

新型木本油料树种光皮树研究进展

廖阳¹, 李昌珠^{2*}, 尹业师¹, 闫荣玲^{1*}, 刘思思²

(1. 湖南科技学院化学与生物工程学院, 湖南 永州, 425199;

2. 湖南省林业科学院 省部共建木本油料资源利用国家重点实验室, 湖南 长沙, 410007)

摘要: 光皮树是我国重要的新型木本油料树种, 其深度开发对我国油脂安全具有重要意义。近年来我国在光皮树基础研究及产业化利用等方面取得了丰硕成果, 显著推进了光皮树生长发育、遗传背景、油脂合成与调控、油脂提取与分析、油脂工业转化等的研究进程。本文从农艺性状、组织结构、生理生化、分子遗传、果实发育、内含物累积、油脂提取、油脂成分、油脂应用等方面对我国光皮树研究进展进行总结, 以为后续研究应用提供参考。

关键词: 木本油脂; 光皮树; 组织解剖; 农艺性状; 基因表达; 生物能源

中图分类号: Q949.9

文献标识码: A

文章编号: 1007-9084(2022)05-0948-09

Research progress of a new woody oil tree species *Swida wilsoniana*

LIAO Yang¹, LI Chang-zhu^{2*}, YIN Ye-shi¹, YAN Rong-ling^{1*}, LIU Si-si²

(1. College of Life Sciences and Chemistry Engineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, China; 2. Hunan Academy of Forestry, State Key Laboratory of Utilization of Woody Oil Resources, Changsha 410007, China)

Abstract: As a newly important woody oil crop in China, *Swida wilsoniana* is of great significance for national oil safety. Great achievements in the foundational research and industrial utilization of *S. wilsoniana* have been made in recent years, these achievements significantly promoted its research process on plant growth and development, as well as genetic background, oil biosynthesis and regulation, oil extraction and ingredient analysis, and oil industrial transformation. In this paper, research progress of *S. wilsoniana* were reviewed in agronomic characteristics and tissue anatomy, physiological and biochemical characteristics, genetic background and functional genes, fruit development and components accumulation, oil extraction process, oil composition analysis, and oil application, in order to provide references for the deepening and expansion of future research.

Key words: woody oil; *Swida wilsoniana*; tissue anatomy; agronomic traits; gene express; bioenergy

人口与经济增长导致油脂与能源需求攀升, 这与我国有限的耕地面积及矿质能源储量间形成了矛盾, 加大不占耕地木本油料资源的深度开发是解决这一问题的有效途径。华中地区大面积丘陵为木本油料资源产业化提供了良好条件, 2014年国务院颁布《关于加快木本油料产业发展的意见》更是把我国木本油料产业的发展提高到战略高度。光皮树(*Swida wilsoniana*)属双子叶植物纲山茱萸科徕

木属落叶灌木或小乔木, 其适应性强, 在中性、弱酸性及轻度盐碱地等各类土壤中均能生长, 因此广泛分布于我国西北、华中、华南、西南等地区。其中华中地区的湖南、江西等地由于气候温和、光照充足、雨水充沛, 符合光皮树对环境的偏好, 成为主产区。由于全果含油率高, 光皮树可作为重要的生态经济型油料树种, 在植物油脂等众多领域开发潜力显著。本文从农艺性状、组织结构、生理生化、分子遗

收稿日期: 2021-11-12

基金项目: 木本油料资源利用国家重点实验室(2019xk2002); 中央引导地方科技发展专项(2019XF5056, 2019XF5067); 湖南省自然科学基金(2020JJ4325); 湖南省青年骨干教师资助项目(湘教通[2018]574号); 湖南科技学院青苗计划(湘科院校发[2019]47号)

作者简介: 廖阳(1983-), 男, 副教授, 主要研究植物提取物综合利用, E-mail: liaoyang1127@163.com

* 通讯作者: 李昌珠(1963-), 男, 研究员, 主要研究木本油料资源开发利用, E-mail: lichangzhu2013@aliyun.com;

闫荣玲(1982-), 女, 副教授, 主要研究天然产物开发利用, E-mail: yanrongling0912@163.com

传、果实发育、内含物累积,及油脂提取、成分分析、综合利用等方面对我国光皮树研究取得的成果进行了综述,以期后续研究应用提供参考。

1 农艺性状与组织结构

1.1 农艺性状

光皮树树干通直,高5~18 m,胸径可达80 cm。树皮光滑且不规则脱落,灰色至青灰色。单叶对生、椭圆形。生长速率快,播种47 d左右破土出真叶,幼苗株高年增长1 m,6~9月为每年生长高峰期,9月下旬后基本停止生长。地径年生长高峰较株高晚,但二者均表现出典型的“慢-快-慢”年生长规律^[1,2]。植株6龄后开始结实,盛果期单株产果量可达40~70 kg,果实11月中上旬成熟。植株各农艺性状表现出不同程度变异但均稳定遗传,其中叶形、叶色、叶缘等叶片形态指标变异系数最高;花序、果实、含油率以及果穗果数是其主遗传因子,依据主遗传因子差异可将光皮树优良无性系聚为4个类群,不同类群杂交得到的子代产油率差异显著^[3]。类群划分及不同类群产油率差异明确,可为人们科学选择无性系进行高产苗木的杂交选育提供指导。

