

DOI:10.12171/j.1000-1522.20190433



**贾黎明**, 北京林业大学国家级重点学科森林培育教授, 博士生导师, 校国家能源非粮生物质原料研发中心主任。担任第四届中国青年科技工作者协会委员、中国林学会森林培育分会副秘书长、无患子产业国家创新联盟理事长、国家林草局油松工程技术研究中心副主任、国家能源行业非粮生物质原料标准化技术委员会林业分会委员及副秘书长等。

主要在用材林和能源林培育、城市林业、困难立地造林、树木栽培生理生态等领域开展科学研究, 在杨树速生丰产林精准水肥管理、无患子能源林高效培育及高效多联产产业链构建、风景游憩林培育、片麻岩地区植被恢复、栓皮栎林立地评价及林分生长模拟、混交林树种间相互作用机制等方面取得了一系列创新研究成果。

主持和协助主持国家科技攻关、国家科技支撑、林业公益性行业科技专项、国家自然科学基金、宁夏自治区重点研发计划等省部级以上课题或专题 16 项。发表第一作者和责任作者学术论文 146 篇(其中 SCI 论文 18 篇, EI 论文 7 篇); 出版专著 12 部; 获省部级科技一等奖 1 项, 二等奖 4 项, 三等奖 2 项。2016 年主持“华北杨树速生丰产林精准水养调控机理与技术”获得梁希林业科学技术奖二等奖。积极开展森林自然教育, 创建《山水林人》微信公众号, 发表原创文章 29 篇, 关注人数 1 500 余人, 受众超过 6 万人次。

## 林业生物质能源“林油一体化”产业高效 可持续发展路径研究

刘诗琦<sup>1,2</sup> 贾黎明<sup>1,2</sup> 苏淑钗<sup>1,2</sup> 马履一<sup>1,2</sup> 程志楚<sup>3</sup> 高世轮<sup>1,2</sup> 高媛<sup>1,2</sup>  
李世冉<sup>1,2</sup> 张赞齐<sup>1,2</sup> 孙操稳<sup>1,2</sup> 赵国春<sup>1,2</sup> 段 劼<sup>1,2</sup> 翁学煌<sup>4</sup>

(1. 北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学国家能源非粮生物质原料研发中心, 北京 100083; 3. 国家林业和草原局生态保护修复司, 北京 100714; 4. 福建源华林业生物科技有限公司, 福建 三明 354500)

**摘要:**【目的】林业生物质能源“林油一体化”产业(以下简称“林油一体化”产业)是指以生物质能源企业为主, 将原料林培育、生物柴油等系列产品生产相结合的产业; 本文旨在提出我国“林油一体化”产业可持续发展路径, 推动产业发展。【方法】通过相关企业调研、原料林林地调查、生物柴油全生命周期  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  排放量测算、原料林培育及产品生产经济效益测算等, 研究产业发展现状、原料林不同培育模式及不同产业链的经济效益。【结果】(1)产业已形成一定规模的原料林培育基地, 企业创新了一系列具有自主知识产权的生物柴油及其他生物燃油的生产工艺; (2)生产 1 t 无患子生物柴油, 原料林固定  $\text{CO}_2$  量 25.38 t, 全生命周期  $\text{CO}_{2\text{eq}}$  排放量为 -19.41 t, 与石化柴油相比, 减排量达 621.77%; (3)多数原料林为实生栽培模式, 未实现良种化, 缺乏集约经营, 结果晚、产量低、成本高; 以 20 年为项目周期, 果实价格 4 元/kg 计, 实生栽培模式原料林约亏损 1 687.68 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 高接换头模式年均利润为 419.57 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ); 但若形成无性系栽培模式, 在第 10 年可收回成本, 年均利润为 2 675.55 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ); 若再按 2019 年的市场平均价格 9 元/kg 计算, 则在第 5 年即可收回成本, 年均利润达 20 675 元/( $\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ ), 经济效益将大幅度提升; (4)1 t 无患子干果生产生物柴油平均盈利 18.65 元, 生产皂苷类产品平均盈利 6 573.3 元, 若形成完整的油-皂-碳-林多联产产品生产线, 年处理 5 000 t 干果的净收益为 5 566.4 万元。【结论】“优良无性系种植园模式+多联产产业链模式”是未来产业高效可持续发展的理想模式; 为进一步促进产业的可持续发展, 建议政府出台相关政策保障产业优先享受营造林普惠财政补贴政策、国家种业和良种优惠政策、财税优惠政策, 并强制石化柴油中配比生物柴油, 拓宽生物柴油的推广应用渠道。

收稿日期: 2019-11-18 修回日期: 2019-12-05

**基金项目:** 国家林业和草原局生态保护修复司委托项目“林油一体化”产业可持续发展模式及相关因素研究(2017-LYSJWJ-1), 北京林业大学青年教师科学研究中长期项目(2015ZCQ-LX-02)。

**第一作者:** 刘诗琦, 博士生。主要研究方向: 能源林培育理论与技术。Email: lsq5330121@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学。

**责任作者:** 贾黎明, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 能源林培育理论与技术。Email: jlm@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

**本刊网址:** <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

**关键词:** 林业生物质能源; 林油一体化; 产业; 可持续发展; 多联产

**中图分类号:** S789.5; S216.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2019)12-0096-12

**引文格式:** 刘诗琦, 贾黎明, 苏淑钗, 等. 林业生物质能源“林油一体化”产业高效可持续发展路径研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(12):96-107. Liu Shiqi, Jia Liming, Su Shuchai, et al. Efficient and sustainable development path of forest-based bioenergy “forestry-oil integration” industry [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(12): 96-107.

## Efficient and sustainable development path of forest-based bioenergy “forestry-oil integration” industry

Liu Shiqi<sup>1,2</sup> Jia Liming<sup>1,2</sup> Su Shuchai<sup>1,2</sup> Ma Lüyi<sup>1,2</sup> Cheng Zhichu<sup>3</sup> Gao Shilun<sup>1,2</sup> Gao Yuan<sup>1,2</sup>  
Li Shiran<sup>1,2</sup> Zhang Yunqi<sup>1,2</sup> Sun Caowen<sup>1,2</sup> Zhao Guochun<sup>1,2</sup> Duan Jie<sup>1,2</sup> Weng Xuehuang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education,

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. National Energy R & D Center for Non-Food Biomass, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

3. Department of Ecological Protection and Restoration, State Forestry and  
Grassland Administration, Beijing 100714, China;

