

文章编号:1001—7380(2023)06—0045—08

## 山桐子研究进展

胡亚梅<sup>1,2</sup>, 沈永宝<sup>1\*</sup>, 马艳<sup>3</sup>, 赵锡斌<sup>4</sup>

(1. 南京林业大学林草学院、水土保持学院, 江苏 南京 210037; 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. 金陵科技学院, 江苏 南京 211199; 4. 南京江宁台创园管理委员会, 江苏 南京 211100)

**摘要:**山桐子不仅观赏性强,而且果实含油量高,具有成为新型生物质能,缓解能源紧缺的潜力。我国具有丰富的山桐子资源,随着各地山桐子产业发展,深入研究我国山桐子产业发展现状,并探讨经济、快速的发展思路十分必要。该文针对山桐子开花与结实特性、良种选育、山桐子油应用、山桐子油优化机制等方面的研究进展,探究山桐子开花结实特性,以及花芽分化过程,积极进行良种选育以及选择高含油量、高不饱和脂肪酸的优质山桐子油的山桐子繁殖体系,是目前促进山桐子产业发展的主要技术研究方向。但以山桐子油用为目标,发展山桐子产业,需对山桐子雌树选育、两性花的分化机制进行进一步探索;目前对于山桐子油提取和优化方法的研究较多,但应选择快速和经济的技术路线,进行果实高产、稳产的育种研究和新品种开发。

**关键词:**山桐子;开花特性;结实特性;选择育种;山桐子油

**中图分类号:**S794.9 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1001-7380.2023.06.008

### Research progress on *Idesia polycarpa*

Hu Yamei<sup>1,2</sup>, Shen Yongbao<sup>1\*</sup>, Ma Yan<sup>3</sup>, Zhao Xibin<sup>4</sup>

(1. College of Forestry and Grass, College of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Collaborative Innovation Center for Southern Modern Forestry, Nanjing Forestry University, Southern Forest Seed Inspection Center of the State Forestry Administration, Nanjing 210037, China; 3. Jinling Institute of Technology, Nanjing 211199, China; 4. Nanjing Jiangning Taichuang Park Management Committee, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** *Idesia polycarpa* not only has strong ornamental value, but also has high oil content in its fruit, which has the potential to become a new type of biomass energy to alleviate energy scarcity. China has abundant resources of *I. polycarpa*, and with the gradual development of the *I. polycarpa* industry in various regions, some new problems have emerged that urgently need to be solved. It is necessary to conduct in-depth research on the current development status of China's *I. polycarpa* industry and explore economic and rapid development strategies. The research progress in the flowering and fruiting characteristics, breeding of improved varieties, application of *I. polycarpa* oil, and optimization mechanism of *I. polycarpa* oil was involved in flowering and fruiting characteristics, process of flower bud differentiation of *I. polycarpa*, breeding of improved varieties, and high-quality *I. polycarpa* selection with high oil content, high unsaturated fatty acid. Further more, exploration is needed for the selection of female trees and the differentiation mechanism of bisexual flowers in *I. polycarpa*; Though there is a lot of research on the extraction and optimization methods of *I. polycarpa* oil, a fast and economical technical route should be chosen to conduct breeding research and new variety development for high and stable fruit yield.

**Key words:** *Idesia polycarpa*; Flowering characteristics; Fruiting characteristics; Breeding selection; *Idesia polycarpa* oil

大风子科(Flacourtiaceae)山桐子属(*Idesia*)仅山桐子(*Idesia polycarpa* Maxim.)1种,以及福建山桐子(*I. polycarpa* var *fujianensis*)、长果山桐子(*I. polycarpa* var *longicarpa*)和毛叶山桐子(*I. polycarpa* var *vestita*)3个变种<sup>[1]</sup>。山桐子又名斗霜红、椅桐、椅树、水冬桐、水冬瓜、椅<sup>[1]</sup>。最早《诗经》中的《小

收稿日期:2023-09-05;修回日期:2023-10-27

基金项目:江苏省林业科技创新与推广项目“山桐子雌株高效繁育技术示范与推广”(LYKJ-南京[2022]01)

作者简介:胡亚梅(1998-),女,安徽蚌埠人,硕士。主要从事园林植物应用方向的研究。E-mail: huyamei1998@163.com

\*通信作者:沈永宝(1963-),男,江苏徐州人,博士生导师,教授。研究方向为森林培育与林木种苗。E-mail: ybshen@njfu.com.cn

雅·湛露》记载：“其桐其椅，其实离离”，意为“那些同类的梧桐山桐，一树比一树果实累累”，其中“椅”即为山桐子<sup>[2]</sup>。而且山桐子适生性强、分布广泛，易繁殖<sup>[3-4]</sup>，产甘肃南部、陕西南部、山西南部、河南南部、台湾北部和西南3省、中南2省、华东5省、华南2省等17个省区，韩国和日本也有分布<sup>[1]</sup>，但常生于海拔400—2 500 m的低山区的山坡、山洼等落叶阔叶林和针阔叶混交林中，通常集中分布于海拔900 m(秦岭以南地区)至海拔1 400 m(西南地区)的山地<sup>[1]</sup>，据不完全统计，仅水城区杨梅乡光明村野生山桐子分布约2.5万株，山桐子长期以来处于野生状态，没有得到有效利用<sup>[5]</sup>。