1.2 组织结构

光皮树平均生长轮宽1.671 mm,密度0.755 g/cm³,茎中纤维长度、宽度、长宽比、双壁厚、壁腔比、腔径比分别为1634.015 μm、14.479 μm、114.701 μm、7.467 μm、1.099、0.479,导管长度、宽度及长宽比分别为1062.042 μm、135.119 μm、7.979 μm;植株幼龄期与成熟期的分界线约为40龄,幼龄期植株间的纤维长度、双壁厚、纤维宽度、长宽比、壁腔比和腔径比、导管长度、导管长宽比均差异显著,但进入成熟期后植株间的纤维长度以及导管形态两个指标差异不再显著^[4]。光皮树的株高、地径、节间长等树体生长势指标与叶片解剖学特征间存在相关性,如地径与叶片中海绵组织含量、叶片组织结构疏松度呈极显著正相关,而与节间长度、栅海比、叶片组织结构紧密度显著负相关^[5]。

2月下旬至4月末,光皮树花芽依次经历5个特征性时期,分别是花芽未分化期、花序分化期、花萼分化期、花瓣分化期和雌雄蕊分化期;在此过程中花芽形态逐渐增大并变得饱满,径向和纵向逐渐伸长,并在花序分化期形成塔形聚伞状花序,生长锥逐渐增大并向上隆起;花萼分化期生长锥边缘会产生4个萼片原基,到了花瓣分化期又在萼片原基内侧分化出花瓣原基,然后花瓣原基内侧再分化出雄

蕊原基,同时生长锥中心形成雌蕊的心皮原基,经过一系列复杂生长分化过程最终形成花萼、花瓣及雌蕊和雄蕊^[6]。雄蕊中花粉粒长球形,赤道面观为四角形,极面观为三裂近圆形、略呈三角形,萌发孔为沟状,花粉粒外壁表面有雕纹,不同无性系间花粉粒超微结构差异不大;花粉粒中小孢子发育过程经历花粉母细胞时期、四分体时期、单核细胞和双核细胞时期,花蕾大小与颜色随着孢子的发育而增大和变色(深绿色变为白色)^[7]。果实与种子均为球形,内果皮坚硬致密且附有蜡质,种皮与内果皮紧密愈合;种子横径0.45±0.02 cm、纵径0.46±0.02 cm、千粒重48.59±1.57 g^[8]。各器官的组织解剖数据为光皮树的良种选育、科学栽培、综合利用提供了科学依据。

2 生理生化特性

2.1 种子萌发

人们对光皮树进行了系统的生理生化研究,在种子萌发、果实发育、生物量变化、营养元素、内源激素、光合作用、胁迫响应等方面积累了丰富的基础资料,从而为光皮树的规模栽培、科学育林、丰收高产奠定了基础。种子萌发是繁殖和规模化育林的前提,光皮树种子活力约76%,常规酸、碱、激素等对光皮树种子催芽效果不佳,而低温沙藏处理则增加了种壳透性并促进物质代谢,可提高种子萌发率;与其它植物一样,光皮树种子萌发过程中,胚乳中淀粉酶、蛋白酶和酸性磷酸酶活性逐渐增强,以促进淀粉、蛋白、脂肪等营养物质的水解,从而为种子萌发提供所需物质和能量^[8]。

2.2 果实发育与内含物富集

光皮树果实发育过程呈“S”型曲线,谢花后到6月中旬,以及9月下旬是果实的两个快速生长期。两个时期主要事件不同,前者主要是果实体积增大,后者主要是干物质积累且果实中含油率显著增加,且油脂含量的增加与淀粉、可溶性糖等物质含量密切相关,可见9月下旬这一快速生长期是决定产量的关键时期^[9]。果实发育的整个过程,各类脂肪酸含量始终处于动态变化中,硬脂酸、棕榈酸、油酸三者的含量逐渐减小,亚油酸含量呈增加趋势;各类脂肪酸含量也差异显著,其中油酸、亚油酸含量最高,棕榈酸含量次之,而硬脂酸含量则长期处于低水平^[9]。成熟后光皮树干果果实含油率超干重30%,并含有蛋白质(5.38%)、淀粉(12.22%)、纤维素(14.18%)等物质^[10]。光皮树油理化性质与常用

油脂接近,碘值较低、酸值较大;果实不同部位油脂总量及组分存在明显差异,其中果肉中油脂含量最高,达66.95%,种核与种仁含量差别不大(约16%);果实各部位油脂均以亚油酸含量最高,其中果肉油脂中其占32.46%,种核油脂中占54.79%,种仁油脂中占58.80%^[11]。刘汝宽等人^[12]以湖南地区52个光皮树果实样品为研究对象,利用近红外光谱法与化学分析方法测定光皮树果实的粗脂肪含量,以及热值、水分和粗蛋白质等指标,发现两种方法测定的结果无显著差异,这为人们进行光皮树果实内含物无损跟踪测定奠定了条件。

2.3 营养元素

光皮树植株不同部位营养元素含量差异明显,磷元素在光皮树各部位中含量普遍较低;氮元素在叶、枝中含量较高,钾元素在叶和果实中的含量较高,其它部位中含量则较少;磷含量及N/P含量比在光皮树幼苗叶片中相对稳定,各自平均值分别为氮含量 $14.62\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,磷含量 $0.93\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,N/P约16。叶片中不同元素含量与土壤中营养元素含量之间存在不同的相关性,叶片中的氮含量与土壤水解氮含量显著正相关,而叶中的磷含量与土壤有效磷之间无显著相关性,叶片N/P与土壤有效氮/有效磷之间也没有显著相关性^[13]。