4. Fujian Yuanhua Forestry Biotechnology Co., Ltd, Sanming 354500, Fujian, China)

**Abstract:** [Objective] Forest-based bioenergy “forestry-oil integration” industry (hereinafter referred to as the “forestry-oil integration” industry) is main consisted by biomass energy enterprises, which combines feedstock forest cultivation with series product production, such as biodiesel products. This paper aims to optimize the development pattern, and promote the development of industry. [Method] Based on the survey of related companies, investigation of feedstock plantations, calculation of carbon emissions on soapberry biodiesel by lifecycle assessment, estimating on profits of feedstock forests cultivation and product production, etc., this paper analyzes the current situation of “forestry-oil integration” industry in China, and the economic benefits of different cultivation patterns and different industry chains. [Result] (1) The industry had basically formed a certain scale of feedstock forests base, and most companies had already created a series of biodiesel production processes and products with independent intellectual property. (2) The amount of CO<sub>2</sub> sequestration of feedstock forest reached 25.38 t while producing 1 t of biodiesel; the CO<sub>2eq</sub> emissions of lifecycle was -19.41 t, which had decreased by 621.77% compared with petroleum diesel. (3) Most feedstock forests were cultivated by seeding pattern with extensive management, late fruit stage, low yield and high cost; taking 20 years as the project lifecycle, the fruit selling price was 4 RMB/kg (year 2017), the seeding cultivation pattern would loss about 1 687.68 RMB/(ha·yr), and the high scion & head-changing pattern would have an average annual profit of 419.57 RMB/(ha·yr); if the clone’s cultivation mode was formed, the costs would be recovered in the 10th year, and the annual profit was 2 675.55 RMB/(ha·yr), which could greatly improve the economic benefit; If the fruits selling price was 9 RMB/kg (year 2019), the costs would be recovered in the 5th year, and the annual profit was 20 675 RMB/(ha·yr). (4) The average profit was 18.65 RMB when using 1 t of soapberry dried fruit to produce biodiesel, and the average profit of saponin products was 6 573.3 RMB; if poly-generation products production line was formed, it could be estimated that the total income would increase to 55.66 million RMB. [Conclusion] “Clones plantation culture pattern + poly-generation industry chain pattern” was the ideal pattern for development of the industry, which would promote comprehensive benefits. In addition, in view of industrial supporting policies, four suggestions were proposed, i.e., enjoying inclusive financial subsidy policy, enjoying National Seed Industry and improved variety preferential policies, enjoying fiscal and tax preferential policies and requiring the proportion of biodiesel in petroleum diesel.

**Key words:** forest-based bioenergy; forestry-oil integration; industry; sustainable development; poly-generation

面对国家能源安全与环境保护的双重挑战,生物柴油作为可替代石化柴油的生物质能源,受到世界范围内的广泛重视。林业生物柴油是以木本油料植物果实种子、植物导管乳汁及汁液等为原料,通过化学方法转化所含油脂所获得的生物柴油<sup>[1]</sup>。与以粮食为原料的生物液体燃料相比,其因“不与人争粮、不与粮争地”、原料可再生、一次栽种持续收获、利于林业产业结构调整等优点,受到发展中国家的极大欢迎<sup>[2-4]</sup>。在过去的20年里,世界上主要发展的林业生物柴油树种为油棕(*Elaeis guineensis*)和小桐子(*Jatropha curcas*)。油棕在印度尼西亚、马来西亚、泰国等东南亚国家被广泛种植,小桐子发展地区主要在亚洲、非洲和拉丁美洲<sup>[5-8]</sup>。然而,在原料培育成本、原料供给、生物柴油生产成本、原油价格及税收等因素的影响下,大多单一生产生物柴油产品的项目经济不可行,且许多规模化原料林种植项目以失败告终<sup>[9-13]</sup>。

林业生物质能源“林油一体化”产业是指以生物质能源企业为主,将原料林培育、生物柴油及其系列产品生产相结合的产业。我国“林油一体化”产业已走过了十余年的历程,在“十一五”和“十二五”期间,规模化的原料林基地建设在全国范围内展开,也有不少企业已形成了生物柴油生产线,并开始生产生物柴油<sup>[7,14]</sup>。同时,如小桐子、光皮树(*Swida wilsoniana*)、乌桕(*Sapium sebiferum*)、文冠果(*Xanthoceras sorbifolia*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、无患子(*Sapindus mukorossi*)等原料树种的优质种质资源评价筛选及优良无性系繁育也取得了很大进展<sup>[14-17]</sup>。其中,无患子作为生物柴油原料树种,相对发展较晚,但其作为洗涤植物和药用植物在我国已有上千年的历史,广泛分布于我国亚热带和热带各省,是综合利用价值极高的树种,是产业发展进程中的后起之秀<sup>[16-17]</sup>。

尽管我国已开始大范围发展“林油一体化”产业,但作为一个新兴产业,其发展仍存在较大的不确定性。原料林培育对环境是否会产生负面影响?如何解决当前普遍存在的大规模原料林种植经济不可行的问题?如何解决企业生产单一产品经济效益不高的问题?政策扶持应重点关注哪些方面?诸多问题尚未有明确的答案。因此,本文在对我国“林油一体化”产业发展现状与问题分析的基础上,以无患子为例,研究其生物柴油产业链全生命周期 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 排放量、原料林不同培育模式经济效益及不同产业链模式经济效益,对原料林培育及产业链模式进行优化,并提出相关产业扶持政策建议,以期为我国“林油一体化”产业高效可持续发展探寻优化路径。

## 1 研究对象与方法

### 1.1 企业调研

对我国“林油一体化”部分核心企业进行调研,内容包括:企业基本情况;原料林种植现状;生产工艺及生产线建设;产品生产及销售;企业效益;政策扶持力度等。

### 1.2 原料林林地调查

对福建省建宁县9年生无患子原料林进行实地调查。调查指标包括:(1)林木生物量:于林内共设置5个 $20\text{ m} \times 30\text{ m}$ 的样地,进行林木生长调查,各选取1株平均标准木进行单株生物量测算;(2)林木碳含量:采用元素分析法测定样品的碳含量,用林木各器官生物量乘以碳含量得到各器官碳储量及林木碳储量;(3)果实产量:当年果实全部收获后晾干测算单位面积果实产量;(4)其他指标:林地土壤全氮、有效磷及有机质,林区地表水pH、高锰酸盐指数( $\text{CODMn}$ )、5日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )、氨氮、总磷( $\text{TP}$ )、砷( $\text{As}$ )、铬( $\text{Cr}^{6+}$ )。

### 1.3 产业链全生命周期 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 排放量测算

采用全生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)对无患子生物柴油全生命周期 $\text{CO}_{2\text{eq}}$ 排放量进行测算。具体如下:(1)系统边界设置:包括原料种植阶段、无患子油生产阶段、生物柴油生产阶段和柴油燃烧阶段;(2)数据收集及清单分析:种植阶段数据来自企业调研,其他3个阶段数据来自文献<sup>[18-19]</sup>;(3)基础数据库:选择CLCD(国内目前唯一可公开获得的中国本土LCA基础数据库)和Ecoinvent3.1.0;(4)影响评价及LCA结果输出:在eFootprint中完成。eFootprint是成都亿科环境科技有限公司(IKE)于近年开发的在线的LCA数据填报和分析平台(<http://www.efootprint.net/#/home>),可基于web完成供应链的数据调查、数据库集成、LCA建模和分析、数据发布,目前已应用在生物质能源LCA领域<sup>[20]</sup>。

### 1.4 经济效益测算

无患子实生苗栽培模式和实生苗改接换头模式各项投资单价数据来源于企业调研;产业链单一产品经济效益数据来源于企业调研。原料林经济效益测算参照国家发改委建设部颁发的《建设项目经济评价方法与参数》中的有关规定,计算收益和费用的价格统一采用2017年的市场价格,项目周期为20年。

无患子良种无性系栽培模式经济效益在假设的基础上完成测算,具体如下:(1)建园投资50 108.625元/ $\text{hm}^2$ (同高接换头模式);造林密度825株/ $\text{hm}^2$ (株

