

盐肤木生物质炼制工程

王岚, 王宁, 李坦, 陈洪章

中国科学院过程工程研究所 生物质炼制工程北京市重点实验室, 北京 100190

王岚, 王宁, 李坦, 等. 盐肤木生物质炼制工程. 生物工程学报, 2014, 30(5): 695-706.

Wang L, Wang N, Li T, et al. Sumac (*Rhus chinensis* Mill) biomass refinery engineering. Chin J Biotech, 2014, 30(5): 695-706.

摘要: 盐肤木为我国乡土植物, 分布范围广, 资源量丰富。盐肤木果实含有油脂, 但含油量低, 因此盐肤木是一种非典型油料植物, 不能单独作为油料植物进行产业化开发。作者根据多年对盐肤木果实和枝桠梢头物料特性的研究, 提出了以蒸汽爆破为核心技术的盐肤木生物质炼制新模式, 提取的盐肤木果油申请了国家卫生部新资源食品并获得了新资源食品许可批文。以盐肤木资源为原材料, 以蒸汽爆破技术为依托, 集成不同组分分离技术, 各组分分别进行功能转化, 形成了盐肤木果油、生物柴油、蛋白饲料、黄酮、本色面巾纸、酚醛树脂、生物质成型燃料、沼气八大产品的盐肤木生物质炼制技术体系和生态产业链集成, 为自然界中非单一经济型野生植物资源的开发提供了新的模式。

关键词: 盐肤木, 蒸汽爆破, 生物质炼制

Sumac (*Rhus chinensis* Mill) biomass refinery engineering

Lan Wang, Ning Wang, Tan Li, and Hongzhang Chen

Beijing Key Laboratory of Biomass Refining Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Sumac (*Rhus chinensis* Mill) is an abundant and widely distributed Chinese native plant. Sumac fruit contains low content of vegetable oil, as an atypical oil plants hardly being processed through traditional vegetable oil production

Received: January 25, 2014; **Accepted:** April 22, 2014

Supported by: Special Funds of the Science and Technology Innovation Base for Beijing Key Laboratory of Biomass Refining Engineering (No. Z13111000280000), National Natural Science Foundation of China (No. 21206176), National Basic Research and Development Program of China (973 Program) (No. 2011CB707401).

Corresponding author: Hongzhang Chen. Tel: +86-10-82544982; Fax: +86-10-82627071; E-mail: hzchen@home.ipe.ac.cn

生物质炼制工程北京市重点实验室 2013 年度科技创新基地培育与发展工程专项项目 (No. Z13111000280000), 国家自然科学基金项目 (No. 21206176), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (No. 2011CB707401) 资助。

网络出版时间: 2014-04-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13345/j.cjb.140058.html>

technologies. Based on our own studies on the characteristics of sumac fruit and branches, we established a novel model of sumac biomass refinery, and constructed the sumac biomass refinery technology system and eco-industrial chain integration. Steam explosion was the key technology, and several components fractionation technologies were integrated in the sumac biomass refinery system. The fractionated components were converted into different products depending on their functional features. Eight products including sumac fruit oil, biodiesel, protein feed, flavonoids, unbleached facial tissue, phenolic resin, biomass briquette and biogas were produced in the refinery. The extracted sumac fruit oil by steam explosion pretreatment was applied for the new food resource of Ministry of Health, and the permit was approved. This research provides a new model for the development of atypical wild plant resources.

Keywords: *Rhus chinensis* Mill, steam explosion, biomass refinery

自然界植物种类繁多，功能多样，可用于食品、医药、能源、建筑、材料、化工等领域，为人类的生存和发展提供了物质基础。然而被人类开发利用的却很少，主要是一些单一功能性植物，如粮食作物、油料植物、糖类作物、药用植物、纤维类植物、特殊功能植物（如漆树、橡胶树等）等。实际上，很多植物资源具有多种功能，如药食兼用植物，然而功能特性往往并不突出，造成这类植物资源很难被产业化开发利用。在自然界中，这样的“非典型经济作物”种类繁多，资源丰富，蕴藏着极大的应用潜能，如能科学开发、合理利用，则会产生巨大的经济效益和社会效益，尤其有利于一些偏远贫困地区难以依靠种植传统经济作物过活的农民，可以依靠当地的地理情况合理开发野生植物资源，摆脱贫困，增产增收。

我国林业生物质资源丰富，林业经济种类多，除拥有大量开发利用的能源树种和经济树种，还存在种类繁多但尚未充分利用的能源林以及大量林业生产剩余物。木本油料植物是林业经济的重要组成部分。我国已查明的油料植物中，种子含油量40%以上的植物有150多种，能够规模化培育的乔灌木树种有30多种，如油棕、无患子、小桐子等^[1]。但自然界的大部分野

生种子植物，含油量都低于上述典型油料植物，这类植物种类多、数量大，为非典型油料植物，盐肤木是其中的代表之一。盐肤木通常生长在非农业区，因其不与粮争地，故具有很高的商业开发价值。

盐肤木叶片上形成的五倍子是医药、冶金、石油、鞣革、食品、染料等工业的重要原料，一直以来，五倍子是盐肤木资源开发利用的主要创收点，因此，目前人们对盐肤木的研究主要在于如何改进其栽培技术，提高五倍子的产量^[2]。除此之外国内有关盐肤木的研究报道还主要集中在对盐肤木生物学特性、五倍子培育、野生林的改造、种子育苗、栽培以及病虫害防治等方面的研究，开发利用方面的报道较少，仅有将其根、茎、叶、花、果用作传统中医的临床用药；或将其作为野生食用蔬菜、饲料及绿肥。