2.4 生物量与光合速率

生物量动态变化反映植物生长发育与代谢速率的快慢,因此处于快速生长期、丰产期的光皮树的植株生物量相对其它时期波动较大^[14]。生物量波动与叶片光合作用密切相关,因此处于花期和果期的不同光皮树无性系的光合特性日变化规律也存在差异,净光合速率日变化规律有“双峰”“单峰”多种类型^[15,16]。不同无性系的光响应特性及光合效率的差异主要体现在光补偿点、光饱和点、最大净光合速率上,光补偿点低而光饱和点高的品系其光能利用效率更高^[17]。这些差异与叶片自身因素及环境因子有关,自身因素的气孔导度是其中最主要因素之一,不同无性系光皮树的气孔长度、宽度、密度明显不同,且气孔密度变化幅度较气孔长度与宽度差异更明显^[18];环境因子则更加复杂,光照强度、大气湿度、大气温度等均影响显著^[16]。各主观和客观因素对其光合速率影响强度从大到小依次为气孔导度、蒸腾速率、光照强度、大气湿度、大气温度、水分利用效率、胞间 CO_2 浓度、大气 CO_2 浓度^[16]。

2.5 内源激素

处于生命周期不同阶段光皮树内部激素水平

明显不同。酶联免疫吸附研究发现,芽分化时期开花光皮树和未开花光皮树叶内的生长素(IAA)、赤霉素(GA_3)、玉米核苷素(ZR)、脱落酸(ABA)的含量动态变化差异显著;有花芽分化的光皮树IAA、 GA_3 含量较低且稳定,ABA含量较高且变化幅度较大,ZR含量虽低但会随花的形成逐渐升高;而同一时间的无花光皮树IAA、 GA_3 、ABA含量先升后降,ZR含量先升后降再升再降^[19]。内源激素含量还会影响到光皮树的嫁接成活率,砧木叶中IAA含量与嫁接成活率呈显著正相关,ABA与嫁接成活率负相关,GA与ZR含量则与嫁接成活率无明显相关性^[20]。可见,内源激素含量动态变化是光皮树生理活动的重要体现。除激素外,环境因子也会激发植株体内一系列生理指标的动态变化,如光皮树会通过降低叶片含水量与蛋白质含量,增加叶片可溶性糖含量、脯氨酸含量、丙二醛含量等策略帮助自己度过干旱胁迫逆境^[21]。

3 遗传与育种

3.1 基因组与转录组

经光皮树染色体数目、核型、基因组分析,明确其染色体数目为18条,染色体臂比在1.02~1.81区间,核型为“1B”型,基因组大小1001.81 Mb,序列组装可得1 313 158条 scaffold,拼接序列总长达到897 216 182 bp,scaffold N50为2842 bp,由所得数据推测其基因组重复序列和杂合率较高^[1,22]。叶片转录组测序发现,光皮树有36 839条 Unigene,与葡萄同源序列最多,其中8945条 Unigene共含有12 538个SSR位点,出现频率约为2514 bp/个,二核苷酸丰富度最高,达58.07%^[23]。优化构建的SSR-PCR最佳反应体系为总体积15 μL ,模板DNA用量37.5 ng,正反向引物浓度均0.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,dNTP浓度0.3 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, Mg^{2+} 浓度1.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,Taq聚合酶用量1.5 U,最佳退火温度50 $^{\circ}\text{C}$ ^[24]。

3.2 功能基因

光皮树功能基因相关报道还不多,油脂合成途径中关键基因将成为人们关注的热点,从而为人们进行基因表达调控、分子育种、品种改良等提供依据。目前已有有人对其果实发育过程中的脂肪酸去饱和酶关键基因FAD7进行了初步研究,发现该基因的表达量在7-8月期间呈上升-下降-上升动态变化,并在7月下旬达最大值,基因编码区长度及其蛋白产物的氨基酸数目、相对分子量、等电点、跨膜结构域数目、二级结构类型等也被初步阐明^[25];对氨基

酸序列进行系统树分析,发现其与常见油料植物的亲缘关系较远,只与油茶、麻风树、蓖麻聚在同一个大类^[1]。

3.3 单倍体育种

结合花药离体培养、愈伤组织诱导等技术,可进行光皮树的基因改良与多倍体育种,从而破解常规育种周期长、效率低、成本高的弊端。王丽华等人研究发现,单核靠边期花药可得到较高愈伤组织诱导率,花药最佳取材时间为5月上旬,此时大部分小孢子正处于单核期;同时确定了愈伤组织诱导最佳条件和增殖最佳体系,并发现基因型、花药发育时期、碳源浓度、预处理时间及激素配比等因素中,花药发育时期对光皮树花药离体培养的影响最大;在获得愈伤组织基础上,进一步摸索得到了基于纤维素酶、蜗牛酶、果胶酶、甘露醇等多种成分的最佳组合和处理条件,得到了高产、高活力的光皮树原生质体^[26,27]。