行距  $3\text{ m} \times 4\text{ m}$ ), 第 1 年挂果率 30%, 产量平均  $1.0\text{ kg/株}$ ; 第 2 年挂果率 80%, 产量平均  $1.5\text{ kg/株}$ ; 第 3 年后全部挂果, 产量平均  $3.0\text{ kg/株}$ ; 第 4 年  $4.0\text{ kg/株}$ ; 前 4 年的果实采运费平均  $900\text{ 元}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$  (同高接换头模式第 5~6 年); 第 5 年起产量稳定在  $4.5\text{ t/hm}^2$  (目前团队实生苗栽培示范林地丰年产量), 经营费用稳定在  $13\ 050\text{ 元/hm}^2$  (同高接换头模式丰产期)。

多联产产业链经济效益测算部分, 深加工产品组成比例来源于文献 [16-17,21] 和企业调研; 各产品线的成本投入及收益基础数据来源于企业和市场调研。

## 2 结果与分析

### 2.1 产业发展现状分析

#### 2.1.1 原料林栽培地区及规模

据不完全统计, 我国主要油料能源林建设(新造林)总面积达  $78.636\text{ 万 hm}^2$ , 包括无患子  $14\ 000\text{ hm}^2$ ; 光皮树  $55\ 000\text{ hm}^2$ ; 黄连木  $139\ 660\text{ hm}^2$ ; 小桐子  $163\ 980\text{ hm}^2$ ; 文冠果  $135\ 690\text{ hm}^2$ ; 乌桕  $7\ 730\text{ hm}^2$ ; 油桐  $270\ 300\text{ hm}^2$  (表 1)。此外, 据笔者调研, 近年来随着无患子产业的发展, 贵州、湖南、江西等地新建无患子原料林共  $31\ 867\text{ hm}^2$ 。然而, 绝大多数原料林栽植的是实生苗, 童期长、结实晚、遗传分化大、果实产量低、不稳定; 造林密度偏大, 造林后疏于管理。因此, 目前大部分原料林林分产量和质量较低。

#### 2.1.2 加工、产品与市场现状

基于全国生物柴油行业协作组官方网站及笔者的调研, 国内现有生物燃油生产企业约 50 余家, 其中以废弃动植物油脂为原料的占 80% 以上, 利用油料植物(小桐子、光皮树、无患子、文冠果、黄连木等)作为原料的企业共有 9 家。这些生物柴油生产企业已形成了较为成熟的生物燃油生产工艺, 且部分拥

有自主研发的生物柴油产品。例如: 新木生物科技集团有限公司创新了“非粮油脂原料生产低凝生物柴油及多联产技术”和“木质纤维多联产高效利用绿色清洁工艺”, 生产的低凝生物柴油及低凝润滑油等产品应用于青藏高原军需; 北京纽斯德特技术有限公司制定了“自混合下行循环流化床 BPO 生物质快速热解制油成套技术方案”, 从根本上解决了生物质快速热解制生物燃料技术工业化放大难问题; 原源华新能源科技有限公司形成了“路易斯酸催化剂一步法合成生物柴油技术”; 云南神宇新能源有限公司对小桐子生物原油和精油进行氢化裂解处理, 得到了小桐子航空生物燃油; 原湖南未名创林生物能源有限公司拥有 BD100 生物柴油、B5-B20 生物柴油混配燃料等。

尽管生产工艺已日趋成熟, 但大部分生物柴油企业尚未实现规模化生产。原料供应不足、原料生产及收储运成本居高不下、生物燃油销路少(或不能获得燃油市场准入)等是制约产业发展的主要因素, 靠单一生产生物燃油的企业难以生存。目前, 多数生物燃油企业除生产生物柴油之外, 同时开发工业甘油、增塑剂、生物润滑油、生物基工程材料、表面活性剂等其他产品。例如: 荆州大地生物工程股份有限公司利用废弃油脂生产生物柴油和船用燃料油, 供应给长江、汉江、洞庭湖流域的水上加油站, 作为内河运输船只的燃料使用, 同时兼顾化工市场(生产增塑剂、肥料抗凝结剂、防潮剂等), 并成立专门的原料供应子公司, 开展油料作物种植销售业务; 新木生物科技集团有限公司除生产生物柴油外, 还生产大量的生物基材料、生物合成润滑油等高价值产品。

#### 2.1.3 政策扶持

据统计: 2005—2018 年, 我国共颁布了 45 个林业生物质能源相关扶持政策文本。其中, 《中华人民共和国可再生能源法》是我国生物质能源领域中的

表 1 我国主要木本油料林栽培地区及面积

Tab. 1 Areas of tree plantations for biodiesel production in China

树种 Species	省份 Province	面积/hm <sup>2</sup> Area/ha	树种 Species	省份 Province	面积/hm <sup>2</sup> Area/ha
无患子 <i>Sapindus mukorossi</i>	福建 Fujian	14 000	小桐子 <i>Jatropha curcas</i>	广东 Guangdong	1 980
光皮树 <i>Swida wilsoniana</i>	湖南 Hunan	15 000		贵州 Guizhou	6 670
	江西 Jiangxi	40 000		四川 Sichuan	67 330
黄连木 <i>Pistacia chinensis</i>	安徽 Anhui	5 330		云南 Yunnan	88 000
	河南 Henan	133 330	文冠果 <i>Xanthoceras sorbifolia</i>	内蒙古 Inner Mongolia	133 330
	山西 Shanxi	1 000		山西 Shanxi	2 360
乌桕 <i>Sapium sebiferum</i>	贵州 Guizhou	7 730	油桐 <i>Vernicia fordii</i>	广西 Guangxi	133 330
				贵州 Guizhou	136 970

注: 表中数据主要来源于参考文献[7]。Note: The data are mainly cited from reference [7].



第一部专项法律,是制定相关产业扶持政策的依据和前提。现行相关扶持政策中,涉及生物柴油的共23个,包括法规类政策1个,发展类政策17个,经济类政策3个,指导类政策2个(表2),主要为推进先进生物柴油技术进步和产业化示范提供了指导和扶持。其中,2006—2007年,《关于发展生物能源和生物化工财税扶持政策的实施意见》和《生物能源和生物化工原料基地补助资金管理暂行办法》两个文件的出台,对油料能源林的发展起到了重要作用,国内8家企业的原料林基地建设获补贴总金额为2.62亿元(林业原料基地补助标准为3 000元/hm<sup>2</sup>),但该文件已废止。

#### 2.1.4 无患子生物柴油全生命周期 CO<sub>2eq</sub> 排放量

表3中种植阶段的投入数据来源于国内某企业单年实际生产数据。利用 eFootprint 在线计算得生产1 t无患子生物柴油全生命周期 CO<sub>2eq</sub> 排放量为5.21 t,其中种植阶段施肥造成的排放占总量的58.76%;设燃烧1 t无患子生物柴油释放的 CO<sub>2eq</sub> 同小桐子生物柴油一致,为0.76 t<sup>[19]</sup>;基于9年生无患子林样地调查,无患子树体年固碳量为1.66 t/(hm<sup>2</sup>·a),调查当年无患子果实产量为2.91 t/hm<sup>2</sup>,按无患子种仁含油率44.69%计算<sup>[21]</sup>,合生产1 t无患子生物柴油,原料林固定 CO<sub>2</sub> 量25.38 t。

若不考虑原料林的固碳量,无患子生物柴油全生命周期 CO<sub>2eq</sub> 排放量为5.97 t/(吨生物柴油),合153.08 g/MJ,为石化柴油(3.72 t/t)的1.60倍<sup>[19]</sup>,与Ou等<sup>[22]</sup>的研究结果相比,CO<sub>2eq</sub> 排放量分别为以大豆、小桐子和地沟油为原料的生物柴油的1.39、2.95和2.05倍。