由于盐肤木为非典型油料植物，各功能特性均不突出，因此目前尚未形成规模化、规范化、集约化的专用经济林基地。本文根据作者多年对盐肤木果实和枝桠梢头物料特性的研究，提出了以蒸汽爆破为核心技术的盐肤木生物质炼制新模式，为自然界中非单一经济型野生植物资源的开发提供了新的模式。

1 盐肤木资源介绍

1.1 盐肤木资源

盐肤木 (*Rhus chinensis* Mill) 又称盐肤子、五倍子树, 为漆树科盐肤木属落叶小乔木, 高 2–10 m。盐肤木为中国本土植物, 俗称中国漆树^[3]。盐肤木根系发达, 耐干旱瘠薄, 适生范围广, 生长势旺, 固碳能力强, 生态效益显著。全国除内蒙古、青海、新疆和东北北部外, 均有分布。垂直分布在海拔 2 700 m 以下的荒山野地、丘陵山坡以及溪涧深谷两旁等地^[4]。同时, 盐肤木林生产周期短, 生产效率高, 10 000 m² 盐肤木人工种植基地每年可生产盐肤木果实 4.5 t, 盐肤木抚育剩余物 15 t。

盐肤木作为木本油料植物, 是我国能够规模化培育的 30 多种乔灌木树种之一, 同时也是我国提倡可以作为能源林基地建设的油料能源树种^[1]。

1.2 盐肤木开发利用现状

盐肤木对土壤适应性强, 在酸性、中性、石灰性及瘠薄干燥的沙砾地上都能生长, 生长快、耐干旱瘠薄、根孽力强, 是重要的造林及园林绿化树种, 可用于盐碱地造林绿化, 也可开发为裸露坡面生态修复的乡土护坡植物^[5-7]。

盐肤木是中国传统药用植物^[8-9], 其根、茎、叶、果实及五倍子均可入药, 民间用于治疗感

冒、发烧、疟疾等^[3,10-12]。寄生在盐肤木上的五倍子主要成分为五倍子单宁^[13], 具有敛肺、降火、涩肠、止血等作用^[4]。盐肤木除具有药用价值外, 还具有经济价值, 五倍子作为重要的工业原料, 广泛应用于医药、化工、印染、冶金等行业, 国内外市场需求量巨大。

2 盐肤木生物质炼制工程关键问题

2.1 盐肤木果实

盐肤木果实为核果, 近扁圆形, 直径 3–4 mm, 果实千粒重 12 g 左右, 外包果皮, 内含种子 1 枚。外果皮和中果皮合为果肉, 薄而软, 易剥落; 内果皮高度木质化成为果核, 坚韧致密, 果肉、内果皮和种子三者所占果实的重量百分比和化学成分差异显著 (表 1)。

盐肤木果实含油量为 15%–30%, 其全成分分析如表 2 所示, 盐肤木果油主要含有棕榈酸、硬脂酸、亚油酸、油酸和亚麻酸 5 种脂肪酸类型, 不饱和脂肪酸含量超过 85% 以上。其中亚油酸含量较高, 高达 69%, 亚油酸是公认的能够促进人体健康的有益脂肪酸。因此盐肤木果油是一种优质的食用油, 对于现在越来越崇尚健康生活的人们来讲, 盐肤木果油可以作为一种新的理想的食用油。盐肤木果油是从盐肤木果实中分离的油脂产品, 是一种新的、野生的、优质的食用油脂资源, 经卫生部主持的新资源

表 1 盐肤木果实的主要化学成分 (%)

Table 1 Main chemical constituents of sumac fruit (%)

Composition	Proportion	Oil	Protein	Lignocellulose	Flavonoids	Ash	Others
Fruit	100.00	17.30	8.34	54.23	1.85	3.20	15.08
Pulp	37.78	19.70	12.99	34.62	1.39	4.85	26.45
Endocarp	43.87	10.74	4.21	74.29	2.94	1.11	6.71
Seed	18.35	26.01	29.11	10.80	0.55	5.32	28.21

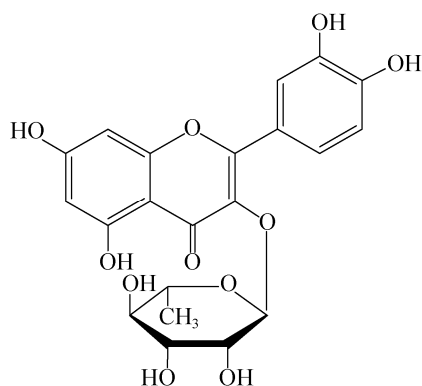
表 2 盐肤木果油全成分分析表

Table 2 Sumac fruit oil ingredients analysis

Index	Result	Index	Result
Refractive index	1.465	Linoleic (%)	69.3
Relative density	0.916 4	Linolenic (%)	3.2
Iodine value (g I/100 g oil)	100.00	Arachidonic acid (%)	0.3
Saponification value (mg KOH/g oil)	195.00	Eicosanoids (%)	0.3
Unsaponifiables (%)	3.12	Heptadec acid (%)	0.1
Palmitic acid (%)	11.4	Behenate (%)	0.1
Palmitelaidic Acid (%)	0.1	Cardamom acid (%)	0.1
Stearic (%)	2.2	Tetracosenic acid (%)	0.1
Oleic (%)	13.1	Tetracosenoic acid (%)	0.2

