μmol·L^{-1}浓度的外源褪黑素,不但能在一定程度上促进幼苗生长,而且在缓解低温冷害方面表现效果最佳[23]。

光照强度是影响降香黄檀幼苗生长的一个重要因子。人工遮阴试验发现,不遮光处理可以加快降香黄檀幼苗的基径和叶片数的增长速度,20%的遮光处理下幼苗的株高和冠幅增长最快,而80%的遮光处理下,各生长指标的增加不明显[24]。此外,随着遮阴程度的增加,幼苗的存活率、苗高、地径等指标逐渐降低,降香黄檀幼苗在全光照条件下生长效果最好[25]。

育苗基质是降香黄檀高效栽培技术的关键因子之一[21]。降香黄檀能够适应不同砂砾含量的土壤类型。不同育苗基质及配比对降香黄檀幼苗生长影响有显著差异,以椰糠:泥炭土:黄心土(2:2:1)配比的基质幼苗长势最好[26]。综合考虑容器规格和基质类型两方面因素,使用泥炭土和中等规格育苗容器或者泥炭土+黄心土(1:1)和大规格育苗容器,在降香黄檀苗期培育及造林初期均有显著效果[27]。

施肥是栽培实践中常用的促进幼苗生长的方法。在特定范围内增加氮、磷、钾肥料可以促进幼苗生长,超出适宜范围的施肥则抑制幼苗的生长[28]。如单施氮肥、磷肥和赤霉素均能显著增加降香黄檀幼苗的株高和基径,氮肥与磷肥的最佳施用量分别为800~1200、60~100 mg·株$^{-1}$,赤霉素的最佳喷施浓度为100 mg·L^{-1}[29-30]。研究表明,氮磷钾配施比单一施肥对幼苗的促进作用更好,并且配方施肥时,这3种元素对降香黄檀幼苗生长

的影响不同,以磷的影响较大,钾次之,氮的影响最小,它们的施肥范围分别是氮肥为1.74～2.15 g·盆$^{-1}$、磷肥为2.40～2.60 g·盆$^{-1}$、钾肥为0.35～0.75 g·盆$^{-1}$[31]。王楠等[32]研究也表明氮、磷、钾质量分别为1.8、0.6、0.3 g配比处理下幼苗各生长指标均达到最大值。

非生物胁迫(如干旱、养分胁迫)和生物胁迫(种内、种间竞争)均对降香黄檀幼苗的生长产生极大的影响。干旱胁迫试验表明,降香黄檀幼苗的耐旱能力有限,在轻度干旱胁迫下,可通过降低自身生长量适应干旱环境,也可以通过提高酶的活性清除活性氧物质以降低其对体内组织的伤害,还可通过调节内源激素水平响应干旱胁迫[33-34]。另有研究发现,干旱胁迫加剧了降香黄檀种内竞争的强度,增强了来自同种邻株对降香黄檀的抑制效应,但是通过施氮肥可促进降香黄檀幼苗的生长,进而缓解这种抑制效应[35-36]。郭璐瑶等[37]研究进一步发现增温和施氮的双重作用对降香黄檀幼苗生长发育的促进效果最好,其次是单一增温处理,而单一施氮处理的幼苗生长最差。生物胁迫方面,在水淹胁迫处理下,混种模式的水翁抑制了降香黄檀的生长发育,但增强了降香黄檀对水淹的耐受性。而在水淹后的干旱胁迫下,拥有较多不定根的水翁抑制了降香黄檀幼苗的生长发育与生理适应性[38]。在应对胁迫的响应方面,添加外源氯化钙和褪黑素的双重作用对提高降香黄檀幼苗的耐干旱胁迫的效果最佳,添加硅酸钾和甜菜碱的双重作用对增强其耐盐性方面效果最好[39-40]。

目前有关降香黄檀幼苗生长的研究,主要从形态、生理特征等方面对结果进行分析,后续应从蛋白组学和基因组学等方面进行深入研究。

2　无性繁殖

2.1　扦插研究

为满足市场需求,扦插繁殖也是降香黄檀快速扩繁重要途径。采穗母树年龄、抽穗长度、扦插部位、抽穗规格及是否保留叶片等是影响扦插生根的内在因素[40]。研究表明,母树年龄显著影响降香黄檀扦插根系生长指标,不同年龄生根率隶属函数值高低顺序为2年生＞1年生＞5年生＞10年生,即采用2年生插穗的扦插效果最好[41]。在插穗长度和抽穗部位方面,该研究还认为20～26 cm为降香黄檀扦插的最佳插穗长度,并且采自降香黄檀下部插穗的生根率、根系与新梢生长等指标均优于中部和上部抽穗[42]。插条的发芽情况和粗细度对扦插的存活率也具有显著的影响。在插条的发芽情况和粗细度交互作用下,未发芽＋粗细度0.7～1.2 cm处理组扦插存活率最高,已发芽＋粗细度小于0.7 cm处理组的扦插存活率最低[43]。