若考虑原料林的固碳量,无患子生物柴油全生命周期 CO<sub>2eq</sub> 排放量为-19.41 t/t,与石化柴油相比,减排量达621.77%;以地沟油(0.39 t/t)、菜籽油(1.20 t/t)和小桐子油(1.26 t/t)为原料的生物柴油全生命周期 CO<sub>2eq</sub> 排放较石化柴油分别减少89.52%、67.74%和66.13%,减排量远不及无患子<sup>[19]</sup>。

此外,从土壤养分与地表水水质两方面看,无患子原料林培育未对环境造成负面影响。其中:土壤养分与当地同龄杉木人工林相当,未导致土壤地力衰退,有机质、全氮、有效磷的平均含量分别为15.943 g/kg、0.756 g/kg、1.167 mg/kg;根据GB3838—2002,林区地表水 COD<sub>Mn</sub>、BOD<sub>5</sub>、氨氮和全磷含量均达到Ⅱ类标准,Cr<sup>6+</sup>和As含量均达到Ⅰ类标准。

#### 2.1.5 成就、存在问题和解决途径

综上,我国“林油一体化”产业取得了3方面成就:(1)已初步形成一定规模的原料林基地;(2)创新了一系列具有自主知识产权的生物柴油及其他生物

燃油的生产工艺;(3)生产1 t无患子生物柴油,原料林固定 CO<sub>2</sub> 量25.38 t;产业链全生命周期 CO<sub>2eq</sub> 排放量为-19.41 t/t,与石化柴油(3.72 t/t)相比,减排量达621.77%。但其发展中仍存在4方面的问题:(1)原料林大多为实生繁殖苗,未实现良种化,缺乏集约经营,面积大、结果晚、产量低、成本高;(2)多数企业未规模化生产生物柴油,收益依靠其他产品;(3)多数企业存在不同程度的亏损,前期投入大,短期内获益少;(4)扶持政策力度不够,企业获得的财政补贴较少。未来必须在原料高效可持续供应、高收益产业链构建上下功夫。

## 2.2 原料林培育模式优化

### 2.2.1 主要培育模式解析

原料林培育模式主要分为实生苗栽培模式(以下简称“实生栽培模式”)、实生苗改接(良种)换头模式(以下简称“高接换头模式”)和良种无性系栽培模式(以下简称“无性系栽培模式”)3种。当前多数生物柴油树种因缺乏良种,多采用实生栽培模式,虽然简单易行,但存在前文所述问题,使企业从投资到产出回报期年限加大。例如无患子实生栽培模式原料林约需7年进入初果期,13年进入丰产期;高接换头是指在多年生树体上通过嫁接优良品种的穗条进行改良,是更新复壮的一种模式,采用此模式可促进树木尽早进入结果期,改造3年后可稳定挂果,第7年可进入丰产期;无性系栽培模式是通过优良无性系选育和扩繁,筛选优质苗木进行原料林营建,可有效缩短树木童期,提早进入结实期,无性繁殖苗约5年即可进入丰产期<sup>[23]</sup>。

### 2.2.2 不同模式经济效益测算

#### 2.2.2.1 实生栽培模式

以国内某企业种植6 666.67 hm<sup>2</sup>无患子原料林进行测算。原料林培育成本投入分建设期(1~4年)投入和经营期(5~20年)投入两部分,其中建设工程建设费包括种植费和抚育费(修剪、施肥、病虫害防治等)。由表4得:实生栽培模式建设期投入25 302.44万元,其中工程建设费22 950.00万元,工程间接费2 352.44万元;经营期投入53 200.00万元;总投入78 502.44万元,年均投入5 887.68元/hm<sup>2</sup>。实生栽培模式第7年开始挂果,平均年产干果约1.5 t/hm<sup>2</sup>。按干果收购均价4元/kg计算,总收入为56 000.03万元,得总利润为-22 502.42万元,则企业约亏损1 687.68元/(hm<sup>2</sup>·a)。

#### 2.2.2.2 高接换头模式

由表4得:6 666.67 hm<sup>2</sup>高接换头模式原料林建设期(1~4年)工程建设费为30 300.00万元,较实生栽培模式的费用高32.0%;经营期投入137 000.00

表 2 我国现行“林油一体化”产业相关扶持政策

Tab. 2 “Forestry-oil integration” industry related support policies

序号 No.	发布年份 Announcing year	发布单位 Announcing department	政策名称 Policy name	类别 Category
1	2006	全国人民代表大会常务委员会 Standing Committee of the National People's Congress	《中华人民共和国可再生能源法》 <i>Renewable energy law of the People's Republic of China</i>	法规类 Regulation
2	2005	国家发展改革委员会 National Development and Reform Commission (NDRC)	《可再生能源产业发展指导目录》 <i>Directory of renewable energy industry development guidance</i>	发展类 Development
3	2007	国务院 The State Council	《关于印发节能减排综合性工作方案的通知》 <i>Notice on printing and distributing comprehensive work plan for energy conservation and emission reduction</i>	
4	2007	国家林业局、国家发展改革委员会、 财政部等 State Forestry Administration SFA, NDRC, The Ministry of Finance	《林业产业政策要点》 <i>Key points of forestry industry policy</i>	
5	2007	国家发展改革委员会 NDRC	《可再生能源中长期发展规划》 <i>National renewable energy long-term planning</i>	
6	2007	国家林业局 SFA	《国家林业局关于做好林业生物质能源工作的通知》 <i>Notice of the State Forestry Administration on doing well in forestry biomass energy work</i>	
7	2009	国务院办公厅 General Office of the State Council	《促进生物产业加快发展的若干政策的通知》 <i>Notice on several policies for accelerating the development of biological industry</i>	
8	2013	国家林业局 SFA	《全国林业生物质能源发展规划(2011—2020年)》 <i>National forestry biomass energy development plan (2011—2020)</i>	
9	2014	国家能源局 National Energy Administration (NEA)	《生物柴油产业发展政策》 <i>Biodiesel industry development policy</i>	
10	2016	国家能源局 NEA	《生物质能发展“十三五”规划》 <i>13th Five Year Plan for biomass energy development</i>	
11	2016	国家发展改革委员会 NDRC	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》 <i>Outline of the 13th Five Year Plan for national economic and social development of the People's Republic of China</i>	
12	2016	国家能源局 NEA	《能源发展“十三五”规划》 <i>13th Five Year Plan for energy development</i>	
13	2016	国家能源局 NEA	《可再生能源发展“十三五”规划》 <i>13th Five Year Plan for renewable energy development</i>	
14	2016	国家林业局 SFA	《林业发展“十三五”规划》 <i>13th Five Year plan for forestry development</i>	
15	2016	国家发展改革委员会、国家能源局 NDRC, NEA	《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》 <i>Action plan for innovation of energy technology revolution (2016—2030)</i>	
16	2016	国务院 The State Council	《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》 <i>13th Five Year Plan national strategic emerging industry development plan</i>	
17	2016	国家林业局 SFA	《林业应对气候变化“十三五”行动要点》 <i>Action points for forestry to cope with climate change during the 13th Five Year Plan</i>	
18	2017	国家林业局等十一部委 SFA, etc.	《林业产业发展“十三五”规划》 <i>13th Five Year Plan for forestry industry development</i>	
19	2009	财政部, 国家林业厅 The Ministry of Finance (SFA)	《林业贷款中央财政贴息资金管理办法》 <i>Measures for the administration of discount interest funds of the central government for forestry loans</i>	经济类 Economy
20	2011	财政部 The Ministry of Finance	《关于组织申报生物能源和生物化工原料基地补助资金的通知》 <i>Notice on organizing application for subsidy funds of bioenergy and biochemical raw material base</i>	
21	2015	财政部 The Ministry of Finance	《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》 <i>Interim measures for the management of special funds for renewable energy development</i>	
22	2017	国家林业局 SFA	国家林业局关于印发《林业生物质能源主要树种目录(第一批)》的通知 <i>Circular of the State Forestry Administration on printing and distributing the catalogue of main tree species for forestry biomass energy (the first batch)</i>	指导规范类 Instruction norm
23	2018	中国国家认证认可监督管委会 Certification and Accreditation Administration of the People's Republic of China	《生物质能可持续性认证要求》 <i>Certification requirements for sustainability of biomass energy</i>	