食品认证, 盐肤木果油经毒理学、卫生学、急性毒性试验、三项遗传性试验等安全性检验全部符合食用油标准。目前盐肤木果油已获得了卫生部的新资源食品许可批文 (批号: 卫食新准字 [2012] 第 0016 号)。

盐肤木种子的蛋白质含量较高, 为 29.11%。此外, 盐肤木果实富含天然活性物质——黄酮类化合物 (槲皮素-3-O-鼠李糖苷, 其分子结构如图 1 所示), 每 100 g 盐肤木果实含有黄酮 1.85 g 左右, 它具有非常广泛的生理和药理活性, 目前在食品、保健、医疗、化妆品等领域用途广泛。

图 1 槲皮苷 (槲皮素-3-O-鼠李糖苷) 的分子结构图^[14]Fig. 1 Molecular structure of quercitrin (Quercetin-3-rhamnosid)^[14].

盐肤木果实富含油脂、粗蛋白以及黄酮类化合物, 可以对盐肤木果实进行开发, 提取其中的油脂、蛋白质和黄酮类化合物等, 因此盐肤木果实具有巨大的开发价值。

2.2 盐肤木抚育剩余物

盐肤木在种植过程中为了控制盐肤木株型, 需要对盐肤木进行修剪; 同时, 盐肤木分蘖能力强, 每年会产生大量的盐肤木修剪枝条和根系萌发茎, 盐肤木抚育剩余物即盐肤木枝桠梢头和根系萌发茎, 为木质纤维素资源。

2.3 盐肤木资源综合利用

2.3.1 盐肤木果实综合利用

盐肤木每年产生大量果实, 其中蕴含丰富的油脂和天然活性物质, 与单一型经济作物如油料植物、糖类植物、药用植物、茶林等相比, 盐肤木同自然界中大部分植物一样, 并没有一个非常突出的开发价值: 其果实含油量相比其他油料作物为低, 虽含有具药用价值的黄酮类却也不足以单独用于黄酮提取。盐肤木果实出油率在 20% 左右, 尚有 70% 的剩余物, 作为饼粕利用似乎是森林资源的一种浪费。因此, 仅提取某一种成分不但会造成资源浪费也不能获得较好的经济效益, 这也是盐肤木这么多年来

一直自生自灭,未能得到开发利用的主要原因。因此,以盐肤木果实为原料,采取分级分层利用,建立生态产业开发模式,是提高盐肤木果实的综合利用价值的有效途径。

2.3.2 盐肤木抚育剩余物综合利用

盐肤木根系萌发性特别强,人工栽培控制株型的修剪和根系萌发茎,一年可得到 1 t 左右的抚育剩余物(枝丫和根发株)。林业废弃资源是生物质资源的重要部分,林业废弃资源如得不到合理的利用,废弃在林地中自然分解,在能源形势已经很严峻的今天,是一种巨大的浪费。目前对林业废弃物的开发利用有限,具有很大的开发利用空间。因此有必要对这些生物质资源进行科学利用,提高林地生产力。

3 盐肤木资源炼制关键技术

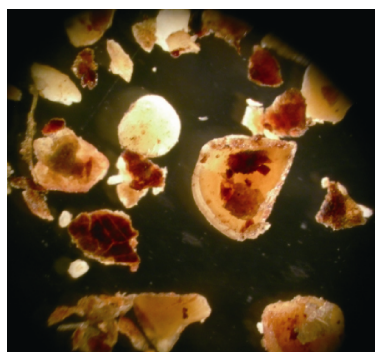
3.1 盐肤木果实汽爆处理提取油脂

对盐肤木果实来说,油脂和黄酮等被包围在微小的果实细胞里,而细胞又深深地包围在纤维结构中,不易提取出来。同时,富含油脂的种子外面包裹着坚韧厚实的果核(内果皮木质化而成),因此,在提取油脂和黄酮之前必须将果实破碎以破坏细胞,释放出油脂和黄酮。

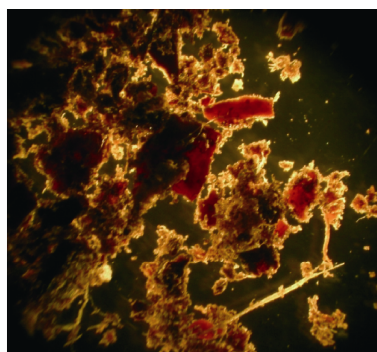
传统方法一般采用机械粉碎对物料进行破碎处理,但由于盐肤木果核韧性较强,对于外力的作用有很大的抵抗力,因此机械处理对果实细胞的破坏程度有限。而且,机械粉碎程度较大时,果实物料容易粘连成团成块,反而不利于溶剂浸入,影响提取效果,此外也会增加设备磨损折旧。

蒸汽爆破技术近年来广泛应用于木质纤维素原料处理领域,在物料的粉碎破壁预处理方面效果显著^[15]。物料在汽爆罐内与饱和水蒸汽混合并维持短时间的高温高压,然后突然减压释放,产生的破坏力能够达到良好的粉碎效果^[16]。