影响降香黄檀扦插效果的外在因素主要包括扦插时间、扦插基质、生根剂[44]。降香黄檀的扦插试验一般在3月进行。扦插基质的组成和理化性质决定了扦插环境的好坏。早期研究认为较好的扦插基质有单一基质珍珠岩、混合基质黄心土＋腐殖质土(5∶5)和泥炭∶木屑∶树皮∶红心土(3∶3∶3∶1)[21]。最新研究认为,混合基质往往比单一基质更适合扦插[45]。如黄心土＋蛭石(1∶1)配比基质的扦插生根率显著高于黄心土、河沙等单一基质[42]。生根剂类型与浓度、浸泡时间也会影响扦插的效果[46]。如ABT1生根粉提高生根率和新梢生长的效果优于其它生长调节剂,吲哚丁酸对提高根系质量有显著的效果,吲哚乙酸促进降香黄檀扦插生根,萘乙酸提高根系生长质量。研究表明,150 mg·L^{-1}吲哚丁酸处理下的生根率为89.2%。混合生根剂方面,采用500 mg·L^{-1}吲哚乙酸＋750 mg·L^{-1}萘乙酸浸泡插穗基部1 min效果最好,生根率高达97.66%[47]。降香黄檀的扦插繁殖受内在因素和外在因素的双重影响,并且扦插繁殖的关键问题主要在于如何提高生根率。目前降香黄檀扦插繁殖的研究主要集中于单个因素对扦插效果的影响,未来可深入开展生长调节剂种类、浓度和浸泡时间多因素对生根率的影响研究,找到更多促进扦插生根的新型生长调节剂。

2.2　嫁接研究

关于降香黄檀嫁接繁殖技术的研究文献较少,最新的文献资料发表于10年前。根据文献记载,不同的嫁接方法和嫁接季节都会影响降香黄檀嫁接后的成活率[48]。一般选择在秋末以后、初春以前,采用“互”形接法和劈接法进行嫁接,降香黄檀的成活率高达91.5%以上[49]。砧木的大小和生长势会影响接穗的生长,生长旺盛的砧木对嫁接后接穗的生长更有利。接穗芽条的质量和生活力会影响接穗芽眼的萌动时间和接穗的生长,生

活力强的饱满穗芽不仅能提高嫁接成活率,还能促进嫁接后穗条的生长,并影响植株的生长[49]。但目前关于这方面的研究尚未深入探讨。

2.3 组织培养研究

有关降香黄檀组培的研究主要集中于外植体选择、消毒方法探讨、培养基筛选等方面[50]。适合作为外植体的对象主要有种子、茎段、根茎等器官,有学者利用降香黄檀嫩叶和幼茎等外植体,建立了以嫩叶和叶柄为较好外植体的悬浮培养体系[51]。并且通过比较发现,以种子为外植体比茎段更容易成活,可形成完整的组培再生植株[52],以根尖作为外植体则是降香黄檀组培最佳选择[53]。木本植物通常含有多种微生物,普通消毒手段无法彻底清除。因此,降香黄檀组培的最佳消毒方法是将外植体先后置于75%酒精和10%次氯酸钠溶液中,并分别浸泡2和20 min,该消毒方法的外植体污染率最低(40%)、存活率最高(51.4%)[54]。培养基筛选方面,不同外植体对培养基的要求也各不相同。研究发现,适宜降香黄檀幼嫩茎段腋芽诱导的培养基为B_5+6-苄氨基嘌呤1.0 mg·L^{-1}+吲哚丁酸0.2 mg·L^{-1}或1/2B_5+6-苄氨基嘌呤1.0 mg·L^{-1}+吲哚丁酸0.1 mg·L^{-1}[55]。林妃等[56]研究进一步发现,培养基MS+6-苄氨基嘌呤3.0 mg·L^{-1}+吲哚乙酸0.5 mg·L^{-1}激素比例对茎和叶的诱导效果最佳,而培养基MS+6-苄氨基嘌呤3.0 mg·L^{-1}+萘乙酸0.5 mg·L^{-1}激素比例对根的诱导率最佳。降香黄檀组培研究已取得一定成果,但同时存在一些瓶颈问题,如培养过程中外植体或愈伤组织褐化、缺乏系统的消毒方式及生根率较低等,严重影响降香黄檀快速繁殖的进程,因此,还需对降香黄檀组培过程中的控制褐化、系统消毒等方法进行深入研究。

3 人工林定向培育

降香黄檀价值最大的在其心材部分,然而自然状态下它的形成极其缓慢,并且大部分心材挥发油含量不高,成材率较低,因此,心材形成是降香黄檀人工林定向培育重要的研究方向。目前有关心材形成的研究主要集中于注射生长调节剂、接种特殊菌类以及种植管理措施等方面[57]。