4 油脂提取与成分分析

4.1 油脂提取

近年人们尝试通过优化传统提取方法的参数选择,或通过微波、酶解等其它辅助手段来提高光皮树油脂的提取得率以及油脂品质。刘汝宽等为更好地选取应变参数和提高传统压榨得率,利用自制直筒式压榨试验装置进行了不同压榨应变水平的应力松弛试验,发现光皮树果实加载过程中应力应变关系呈现线性和非线性两部分,屈服应变为0.4,应力松弛量随着压榨应变的增大而增大^[28]。各种提取方法工艺参数及油脂得率差异显著,如超临界CO₂萃取最佳工艺条件为萃取压力37 MPa、萃取温度30℃、CO₂流量30 kg/h,时间80 min,得率可达16.34%;而微波辅助法提取的最佳提取工艺为石油醚做萃取剂、固液比1:3(*m:m*)、微波功率800 W、微波持续时间每次1 min,得率为8.11%^[29,30]。人们还尝试利用水解酶破坏细胞壁来提高提取得率,比较发现木聚糖酶、淀粉酶、纤维素酶等不同酶处理时,纤维素酶的效果最佳,提油率可达76%且油脂乳化率低^[31]。利用低温压榨-正丁醇研磨浸提这一绿色新工艺进行提取,既可收获超96%的总油脂提取率,还可实现油脂和磷脂同步提取^[31]。当然,不同提取方法的油率及油脂理化性质可能差异明显,曾虹燕等比较超临界CO₂、超声波、微波三种方法所得光皮树籽油发现,三种方法得到的油脂在成分、质量、稳定性上均存在明显差异,其中超临界法所得油脂

的油酸含量最高、品质好、质量稳定、工艺简单^[32]。

4.2 油脂成分

油脂的脂肪酸组成决定其理化性质、开发潜质及应用领域。光皮树全果含油,对果实发育过程进行跟踪测定发现,其含油率最高可达34.2%^[9]。果实不同部位油脂的脂肪酸成分相同,但不同脂肪酸含量存在一定差异,油脂中富含不饱和脂肪酸,总不饱和脂肪酸含量均接近80%,主要为油酸和亚油酸两种成分。相较常见植物油脂,光皮树果油总不饱和脂肪酸含量高于棕榈油,接近花生油、大豆油及橄榄油,但低于油茶籽油和油菜籽油;申爱荣^[33]等人还测得不同提取方法得到的光皮树果油中含有2.09%~3.08%的亚麻酸,这类对人体健康十分有利的 ω -3脂肪酸使其具有类似橄榄油的保健功效。不过高比例不饱和脂肪酸使光皮树果油与大部分植物油脂一样存在易氧化、不便于长时间保存等不足。

5 油脂应用

5.1 新型食用油

光皮木果油在江西、贵州等地一直是人们的传统食用油,但传统提取所得油脂色味不佳(颜色偏黑、有涩味),不利于其大规模推广。新提取纯化工工艺可很好地解决这一问题。2013年国家卫计委已批准光皮木果油为新食品原料。光皮树毛油经脱胶、脱酸、脱色等处理后可得精炼油,常用方法分别是高温水化脱胶、萃取脱酸和白土脱色。以脱酸为例,人们发现乙醇萃取法比高温蒸汽法或碱炼法效果更佳,有利于提高油脂质量,同时还可降低炼耗,但也存在处理次数多、耗时长等不足,因此人们尝试利用超声辅助萃取脱酸,发现以无水乙醇做萃取剂,超声处理2 min,连续萃取4次后,光皮树油脂酸值下降到符合食用油质量标准^[44]。精炼后油脂依然主要含有油酸、亚油酸、亚麻酸等不饱和脂肪酸(总质量分数约72%),表观性状及理化性质发生明显改善(颜色变浅、酸值、过氧化值显著降低),但碳水化合物、 β -胡萝卜素等营养成分及钾、镁、磷等元素含量显著下降。综合来看,精炼后的光皮树油仍是一种较优质食用油资源^[45]。

光皮树油和其它植物油脂一样,含较多不饱和脂肪酸尤其是高比例亚油酸,因此稳定性差、易氧化、难保藏。研究表明在光皮树油中加入特丁基对苯二酚(TBHQ)等抗氧化剂,可较好地延缓变质速度和显著延长保存期,若同时加入柠檬酸和抗坏血

表1 光皮树果实不同部位脂肪酸组成与含量及其与其它常用油脂的比较

Table 1 Composition and content of oils from different parts of *Swida wilsoniana* fruit and comparison with other common oils /%

原料	软脂酸	硬脂酸	棕榈油酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	总不饱和脂肪酸
Material	Palmitic	Stearic	Palmitoleic	Oleic	Linoleic	Linolenic	Total unsaturated
光皮树果实 ^[1, 11]	21.0	1.4	1.2	43.9	32.6	—	77.7
<i>S. wilsoniana</i> fruit							
光皮树外果皮 ^[1, 11]	23.2	1.1	1.4	46.3	28.0	—	76.8
<i>S. wilsoniana</i> epicarp							
光皮树种子 ^[1, 11]	17.4	1.7	1.2	35.1	44.6	—	80.9
<i>S. wilsoniana</i> seed							
油茶 ^[34]	8.3	2.2	0.2	80.6	8.1	0.3	89.2
Oil-tea camellia							
油棕 ^[35]	41.0	0.5	—	35.3	14.2	0.4	49.9
Oil palm							
油橄榄 ^[36]	12.3	2.5	1.2	73.8	7.5	1.2	83.7
Olive							
大豆 ^[37]	11.1	4.8	—	32.5	50.6	0.5	83.6
Soybean							
花生 ^[38]	10.0	4.4	—	53.8	25.0	—	>78.8
Peanut							
油菜 ^[39]	—	2.1	—	72.2	18.5	—	>90.7
Rapeseed							
玉米 ^[40]	12.4	1.8	—	29.1	55.1	0.9	>85
Corn							
葵花 ^[41]	6.1	5.6	—	23.8	62.2	1.0	>86
Sunflower							
亚麻 ^[42]	7.3	5.0	—	22.3	13.7	49.1	87.1
Oil flax							
芝麻 ^[43]	9.5	5.2	—	39.0	44.9	—	>83
Sesame							