针对盐肤木果实籽粒小且含有坚硬的果核的特点,采用汽爆这种能有效破坏植物细胞壁结构的技术对原料进行处理,建立盐肤木汽爆处理提取油脂技术。利用蒸汽爆破对盐肤木果实进行预处理,物料在汽爆罐内和饱和水蒸汽混合并维持短时间的高温高压,然后突然减压释放,产生的破坏力能够达到良好的粉碎破壁效果,而且同时实现粉碎和湿热处理,简化了工艺。经过蒸汽爆破预处理的盐肤木种子细胞破坏彻底,料坯呈薄片状,多孔性增加(图 2)。对蒸汽爆破的料坯进行溶剂浸提制油,溶剂的



Milled ($\times 20$)



Steam exploded ($\times 20$)

图 2 机械粉碎和汽爆 (1.5 MPa/5 min) 盐肤木果实的对比照片^[16]

Fig. 2 Pictures of sumac fruits treated by milling and steam explosion (1.5 MPa/5 min)^[16].

渗透作用得以加速进行, 萃取效率提高, 浸出时间缩短, 粕中残油降低。通过条件优化, 当汽爆预处理条件为 1.5 MPa/5 min 时油脂提取率最高, 在 100 min 时提取率达到 92%, 比未处理原料和粉碎料分别高 443%和 21%。

另外, 通过油脂理化性质分析以及化学组成分析, 与未处理的盐肤木果油相比, 蒸汽爆破处理降低了盐肤木果油的酸值, 提高了盐肤木果油的碘值。同时, 油脂中的中性油含量和不饱和脂肪酸含量也得到了提高。因此, 蒸汽爆破处理, 有利于提高油脂的品质^[17]。

引入汽爆技术于油脂加工, 整合了油脂制取工业中油籽粉碎与湿热处理 2 个过程, 克服了传统油料预处理中粉碎轧坯、湿熟蒸炒等复杂繁琐、耗能耗时的弊端, 建立新型、高效、清洁的油料处理技术工艺。

3.2 汽爆盐肤木果实油脂加工剩余物的综合利用

3.2.1 汽爆盐肤木果实油粕制备蛋白饲料

如表 1 所示, 盐肤木种子的蛋白质含量较高, 为 29.11%, 提取油脂后种子粕的蛋白质含量高达 38.27%, 可用于生产高蛋白饲料。但果核高度木质化, 坚硬致密, 蛋白质含量低, 仅为 4.21%, 严重影响了盐肤木种子油粕的饲用价值。由于果核与种子的机械力学性能不同, 因此汽爆对果核与种子的破碎效果具有显著差异, 果核破裂, 粒径大; 种子破碎, 粒径小。因此可以根据爆破后的物料颗粒大小经振动筛筛分, 实现果核与种子的分离, 汽爆提油后的盐肤木种子作为蛋白饲料。由于汽爆集粉碎、膨化、软化为一体, 所以经过了前面的汽爆工序, 蛋白质的粒径中 90%已经降低至 1 mm 以下, 对于传统的饲料加工行业, 本工艺省去了

粉碎步骤, 降低了能耗。

3.2.2 汽爆盐肤木果实油粕提取黄酮类化合物

盐肤木果核黄酮含量高, 汽爆后的盐肤木果核可用来提取黄酮。传统的黄酮提取工艺采取溶剂提取, 通常需要 2-3 h 或更长的时间, 而长时间高温提取过程容易造成黄酮降解^[18], 因此, 有必要提高黄酮提取效率, 缩短提取时间, 以减少提取过程中的黄酮损失。经过蒸汽爆破预处理的盐肤木种子细胞破坏彻底, 料坯呈薄片状, 多孔性增加, 相比粉碎提油粕来说, 从汽爆提油粕中提取黄酮更容易, 提取效率高, 时间短。通过单因素实验优化了汽爆盐肤木果实黄酮提取条件, 最佳条件为: 以液固比 20 的 70%乙醇, 在 80 °C 提取 2 次, 每次 20 min, 在此条件下总黄酮提取率达到 95%。该工艺方法相比传统方法缩短了提取时间, 有利于减少溶剂用量, 降低能耗, 提高生产效率^[14]。

盐肤木果实中的黄酮以槲皮苷的形式存在。蒸汽爆破具有脱糖苷作用, 通过蒸汽爆破处理, 可以在 3-5 min 内将槲皮苷转化为槲皮素, 1.5 MPa 处理 5 min 转化率为 84.51%, 且无需添加任何酸碱化学品或酶类, 而传统槲皮素生产方式仍以槲皮苷的酸水解为主, 整个水解过程需要 0.5-2.0 h。因此蒸汽爆破技术对脱糖苷过程简单而高效, 实现了盐肤木果实制备槲皮素的清洁生产^[14]。

3.2.3 汽爆盐肤木果实油粕制备生物质成型燃料

能源问题关乎国家的发展命脉, 生物质能源为我国战略性新兴产业。汽爆盐肤木果实油粕经筛分处理得到的富含果核部分进行压缩处理制备生物质成型燃料, 符合我国对生物质能源的战略要求。

剩余物经实验分析, 粒径主要分布在 0.25–0.8 mm 之间, 基于这种原料的特性, 在压缩过程中不需要进行粉碎处理。采用非预热热压成型工艺, 该工艺的特点是, 只在原料成型的部位加热, 原料进入压缩结构前不进行加热。具体工艺流程为: 1) 风干处理: 保持含水量在 40% 以下; 2) 加压成型: 将原料置于压缩机中, 控制转速在 90–160 r/min; 3) 成型后的颗粒状物进行冷却包装。