表3 无患子生物柴油全生命周期投入表  
Tab. 3 Inputs of soapberry biodiesel production

阶段 Stage	投入 Input	数值 Value
原料培育(1 t果实) Feedstock cultivation (1 t of dried fruits)	N/kg	83.42
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /kg	41.71
	K <sub>2</sub> O/kg	62.56
	柴油 Diesel/kg	21.05
	汽油 Gasoline/kg	2.24
	除草剂 Herbicide/kg	0.3
	杀虫剂 Pesticide/kg	0.73
	杀菌剂 Fungicide/kg	0.012
	果实运输 Transportation/km	30
	电力 Electricity/kWh	231.97
无患子油生产(1 t无患子油) Production of soapberry oil (1 t of oil)	蒸汽 Steam/GJ	3.07
	电力 Electricity/kWh	40
生物柴油生产(1 t生物柴油) Production of biodiesel (1 t of biodiesel)	甲醇 Methanol/kg	96
	蒸汽 Steam/GJ	1.57

注:原料培育阶段数据来源于国内某企业单年实际生产数据;无患子油生产数据及生物柴油生产数据来源于参考文献[18]。Notes: the data of feedstock stage comes from annual actual data of a company in China; the data of soapberry oil and biodiesel production comes from reference [18].

万元,为实生栽培模式的2.6倍;项目期20年内,高接换头模式原料林总投入170 405.75万元,年均投入12 780.43元/hm<sup>2</sup>。该模式下无患子第5年(高接换头第2年)开始挂果,年产干果约1.5 t/hm<sup>2</sup>,第7年进入丰产期,年产干果4.5 t/hm<sup>2</sup>。按干果收购均价4元/kg计算,年均利润419.57元/(hm<sup>2</sup>·a)。由图1(a)可知:高接换头缩短了童期,并使原料林在第7年产量大幅提升,再辅以更精细化的管理,项目在第19年扭亏为盈,第20年实现累计收益8 391.38元/hm<sup>2</sup>,总累计收益达5 594.3万元。若将项目期限延长至50年(无患子稳产期),原料销售将实现累计收益15.69万元/hm<sup>2</sup>。

### 2.2.2.3 无性系栽培模式

项目期20年内,6 666.67 hm<sup>2</sup>无性系栽培模式原料林总投入175 005.75万元,年均投入13 125.45元/hm<sup>2</sup>(表4)。由图1(b)可得:项目在第10年收回成本,累计实现4 011元/hm<sup>2</sup>的收益,此后每年的收益持续增加;在项目周期(20年)结束时,累计收益达53 511元/hm<sup>2</sup>,年均利润2 675.55元/(hm<sup>2</sup>·a);原料林总累计收益达35 674.0万元;若将项目期限延长至50年(无患子稳产期),原料销售将实现累计收益20.2万元/hm<sup>2</sup>。项目周期20年内,无性系栽培模式较高接换头模式提前9年收回成本,且收益增加6.4倍;随着项目周期从20年延长至50年,无性系

栽培模式原料林累计收益可增加2.8倍。随着无患子产业的发展,原料价格不断上涨。若以2019年的平均市场价格9元/kg计算,则项目在建设期结束后第2年(第5年)即可收回成本,第20年可实现累计收益41.35万元/hm<sup>2</sup>,年均利润为20 675元/(hm<sup>2</sup>·a)。

### 2.2.3 培育模式优化路径

由上述3种模式收益对比分析可知,影响原料林经济效益的两大主要因素为童期和果实产量。高接换头与无性系栽培模式缩短了果树童期,且提高了稳产期的果实产量。尤其是优良无性系苗木,其从栽植起就具备了开花结实的能力,能提前进入结果期,并快速进入丰产期。高接换头与无性系栽培模式稳产期果实产量达4.5 t/hm<sup>2</sup>,为实生栽培模式的3倍。因此,即使其项目投入经费超过实生栽培的2倍,项目盈利能力仍然远远高于实生栽培模式。

因此,原料林培育模式优化路径为“优良无性系种植园模式”,其技术特点是优良无性系与集约化种植园(果园化)高效培育技术体系的结合。该技术体系是提高原料林果实产量的关键之一,包括精细化造林整地、矮化密植、水肥管理、整形修剪、花果调控与病虫害防治6大部分。无患子的集约化种植园高效培育技术体系雏形已形成,包括:劈接法嫁接育苗;人工杂交授粉技术<sup>[24]</sup>;适生立地梯田式整地;栽培密度在495~825株/hm<sup>2</sup>;树体修剪为3骨干枝、60°开张角度和每m<sup>2</sup>投影面积保留16~18个结果枝<sup>[25]</sup>;5月进入初花期(25%植株开花),每0.33 hm<sup>2</sup>地释放3脾有王蜜蜂,直到开花结束;全年施肥比例为N:P:K=2.83:1.00:2.04,各时期占全年施肥量的比例为采后肥:N(40%)、P(20%)、K(40%),花期肥:N(20%)、P(40%)、K(30%),壮果肥:N(40%)、P(40%)、K(30%)<sup>[26]</sup>;主要病虫害生物防治技术<sup>[27-28]</sup>。这些技术将对无患子无性系种植园原料林培育模式产生积极的影响。

## 2.3 产业链建设模式优化

### 2.3.1 单一类型产品经济效益

以无患子为例,果肉含皂苷10%~27%,种仁平均含油40%,种壳是活性炭原料<sup>[16]</sup>,其单一类型产品经济效益分析主要分为油脂类产品和皂苷类产品两类。

根据企业调研结果可知:年产18万吨的无患子生物柴油生产线建成投产后,年平均税后利润总额为5 605.88万元,相当于1 t无患子干果平均盈利18.65元;年处理5 000 t无患子果实皂苷生产线,年平均税后利润总额为3 286.66万元,相当于1 t无患子干果平均盈利6 573.3元。可见对于无患子而言,1 t干果生产油脂类产品的经济收益仅为皂苷类产品