注：“—”表示此项未检出或未对其进行检测

Note: — indicates not detected

酸则会收获优于TBHQ的协同效应^[46]。用作食用油时,温度是导致油脂有害物质反式脂肪酸生成量的重要因素,研究发现当油温升至270℃时,光皮树油中反式脂肪酸总量达1.77%,相反较低温度条件下反式脂肪酸含量随时间增加较缓慢^[47]。

比较光皮树果油和其它常用食用植物油理化性质可知,其皂化值高于茶油、花生油,低于大豆油,过氧化值高于大部分其它植物油脂,但低于花生油;酸值高于大部分其它植物油脂,但是低于茶油、大豆油和菜籽油。综合来看,光皮树果油各项理化性质指标介于已商业化食用植物油的指标值范围内且表现良好。

5.2 生物燃料

传统液体酸、碱催化酯交换是植物油脂制备生物燃料的重要途径,但反应条件苛刻、产率低、成本高。近年国内多个研究团队积极探索新型催化途径。温晓等人借助超声波辅助光皮树油脂的酯交

换反应发现,频率50 Hz、功率180 W超声波辅助下,生物柴油产率提高、闪点更高、灰分更低,所得生物柴油的性能可基本达到0#柴油标准^[55]。一些研究团队通过开发新型化学催化剂来优化基于光皮树油脂的生物燃料生产工艺。如焦晨合成了一种新型双核碱性功能化离子液体,并利用这种双核碱性离子液作为催化剂时,考察了其对甲醇和光皮树果油酯交换制备生物柴油的催化性能,发现在离子液体用量为原料油质量的3%,反应温度为60℃,醇油摩尔比为12:1,反应时间为3.5 h时生物柴油产率可达95.5%,各项主要指标基本达到国家生物柴油标准,且这种离子液循环使用5次后依然保持良好的催化效率^[56]。有研究团队则合成了绿色环保的固体磷钨酸铯盐作为催化剂,催化光皮树油与甲醇制备生物柴油并得到了91.0%的转化率,且这种新型固体催化剂易回收使用^[57]。

生物催化光皮树油脂合成生物燃料也一直是

表2 光皮树油与常见食用油脂理化性质比较
Table 2 Physicochemical properties comparison between *Swida wilsoniana* oil and other edible oils

油脂 Oil	酸值 / (mg/g) Acid value	皂化值 / (mg/g) Sapon value	过氧化值 / (mmol/kg) Peroxide value
光皮树果油 <i>S. wilsoniana</i> oil	0.36 ^[44]	187.99 ^[33]	3.10 ^[44]
茶油 ^[48] Camellia oil	1.30	180.50	—
橄榄油 ^[49] Olive oil	0.27	—	2.80
棕榈油 ^[50] Palm oil	0.16	—	2.77
椰子油 ^[51] Coconut oil	0.29	—	0.80
花生油 ^[52] Peanut oil	0.25	184.80	3.50
大豆油 ^[53] Soybean oil	0.61	192.8	0.82
菜籽油 ^[54] Rapeseed oil	0.61	—	0.96

注：“—”表示此项未检出或未对其进行检测

Note: — indicates not detected

人们关注的重点,且由于固定化酶相对于游离酶其对底物选择性、循环利用等方面优势显著,因此人们着重研究了固定化酶在光皮树油脂催化中的应用。利用响应面法优化研究可催化光皮树油合成生物柴油的白地霉脂肪酶固定化处理条件,发现酶液/载体比、温度、缓冲液pH值等因素均会影响固定化酶活力,优化得到最佳固定化处理工艺为酶液/载体比4:1、温度39℃、缓冲液pH 7.5,此条件化固定化脂肪酶活力及生物柴油转化率较高^[58]。尤其是经多次重复使用后,固定化酶的活力仍保持在较高水平,十分利于其工业化应用。值得注意的是,脂肪酶经固定化处理后,其最佳反应条件往往发生变化,如假丝酵母脂肪酶固定化处理后其所催化的酯交换反应的最佳温度从37℃提高到42℃,最适反应pH从7.2提高到7.5^[59]。部分学者还尝试改变酶催化生物柴油合成的反应体系,丁荣等^[60]研究氯化镁饱和溶液反应体系中固定化脂肪酶Lipozyme TL IM催化光皮树油脂转化为生物柴油的工艺,发现相对传统有机溶剂反应体系,氯化镁饱和溶液体系中酶稳定性更好、催化效率更高、成本更低,酶失活现象更少。

基于植物油脂催化裂解可得到富烃基生物燃料,且其在能量效益上更具竞争性,因此,催化裂解技术较传统的酯交换技术更适于生物液体燃料的制备。裂解反应所用催化剂不同时,最佳反应工艺

条件差异明显,如以钙基固体碱KF/CaO为催化剂时,最佳反应温度440℃、反应时间50 min、催化剂用量为0.1%,而用V₂O₅/硅藻土为催化剂时,裂解温度480℃、裂解时间59 min、催化剂用量0.14%。目前催化裂解技术的得率均可达到82%左右,且产物中主要成分为烷烃、烯烃、羧酸、醛和醇等,裂解产物经酯化反应得到的生物柴油与0#柴油的各项指标相近^[61,62]。