对制备的汽爆盐肤木果实油粕成型燃料进行热值分析, 如表 3 所示。

与其他几种生物质秸秆的热值分析进行比较发现, 盐肤木果油剩余物的灰分含量最低; 盐肤木果油剩余物的挥发分在几种燃料中最高, 固定碳含量最低; 在低位热值的比较中, 盐肤木果油剩余物达到了 20.51 MJ/kg, 在几种燃料中最高。

将盐肤木果实油脂提取剩余物(油粕)用于提取盐肤木黄酮, 制备蛋白饲料和生物质成型燃料, 实现盐肤木果实的综合利用和高值转化^[19]。

3.3 汽爆盐肤木抚育剩余物的综合利用

盐肤木抚育剩余物为木质纤维素原料, 木质纤维素在器官、组织水平组织结构不均一, 细胞及化学组成具有显著差异, 作为工业原料时往往仅利用其中某一组织、细胞或成分, 从而造成了其他组织或成分的浪费。因此有必要开发清洁、高效的组分分离技术, 实现不同组分的功能化转化^[20]。

3.3.1 汽爆盐肤木抚育剩余物梳分分离

盐肤木抚育林剩余物为一年生枝条, 此时枝条处于快速生长期, 因此韧皮部发达。韧皮部柔软, 木质素含量低, 纤维细胞细长, 是制浆造纸的优质原料。木质部较韧皮部坚硬, 木质素含量高, 纤维细胞短小。由于韧皮部与木质部的机械力学性能不同, 汽爆后韧皮部与木质部的破碎程度不同, 形态差异显著。韧皮部汽爆后呈纤维状, 而木质部汽爆后呈碎片状。根据韧皮部与木质部汽爆后的形态差异, 利用轴流式机械梳分技术可实现韧皮部与木质部的分离^[21]。

表 3 汽爆盐肤木提油剩余物与其他几种生物质秸秆燃烧热值分析对比表

Table 3 Steam exploded sumac oil extraction residue and several other straw biomass combustion heat value analysis

Fuel type	Industrial analysis component (%)				Elements (%)		Net calorific value (MJ/kg)
	Moisture	Ash	Volatile	Fixed carbon	Hydrogen	Sulfur	
Corn stalks	6.10	4.70	76.00	13.20	6.00	0.11	17.75
Corn cob	4.87	5.93	71.95	17.25	8.00	0.01	17.73
Wheat straw	4.39	8.90	67.36	19.32	6.20	0.07	18.53
Rice straw	3.61	12.20	67.80	16.39	5.30	0.09	17.64
Rice husk	5.62	17.80	62.61	13.95	6.20	0.40	16.02
Weeds	5.43	9.40	68.72	16.40	5.24	0.22	16.20
Pole beans	5.10	3.13	74.56	17.12	5.81	0.11	16.16
Sorghum pole	4.71	8.91	68.90	17.48	6.09	0.01	15.07
Cotton stalks	6.78	3.97	68.54	20.71	5.70	0.22	18.09
Steam exploded sumac oil extraction residue	3.26	2.88	78.18	15.68	6.50	0.14	20.51

3.3.2 汽爆盐肤木抚育剩余物韧皮部半纤维素的分离及沼气发酵

半纤维素为无定形结构、支链多、聚合度低，在预处理过程中很容易被降解^[22]。汽爆气相蒸煮过程中，半纤维素在自催化作用下大部分被降解为可溶性糖类，通过水洗，很容易将半纤维素分离出来。汽爆分离后的韧皮部经过水洗分别得到含有半纤维素降解糖类的水洗液和纤维物料^[23]。水洗液主要为可溶性糖类，可用于沼气发酵。

3.3.3 汽爆盐肤木抚育剩余物韧皮部制备纸浆和木质素基酚醛树脂胶粘剂

纤维物料为优质的纤维原料，用于制浆造纸。汽爆后的纤维物料，结构疏松，有利于溶剂和药品与原料的相互作用，对木质素的提取和纸浆的漂白起到了促进作用^[24]。韧皮部纤维细胞细长，是制浆造纸的优质原料，汽爆盐肤木纸浆性能如表 4 所示。

木质素是植物界中广泛存在的芳香族化合物，含量仅次于纤维素，是一种富有工业价值的有机原料^[25]，工业用木质素主要来源于造纸废液，然而超过 95% 的木质素仍以造纸废水的形式直接排入江河，或浓缩后烧掉，没有得到高效利用，不仅浪费了资源，而且造成了土壤、水体等的严重污染。汽爆碱萃取得到的盐肤木

表 4 盐肤木纸浆性能分析

Table 4 Performance analysis of steam exploded sumac pulp

Index	Unit	Result
Quantitative	g/m ²	39.5
Thickness	μm	130
Tightness	g/cm ³	0.30
Opacity	%	83.6
Tensile strength	kN/m	1.23
Tear	mN	272
Bursting	kPa	70

木质素活性基团增加，分子量变小，可以替代苯酚制备酚醛树脂胶黏剂^[26]。基于此，作者成功开发了利用盐肤木汽爆木质素替代苯酚制备木质素基酚醛树脂胶黏剂，木质素基酚醛树脂胶黏剂技术指标如表 5 所示，游离苯酚和游离甲醛含量明显低于国家标准，胶合强度明显优于国家标准。