山桐子为山地营造速生混交林和经济林的优良树种，主要利用价值包括：(1)木材松软，可供建筑、家具、器具等的用材。(2)树形优美，果实长序，结果累累，果色朱红，为山地或园林的观赏树<sup>[1]</sup>。(3)叶片能吸收大气中的二氧化硫，也是工矿地区的理想绿化树种<sup>[4]</sup>。(4)山桐子花朵、果实、叶片、枝条等组织是多种生物活性物质的优良来源。花多芳香，有蜜腺，为养蜂业的蜜源资源植物；果实提取物可以做金属缓蚀剂<sup>[6]</sup>、抑制脂肪生成<sup>[7]</sup>；叶片内含有羟基肉桂酸衍生物，可以减少OA诱导的脂肪变性条件下的HepG2细胞中的肝细胞游离脂肪酸积累<sup>[8]</sup>；枝条提取物对人B细胞急性淋巴细胞白血病细胞有抗白血病作用<sup>[9]</sup>。(5)山桐子果实含油率高，且速生高产<sup>[3-4]</sup>，百年大树仍是果实盛产期<sup>[10]</sup>。山桐子油属于半干性油，可做绝缘漆、肥皂、润滑油<sup>[3]</sup>，提高双酚A型环氧树脂的韧性<sup>[11]</sup>；山桐子油还富含 $\beta$ -谷甾醇、总生育酚和多酚，抗氧化活性高<sup>[12]</sup>，具有食用价值<sup>[12-13]</sup>；尤其是近年来国际能源紧缺，生物质能被赋予重要能源战略定位<sup>[14]</sup>，山桐子油富含亚油酸<sup>[12]</sup>，具有发展成生物柴油的潜力<sup>[15]</sup>，具有较高的经济和生态价值。

## 1 山桐子开花与结实

山桐子常为雌雄异株，是重要的经济树种和观赏树种，其果实是山桐子油的主要来源，但是幼苗阶段不容易区分山桐子的性别，目前常在开花3 a后种植幼苗，砍掉雄树，大大提高了管理和栽培成本<sup>[16]</sup>，研究山桐子开花结实特性、雌雄问题，良种选育，可以为山桐子早期雌树选择、花期调控和果实丰产提供理论依据。

### 1.1 山桐子开花结实性

1.1.1 山桐子花芽分化 山桐子雌花和雄花在发育初期具有相同的解剖结构，直到次年4月上旬休眠结束后，花芽即将萌动时，雌雄花芽分化出现差异<sup>[16-17]</sup>，而且山桐子雄花蕾的芽鳞开裂时间和花序分生组织的分化都早于雌花蕾<sup>[17]</sup>。(1)山桐子在雌花发育早期，有多数雄蕊，但是其雄蕊在四分体期之前停止发育，之后解体，不能产生正常的花粉粒<sup>[16-17]</sup>，所以药室内形成空腔<sup>[18]</sup>。(2)雄花花粉母细胞正常进行减数分裂<sup>[18]</sup>，而子房在胚珠原基发生后停止发育，并且退化的子房中有不完整的胚珠<sup>[16-17]</sup>。所以山桐子单性花发育过程中，通过限制异性花器官的发育，最终形成仅具雌性或雄性器官的单性花<sup>[17]</sup>。Li等鉴定了80组转录因子家族，主要包括MYB, WRKY, AP2和bHLH转录因子家族，KEGG途径分析表明在雌、雄花发育的不同阶段，多种植物激素(CTK, GA3和EHT)的表达和类黄酮生物合成途径不同，还与开花相关的基因与光周期、春化、热感和自主神经途径相关<sup>[16]</sup>。雄花IAA含量高于雌花，雌花ABA, GA3和tZR含量高于雄花<sup>[19]</sup>。CTK, GA3和EHT，在雌花分化的中期促进雌蕊发育，而在雄花分化中期下调，也可能是雄花雌蕊无法正常发育的原因<sup>[16]</sup>。而IAA也可能与山桐子花芽分化有关<sup>[20]</sup>。山桐子花器官发育符合ABCDE模型，其中B基因家族在山桐子雌花中表达较少，可能是影响雌花发育后期雄蕊育性的原因<sup>[16]</sup>。开发的山桐子雌性特异性SCAR标记<sup>[21]</sup>，可用于山桐子雌株早期鉴定。

1.1.2 山桐子两性花 中国植物志记载山桐子雌雄异株或杂性<sup>[1]</sup>，即1株山桐子上同时有单性花和两性花的现象。但对于山桐子两性花的研究并不多。1948年Corti发现山桐子雄株偶尔会开出一些带有子房并发育成果实的花<sup>[22]</sup>。Wang等也发现山桐子偶有两性花，且发育正常，能正常结实，同时其两性花和单性花在发育初期具有相同的解剖结构，而后续分化阶段雌花雄蕊退化，雄花子房退化，但两性花雄蕊和子房都发育正常<sup>[17]</sup>。Wang研究发现雄花的子房在胚珠原基启动后停止发育<sup>[17]</sup>，而两性花胚珠原基败育期之前花芽分化发生异常，导致雄花向两性花转化<sup>[17]</sup>，这可能是研究两性花产生的切入点。

1.1.3 山桐子结实特性 山桐子果实含油量高，果实是山桐子主要经济来源，其结实特性决定了山桐

子的经济价值。山桐子果实在5月下旬开始发育<sup>[23]</sup>,至10月成熟<sup>[20]</sup>,6月至7月果实数量最多,9月至10月果实损失最多,高达56.92%<sup>[24]</sup>。植株内营养物质和激素往往与雌株的结实有关。山桐子果实不同发育时期中可溶性糖和可溶性蛋白含量呈“上升-下降”趋势,抗氧化酶、ABA、IAA、GA3和ZR含量的动态变化,对果实的发育进程起积极的调控作用<sup>[25]</sup>。为了解山桐子大小年现象,许东辉等研究无大小年、不完全大小年和完全大小年等3种结实类型的山桐子,发现高含量的ABA,ZR和低含量的GA3有利于山桐子花芽的分化,而有果枝的叶、芽中内源激素ABA/GA3及(ZR+ABA)/GA3之值均小于无果枝的,则不利于其花芽分化,而且果实膨大期叶、芽中内源激素的平衡态决定着当年的花芽分化水平,继而决定着翌年结实的丰产性<sup>[20]</sup>。