3.1 注射生长调节剂

20世纪60年代末,学者Ziegler[58]提出了激素调控假说,他认为心材形成与树体内部某些激素的诱导或调控有关。随后的研究进一步发现,心材形成不仅受单个激素因子的影响,也与多种激素因子交互作用有关[59]。在降香黄檀人工林定向培育实践中,常用的生长调节剂主要有乙烯利、赤霉素、6-苄氨基腺嘌呤、百草枯、吲哚乙酸等。其中乙烯利和6-苄氨基腺嘌呤诱导产生的心材面积大于其它生长调节剂,2种诱导剂的最佳注射浓度分别为2.5%和4%;脱落酸、赤霉素和吲哚乙酸诱导产生的心材面积次之,它们的最适宜注射浓度分别为4%、3%和0.6%;百草枯诱导产生面积最小,并且心材挥发油含量显著低于对照处理[9,11]。有学者研究了2种生长调节剂交互作用对降香黄檀心材形成的影响,并发现2%乙烯利+4%6-苄氨基腺嘌呤组合处理的心材挥发油含量最高[60]。目前这方面的研究多集中于不同激素的单因子梯度试验,缺乏对2种或者多种激素混合处理下心材形成的研究。

3.2 接种微生物

据统计,在开花植物中,约有30万种植物被病原真菌定殖,目前已证实真菌有利于奇楠沉香中心材的形成[61]。学者们对降香黄檀心材形成与微生物的关系进行了研究。研究表明,受损的降香黄檀木材中的真菌多样性比健康降香黄檀木材中的真菌多样性要大,说明降香黄檀的心材形成与真菌侵染有关[62]。为了验证这个结论,贾瑞丰等[9]研究发现茄病镰刀菌(*Fusarium solani*)、多毛孢(*Pestalotiopsis palmarum*)等4种菌液都能促进降香黄檀心材形成,其中多毛孢菌液促进产生的心材面积和精油质量均显著高于其它菌液处理。目前降香黄檀心材形成与菌类关系的研究较少,而心材形成是否是由真菌入侵诱导的,还有待进一步验证,其潜在的分子机制也需要深入研究。

3.3 种植管理措施

不同种植措施(如水分调控、截干修枝、抚育管理等)也会对降香黄檀的心材形成产生影响[57]。研究表明,不同水分供给条件下(0、900、1800、2700 mm)降香黄檀都能产生心材,其中在0 mm处理下,心材中挥发油的含量明显高于其它处理[9]。这表明不同干旱处理均显著影响降香黄檀心材的形成,并且重度干旱处理的心材含油量显著高于其它处理。因此,在降香黄檀人工林栽培

实践中,重度干旱措施可用于促进中龄林或成熟林心材的形成,而轻度干旱措施则适用于促进幼龄林心材的形成[10]。修枝处理可以提高降香黄檀心材形成率,其中重度修枝处理的心材比例最高[7]。最新的研究表明,林下施用钙和覆盖膜的协同处理也能促进降香黄檀的生长和心材形成,其中覆盖膜+施钙150 g·株$^{-1}$处理的中心材特征产物较多[11]。还有研究认为配方施肥也会促进心材形成,但是有关降香黄檀林地施肥的研究集中于施肥措施与土壤养分、林分生长、植被多样性等之间的研究,还未系统探讨施肥措施对心材形成的影响[63-64]。

4　结论及展望

目前,珍贵树种降香黄檀繁育技术研究已经取得诸多成果,但由于存在各种客观因素,其繁育技术还未形成体系,仍处于不断的探索中。同时,在降香黄檀产业发展过程中也存在一些亟待解决的问题。主要表现为:①降香黄檀人工林资源丰富,但优良种质资源缺乏仍然是其产业发展的"卡脖子"问题。②高效栽培技术和定向培育技术缺乏,是制约降香黄檀产业发展的核心要素。③降香黄檀新品种物质基础研究不足,活性成分挖掘不系统,产品研发仍处于初级阶段,产业化发展程度低。为了更好地开发与利用降香黄檀现有资源,并推动降香黄檀产业可持续发展,本文基于以上国内外研究进展,结合降香黄檀人工林的资源现状,提出几个关于未来降香黄檀资源保护与开发利用方面的研究展望。

(1)重视降香黄檀种质资源收集与保存工作,加强优良品种筛选与新品种选育研究

现有的降香黄檀育苗基地主要以私人小苗圃为主,存在规模小、布局散乱、缺乏规模化的集中经营等问题。采种和育苗工作仅凭自身经验,缺乏相应的专业技术人员,无法保证种子的质量,极易造成苗木质量良莠不齐。因此,应重视降香黄檀种质资源收集与保存工作,建立引种试验示范基地和优良品种种质资源圃。可采用常规选优与分子标记育种2种方式开展降香黄檀优质资源的筛选工作,选育出优良品系推广种植,为其产业化发展和科学理论研究提供物质基础。