3.3.4 汽爆盐肤木抚育剩余物木质部制备生物质成型燃料

如表 6 所示，汽爆枝条木质部与未经汽爆盐肤木枝条相比，灰分增加，挥发分减少，固定碳、高位发热量和低位发热量均呈现增加的趋势，其中低位发热量增加了近 14%，全硫和氢的含量减少。

表 5 木质素基酚醛树脂胶粘剂 (木质素基酚醛树脂胶黏剂替代率 30%)

Table 5 Lignin-based phenolic resin adhesive (lignin-based phenolic resin adhesive replacement rate of 30%)

Products	Solid content (%)	Viscosity (MPa·s)	Free phenol (%)	Free formaldehyde (%)	Bonding strength ^b (MPa)
Sample	45.00	150	2.24	0.199±0.019	1.330±0.073
Standard ^a	35.00	20–300	6.00	0.300	0.700

^aGB/T 14732-2006 《Wood adhesives: urea formaldehyde, phenol formaldehyde and melamine formaldehyde resins》.

^bGB/T 14074-2006 《Testing methods of wood adhesives and their resins》.

表 6 盐肤木枝条与汽爆枝条木质部热值分析比较表

Table 6 Calorific value comparison of sumac branches xylem before and after steam explosion

Index	Sumac branches	Steam exploded sumac branches xylem	Sumac branches	Steam exploded sumac branches xylem	Sumac branches	Steam exploded sumac branches xylem
	Air dry		Dry		Dry ash free	
Moisture (%)	5.05	5.19	—	—	—	—
Ash (%)	1.80	3.09	1.90	3.26	—	—
Volatile (%)	76.51	72.77	80.58	76.75	82.14	79.34
Fixed carbon (%)	16.64	18.95	17.53	19.99	17.86	20.66
Gross calorific value (MJ/kg)	18.25	19.53	19.22	20.60	19.59	21.29
Net calorific value (MJ/kg)	16.09	18.29	—	—	—	—
Sulfur (%)	0.11	0.10	0.12	0.11	0.12	0.11
Hydrogen (%)	5.69	5.44	5.99	5.74	6.11	5.93

4 盐肤木资源汽爆炼制技术产业化开发

根据盐肤木果实和盐肤木抚育剩余物的物料特征和功能特性, 依托盐肤木资源炼制关键技术的突破, 提出了盐肤木资源汽爆炼制技术产业化工艺路线, 如图 3 所示。盐肤木资源汽爆炼制技术克服了盐肤木资源利用的瓶颈, 通过蒸汽爆破耦合分级分离技术, 将盐肤木资源拆分为不同的功能组分, 并对各组分进行了最大功能化转化, 联产食用盐肤木果油、生物柴油、黄酮、本色面巾纸、木质素基酚醛树脂胶粘剂、蛋白饲料、生物质成型燃料和沼气 8 大产品, 产品包含了食品、药品、生物基能源与生物基材料, 实现了盐肤木果实及枝桠梢头的综合利用, 为盐肤木资源的产业化开发提供了技术保障。

该工艺路线具有如下特点:

1) 蒸汽爆碎技术作为一种经济有效的预处理方法, 广泛用于多种原料, 通过高温蒸煮软化物料, 并瞬间减压水蒸汽膨化做功, 能有效

破碎物料。盐肤木油脂制取工业引入蒸汽爆破技术, 整合了传统工艺中的粉碎与湿热处理过程, 建立了新型高效的油料处理技术工艺。汽爆炼制的盐肤木果油的各项指标完全符合国家食用油标准, 并获得了卫生部的新资源食品许可批文(批号: 卫食新准字 [2012] 第 0016 号)。

2) 蒸汽爆破炼制技术用于盐肤木果实处理, 不仅提高了油脂提取率, 还实现了果壳、果仁与活性成分的分层多级转化综合利用。

3) 蒸汽爆破技术耦合梳分分离技术, 实现了盐肤木抚育剩余物长短纤维的分离, 有利于不同组织的最大功能化利用, 避免了传统整体利用方式造成的不同组织之间的相互影响, 提高了产品质量。

4) 传统制浆黑液碱回收技术投资大, 对黑液质量要求高, 木质素得不到有效利用, 木质素制备酚醛树脂胶粘剂技术, 充分利用木质素的芳香环结构, 实现了木质素的高值化利用。