5.3 增塑剂

基于富含不饱和脂肪酸的植物油脂,尤其是木本植物油脂生产的塑料助剂,具有无毒、耐热、可降解等优点,因此增塑剂是光皮树油脂应用的另一个重要领域。利用光皮树油环氧化制备环氧油脂时,体系的反应温度对环氧值影响最大,最佳反应工艺参数为:反应时间4.67 h,反应温度59.67℃,甲酸用量为油量19.3%(m/m),在此条件下制备的环氧油脂的环氧值可达5.40%^[63]。王浩蓉研究则发现,在使用不同的催化剂如甲酸、磷钨酸季铵盐、硼钨酸季铵盐催化光皮树油脂的环氧化反应时,各自最佳反应条件下的参数如反应温度、反应时间、过氧化氢与油脂双键摩尔比、催化剂用量变化程度不同,其中反应时间的波动最大,反应温度波动最小,各催化体系下制得的产物环氧值均在5.0%左右^[64]。

5.4 微囊颗粒

通过乳化剂对光皮树油微囊化处理后,可用于

食品、保健品、药品等多个领域,从而显著提高其经济价值。许利娜等人利用不同质量配比的硬脂酰乳酸钙和甜菜碱制得复配型乳化剂,并基于这种复配型乳化剂对光皮树油进行微囊处理,硬脂酰乳酸钙与甜菜碱质量比为2:3时,制备得到的微胶囊粉末状光皮树油颗粒外形圆整、大小均匀、表面光滑、含水适中,包埋率及载油量分别达到91.2%和28.0%^[65]。

5.5 其它应用

除油脂外,光皮树由于适应性强、耐盐碱,树干挺拔、花色抢眼、树冠舒展覆盖面大等优点,因此在荒山、废地、湖区、河滩、庭院、路旁的绿化、防护或治理上表现出独特优势。尤其在在我国南方岩溶地区,生态脆弱性及人类活动的破坏使其成为难以治理的生态难题,光皮树生长速度快、耐贫瘠、适应高钙环境等特性,使其成为石灰岩地区石漠化治理理想树种^[66]。而树干高大通直且木质纤维发达使其成为良好的木材及造纸原料。

6 结语

光皮树生长速率快、果实含油率高、不占耕地等优势,以及人类对植物油脂不断增加的实际需求等因素决定着光皮树这一新型木本油料作物将在我国经济社会发展中发挥越来越重要的作用。基于人们建立的新提取纯化工艺,可获得杂质少、理化性质好、油品质量高的光皮树油,用作食用油或日化、能源、医药、化工原料。由于对光皮树重点关注和系统研究的时间还不长,还存在着各种各样的基础理论或创新技术问题待解决,这也是目前光皮树油在国民经济相关领域的影响力依然有限的主要原因。后续研究还应从上、中、下游不同环节同步协调推进,如上游的功能基因发掘、油脂合成与调控、遗传育种与良种选育、规模栽培与科学管理,中游的油脂产业化高效高质生产,以及新型催化剂挖掘、新工艺优化,下游的高附加值新产品开发等,从而有力推进我国光皮树及其油脂产业的健康快速发展。

参考文献:

- [1] 王冬梅. 光皮树脂肪酸及主要生物学特性初步研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2013.
- [2] 欧斌, 刘洪生. 生物质能源树种光皮树苗木生长规律及育苗技术研究[J]. 江西林业科技, 2007, 35(6): 17-18, 29. DOI:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2007.06.011.
- [3] 陈韵竹, 蒋丽娟, 陈景震, 等. 光皮树不同无性系主

- 要农艺性状多样性分析[J]. 植物分类与资源学报, 2014, 36(6): 755-762. DOI: 10.7677/ynzw-yj201414049.
- [4] 刘莉. 光皮树木材构造和材性变异研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [5] 马倩, 蒋丽娟, 李昌珠, 等. 光皮树叶片解剖结构与树体生长势的相关性[J]. 经济林研究, 2011, 29(1): 67-71. DOI:10.14067/j.cnki.1003-8981.2011.01.028.
- [6] 何见, 蒋丽娟, 李昌珠, 等. 光皮树花芽分化的形态和解剖特征观察[J]. 植物资源与环境学报, 2009, 18(2): 57-61. DOI:10.3969/j.issn.1674-7895.2009.02.010.
- [7] 周娟, 蒋丽娟, 李昌珠, 等. 光皮树小孢子发育与花器形态相关性花粉粒超微结构观察[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(7): 109-114. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2011.07.041.
- [8] 戴萍. 光皮树种子萌发的生理特性及破眠技术研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2011.
- [9] 陈景震, 李昌珠, 李培旺, 等. 光皮树果实生长发育及其脂肪酸积累研究[J]. 湖南林业科技, 2013, 40(2): 9-14. DOI:10.3969/j.issn.1003-5710.2013.02.003.
- [10] 刘汝宽, 肖志红, 李昌珠, 等. 光皮树果实内含物含量的测定与综合利用[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, 33(12): 19-21, 31. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2013.12.019.
- [11] 肖志红, 李昌珠, 陈景震, 等. 光皮树果实不同部位油脂组成分析[J]. 中国油脂, 2009, 34(2): 72-74. DOI:10.3321/j.issn: 1003-7969.2009.02.022.
- [12] 刘汝宽, 肖志红, 姜莎, 等. 近红外光谱法无损测定光皮树果实内含物含量[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 120-123.
- [13] 张志才, 黄金华, 叶代全, 等. 光皮树不同家系叶片氮、磷化学计量特征及其与土壤养分的关系[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(4): 53-58. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2016.04.10.
- [14] 李洁. 湖南不同立地条件光皮树生物量变化及营养元素累积特性研究[J]. 绿色科技, 2017(21): 108-110, 113. DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2017.21.044.
- [15] 宋庆安, 李志辉, 李昌珠. 光皮树不同无性系开花期光合生理特性日变化规律研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(10): 143-147.
- [16] 吴林瑛, 邓文剑, 张应中, 等. 光皮树不同无性系果期光合日变化研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(9): 32-37, 56. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2017.09.006.
- [17] 林军, 张应中, 邓文剑, 等. 光皮树无性系光响应特性研究[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(3): 19-23. DOI:10.3969/j.issn.1006-4427.2016.03.004.
- [18] 梁文斌, 蒋丽娟, 刘强, 等. 光皮树不同无性系苗木气孔及光合特性比较[J]. 经济林研究, 2011, 29(2):