## 1.2 山桐子良种选育

1.2.1 山桐子遗传变异 山桐子经过天然杂交和长期的自然选择,呈现出许多变异。山桐子不同居群和个体之间变异较大,除了花序梗以外,还主要表现在含油率、果实表型<sup>[13]</sup>、果穗<sup>[26]</sup>变化上。山桐子优树选择的核心是高质量油脂优树选择,而山桐子果实是含油量最高的组织<sup>[27]</sup>,所以果实品质是良种选育的关键。冯建等以国内14个山桐子居群为研究对象,其9个果实表型性状在居群间和居群内均有广泛变异,居群间各表型性状的变异系数为6.47%—32.51%,居群内各表型性状的变异系数为4.69%—35.21%<sup>[28]</sup>。刘英<sup>[13]</sup>等以8个产地山桐子为研究对象,对其18个果实性状进行表型变异分析,结果表明山桐子的18个果实性状均存在极显著差异( $P < 0.01$ ),变异系数6.25%—81.98%,其中单穗果柄鲜质量变异系数最大,果形指数变异系数最小。

山桐子油是山桐子的重要经济价值,富含不饱和脂肪酸是山桐子油的更大优势,在选育时,往往以含油量和脂肪酸组成为主要衡量标准。Li等研究发现不同省份的山桐子果实大小和含油量差异很大(21.27%—39.47%)<sup>[29]</sup>。但是所有地区山桐子果油的亚油酸都是主要脂肪酸,比例保持稳定且含量在60%以上<sup>[29-30]</sup>。山桐子油的其他脂肪酸成分包括棕榈酸(12.57%—20.62%)、油酸(3.57%—9.10%)、棕榈油酸(1.98%—5.80%)、硬脂酸(2.43%—3.68%)、十七烷酸(1.49%—14.97%)、 $\gamma$ -亚麻酸(1.29%—2.58%)、花生酸(0.68%—

5.13%)和 $\alpha$ -亚麻酸(0—0.73%)<sup>[30]</sup>,但是在湖北地区山桐子果油中未发现 $\alpha$ -亚麻酸,所以不同原产地的山桐子油其他脂肪酸组成不同<sup>[30]</sup>。Wen等采用主成分综合评价栽植在重庆来自不同省份的山桐子油,发现陕西、四川、河北和江西4个原产地中,河北的果实脂肪酸组成更适合开发食用油<sup>[30]</sup>。Zhang等也对不同市的山桐子油脂脂肪酸组成、生物活性成分和抗氧化能力进行比较,结果表明各市之间也存在显著差异<sup>[12]</sup>。总体而言,山桐子油脂脂肪酸水平的差异主要体现在不同品种和组织之间,而果实生长过程中质量的增加主要反映在果肉部分<sup>[30]</sup>,所以果实的含油量主要与果肉中的含油量有关,而总糖、粗纤维和灰分含量与油含量呈负相关关系<sup>[30]</sup>。

1.2.2 山桐子杂交育种 杂交和回交是加快传统林木遗传改良捷径,杂交育种现在广泛用于人工林培育以获得杂交优势,回交则用于加强杂种个体的性状表现<sup>[31]</sup>。山桐子雌花和雄花的开放数量同时达到高峰,花期同步性较强,有利于杂交授粉<sup>[23]</sup>。父本和母本的选择是提高果实品质的关键,母本、父本及其交互作用对坐果率和果实性状都有较大影响<sup>[23]</sup>。果实品质还与花粉竞争有关,所以山桐子人工杂交授粉处理的果实质量、产量和种子发芽率都高于自然授粉<sup>[23]</sup>。山桐子的植物花为虫媒花,传媒昆虫多为蜂类、蝶类、甲虫,以及少数蝇及蜻<sup>[18]</sup>。昆虫数量少时,山桐子还可以进行无融合生殖,但通过无融合生殖获得果实品质显著低于自然授粉和人工杂交授粉,并且平均结实率低,为3.6%—13.33%<sup>[23]</sup>。

1.2.3 山桐子分子遗传育种 分子遗传育种为加快传统树木育种周期以及杂交和回交方案提供了有前途的替代方案<sup>[31]</sup>。山桐子油富含饱和和不饱和脂肪酸,其中不饱和脂肪酸含量最高可达82%<sup>[32]</sup>,不饱和脂肪酸中亚油酸含量最高,占70%<sup>[30]</sup>。而山桐子不同阶段的脂质积累率、最终脂质含量、亚油酸积累率和最终亚油酸含量差异显著<sup>[33]</sup>。近年来学者在基因组水平上分析基因功能,以为遗传改良山桐子油的脂肪酸组成提供基因资源。硬脂酰-ACP  $\Delta^9$ 脱氢酶(stearoyl-ACP  $\Delta^9$  desaturase, SAD)是决定脂肪酸组成的关键酶<sup>[34]</sup>,龚珏等人鉴定到7个*IpSAD*基因(*IpSAD1-7*),其中*IpSAD3*在山桐子不同发育时期的果实、各发育阶段的雌雄花、成熟根和叶片中表达量均较高。沉默*IpSAD*基因使叶片的油酸含量显著降低,其中沉默

*IpSAD3* 可使油酸含量下降 76%<sup>[34]</sup>。脂肪酸去饱和酶(fatty acid desaturase, FAD)途径,在亚油酸合成中也起到关键作用,是亚油酸和  $\alpha$ -亚麻酸生物合成的关键酶,*IpFAD2* 蛋白可以催化山桐子亚油酸的合成,与根、茎、叶、花相比,*IpFAD2* 的表达在发育果实中丰度最高,并与果实亚油酸积累率呈正相关<sup>[33]</sup>。