5) 生产过程所需要的能源来自于自身产品中的沼气和生物质成型燃料(发电或直接燃烧), 实现了能源自给并低碳环保。

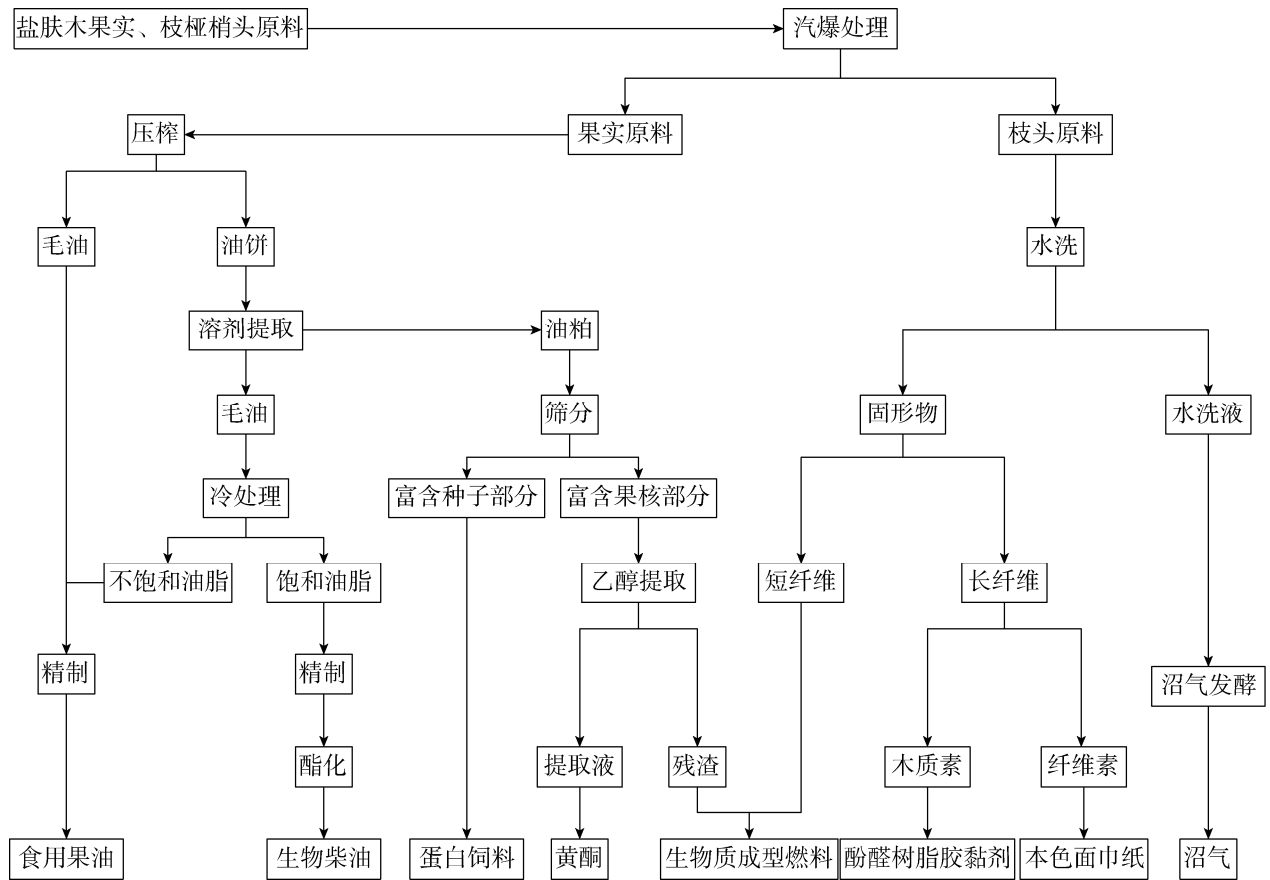


图 3 盐肤木资源汽爆炼制技术工艺流程图

Fig. 3 Sumac steam explosion refinery technology process flow diagram.

5 结论

盐肤木作为一种乡土的非典型油料植物，任何一种单一的开发模式都不能有效地利用盐肤木资源。根据盐肤木果实和盐肤木抚育剩余物的物料特征和功能特性，以蒸汽爆破为核心技术，集成多种组分分离技术，成功构建了盐肤木果实及其抚育剩余物炼制技术体系，开发了盐肤木资源汽爆炼制技术的生态产业链新模式，实现了盐肤木资源的综合开发利用，同时也为自然界中大量的此类非单一经济型野生植物资源的开发提供了新的模式。

REFERENCES

- [1] State Forestry Administration. Development plan the national forestry biomass energy (2011–2020). 2013 (in Chinese).
国家林业局. 全国林业生物质能发展规划 (2011–2020年). 2013.
- [2] Chen CW, Zhang L, He XM, et al. Conventional nutritional components analysis on fruits of *Rhus chinensis* Mill. *Anim Husbandry Feed Sci*, 2010, 31(4): 2–5 (in Chinese).
陈存武, 张莉, 何晓梅, 等. 盐肤木果实常规营养成分分析. *畜牧与饲料科学*, 2010, 31(4): 2–5.