表 4 3 种培育模式原料林投资测算表

元/hm<sup>2</sup>

Tab. 4 Investment of raw material forests in three cultivation patterns

RMB/ha

栽培模式 Cultivation pattern	时期 Period	项目 Item	合计 Total	1~4年 1-4 years	5~20年 5-20 years	
实生栽培模式 Seeding cultivation pattern	总计 Total		117 753.660			
	建设期 Construction period	小计 Subtotal	37 953.660	37 953.66		
		工程建设费 Engineering construction cost	34 425.00	34 425.00		
		工程间接费 Indirect cost of engineering	3 528.66	3 528.66		
	经营期 Management period	小计 Subtotal	79 800.00		5 100.00	
		肥药费 Fertilizer & pesticide costs	31 200.00		1 950.00	
		抚育费 Fostering cost	36 000.00		2 250.00	
		采运费 Collection & transportation costs	12 600.00		900.00	
栽培模式 Cultivation pattern	时期 Period	项目 Item	合计 Total	1~4年 1-4 years	5~6年 5-6 years	7~20年 7-20 years
高接换头模式 High scion & head-changing pattern	总计 Total		255 608.625			
	建设期 Construction period	小计 Subtotal	50 108.625			
		工程建设费 Engineering construction cost	45 450.00	45 450.00		
		工程间接费 Indirect cost of engineering	4 658.625	4 658.625		
	经营期 Management period	小计 Subtotal	205 500.00		11 400.00	13 050.00
		肥料费 Fertilizer cost	48 000.00		3 000.00	3 000.00
		农药费 Pesticide cost	12 000.00		750.00	750.00
		抚育费 Fostering cost	108 000.00		6 750.00	6 750.00
		果实采收费 Fruit collection cost	21 900.00		450.00	1 500.00
		果实运输费 Fruit transportation cost	15 600.00		450.00	1 050.00
栽培模式 Cultivation pattern	时期 Period	项目 Item	合计 Total	1~4年 1-4 years	5~20年 5-20 years	
无性系栽培模式 Clone's cultivation mode	总计 Total		262 508.625			
	建设期 Construction period	小计 Subtotal	53 708.625	53 708.625		
		工程建设费 Engineering construction cost	45 450.00	45 450.00		
		工程间接费 Indirect cost of engineering	4 658.625	4 658.625		
		采运费 Collection & transportation costs	3 600.00	3 600.00		
	经营期 Management period	小计 Subtotal	208 800.00		13 050.00	
		肥料费 Fertilizer cost	48 000.00		3 000.00	
		农药费 Pesticide cost	12 000.00		750.00	
		抚育费 Fostering cost	108 000.00		6 750.00	
		果实采收费 Fruit collection cost	24 000.00		1 500.00	
		果实运输费 Fruit transportation cost	16 800.00		1 050.00	

注: 实生栽培模式和高接换头模式的基础数据来自国内某企业实际生产数据。Notes: the values of seeding cultivation pattern and high scion & head-changing pattern come from actual data of a company in China.



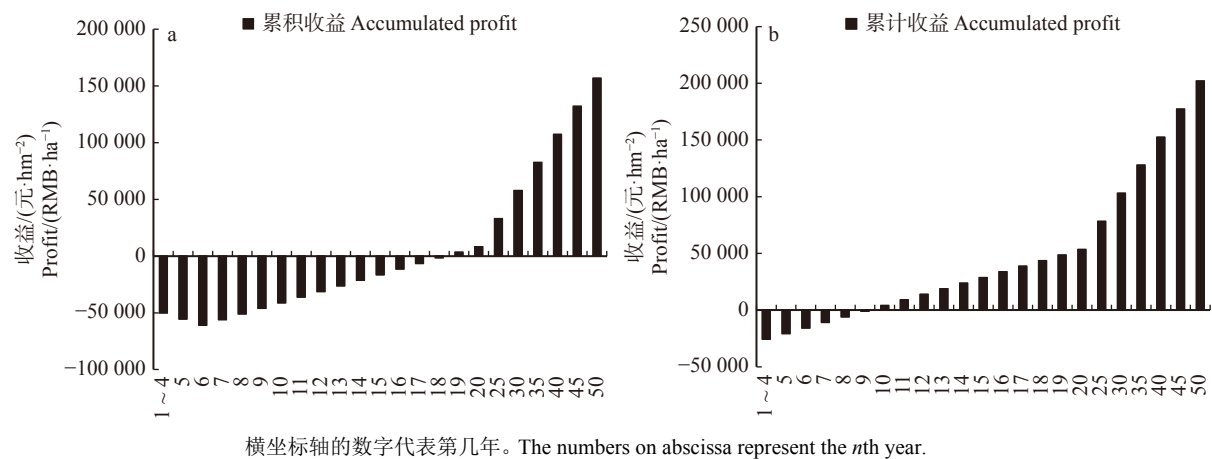


图 1 无患子高接换头模式(a)和无性系栽培模式(b)各年累计收益

Fig. 1 Annual cumulative income of high scion & head-changing pattern (a) and clone's cultivation mode (b)

的 0.3%; 倘若原料供应不足, 随着原料价格的上涨, 企业仅生产油脂类产品就会出现亏损的局面。这里还未计算生产后的原料废渣处理成本, 否则即便皂苷型企业, 利润空间也有限。

### 2.3.2 多联产产业链经济效益

以 1 t 无患子干果为单位, 约可分离 500 kg 的果皮, 200 kg 种仁和 300 kg 种壳, 果皮通过粉碎、提取、过滤、离心制取皂苷, 最终制作手工皂等产品; 种子破碎、筛分后分成种壳和种仁, 种壳经碳化生产种壳活性炭; 种仁生产生物燃油、甘油, 渣饼制成蛋白饼饲料(表 5)<sup>[18-20]</sup>。若建成完整的多联产产品生产线(皂苷、手工皂、活性炭、生物柴油、植物蛋白饲料等), 以年处理 5 000 t 干果测算, 无患子多联产产业链产值为 15 904 万元, 按毛利率 35% 计算, 净收益为 5 566.4 万元/a, 相当于 1 t 干果净收益 11 132.8 元(表 6)。

表 5 无患子深加工产品组成

Tab. 5 Products of soapberry by deep processing

干果 Dried fruit	组成 Composition	主要产品 Main product
干果 Dried fruit (1 000 kg)	果皮 Peel (500 kg)	40%皂苷液(约150 kg)或手工皂产品(850 kg) 40% saponin solution (150 kg) or handmade soap (850 kg)
	种仁 Seed kernel (200 kg)	生物柴油(约80 kg) Biodiesel (80 kg)
		甘油(约8 kg) Glycerol (8 kg)
		蛋白饼饲料(约120 kg) Protein cake (120 kg)
	种壳 Seed shell (300 kg)	活性炭(约45 kg) Activated carbon (45 kg)

### 2.3.3 多联产产业链可持续发展模式

由以上原料林不同培育模式和不同生产模式的经济效益分析可知: 只有形成多联产产业链, 加强综

合加工利用, 提高原料利用率, 才能最大限度地提高产业经济效益, 减少原料消耗量, 减轻土地负担和资源压力。因此, 林业生物质能源“林油一体化”产业应构建多联产产业链可持续发展模式。以无患子为例, 模式包括无性系种植园原料培育、生物燃油联产、生物皂苷生产、种壳活性炭等高值化副产品生产、热气电联产和环境综合处理系统, 各系统相互衔接, 实现多联产(图 2)。

无性系种植园原料培育系统前文已述。无患子果皮生产生物皂苷及相关产品、种仁生产生物柴油及相关产品、种壳生产高级活性炭等。种壳生产高级活性炭采用南京林业大学开发的国际先进的热气电肥联产技术, 其生产的电能可用于整个产业链的部分电能消耗。此外, 种仁、果皮加工剩余物可生产蛋白粕及生物有机肥, 用作饲料及原料林施肥。多联产可实现无患子果实的无损利用, 最大程度地降低能耗和生产成本, 提高产品附加值, 提升环境、社会及经济效益, 实现产业可持续发展。如果产业链中将无患子园林绿化苗木产业加入, 更将提升产业链的效益。