(2)积极探索降香黄檀定向培育技术体系,实现人工林的可持续经营

目前降香黄檀栽培技术、造林模式等均以传统技术为主,缺乏优质种苗和高效种植技术支撑,造成林木生长慢,干形差,林分分化严重等问题。降香黄檀的主要经济价值在于其心材中所蕴含的化学成分,但是自然条件下心材的形成时间比较漫长,导致该树种的投资周期长、见效慢。因此,应积极开展降香黄檀定向培育技术体系研究。如大径材培育方面,研究配方施肥、修枝整形以及林地管理等综合措施对大径材生长效果的影响,探索适宜降香黄檀大径材生长的最优培育模式。在短期收益方面,有效利用降香黄檀人工林现有中小径材资源,基于抑制主干、多分支造香等理念,深入开展小径级香用林定向培育技术研究,解决短时间结香、高质量和高产量结香等问题。最后,开展降香黄檀低效林改造研究,选择适宜的低效林,针对不同生长状况的树木采用不同培育方式(如对参差不齐、长势较差的树木,进行小径材培育,而干型笔直、长势较好的个体,则进行大径材培育),探索一套降香黄檀的复合培育模式。

(3)揭示降香黄檀心材形成的分子机理,突破产业链结构升级的理论与关键技术

目前,降香黄檀心材形成机理还未探明,心材形成技术还不成熟,在研究方法上还面临一些困难。首先,由于降香黄檀心材研究的试验主要在野外进行,受外界不可控的因素影响较大,加上心材的形成时间比较漫长,这也增加了试验的研究难度。其次,采用机械破坏、激素诱导以及微生物感染等研究方法,获得的心材成分及其相对含量差异较大。最后,心材形成是多种外界因子共同促进的结果,在开展研究时,应考虑从因素类型、因素搭配等诱导方法入手,找到人工促进降香黄檀心材形成的最佳组合模式。心材是由多种功能基因共同调控的代谢产物,应利用现代分子生物学和先进分析检测技术,揭示降香黄檀心材形成的分子机理,并挖掘心材功能性成分及活性物质,创制降香药材新产品,突破降香黄檀产业链结构升级的理论与关键技术。

参　考　文　献

[1]李志辉,李柏海,祁承经,等. 我国南方珍贵用材树种资源的重要性及其发展策略[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(11):1-8.

Li Z H, Li B H, Qi C J, et al. Studies on importance of valuable wood species resources and its development strategy [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2012, 32(11): 1-8.

[2]徐放,张卫华,潘文.珍贵树种大径级无节材培育研究进展[J].农业与技术,2022,42(7):88-90.
Xu F, Zhang W H, Pan W. Research progress in the cultivation of large-diameter non-saving wood of precious tree species[J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(7): 88-90.

[3]Cui Z Y, Li X F, Xu D P, et al. Changes in non-structural carbohydrates, wood properties and essential oil during chemically-induced heartwood formation in *Dalbergia odorifera* [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 1161.

[4]Yue X H, Miao L F, Yang F, et al. Morphological and physiological responses of *Dalbergia odorifera* T. Chen seedlings to different culture substances[J]. PLoS One, 2020, 15(5): e0232051.

[5]Zhao X S, Wang C H, Meng H, et al. *Dalbergia odorifera*: a review of its traditional uses, phytochemistry, pharmacology, and quality control[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 248: 112328.

[6]Sun Y, Gao M, Kang S, et al. Molecular mechanism underlying mechanical wounding-induced flavonoid accumulation in *Dalbergia odorifera* T. Chen, an endangered tree that produces Chinese rosewood[J]. Genes, 2020, 11(5): 478.

[7]王玥琳.不同培育措施对降香黄檀生长和生理代谢影响的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2019.
Wang Y L. Effects of Different Cultivation Measures on the Growth and Physiological Metabolism of *Dalbergia odorifera* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.

[8]Liu F M, Zhang N N, Liu X J, et al. Genetic diversity and population structure analysis of *Dalbergia odorifera* germplasm and development of a core collection using microsatellite markers [J]. Genes, 2019, 10(4): 281.

[9]贾瑞丰.降香黄檀人工促进心材形成的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2014.
Jia R F. Studies on artificially induced heartwood formation of *Dalbergia odorifera* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.

[10]崔之益,徐大平,杨曾奖,等.心材形成机理与人工促进研究进展[J].世界林业研究,2016,29(6):33-37.
Cui Z Y, Xu D P, Yang Z J, et al. A review of mechanism and artificial promotion of heartwood formation[J]. World Forestry Research, 2016, 29(6): 33-37.