- 42-47. DOI:10.14067/j.cnki.1003-8981.2011.02.019.
- [19] 何见, 蒋丽娟, 李昌珠, 等. 光皮树花芽分化过程中内源激素含量变化的研究[J]. 中国野生植物资源, 2009, 28(2): 41-45. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9690.2009.02.012.
- [20] 蒋丽娟, 马倩, 佟金权, 等. 光皮树砧木生长指标及内源激素对嫁接成活率的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(3): 26-29. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2011.03.021.
- [21] 梁文斌, 蒋丽娟, 马倩, 等. 干旱胁迫下光皮树不同无性系苗木的生理生化变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(4): 13-19. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2011.04.031.
- [22] 周文才, 李进, 左继林, 等. 光皮树全基因组调查[J]. 分子植物育种: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20201123.1537.012.html>.
- [23] 周宵, 彭映辉, 陈景震, 等. 木本油料植物光皮树叶片转录组测序与分析[J]. 分子植物育种, 2020, 18(19): 6305-6313. DOI:10.13271/j.mpb.018.006305.
- [24] 张路红, 蒋丽娟, 陈景震, 等. 油料植物光皮树 SSR-PCR 反应体系优化及引物筛选[J]. 经济林研究, 2017, 35(2): 78-83. DOI: 10.14067/j.cnki.1003-8981.2017.02.012.
- [25] 罗定伟, 王冬梅, 马贵芳, 等. 光皮树 *SuFAD7* 基因克隆及其表达研究[J]. 分子植物育种, 2015, 13(7): 1639-1644. DOI:10.13271/j.mpb.013.001639.
- [26] 王丽华. 油料能源植物光皮树花药离体培养研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [27] 李培旺, 李昌珠, 蒋丽娟, 等. 光皮树小孢子发育及其对花药愈伤组织诱导的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(7): 1-5.
- [28] 刘汝宽, 肖志红, 张爱华, 等. 基于松弛试验的光皮树果实冷态压榨流变模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 278-283. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.037.
- [29] 温晓, 麻明友, 吴显明, 等. 光皮树籽油的微波提取工艺研究[J]. 生物质化学工程, 2011, 45(6): 11-14. DOI:10.3969/j.issn.1673-5854.2011.06.003.
- [30] 曾虹燕, 方芳, 苏洁龙, 等. 超临界 CO₂、微波和超声波辅助提取光皮树子油工艺研究[J]. 中国粮油学报, 2005, 20(2): 67-70. DOI: 10.3321/j.issn:1003-0174.2005.02.018.
- [31] 肖志红, 刘汝宽, 李昌珠, 等. 光皮树果实高效制油的低温压榨与正丁醇研磨浸提技术[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(12): 54-59.
- [32] 曾虹燕, 李昌珠, 蒋丽娟, 等. 不同方法提取光皮树籽油的 GC-MS 分析[J]. 中国生物工程杂志, 2004, 24(11): 82-85. DOI:10.13523/j.cb.20041119.
- [33] 申爱荣, 陈艺, 肖志红, 等. 不同提油方法对光皮树果实油品质的影响[J]. 中国油脂, 2014, 39(5): 5-8.
- [34] 陈振超, 倪张林, 莫润宏, 等. 7 种木本油料油脂品质综合评价[J]. 中国油脂, 2018, 43(11): 80-85. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7969.2018.11.017.
- [35] 涂行浩, 杜丽清, 魏芳, 等. 我国 7 种典型热带木本油料加工研究现状[J]. 热带农业科学, 2019, 39(4): 114-122. DOI:10.12008/j.issn.1009-2196.2019.04.021.
- [36] 郭咪咪, 王瑛瑶, 闫军, 等. 典型木本油料油脂的特性分析[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(2): 74-79. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2017.02.013.
- [37] 王瑾, 李祖光, 胡伟, 等. 大豆油中脂肪酸组成的气相色谱-质谱分析[J]. 浙江科技学院学报, 2003, 15(S1): 16-18.
- [38] 郑畅, 杨湄, 周琦, 等. 高油酸花生油与普通油酸花生油的脂肪酸、微量成分含量和氧化稳定性[J]. 中国油脂, 2014, 39(11): 40-43.
- [39] 赵云龙, 周中凯. 不同提取工艺对菜籽油脂脂肪酸组成和加工性质的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(1): 42-44. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2018.01.012.
- [40] 郝希成, 汪丽萍, 张蕊. 玉米油脂脂肪酸成分标准物质的研制[J]. 粮食储藏, 2011, 40(1): 41-44. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6958.2011.01.010.
- [41] 汪丽萍, 郝希成, 张蕊. 葵花籽油脂脂肪酸成分标准物质的研制[J]. 粮油食品科技, 2011, 19(1): 29-31. DOI:10.3969/j.issn.1007-7561.2011.01.009.
- [42] 李高阳, 丁霄霖. 亚麻籽油中脂肪酸成分的 GC-MS 分析[J]. 食品与机械, 2005, 21(5): 30-32. DOI: 10.3969/j.issn.1003-5788.2005.05.011.
- [43] 汪丽萍, 郝希成, 张蕊. 芝麻油脂脂肪酸成分标准物质的研制[J]. 中国油脂, 2011, 36(5): 52-54.
- [44] 章挺, 周文才, 徐海宁, 等. 光皮树油工厂化精炼及理化性质分析[J]. 食品科学, 2012, 33(8): 163-166.
- [45] 李瑞贞, 刘玉环, 周厚德, 等. 光皮树油氧化稳定性的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(21): 87-89. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6630.2009.21.021.
- [46] 任娜, 刘玉环, 韩东平, 等. 超声波辅助法在光皮树油脱酸工艺中的应用研究[J]. 粮油加工, 2010(4): 21-23.
- [47] 周厚德, 刘玉环, 彭红, 等. 煎炸条件对精炼光皮树油中反式脂肪酸的影响[J]. 中国油脂, 2010, 35(5): 23-26.
- [48] 恽卓婷, 廖鲜艳, 翁新楚. 茶叶籽油与油茶籽油理化性质及脂肪酸组成比较[J]. 食品工业科技, 2011, 32(6): 136-138. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2011.06.055.
- [49] 马君义, 闫辉强, 吕孝飞, 等. 陇南两种单品种初榨橄榄油的理化性质和脂肪酸组成随成熟度的变化[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(11): 72-79, 85. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0174.2020.11.013.
- [50] 胡爱军, 孙军燕, 郑捷, 等. 超声波处理对棕榈油性