各种植物在其种子中积累油脂(主要以三酰基甘油的形式),用作发芽的能量贮备<sup>[35]</sup>。由于三酰基甘油和柴油化学特征相似,植物油也成为传统柴油,成为不可再生能源的替代品<sup>[36]</sup>。二酰基甘油酰基转移酶 2(diacylglycerol acyltransferase 2, DGAT2)是催化三酰基甘油合成最后一步的关键酶,Fan 等研究发现山桐子果实脂质含量的增加速率与 *IPDGAT2* mRNA 含量呈正相关,并且 *IPDGAT2* 在种子成熟期表达量最高,过表达 *IPDGAT2* 使脂质含量增加了 2%<sup>[27]</sup>。qPCR 检结果表明 *IpDGAT4*mRNA 在果实中的表达明显高于其他组织(根、1 年生茎、多年生茎、叶片、花朵)<sup>[27]</sup>。

1.2.4 山桐子优良单株和良种选择 我国山桐子多处于野生状态<sup>[5]</sup>,新品种和良种选育还处于初级阶段,缺乏优质种苗,导致山桐子产业推动难<sup>[37]</sup>。现经选优,无性繁殖已育成‘鄂选 1 号’(*I. polycarpa* ‘Exuan 1’)<sup>[38]</sup>新品种,‘鄂选 1 号’丰产稳产,生长快,树形好,结果早,经试验其抗逆性<sup>[39]</sup>、果实油脂其他基本化学成分含量都较为优良<sup>[40]</sup>,并经审定于 2022 年作为良种<sup>[41]</sup>。

树木的世代时间很长,所以树木育种目的很少是开发新品种,而是依赖于自然选择和表型选择来实现良种选育<sup>[31]</sup>,而且选择优良单株是选育新品种的基础<sup>[42]</sup>。在相同生长条件下,不同果实品种间含油量、脂肪酸组成和其他基本营养物质含量都存在显著差异<sup>[30]</sup>。近年来,学者从坐果率、果实大小、质量、果形指数等品质间接选择高含油率和优质脂肪酸组成的山桐子单株。其中山桐子果实单串果穗质量和单串果实质量的变异系数较大,单果横径、单果纵径及单果质量的变异系数均较小,山桐子果穗表型性状与果实产量性状呈显著正相关对其产量有着显著影响,选择潜力较大<sup>[28]</sup>。而且山桐子不同单株果实含油率变化范围 20.00%—41.45%,平均值达 29.89%,单株间存在较为丰富的变异<sup>[13]</sup>。山桐子果实含油率与单穗果实鲜质量<sup>[13]</sup>、单果种子数和干质量<sup>[29]</sup>均呈极显著正相关,而与果形指数、鲜果含水率呈显著负相关<sup>[13]</sup>,但单果种子数和干质

量不会影响亚油酸含量<sup>[29]</sup>,所以在选择高油单株时建议优先考虑果形指数小、果实质量大的单株<sup>[13]</sup>。

1.2.5 山桐子苗木繁育 山桐子苗木繁育方式主要包括播种、扦插、嫁接和组织培养<sup>[43]</sup>,种子去蜡处理可以提高山桐子发芽率,但是培育实生苗前期不容易区分山桐子的性别,大大提高了管理和栽培成本<sup>[16]</sup>,且无性繁殖技术更有利于保持优良单株的优良性状并加速推广<sup>[43]</sup>。杨朗声等对山桐子苗进行嫁接,成活率为 86.00%—93.20%,保存率为 82.63%—90.43%,并且发现砧木粗度增加对嫁接苗生长具有积极影响<sup>[44]</sup>。其次激素处理硬枝、嫩枝或根都可以得到较高的扦插成功率<sup>[43]</sup>。而组织培养方面,和叶片相比,种子是更适合诱导愈伤组织的外植体<sup>[45]</sup>。蒋泽平等试验证明若在南京采用山桐子茎段作为组织培养材料,最佳取材时间为 4 月下旬,并且移栽于蛭石(V):珍珠岩(V):泥炭(V)=6:3:1混合基质内,适当遮荫,存活率较高<sup>[46]</sup>。

冯建等研究发现土壤 pH 及有效磷含量是影响山桐子果实表型性状的主要土壤养分因子,在生产中或可通过调节土壤酸碱度及有效磷含量来达到增产的目的,山桐子不同居群地土壤 pH 在 5.36—8.49 范围内,多为酸性,而有效氮、有效磷、有效钾含量低<sup>[28]</sup>。土壤 pH、有效磷含量与果实表型性状存在显著相关性,全氮对山桐子果实表型性状影响较大<sup>[28]</sup>,同时降雨量也影响果实的大小<sup>[29]</sup>。海拔、年平均气温和年降雨量是影响含油量和脂肪酸组成的主要因素,因此在山桐子的栽培管理中可以进行适当的水肥控制<sup>[28-29]</sup>。

## 2 山桐子油

山桐子果实含油率高,四川和陕西等地区群众食用山桐子油、点灯、做涂料已经有近百年历史<sup>[10,47]</sup>。山桐子油中富含大量不饱和脂肪酸,其中占比最重的则为具有多种生理活性功能的亚油酸<sup>[40]</sup>。在追求森林资源多效永续利用的新阶段<sup>[48]</sup>,不仅要关注林业的生态环境价值,也应该发挥其经济价值<sup>[49]</sup>。山桐子油由于其优质的脂肪酸组成成分,是开发生物质能的优质原料,而且利用生物质能也是解决食用和工业油供应、能源和其他资源短缺的绝佳选择<sup>[30]</sup>。所以山桐子果实含油率、山桐子油脂肪酸组成及其提取方法的优化是山桐子的主要研究内容之一。