[11]黄彩虹.基于人工调控的降香黄檀树木生长及其木质部结构与心材抽提成分分析[D].南宁:广西大学,2022.
Huang C H. Analysis of growth, xylem structure and heartwood extraction of *Dalbergia odorifera* T. Chen based on artificial regulation[D]. Nanning: Guangxi University, 2022.

[12]杨昌儒.降香黄檀荚果和种子生长发育动态的研究[D].南宁:广西大学,2018.
Yang C R. The study on the growth development of *Dalbergia odorifera* pod and seed [D]. Nanning: Guangxi University, 2018.

[13]邓力.降香黄檀种子贮藏及播前处理技术[J].林业科技开发,2013,27(5):115-117.
Deng L. A technique for seed storage and pretreatment in *Dalbergia odorifera* T. Chen [J]. China Development of Forestry Science and Technology, 2013, 27(5): 115-117.

[14]Liu X J, Xu D P, Yang Z J, et al. Geographic variations in seed germination of *Dalbergia odorifera* T. Chen in response to temperature[J]. Industrial Crops and Products, 2017, 102: 45-50.

[15]李效文,刘星,潘凤跃,等.不同配比基质对降香黄檀种子萌发的影响[J].林业科技通讯,2018(6):65-68.
Li X W, Liu X, Pan F Y, et al. Effects of different substrate formulas on seed germination of *Dalbergia odorifera* T. Chen [J]. Forest Science and Technology, 2018(6): 65-68.

[16]郑国增.降香黄檀播种及幼苗生长规律研究[J].福建林业科技,2015,42(1):123-125,176.
Zheng G Z. Sowing technique and seedling growth law of *Dalbergia odorifera*[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2015, 42(1): 123-125, 176.

[17]俞建妹,李付伸,刘晓璐,等.植物生长调节剂对降香黄檀种子发芽及幼苗生长的影响[J].广西农业科学,2010,41(7):649-652.
Yu J M, Li F S, Liu X L, et al. Effects of plant growth regulators on seed germination and seedling growth of *Dalbergia odorifera*[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2010, 41(7): 649-652.

[18]邱明红,黄丹懋,刘盛波,等.干旱胁迫对降香黄檀(*Dalbergia oderifera*)种子发芽及幼苗生长的影响研究[J].中国野生植物资源,2016,35(4):14-18,36.
Qiu M H, Huang D M, Liu S B, et al. Research on the germinating and growing of *Dalbergia odorifera* seedling under drought stress[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2016, 35(4): 14-18, 36.

[19]刘盛波,张伟,杜尚嘉,等.NaCl胁迫对降香黄檀(*Dalbergia oderifera*)种子萌发及幼苗生长的影响[J].种子,2016,35(6):22-26.
Liu S B, Zhang W, Du S J, et al. Research on the seed germination and seedling growth of *Dalbergia odorifera* under NaCl stress[J]. Seed, 2016, 35(6): 22-26.

[20]鲁洋,魏鹏,贾晨,等.降香黄檀在宜宾地区引种栽培试验初步评价[J].南方农业,2017,11(8):121-123.
Lu Y, Wei P, Jia C, et al. Preliminary evaluation on the introduction and cultivation experiment of *Dalbergia odorifera* in Yibin area[J]. South China Agriculture, 2017, 11(8): 121-123.

[21]高媛.不同降香黄檀种源评价及苗木繁育关键技术研究[D].杭州:浙江农林大学,2017.
Gao Y. The research of evaluating six provenances and seedling breeding key technology of *Dalbergia odorifera* T. chen[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2017.

[22]洪舟,张宁南,杨曾奖,等.低温胁迫对不同产地降香黄檀幼苗生理特征影响[J].西北林学院学报,2020,35(3):29-35.

Hong Z, Zhang N N, Yang Z J, et al. Effects of low-temperature stress on physiological characteristics of *Dalbergia odorifera* seedlings from different locations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(3): 29-35.

[23]蒲玉瑾,张一璇,苗灵凤,等.常温和低温条件下不同浓度外源褪黑素对降香黄檀幼苗的生理生态影响[J].广西植物,2022,42(4):648-658.
Pu Y J, Zhang Y X, Miao L F, et al. Effects of different exogenous melatonin concentrations on eco-physiological characteristics of *Dalbergia odorifera* seedlings under ambient and low temperatures[J]. Guihaia, 2022, 42(4): 648-658.

[24]李芸瑛.不同光照强度对降香黄檀幼苗生长及光合特性的影响[J].农业与技术,2014,34(3):13-15.
Li Y Y. Effects of different light intensity on growth and photosynthetic characteristics of *Dalbergia odorifera* seedlings [J]. Agriculture and Technology, 2014, 34(3): 13-15.