- 质影响[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(11): 8-11. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9578.2013.11.003.
- [51] 程敏, 塔巍, 刘睿杰, 等. 精炼工艺对椰子油品质的影响[J]. 中国油脂, 2018, 43(7): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2018.07.001.
- [52] 于森, 周玥彤, 马佳慧, 等. 两种冷榨花生油理化性质及抗氧化活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(21): 38-43. DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2019.21.007.
- [53] 张来林, 金文, 周杰生, 等. 充氮气调对大豆制油品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2010, 31(6): 11-14. DOI: 10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2010.06.007.
- [54] 黄颖, 郑畅, 刘昌盛, 等. 催熟与微波预处理对菜籽油品质的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(7): 39-43. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2019.07.009.
- [55] 温晓, 麻明友, 吴显明, 等. 超声波辅助光皮树油脂交换制备生物柴油的研究[J]. 林产化学与工业, 2011, 31(2): 58-62.
- [56] 焦晨. 双核碱性离子液体催化光皮树果油制备生物柴油[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(7): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9578.2015.07.010.
- [57] 李念, 钟世安. 采用固体磷钨酸铯盐催化光皮树油制备生物柴油[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(5): 1226-1231.
- [58] 郝聚喜, 黎继烈, 崔培梧, 等. 白地霉脂肪酶固定化及其催化光皮树油合成生物柴油的研究[J]. 粮油加工, 2010(4): 31-35.
- [59] Li C Z, Zhang L B, Xiao Z H, et al. Production of biodiesel using a vegetable oil from *Swida wilsoniana* fruits [J]. Period Polytech Chem Eng, 2015, 59(4): 283-287. DOI:10.3311/ppch.7868.
- [60] 丁荣, 钟世安, 李念, 等. 基于氯化镁饱和溶液中固定化脂肪酶Lipozyme TL IM催化光皮树油脂合成生物柴油[J]. 燃料化学学报, 2010, 38(3): 287-291. DOI:10.3969/j.issn.0253-2409.2010.03.006.
- [61] 李洋, 张爱华, 肖志红, 等. 响应面法优化 V_2O_5 /硅藻土催化光皮树油裂解反应的工艺条件[J]. 石油化工, 2015, 44(7): 882-887. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8144.2015.07.018.
- [62] 张红勤. 光皮树植物油高温催化裂解制备生物燃料油[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [63] 杜高宽, 张爱华, 肖志红, 等. 光皮树油在自催化体系下环氧化的工艺优化[J]. 石油化工, 2018, 47(12): 1345-1350. DOI:10.3969/j.issn.1000-8144.2018.12.008.
- [64] 王浩蓉. 不同催化体系中光皮树油脂环氧化过程与反应动力学研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2016.
- [65] 许利娜, 黄立新, 夏建陵, 等. 含钙微胶囊粉末光皮树油的制备及其性能[J]. 林业工程学报, 2019, 4(4): 66-70. DOI:10.13360/j.issn.2096-1359.2019.04.010.
- [66] 陈海, 梁小英. 南方石灰岩山地石漠化及其治理的生态学分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2002, 32(3): 295-297, 312. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-274X.2002.03.022.

(责任编辑:郭学兰)