## 2.1 山桐子油的应用

2.1.1 山桐子生物柴油 生物柴油是集可持续性和经济可行性为一体的清洁能源<sup>[50]</sup>,是一种“替代”柴油燃料,在世界上正被越来越多的国家接受<sup>[51]</sup>。构成生物柴油的各种单个脂肪酸的性质决定了生物柴油燃料的整体燃料特性<sup>[51]</sup>。山桐子油富含不饱和脂肪酸不仅是优质的食用油也是生物柴油的理想原料。王利兵等兼顾生物柴油十六烷值、碘值、冷滤点和氧化安定性4个重要燃料特性的要求,预测生物柴油燃料特性,认为制备生物柴油的油脂脂肪酸组成一般含少量的饱和脂肪酸(<30%)、大量的单元不饱和脂肪酸(>30%)和一定量的多元不饱和脂肪酸(<60%)<sup>[52]</sup>。不同提取方式可能影响山桐子油制备柴油的能力,学者各自采用不同提取方式,探究山桐子油是否达到制备生物柴油的标准。陈姹月等通过对麻疯树、乌桕、毛叶山桐子、油茶、巴豆、蝴蝶果和东京桐7种产于西南地区木本植物种子油的理化性质及其制备的生物柴油脂肪酸组成进行比较研究,发现蝴蝶果、油茶和东京桐也是生物柴油的理想原料植物,而毛叶山桐子可作为生产生物柴油的备选资源<sup>[50]</sup>。Yang等采用甲醇和氢氧化钾为原料,采用碱催化酯交换法,以精制的山桐子果油为原料,制备了甲酯型生物柴油,其燃料特性与No.40轻柴油燃料相似,大多数参数符合生物柴油规范<sup>[15]</sup>。汪全义等以毛叶山桐子油、甲醇为原料,通过碱催化酯交换反应制备生物柴油结果显示制备生物柴油性能也达到美国生物柴油的标准<sup>[53]</sup>。

2.1.2 山桐子食用植物油 山桐子油果实含油率高<sup>[12,30]</sup>,目前山桐子以及其变种毛叶山桐子油由于富含的对健康有益的不饱和脂肪酸<sup>[12,30,54-55]</sup>,具有成为新型优质食用植物油的潜力<sup>[12-13]</sup>,有利于扩大健康植物油的供应范围,并缓解食用油供应的压力<sup>[56]</sup>。2018年发布的推荐性粮食行业标准《山桐子油》,为规模生产山桐子植物油提供了技术支撑<sup>[57]</sup>。山桐子油含有油酸、亚油酸、棕榈油酸、亚麻酸、维生素E、谷甾醇和多酚等营养物质<sup>[12]</sup>。亚油酸是山桐子油中含量最高的不饱和脂肪酸<sup>[30]</sup>,对人体健康有益,但人类自身不能合成<sup>[58]</sup>,所以食用山桐子油是摄取亚油酸的好途径。Xiang等比较了山桐子果油、橄榄油和大豆油的理化、生物活性和消化特性,发现山桐子油易于消化,且富含 $\beta$ -谷甾醇、 $\alpha$ -生育酚和 $\beta$ -生育酚,营养含量较高,并不逊色橄

榄油和大豆油<sup>[56]</sup>。所以山桐子油具有良好的食用植物油发展前景。但是未精炼的山桐子种子油有苦涩味,果肉油有卡喉味,其苦味来源于一种易溶于水的酚甙化合物,卡喉味是果肉油酸值高,游离脂肪酸多所致<sup>[10,47]</sup>,所以必须精炼后食用<sup>[57]</sup>。

## 2.2 山桐子油的优化

2.2.1 山桐子果实采收时期选择 不同发育时期山桐子果实的含油量不同,例如西北农林大学苗圃中的山桐子果实内脂质的积累主要集中在准备期(8月1日—8月11日)和成熟期(9月10日—9月30日)<sup>[27]</sup>,成熟期脂质含量达到峰值而不再积累,此时IPDGAT2的表达在所有生长期中也最低<sup>[27]</sup>。“鄂选1号”最佳采收期为盛花期后133d左右,此时山桐子全果平均含油率为40.25%;果肉中的平均含油率为44.60%;种子中的平均含油率为30.55%;“鄂选2号”山桐子油料最佳采收期为盛花期后128d左右,此时山桐子全果平均含油率为33.46%;果肉中的平均含油率为44.35%;种子中的平均含油率为29.26%<sup>[40]</sup>。其中“鄂选1号”种子油脂中亚油酸含量高达61.85%，“鄂选2号”种子油脂中亚油酸含量高于整果和果实,高达61.43%<sup>[40]</sup>。山桐子果肉含油量比种子高得多<sup>[29,40]</sup>,但种子油的亚油酸和多不饱和脂肪酸的比例增加,饱和脂肪酸含量较低<sup>[54]</sup>,所以种子最适合用于提取山桐子多不饱和脂肪酸<sup>[30]</sup>。

2.2.2 山桐子油的提取优化 山桐子油的传统提取方法是直接榨取和浸出<sup>[57]</sup>,现也尝试使用索氏提取法、水酶法、有机溶剂浸提法、酸性浸润干燥辅助水代法等方法提取山桐子油,以提高提取率和山桐子油的品质。华婉等发现索氏提取法比传统压榨法的提取率更高,提取率由21%提高到35%以上<sup>[59]</sup>。使用压榨法、水酶法、有机溶剂浸提法3种方法提取,都可以得到较高不饱和脂肪酸含量的山桐子油(82%),其中有机溶剂浸提法的提取率最大,但耗时长且存在一定溶剂残留,而压榨法不饱和脂肪酸最高,且耗时短,操作简单,是较好的提取山桐子油的方法<sup>[32]</sup>。近年来,学者们还使用酸性浸润干燥辅助水代法提高提取效率,使山桐子果油提取率由未处理的50%提升到69%<sup>[60]</sup>。而使用超高压临界二氧化碳萃取在高达65MPa的提取压力下萃取山桐子油,结果也显示高提取压力无法改变多果油的脂肪酸组成,但更有利于提高DPPH自由基清除能力,增强油类的抗氧化能力和较低的酸