[25]郑坚,吴朝辉,陈秋夏,等.遮荫对降香黄檀幼苗生长和生理的影响[J].林业科学,2016,52(12):50-57.
Zheng J, Wu Z H, Chen Q X, et al. Influence of shading on growth and physiology of *Dalbergia odorifera* seedlings [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(12): 50-57.

[26]孙洁,刘俊,郁培义,等.不同基质配方对降香黄檀幼苗生长生理的影响[J].中南林业科技大学学报,2015,35(7):45-49.
Sun J, Liu J, Yu P Y, et al. Effects of growth physiology on *Dalbergia odorifera* seedlings by different matrixes[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(7): 45-49.

[27]洪舟,刘小金,张宁南,等.不同基质和容器规格对降香黄檀苗期及造林早期生长的影响[J].中南林业科技大学学报,2022,42(10):22-29,38.
Hong Z, Liu X J, Zhang N N, et al. Effects of different mediums and container sizes on the growth performance of *Dalbergia odorifera* at seedling and early afforestation stages [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(10): 22-29, 38.

[28]吴朝辉.不同光照强度和施肥水平对降香黄檀容器苗质量的影响[D].南京:南京农业大学,2010.
Wu Z H. Effect of different light intensity and fertilizer levels on quality of *Dalbergia odorifera* container seedlings [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.

[29]李毓琦.氮素和赤霉素对降香黄檀生长和叶片养分状况的影响[D].北京:中国林业科学研究院,2020.
Li Y Q. Effects of nitrogen and gibberellin on growth and nutrient status of *Dalbergia odorifera* leaves [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.

[30]赵霞,徐大平,刘小金,等.磷素营养对降香黄檀幼苗生长及叶片养分状况的影响[J].植物研究,2018,38(2):218-224.
Zhao X, Xu D P, Liu X J, et al. Effects of phosphorus supply on growth and foliar nutrition of *Dalbergia odorifera* seedlings [J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(2): 218-224.

[31]吴国欣,王凌晖,梁惠萍,等.氮磷钾配比施肥对降香黄檀苗木生长及生理的影响[J].浙江农林大学学报,2012,29(2):296-300.
Wu G X, Wang L H, Liang H P, et al. Fertilizer treatments for growth and physiology of *Dalbergia odorifera* seedlings[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2012, 29(2): 296-300.

[32]王楠,王宏信,李向林,等.施肥对降香黄檀幼苗生长和光合的影响[J].东北林业大学学报,2017,45(1):25-29.
Wang N, Wang H X, Li X L, et al. Effect of fertilization on growth and photosynthesis of *Dalbergia odorifera* seedlings [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(1): 25-29.

[33]贾瑞丰,杨曾奖,徐大平,等.干旱胁迫对降香黄檀幼苗生长及内源激素含量的影响[J].生态环境学报,2013,22(7):1136-1140.
Jia R F, Yang Z J, Xu D P, et al. Growth and endogenous hormone content of *Dalbergia odorifera* seedlings under drought stress [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1136-1140.

[34]贾瑞丰,徐大平,杨曾奖,等.干旱胁迫对降香黄檀幼苗光合生理特性的影响[J].西北植物学报,2013,33(6):1197-1202.
Jia R F, Xu D P, Yang Z J, et al. Photosynthesis physiological characteristics of *Dalbergia odorifera* seedlings under drought stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(6): 1197-1202.

[35]Xiang L S, Miao L F, Yang F. Drought and nitrogen application modulate the morphological and physiological responses of *Dalbergia odorifera* to different niche neighbors [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 664122.

[36]向丽珊.干旱、施氮条件下降香黄檀幼苗对不同生态位邻株的响应研究[D].海口:海南大学,2021.
Xiang L S. Study on the response of *Dalbergia oderifera* seedling to different ecological niches of neighboring plants under drought and nitrogen application [D]. Haikou: Hainan University, 2021.

[37]郭璐瑶,苗灵凤,李大东,等.施氮和增温对降香黄檀幼苗生长发育和生理特征的影响[J].植物科学学报,2022,40(2):259-268.
Guo L Y, Miao L F, Li D D, et al. Responses of *Dalbergia odorifera* seedling to neighbors with different niches under conditions of drought and nitrogen application [J]. Plant Science Journal, 2022, 40(2): 259-268.

[38]郭璐瑶.复合胁迫对降香黄檀幼苗生理生态的影响[D].海口:海南大学,2022.
Guo L Y. Effect of complex stress on the ecophysiology of seedlings of *Dalbergia odorifera* T. Chen seedlings [D]. Haikou: Hainan University, 2022.

[39]蒲玉瑾.外源褪黑素和氯化钙对低温下降香黄檀幼苗的生理生态影响[D].海口:海南大学,2019.
Pu Y J. Effects on Eco-physiological characters of *Dalbergia odorifera* T. Chen seedling under low temperature by exogenous melatonin and calcium application [D]. Haikou: Hainan University, 2019.