- [3] Wang RR, Gu Q, Yang LM, et al. Research of anti-HIV-1 activities of compounds from the medicinal plant *Rhus chinensis*. Proceedings of Chinese Medical Association to Fight AIDS Branch of the Sixth Annual Conference, 2008 (in Chinese). 王睿睿, 顾琼, 杨柳萌, 等. 药用植物盐肤木抗 HIV-1 活性成分研究. 中华中医药学会防治艾滋病分会第六届学术年会论文汇编, 2008.
- [4] Shao XF, Zhang SY, Gao BW, et al. Sumac aphid efficient cultivation techniques. Hubei For Sci Technol, 2013, 42(4): 88–90 (in Chinese). 邵贤甫, 张双英, 高本旺, 等. 五倍子高效栽培技术——夏寄主建园技术. 湖北林业科技, 2013, 42(4): 88–90.
- [5] Zhang JF, Li JY, Xing SJ, et al. Experiment of seed germination under salinity stress. J North East For Univ, 2003, 31(3): 79–80 (in Chinese). 张建锋, 李吉跃, 邢尚军, 等. 盐胁迫下盐肤木种子发芽试验. 东北林业大学学报, 2003, 31(3): 79–80.
- [6] Wang Q, Song GL. Study on hardseed and Germinating Characteristic of *Rhus chinensis* Mill. Seed, 2008, 27(4): 59–61 (in Chinese). 王琼, 宋桂龙. 盐肤木种子硬实与萌发特性研究. 种子, 2008, 27(4): 59–61.
- [7] Li QT, Yang FJ, Zhang B, et al. Biogeochemistry responses and spectral characteristics of *Rhus chinensis* Mill under heavy metal contamination stress. J Remote Sens, 2008, 12(2): 284–290.
- [8] Gu Q, Wang RR, Zhang XM, et al. A new benzofuranone and anti-HIV constituents from the stems of *Rhus chinensis*. Planta Med, 2007, 73(3): 249–256.
- [9] Wang RR, Gu Q, Wang YH, et al. Anti-HIV-1 activities of compounds isolated from the medicinal plant *Rhus chinensis*. J Ethnopharmacol, 2008, 117(2): 249–256.
- [10] Ma TB, Liu SZ. Studies on the chemical constituents of Taishan Yanfumu (*Rhus taishanensis*). Chin Herbal Med, 1996, 27(8): 451–453 (in Chinese). 马天波, 刘思贞. 泰山盐肤木化学成分的研究. 中草药, 1996, 27(8): 451–453.
- [11] Shim YJ, Doo HK, Ahn SY, et al. Inhibitory effect of aqueous extract from the gall of *Rhus chinensis* on alpha-glucosidase activity and postprandial blood glucose. J Ethnopharmacol, 2003, 85(2): 283–287.
- [12] Zhao J, Cui CB, Cai B, et al. Progress of national *Rhus* genus. Pharm J Chinese People's Liberation Army, 2006, 22(1): 48–51 (in Chinese). 赵军, 崔承彬, 蔡兵, 等. 国产盐肤木属植物的研究进展. 解放军药学学报, 2006, 22(1): 48–51.
- [13] Ren Z, Zhu B, Wang D, et al. Comparative population structure of Chinese sumac aphid *Schlechtendalia chinensis* and its primary host-plant *Rhus chinensis*. Genetica, 2008, 132(1): 103–112.
- [14] Chen GZ, Chen HZ. Extraction and deglycosylation of flavonoids from sumac fruits using steam explosion. Food Chem, 2011, 126(4): 1934–1938.
- [15] Zhao JY, Chen HZ. Correlation of porous structure, mass transfer and enzymatic hydrolysis of steam exploded corn stover. Chem Eng Sci, 2013, 104(18): 1036–1044.
- [16] Chen HZ, Li ZH. Studies on the steam explosion of wheat straw. Mechanisms of steam explosion of wheat straw. J Cell Sci Technol, 1999, 7(4): 14–22 (in Chinese). 陈洪章, 李佐虎. 麦草蒸汽爆破处理的研究 II. 麦草蒸汽爆破处理作用机制分析. 纤维素科学与技术, 1999, 7(4): 14–22.
- [17] Chen GZ, Chen HZ. Enhancement of Oil Extraction from Sumac Fruit using Steam-Explosion Pretreatment. J Am Oil Chem Soc, 2011, 88(1): 151–156.
- [18] Zhang L, Shan Y, Tang K, et al. Ultrasound-assisted extraction flavonoids from

- Lotus (*Nelumbo nuficera* Gaertn) leaf and evaluation of its anti-fatigue activity. *Int J Phys Sci*, 2009, 4(8): 418–422.
- [19] Chen HZ, Chen GZ, Zhang ZF. Sumac fruit steam explosion pretreatment and oil flavonoids utilization technology: China, 200710121223.3. 2007-08-31 (in Chinese).
陈洪章, 陈国忠, 张作坊. 盐肤木果实汽爆处理及其油脂黄酮等综合利用的技术: 中国, 200710121223.3. 2007-08-31.
- [20] Chen HZ, Li ZH. Lignocellulose Fractionation. *J Cell Sci Technol*, 2003, 11(4): 31–40 (in Chinese).
陈洪章, 李佐虎. 木质纤维原料组分分离的研究. *纤维素科学与技术*, 2003, 11(4): 31–40.
- [21] Wang N, Chen HZ. Manufacture of dissolving pulps from cornstalk by novel method coupling steam explosion and mechanical carding fractionation. *Bioresour Technol*, 2013, 139: 59–65.
- [22] Carvalho F, Duarte LC, Girio FM. Hemicellulose biorefineries: a review on biomass pretreatments. *J Sci Ind Res India*, 2008, 67(11): 849–864.
- [23] Chen HZ, Liu LY. Unpolluted fractionation of wheat straw by steam explosion and ethanol extraction. *Bioresour Technol*, 2007, 98(3): 666–676.
- [24] Chen HZ, Zhang SJ, Chen GZ. Sumac branches clean pulping method and utilization: China, 201010565539.3. 2010-11-25 (in Chinese).
陈洪章, 张思静, 陈国忠. 盐肤木枝桠清洁制浆及其综合利用的方法. 中国, 201010565539.3. 2010-11-25.
- [25] Qiu WH, Chen HZ. Structure, function and higher value application of lignin. *J Cell Sci Technol*, 2006, 14(1): 52–59 (in Chinese).
邱卫华, 陈洪章. 木质素的结构、功能及高值化利用. *纤维素科学与技术*, 2006, 14(1): 52–59.
- [26] Wang GH, Chen HZ. Carbohydrate elimination of alkaline-extracted lignin liquor by steam explosion and its methylation for substitution of phenolic adhesive. *Ind Crop Prod*, 2014, 53: 93–101.

(本文责编 郝丽芳)