### 2.4 产业扶持政策建议

针对产业扶持政策的建议主要包括以下 4 个方面: (1) 享受普惠财政补贴政策。使林业生物质能源“林油一体化”企业在营造、经营与抚育原料林时优先享受国家普惠财政补贴政策, 造林补贴标准可暂定为 3 000 ~ 9 000 元/hm<sup>2</sup>, 抚育经营补贴可暂定为 3 000 元/hm<sup>2</sup>。(2) 享受国家种业和良种优惠政策。各经营主体建立的林业生物质能源原料树种良种基地及种质资源库享受国家种业和良种优惠政策。此外, 政府可对达到一定规模, 具有优质种质资源的企业进行林木良种苗木培育补助。(3) 享受财税优惠政策。让生物质能产业与太阳能、风能等非化石能源一样享受财税优惠政策。(4) 强制石化柴油中配比生

表 6 无患子深加工体系产品产值估算表

Tab. 6 Output value of products in the deep processing system of soapberry			
名称 Name	市场平均价格/(万元·t <sup>-1</sup> ) Average market price/(10 <sup>4</sup> RMB·t <sup>-1</sup> )	产量 Output/t	产值/万元 Value/10 <sup>4</sup> RMB
无患子果实(干果) Dried fruit		5 000	/
一、果核 Core	/	2 500	/
1. 种仁 Seed kernel	/	1 500	/
① 无患子毛油 Soapberry oil	/	600	/
② 无患子生物柴油 Soapberry biodiesel	0.73	540	394.2
2. 种壳 Seed shell	/	2 500	/
二、无患子果皮 Peel	/	1 250	/
1. 皂苷液 Saponin solution	/	875	/
2. 皂苷粉 Saponin powder	30	89	2.655
三、无患子活性炭 Activated carbon	1.25	500	625
四、无患子蛋白饼 Protein cake	0.25	600	150
五、无患子有机肥 Organic fertilizer	0.08	1 000	80
六、无患子手工皂 Handmade soap	/	1 000	12 000
合计 Total	/	/	15 904

注: 各产品产量按年处理5 000 t干果测算; 皂苷液、皂苷粉及手工皂产值来源于企业实际生产和销售数据, 其他产品产值数据来源于企业可行性研究报告和市场平均数据; “/”表示本表中产品产值估算不以该项作为主产品。Notes: the output of products is estimated by processing 5 000 t of dried fruit per year; the value of saponin products comes from the actual data of companies. The value of other products comes from the report of feasibility study and the average data of market; “/” means that estimation of value does not take this item as the main products.

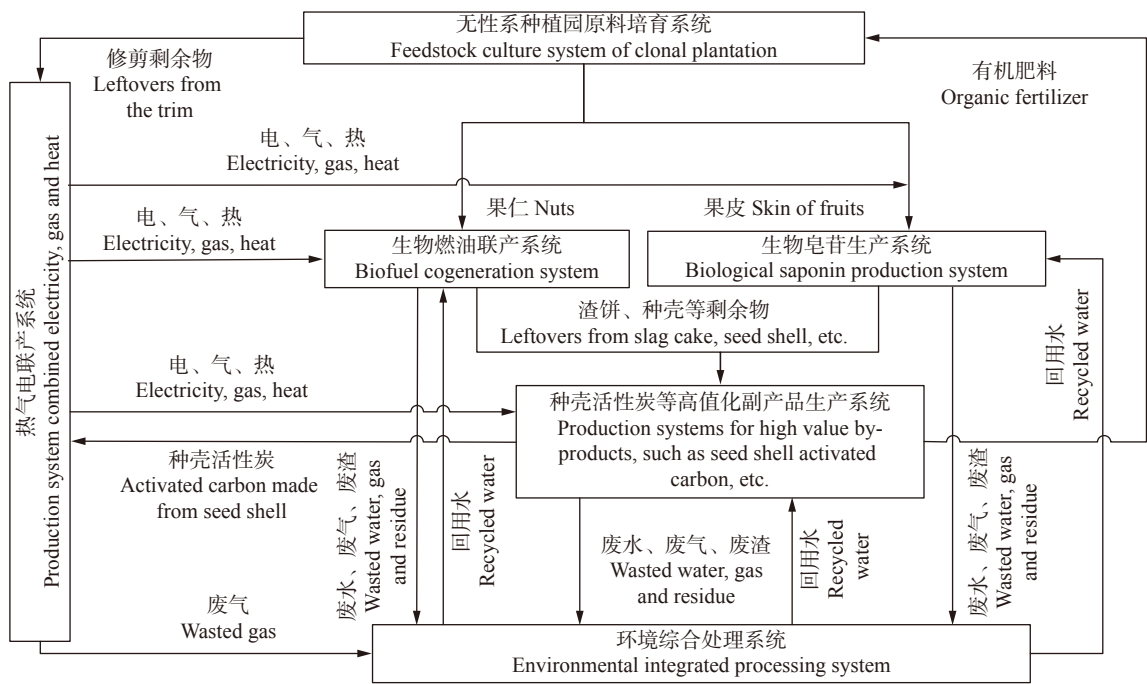


图 2 无患子“林油一体化”多联产产业链模式

Fig. 2 Pattern of poly-generation industry chain of soapberry

物柴油。为保障生物柴油的销路, 建议政府部门借鉴国际经验, 采取区域封闭运行试点示范, 强制要求石化柴油中配比生物柴油, 使产品有明确的销售渠道。例如: 要求在石化柴油中添加 5% 的生物柴油, 混配后的柴油需符合行业标准, 由加油站公开销售。

3 结论与展望

(1)我国“林油一体化”产业已形成了一定数量规模化培育的原料林, 拥有一系列具有自主知识产权的生物柴油及其他生物燃油的生产工艺; 以无患子为例, 生产 1 t 无患子生物柴油, 原料林固定

CO<sub>2</sub> 量 25.38 t; 产业链全生命周期 CO<sub>2eq</sub> 排放量为 -19.41 t/t, 与石化柴油(3.72 t/t)相比, 减排量达 621.77%。

(2)以 20 年为项目周期, 按 2017 年的收购单价 4 元/kg 计算, 无患子原料林实生栽培模式下企业约亏损 1 687.68 元/(hm<sup>2</sup>·a); 若形成无性系栽培模式, 在第 10 年即可收回成本, 年均利润为 2 675.55 元/(hm<sup>2</sup>·a); 以 2019 年的平均市场价格 9 元/kg 计算, 则在第 5 年即可收回成本, 年均利润为 20 675 元/(hm<sup>2</sup>·a)。1 t 无患子干果生产生物柴油平均盈利 18.65 元, 生产皂苷类产品平均盈利 6 573.3 元; 若形成油-皂-碳-林多联产产业链, 年处理 5 000 t 干果的净收益为 5 566.4 万元, 相当于 1 t 无患子干果净收益为 11 132.8 元。

(3)“优良无性系种植园模式+多联产产业链模式”是未来产业高效可持续发展的理想模式, 可有效实现产业自养。为进一步促进产业的可持续发展, 需要政策的有力推动。建议政府出台相关政策保障产业优先享受营造林普惠财政补贴政策、国家种业和良种优惠政策、财税优惠政策, 并强制石化柴油中配比生物柴油, 拓宽生物柴油的推广应用渠道。