值<sup>[61]</sup>。微波协同盐效应辅助水剂法获得的山桐子油具有更高的 DPPH 清除率和更低的硫代巴比妥酸值;且这 2 种方法提取的山桐子油的脂肪酸组成、酸价和过氧化值无显著差异,微波协同盐效应辅助水剂法可以有效提取山桐子油,提取率较高且油脂品质表现良好,为生产高品质山桐子油提供参考<sup>[62]</sup>。

2.2.3 山桐子香气优化 香气作为油脂独特风味,是评价油脂品质的关键指标之一,但是受氧化影响,山桐子油中存在难闻的气味,这是食用油开发中要解决的问题之一<sup>[30]</sup>。挥发性成分的变化对山桐子油的品质有巨大影响,研究山桐子挥发性成分有助于进一步选育及推广山桐子优良品种<sup>[63]</sup>。山桐子鲜果和油脂中香气成分中的优势成分为烷类物质<sup>[40]</sup>,而油脂中烷类物质中主要成分为正戊烷,含量高达总体香气成分的 86.16%,是山桐子油脂香气成分的绝对优势成分<sup>[40]</sup>。陈耀兵等采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME-GC-MS)对 4 种品种的山桐子及其在制油过程中的香气成分进行检测与分析,结果显示不同品种之间、不同处理过程中的香气成分的种类和相对含量都有比较大的差异,在经相同的条件处理后,干样和油的香气成分逐渐变得统一,鲜样的香气成分以醇类、酸类、酯类和酰胺类物质为主,干样的香气成分以烷类、醛类和醇类为主,油的香气成分主要为烷类<sup>[63]</sup>。而精炼后山桐子油酚类、醛类和醇类大幅度减少<sup>[58]</sup>。

2.2.4 山桐子油的贮藏方式优化 山桐子果实油脂中富含大量不饱和脂肪酸,而不饱和脂肪酸易氧化变质,使其储存稳定性变差,运用面变窄<sup>[40, 64]</sup>。而复合抗氧化剂叔丁基对苯二酚+抗坏血酸棕榈酸酯均能够有效抑制酸价过氧化值的上升和脂肪酸组成的变化和不饱和脂肪酸含量降低<sup>[40]</sup>。除此以外,高温和光照也影响山桐子内酸价、过氧化值、茴香胺值和共轭二烯值,随着储藏时间、温度和光照呈正相关,所以最适合山桐子油的储藏条件为添加叔丁基对苯二酚抗氧化剂,棕色玻璃瓶包装,避光、4℃低温储藏<sup>[58]</sup>。李凯等通过微胶囊技术对山桐子油进行包埋,转化粉末油脂,即山桐子微胶囊,防止油脂的氧化酸败,延长保质期<sup>[64]</sup>。山桐子油精炼前后脂肪酸成分和各脂肪酸相对含量都无明显变化,适度精炼可以在保持油脂品质的同时延长贮藏时间<sup>[58]</sup>。

### 3 问题与展望

山桐子果实含油量高,山桐子油含大量不饱和脂肪酸,具有成为食用油和生物柴油的广阔发展前景<sup>[30]</sup>,加快其开发力度势必能有效增加收入,助力生物质能发展,缓解资源紧缺问题。山桐子果实利用价值高,雌雄问题突出,探究雌雄植株差异,更早进行雌树选育或促进雌花或两性花的分化是降低生产成本的途径之一<sup>[17]</sup>。加快选择育种进程,选育果实产量高、抗逆性强、出油率高的山桐子新品种是我国山桐子油用产业育种的重要发展方向。

但目前山桐子研究方向有以下 2 点问题:首先,现多关注山桐子不同地区的山桐子果实出油率、脂肪酸组成和品质,进行山桐子油提取方式和贮藏方式优化,提高了山桐子油的品质。但忽视果实产量和结实大小年现象,难以保证山桐子果实高产、稳产。其次,在我国,山桐子资源分布广<sup>[1]</sup>,但优质种苗却很少,许多地方常引种其他地区的良种<sup>[19]</sup>。而表型是基因和环境互作的产物,良种具有区域性,不同地区的良种生态适生性不同,种植外地良种,其优良性状可能并不能完全体现,易产生低产、低效甚至种植失败的问题。所以为避免盲目调种用种,引进外地良种前应先进行区域试验,确定品种的适应性和丰产性,确定其适应范围和适宜的栽培条件<sup>[65]</sup>。但区域试验耗时长,且具有种质资源污染的风险,对后续育种造成不利影响。

因此以山桐子油用为目标,发展山桐子产业需先进行育种研究和新品种开发,选择快速和经济的技术路线。现对于山桐子育种思路提出以下 3 点建议:第一,选择育种是最快速和经济的育种手段,但应在选择出果实高产、稳产品种的基础上,再选育出油率高、脂肪酸组成适宜、品质高的山桐子品种。第二,全国不同省、市、县应同步培育本土良种,避免盲目推广和种质资源污染。第三,虽栽培实生苗时较难选择雌雄植株,但目前仍应提高栽培手段,进行实生苗的栽培。后续雌株可生产果实,而低产的劣种和雄株可用于嫁接良种,降低成本,同时助力提高育种效率。