[40]张丽佳.干旱、盐胁迫下降香黄檀对外源物质应用的生理生态响应[D].海口:海南大学,2019.
Zhang L J. Effects of drought and salt stress on physiological

and ecological responses of *Dalbergia odorifera* T. Chen to exogenous substances application [D]. Haikou: Hainan University, 2019.

[41]尚春琼.桑树硬枝扦插不同生根类型的生理与转录调控机制比较研究[D].镇江:江苏科技大学,2020.
Shang C Q. A comparative study on physiological and transcriptional regulation mechanisms of different rooting types of mulberry hardwood cuttings [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020.

[42]徐珊珊.降香黄檀扦插繁殖及生根机理研究[D].北京:中国林业科学研究院,2021.
Xu S S. Cutting propagation and rooting mechanism of *Dalbergia odorifera* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2021.

[43]施悦谋,税珺,刘一贞,等.插条粗度和萌芽度对降香黄檀扦插成活率的影响[J].湖南林业科技,2014,41(1):20-24.
Shi Y M, Shui J, Liu Y Z, et al. The impact on survival ratio of the cutting propagation trial of *Dalbergia odorifera* by different degree of thickness and gemination [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2014, 41(1): 20-24.

[44]赵爽,刘志高,冯彬,等.山木通扦插繁殖及生根机制[J].浙江农林大学学报,2017,34(5):955-962.
Zhao S, Liu Z G, Feng B, et al. Cutting propagation technology and rooting of *Clematis finetiana* [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2017, 34(5): 955-962.

[45]贾志远,葛晓敏,唐罗忠.木本植物扦插繁殖及其影响因素[J].世界林业研究,2015,28(2):36-41.
Jia Z Y, Ge X M, Tang L Z. Research progress in cutting propagation technology for woody plants and its affecting factors [J]. World Forestry Research, 2015, 28(2): 36-41.

[46]施福军,俞建妹,王凌晖.降香黄檀扦插繁殖技术研究[J].广东农业科学,2011,38(1):50-52.
Si F J, Yu J M, Wang L H. Studies on the cutting propagation of *Dalbergia odorifera* [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(1): 50-52.

[47]徐珊珊,刘小金,徐大平,等.IAA和NAA对降香黄檀扦插繁殖的影响[J].林业科学研究,2021,34(5):168-176.
Xu S S, Liu X J, Xu D P, et al. Influence of IAA and NAA on cutting propagation of *Dalbergia odorifera* [J]. Forest Research, 2021, 34(5): 168-176.

[48]翁小婷,陈尚钘,宁晓丹,等.樟科植物无性繁殖技术研究进展[J].世界林业研究,2023,36(1):39-44.
Weng X T, Chen S X, Ning X D, et al. Research progress in clone reproduction technology of Lauraceae [J]. World Forestry Research, 2023, 36(1): 39-44.

[49]杨曾奖,徐大平,张宁南,等.降香黄檀嫁接技术研究[J].林业科学研究,2011,24(5):674-677.
Yang Z J, Xu D P, Zhang N N, et al. Study on the grafting technique of *Dalbergia odorifera*[J]. Forest Research, 2011, 24(5): 674-677.

[50]周双清,周亚东,盛小彬,等.降香黄檀繁殖技术研究进展[J].林业实用技术,2013(12):28-30.
Zhou S Q, Zhou Y D, Sheng X B, et al. Progress of propagation technology of *Dalbergia odorifera*[J]. Practical Forestry Technology, 2013(12): 28-30.

[51]孟慧,杨云,陈葵,等.降香黄檀的悬浮细胞培养[J].林业实用技术,2009(5):23-24.
Meng H, Yang Y, Chen K, et al. Suspension cell culture of *Dalbergia odorifera*[J]. Practical Forestry Technology, 2009 (5): 23-24.

[52]杨卫星.降香黄檀组织培养技术研究[J].现代农业科技,2018(10):150-151.
Yang W X. Study on tissue culture techniques of *Dalbergia odorifera*[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(10): 150-151.

[53]杨峰,陈仁利,刘进平,等.降香黄檀愈伤组织培养与植株再生研究[J].中国农学通报,2012,28(13):70-75.
Yang F, Chen R L, Liu J P, et al. Callus culture and plant regeneration of *Dalbergia odorifera*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(13): 70-75.

[54]林妃,李敬阳,常胜合,等.花梨木组织培养外植体消毒方法初步探讨[J].基因组学与应用生物学,2013,32(4):522-525.
Lin F, Li J Y, Chang S H, et al. The preliminary study in disinfection method of explants of *Dalbergia odorifera* in tissue culture [J]. Genomics and Applied Biology, 2013, 32(4): 522-525.