(4)本文基于产业现状研究, 以无患子为例, 从理论和实践上测算了不同栽培模式的原料林及不同产业链模式的经济效益, 形成了理想的产业发展模式。其他油料能源林树种也都有不同的多联产产业链路径, 可以研究探寻各自的可持续发展路径。尽管该模式距离在生产上真正实现还需要很长的一段时间, 但其为我国乃至世界林业生物质能源“林油一体化”产业发展提供了一条优化路径, 值得大力推进。

**致谢** 国家林业和草原局生态保护修复司吴坚先生、黄正秋先生、王晓华女士、彭继平先生; 福建源华林业生物科技有限公司、福建省源容生物科技有限公司、中国科学院过程工程研究所、新木生物科技有限公司、云南神宇新能源有限公司、北京纽斯德特技术有限公司。

### 参 考 文 献

- [1] 钱能志, 费世民, 韩志群. 中国林业生物柴油 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.  
Qian N Z, Fei S M, Han Z Q. China forestry biodiesel[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007.
- [2] 吴伟光. 我国西南地区生物柴油原料麻疯树发展潜力研究 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.  
Wu W G. Assessment of the potential on *Jatropha curcas* L. as the biodiesel feedstock in Southwest China[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [3] Datta A, Mandal B K. Use of *Jatropha* biodiesel as a future sustainable fuel[J]. Energy Technology & Policy, 2014, 1(1): 8-14.
- [4] USDA. Indonesia biofuels annual 2016 [R/OL]. 2016 [2019-10-11]. <https://www.fas.usda.gov/data/indonesia-biofuels-annual-0>.
- [5] Jayed M H, Masjuki H H, Saidur R, et al. Environmental aspects and challenges of oilseed produced biodiesel in Southeast Asia[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(9): 2452-2462.
- [6] Yang C Y, Fang Z, Li B, et al. Review and prospects of *Jatropha* biodiesel industry in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2178-2190.
- [7] Yang J, Dai G H, Ma L Y, et al. Forest-based bioenergy in China: status, opportunities, and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 478-485.
- [8] Graham V M, Alexandros G, Christo F. The rise, fall and potential resilience benefits of *jatropha* in southern Africa[J]. Sustainability, 2014, 6(6): 3615-2643.
- [9] Wang Z X, Calderon M M, Lu Y. Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *Jatropha curcas* L. biodiesel in China[J]. Biomass & Bioenergy, 2011, 35(7): 2893-2902.
- [10] Silalertruksa T, Sebastien B, Gheewala S H, et al. Life cycle costing and externalities of palm oil biodiesel in Thailand[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 28: 225-232.
- [11] Navarro-Pineda F S, Donny V P, Sacramento-Rivero J C, et al. An economic model for estimating the viability of biodiesel production from *Jatropha curcas* L.[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2017, 92(5): 971-980.
- [12] Deng X Z, Han J Z, Yin F. Net energy, CO<sub>2</sub> emission and land-based cost-benefit analyses of *Jatropha* biodiesel: a case study of the Panzhihua region of Sichuan province in China[J]. Energies, 2012, 5(7): 2150-2164.
- [13] Henny R, Sanne H, Jouke R C, et al. Economic and social sustainability performance of *jatropha* projects: results from field surveys in Mozambique, Tanzania and Mali[J]. Sustainability, 2014, 6(9): 6203-6235.
- [14] 李昌珠, 李培旺, 肖志红, 等. 我国木本生物柴油原料研发现状及产业化前景[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 165-170.  
Li C Z, Li P W, Xiao Z H, et al. Current progress in research and development of woody biodiesel oil feedstock and its industrialization prospect in China[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 165-170.
- [15] 敖妍, 段劼, 于海燕, 等. 文冠果研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 197-203.  
Ao Y, Duan J, Yu H Y, et al. Research progress on *Xanthoceras sorbifolia* Bunge[J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 197-203.
- [16] 贾黎明, 孙操稳. 生物柴油树种无患子研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(6): 191-196.  
Jia L M, Sun C W. Research progress of biodiesel tree *Sapindus mukorossi* [J]. Journal of China Agricultural University, 2012, 17(6): 191-196.
- [17] 刘济铭, 孙操稳, 何秋阳, 等. 国内外无患子属种质资源研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(6): 12-18.

- Liu J M, Sun C W, He Q Y, et al. Research progress in *Sapindus* L. germplasm resources[J]. *World Forestry Research*, 2017, 30(6): 12–18.
- [18] Hou J, Zhan P D, Yuan X Z, et al. Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15: 5081–5091.
- [19] 邢爱华, 马捷, 张英皓, 等. 生物柴油环境影响的全生命周期评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(6): 917–922.
- Xing A H, Ma J, Zhang Y H, et al. Life cycle assessment of biodiesel environmental effects[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(6): 917–922.
- [20] Jiao J L, Li J J, Bai Y. Uncertainty analysis in the life cycle assessment of cassava ethanol in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 206: 438–451.
- [21] 刘济铭, 陈仲, 孙操稳, 等. 无患子属种质资源种实性状变异及综合评价[J]. *林业科学*, 2019, 55(6): 44–54.
- Liu J M, Chen Z, Sun C W, et al. Variation in fruit and seed properties and comprehensive assessment of germplasm resources of the genus *Sapindus*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, 55(6): 44–54.
- [22] Ou X M, Zhang X L, Chang S Y, et al. Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China[J]. *Applied Energy*, 2009, 86: 197–208.
- [23] 张玉星. 果树栽培学总论 (第四版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011.
- Zhang Y X. General introduction of fruit tree cultivation (Fourth Edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2011.
- [24] 福建源华林业生物科技有限公司, 贾黎明. 一种无患子人工杂交授粉方法: 中国, CN105613278A[P]. 2016.06.01.
- Fujian Yuanhua Forestry Biotechnology Co., Ltd, Jia L M. A method of artificial hybridizing pollination methods on soapberry: China, CN105613278A[P]. 2016.06.01.
- [25] 高媛, 贾黎明, 高世轮, 等. 无患子树体合理光环境及高光效调控[J]. *林业科学*, 2016, 52(11): 29–38.
- Gao Y, Jia L M, Gao S L, et al. Reasonable canopy light intensity and high light efficiency regulation of *Sapindus mukorossi*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(11): 29–38.
- [26] 卫星杓, 戴腾飞, 刘诗琦, 等. 施肥对无患子叶片养分动态及产量的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(5): 17–24.
- Wei X B, Dai T F, Liu S Q, et al. Effects of formula fertilization on leaf nutrient dynamics and yield of *Sapindus mukorossi* Gaertn.[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2018, 42(5): 17–24.
- [27] 姜翠翠, 卢新坤, 叶新福. 建宁县无患子病虫害调查初报[J]. *东南园艺*, 2017(6): 17–21.
- Jiang C C, Lu X K, Ye X F. Preliminary report of diseases and pest insects on *Sapindus mukorossi* in Jianning County[J]. *Southeast Horticulture*, 2017(6): 17–21.
- [28] 罗会生. 无患子病虫害防治[J]. *中国花卉园艺*, 2016(2): 48–50.
- Luo H S. Disease and pest insects control on *Sapindus mukorossi*[J]. *China Flower & Horticulture*, 2016(2): 48–50.
- (责任编辑 范娟  
责任编辑 张建国)