#### 参考文献:

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1999,52(1):56-58.
- [2] 赖书绅.中国大风子科(Flacourtiaceae)研究资料[J].植物研

- 究, 1994, 36(3): 221-230, 329-331.
- [3] 安源. 神奇的木本油料植物水冬瓜树[J]. 华夏星火, 2002, 13(4): 42.
- [4] 张志诚, 刘贵珍. 水冬瓜播种育苗技术[J]. 陕西林业科技, 1980, 8(2): 72-75.
- [5] 施林轩. 山桐子采种林建设项目通过市级验收[N]. 六盘水日报, 2023-05-12.
- [6] ZHANG X, LI W, YU G, et al. Evaluation of *Idesia polycarpa* Maxim fruits extract as a natural green corrosion inhibitor for copper in 0.5M sulfuric acid solution [J]. Journal of Molecular Liquids, 2020, 38(22): 114080.
- [7] LEE M, LEE H H, LEE J K, et al. Anti-adipogenic activity of compounds isolated from *Idesia polycarpa* on 3T3-L1 cells [J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 2013, 23(11): 3170-3174.
- [8] HUANG L, ZHU Y, PENG T, et al. Drying methods and structure-activity relationships of hydroxycinnamic acid derivatives in *Idesia polycarpa* Maxim. Leaves [J]. Food & Function, 2021, 12(4): 1651-1661.
- [9] KWON C S, LEE J E, JEON B E, et al. Anti-leukemic effects of *Idesia polycarpa* Maxim branch on human B-cell acute lymphoblastic leukemia cells [J]. Current Issues in Molecular Biology, 2023, 45(5): 4035-4049.
- [10] 张学忠, 魏明山. 木本油料山桐子[J]. 植物杂志, 1982, 9(6): 24.
- [11] 张颖, 吴磬, 杨菁菁, 等. 环氧化山桐子油的制备及其对双酚A型环氧树脂增韧改性研究[J]. 塑料科技, 2023, 51(6): 65-69.
- [12] ZHANG W, ZHAO C, KARRAR E, et al. Analysis of chemical composition and antioxidant activity of *Idesia polycarpa* pulp oil from five regions in China [J]. Foods, 2023, 12(6): 1251.
- [13] 刘英, 王帅, 王慧敏, 等. 山桐子果实性状变异规律及优良单株选择[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(5): 536-543.
- [14] 任东明. 推进生物质能多元化开发[N]. 经济日报, 2023-01-11.
- [15] YANG F X, SU Y Q, LI X H, et al. Preparation of biodiesel from *Idesia polycarpa* var. *vestita* fruit oil [J]. Industrial Crops and Products, 2009, 29(2): 622-628.
- [16] LI T, LI F, MEI L, et al. Transcriptome analysis of *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels flowers during sex differentiation [J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(6): 2463-2478.
- [17] WANG H, RANA S, LI Z, et al. Morphological and anatomical changes during floral bud development of the trioecious *Idesia polycarpa* Maxim [J]. Brazilian Journal of Botany, 2022, 45(2): 679-688.
- [18] 岁立云. 山桐子果实性状自然变异及生殖生物学研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2011.
- [19] HUANG S, ZHENG W, WANG Y, et al. Dynamic changes of endogenous hormones in different seasons of *Idesia polycarpa* Maxim [J]. Life, 2023, 13(3): 788.
- [20] 许东辉, 耿晓东, 王艳梅, 等. 内源激素与山桐子结实大小年的关系[J]. 经济林研究, 2023, 41(2): 150-161.
- [21] H W S, Y L, Q L Z, et al. Identification of an SCAR marker related to female phenotype in *Idesia polycarpa* Maxim [J]. Genetics and molecular research : GMR, 2015, 14(1).
- [22] CORTI R. Sul Dioicismo Di *Idesia polycarpa* Maxim [J]. Giornale botanico italiano, 1948, 55(4): 446-496.
- [23] WANG S H, JIN C F, LI Z Q, et al. Breeding system and parental effect on fruit characters of *Idesia polycarpa* (Flacourtiaceae), a promising plant for biodiesel, in Northwest China [J]. Pakistan Journal of Botany, 2017, 49(5): 1885-1890.
- [24] RANA S, JEMIM R S, LI Z, et al. Study of the pattern of reproductive allocation and fruit development in young dioecious trees of *Idesia polycarpa* Maxim [J]. South African Journal of Botany, 2022, 41(5): 472-480.
- [25] 房丽莎, 徐自恒, 刘震, 等. 山桐子果实发育过程中内含物、内源激素及光合特性的变化[J]. 林业科学, 2020, 56(11): 41-52.
- [26] 苏上, 李振坚, 倪建伟, 等. 山桐子果穗和果实性状多样性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 35-44.
- [27] FAN R, CAI G, ZHOU X, et al. Characterization of diacylglycerol acyltransferase 2 from *Idesia polycarpa* and function analysis [J]. Chemistry and Physics of Lipids, 2021, 56(1): 105023.
- [28] 冯建, 刘震, 蔡齐飞, 等. 不同居群山桐子果实表型性状变异及与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1165-1174.
- [29] LI Y, PENG T, HUANG L, et al. The evaluation of lipids raw material resources with the fatty acid profile and morphological characteristics of *Idesia polycarpa* Maxim. var. *vestita* Diels fruit in harvesting [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 28(3): 114-122.
- [30] WEN L, XIANG X, WANG Z, et al. Evaluation of cultivars diversity and lipid composition properties of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(9): 3841-3855.
- [31] CORTÉS A J, RESTREPO-MONTOYA M, BEDOYA-CANAS L E. Modern strategies to assess and breed forest tree adaptation to changing climate [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 583323.
- [32] 宋明发, 杨芸, 白冉冉, 等. 不同方法提取山桐子油的品质及体外抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(3): 28-32, 38.
- [33] FAN R, LI L, CAI G, et al. Molecular cloning and function analysis of FAD2 gene in *Idesia polycarpa* [J]. Phytochemistry, 2019, 59(12): 112114.
- [34] 龚珏, 毕浩, 杨雯露, 等. 山桐子 IpSAD 基因家族分析及功能鉴定[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 261-270.
- [35] ZAFAR S, LI Y L, LI N N, et al. Recent advances in enhancement of oil content in oilseed crops [J]. Journal of Biotechnology, 2019, 36(13): 35-44.
- [36] DURRETT T P, BENNING C, OHLROGGE J. Plant triacylglycerols as feedstocks for the production of biofuels [J]. The Plant