[55]俞建妹.降香黄檀组织培养和扦插繁殖技术的初步研究[D].南宁:广西大学,2010.
Yu J M. Preliminary study on tissue culture and cutting propagation techniques of *Dalbergia odorifera*[D]. Nanning: Guangxi University, 2010.

[56]林妃,李敬阳,王必尊,等.不同激素对降香黄檀愈伤诱导的影响[J].分子植物育种,2017,15(1):267-270.
Lin F, Li J Y, Wang B Z, et al. Effects of different hormones on callus induction of *Dalbergia odorifera* T. Chen [J]. Molecular Plant Breeding, 2017, 15(1): 267-270.

[57]王宏信,李向林,王楠,等.降香黄檀人工促进心材研究进展[J].广西林业科学,2016,45(2):186-189.
Wang H X, Li X L, Wang N, et al. Research progress on artificially induced heartwood formation of *Dalbergia odorifera* [J]. Guangxi Forestry Science, 2016, 45(2): 186-189.

[58]Ziegler H. Biological aspects of heartwood formation[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 1968, 26: 61-68.

[59]刘小金.檀香精油成分组成、分布及人工促成心材形成的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2012.
Liu X J. Studies on essential oil composition, distribution and inducing heartwood formation of sandal (*Santalum album*) [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2012.

[60]王宏信,李向林,王楠,等.植物生长调节剂处理对幼龄降香黄檀心材形成的影响[J].江苏农业科学,2017,45(14):95-99.
Wang H X, Li X L, Wang N, et al. Effect of plant growth regulator treatments on the formation of heartwood of young *Dalbergia odorifera*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(14): 95-99.

[61]Scheffer R P. Role of toxins in evolution and ecology of plant pathogenic fungi[J]. Experientia, 1991, 47: 804-811.

[62]Sun S S, Zeng X, Zhang D W, et al. Diverse fungi associated with partial irregular heartwood of *Dalbergia odorifera*[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 8464.

[63]DeBell J D, Lachenbruch B. Heartwood/sapwood variation of western redcedar as influenced by cultural treatments and position in tree[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(9): 2026-2032.

[64]王丽云,刘小金,崔之益,等.施肥对降香黄檀营养生长和生殖生长的影响[J].植物研究,2018,38(2):225-231.
Wang L Y, Liu X J, Cui Z Y, et al. Effects of fertilization on the vegetative and reproductive growth of *Dalbergia odorifera* T. Chen[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(2): 225-231.

Research progress on breeding techniques of national grade II protected plant, *Dalbergia odorifera* T. Chen

Lin Ling, Zhang Mengwen, Chen Feifei, Huang Chuanteng, Dong Xiaona, Chen Lin

(*Hainan Academy of Forestry/Hainan Mangrove Research Institute, Haikou 571100, China*)

Abstract: *Dalbergia odorifera* T. Chen, commonly known as fragrant rosewood, is an evergreen semi-deciduous tree belonging to the genus Dalbergia in family Fabaceae, and is naturally distributed only on Hainan Island. It is listed as a national grade II protected plant in China. It is not only an important strategic resource but also a precious medicinal and aromatic spices. Due to irrational logging practices and extensive illegal logging, the wild resources of *D. odorifera* are nearly depleted. Additionally, there has been a persistent imbalance between supply and demand for *D. odorifera* globally, leading to continuously rising market prices, reaching a point where it is priced per pound and difficult to find. Furthermore, the heartwood formation of *D. odorifera* in the wild takes a long time, typically around 7 years to initiate heartwood formation, and maturity requires more than 30 years. Therefore, research on breeding techniques for *D. odorifera* can not only meet the growing market demand but also alleviate the pressure of its remaining natural resources from illegal logging. In recent years, scholars both domestically and internationally have conducted extensive research on the breeding techniques of *D. odorifera* and have achieved fruitful results. Based on this, the current paper reviewed the research progress of breeding techniques for *D. odorifera*, including sexual reproduction (seed germination, seedling growth), asexual propagation (cuttings, grafting, tissue culture), and targeted cultivation in artificial forests (growth regulator injection, microorganism inoculation, and planting management measures). Additionally, it analyzed the main problems existing in the development of *D. odorifera* industry, such as insufficient high-quality germplasm resources, lack of efficient cultivation and targeted breeding techniques, insufficient research on the material basis of new varieties, and non-systematic exploration of active ingredients. Finally, this paper proposes research prospects such as increasing the breeding of new varieties, innovating cultivation technology systems, and upgrading the industrial chain structure. This review can provide references for the research on high-quality seedling breeding techniques for *D. odorifera*.

Keywords: Rare tree species, *Dalbergia odorifera*, Asexual reproduction, Sexual reproduction, Plantation cultivation

(编辑:郭玥微)