- Journal, 2008, 54(4): 593-607.
- [37] 艾 佳.山桐子“鄂选 1 号”诞生记[J]. 中国林业产业, 2019 (Z1): 51-52.
- [38] 陈耀兵,石开明,郑小江,等.山桐子新品种‘鄂选 1 号’ [J]. 园艺学报, 2019, 46(8): 1629-1630.
- [39] 石开明,吴强盛.干旱胁迫对山桐子种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2018, 15(10): 8-13,4.
- [40] 陈子茜.山桐子果实油脂积累及其贮藏工艺研究[D]. 恩施:湖北民族大学, 2023.
- [41] 许红霞,汪 明,刘 华,等.山桐子良种‘鄂选 1 号’ [J]. 湖北林业科技, 2022, 51(2): 89-90.
- [42] WHITE T L. A conceptual framework for tree improvement programs [J]. New Forests, 1987, 1(4): 325-342.
- [43] 张海燕,李献兰,张焕仕.,山桐子苗木繁育研究进展[J]. 中国野生植物资源, 2022, 41(8): 77-80.
- [44] 杨朗生,杨 平,刘芙蓉,等.不同地径砧木对山桐子嫁接苗成活及生长特性的影响[J]. 经济林研究, 2017, 35(1): 97-102,157.
- [45] 杨恩让,刘晓敏,解 庆.山桐子离体培养植株再生[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(6): 95-98.
- [46] 蒋泽平,梁珍海,刘根林,等.山桐子茎段离体培养技术研究 [J]. 中国农学通报, 2006, 23(12): 393-396.
- [47] 魏明山,梁仰止,汝天心.水冬瓜果实和种子化学成分的研究 [J]. 西北植物研究, 1982, 3(2): 87-94,148.
- [48] 樊文斌,张建成,张文瑞.现代西方林业经济理论流派、特征及其启示[J]. 内蒙古农业大学学报(社会科学版), 2007, 9(2): 120-122.
- [49] 张凤珍.林业经济效益与生态保护的平衡探讨[J]. 现代园艺, 2019, 42(9): 199-200.
- [50] 陈姘月,唐 琳,陈 放.7 种木本植物油理化性质及其生物柴油脂肪酸组成的比较研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, 37(12): 88-92.
- [51] KNOTHE G. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters [J]. Fuel Processing Technology, 2005, 86(10): 1059-1070.
- [52] 王利兵,于海燕,贺晓辉,等.生物柴油树种油脂脂肪酸组成对燃料特性的影响[J]. 燃料化学学报, 2012, 40(4): 397-404.
- [53] 汪全义,杜开峰,李新莹,等.毛叶山桐子油制备生物柴油的研究[J]. 粮油加工, 2009, 40(2): 52-55.
- [54] PI Y, GAO S T, MA L, et al. Effectiveness of rubber seed oil and flaxseed oil to enhance the  $\alpha$ -linolenic acid content in milk from dairy cows [J]. Journal of dairy science, 2016, 99(7): 5719-5730.
- [55] 张 旋,吕名蕊.毛叶山桐子成分分析及开发利用[J]. 粮食与食品工业, 2021, 28(2): 53-57,60.
- [56] XIANG X, WEN L, WANG Z, et al. A comprehensive study on physicochemical properties, bioactive compounds, and emulsified lipid digestion characteristics of *Idesia polycarpa* var. *vestita* Diels fruits oil [J]. Food Chemistry, 2023, 38(13): 134634.
- [57] 国家粮食和物资储备局.中华人民共和国粮食行业标准山桐子油:LS/T3258-2018 [S].
- [58] 庞贵尹.新型 pH 指示膜的制备与应用和山桐子油风味及储藏研究[D]. 成都:成都大学, 2023.
- [59] 华 婉,叶 扬,王战国,等.山桐子油的提取分离及理化性质研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2016, 53(1): 181-186.
- [60] 狄飞达,吴文梅,刘运科,等.响应面优化酸性浸润干燥辅助水代法提取山桐子果油工艺及其品质分析[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 89-93.
- [61] ZHOU D, ZHOU X, SHI Q, et al. High-pressure supercritical carbon dioxide extraction of *Idesia polycarpa* oil: Evaluation the influence of process parameters on the extraction yield and oil quality [J]. Industrial Crops and Products, 2022, 31(13): 115586.
- [62] 王小悦,胡 晓,罗国柳,等.预处理方法对盐效应辅助水剂法提取山桐子油的影响[J/OL]. 中国油脂; 1-11 [2023-11-07]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230308>.
- [63] 陈耀兵,李美东,夏兰欣,等.顶空固相微萃取结合 GC-MS 对山桐子(油葡萄)香气成分比较分析[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 163-169.
- [64] 李 凯,马立志,常云鹤,等.响应面优化山桐子油微胶囊喷雾干燥工艺[J/OL]. 中国粮油学报; 1-9 [2023-11-07]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000194>.
- [65] 中国农业百科全书编辑部.中国农业百科全书农作物卷:上 [M]. 北京:中国农业出版社, 1991: 452.