

文冠果研究进展

敖妍^{1,2} 段劫² 于海燕³ 姜常玉⁴ 马履一^{1,2*}

(1. 北京林业大学 林学院, 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. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091; 4. 北京艾比蒂生物科技有限公司, 北京 102200)

摘要 生物质能源作为一种清洁的可再生能源已受到世界各国高度重视。发展生物质能源瓶颈之一是生物质原料不足。文冠果作为一种具有发展潜力的生物能源物种, 近年来受到人们广泛关注。为使育种工作者对文冠果栽培育种、遗传改良与开发利用的研究进展充分了解, 本研究介绍了目前资源分布情况; 有性繁殖和无性繁殖关键技术; 文冠果变异情况和良种选育进展; 开花座果特点及分子机制研究, 提出防止落花落果技术措施, 分析了产量影响因素; 综述了化学成分与开发利用研究进展; 分析了油脂含量影响因素及其改良措施, 文冠果籽油及生物柴油的理化指标, 比较了不同油脂提取与生物柴油生产工艺的油得率、转化率及优缺点; 介绍目前产量情况与经济效益, 总结林分低产原因, 并提出解决对策。

关键词 文冠果; 栽培选育; 开花座果; 开发利用; 生物柴油

中图分类号 Q 949.755.5

文章编号 1007-4333(2012)06-0197-07

文献标志码 A

Research progress on *Xanthoceras sorbifolia* Bunge

AO Yan^{1,2}, DUAN Jie², YU Hai-yan³, JIANG Chang-yu⁴, MA Lü-yi^{1,2*}

(1. Academy of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

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

3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

4. Beijing ABT Biotechnology Co., Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract As a clean, renewable energy source, the importance of biomass energy has been highly recognized. The lack of biomass raw material creates a bottleneck for bio-energy developments. In recent years *Xanthoceras sorbifolia* Bunge has been widely recognized as a potential bio-fuel plant. In order to improve the understanding of the breeder about the cultivation and breeding, genetic improvement, exploitation and utilization of *X. sorbifolia*, this paper introduces resource distribution; the key technique of sexual and asexual reproduction, research progress on variation and fine variety breeding, characteristics and molecule mechanism of flowering and fruit setting; proposes methods of preventing flowers and fruits dropping, analyzes the factors affecting production; summarizes the research progress on chemical components, exploitation and utilization; analyzes the factors affecting oil content, the methods to improve it, and the physicochemical index of *X. sorbifolia* seed oil and bio-fuel; compares the oil yield and extraction rate, the advantages and disadvantages of different oil extraction and bio-fuel production techniques; introduces yield status and economic benefits, summarizes the reasons for low yield, and puts forward ways to resolve low yield issues.

Key words *Xanthoceras sorbifolia* Bunge; cultivation and selection; flowering and fruit setting; exploitation and utilization; bio-fuel

文冠果(*Xanthoceras sorbifolia* Bunge)隶属无患子科(Sapindaceae)文冠果属(*Xanthoceras* Bunge)。结实早,种子含油量高,耐干旱、盐碱,适生区域大,易繁殖,主要分布于我国北部和朝鲜,具

收稿日期: 2012-06-27

基金项目: 国家林业局科技推广项目(2008-8); “十二五”国家科技支撑计划(2011BAD22B08)

第一作者: 敖妍, 博士, 主要从事能源植物文冠果的研究, E-mail: aoyan316@163.com

通讯作者: 马履一, 教授, 主要从事森林培育研究, E-mail: maluyi@bjfu.edu.cn

有较高的生态和经济价值。文冠果作为一种具有发展潜力的生物能源物种,近年来受到人们广泛关注。其籽油的碳链长度集中在 C17~C19 之间,与普通柴油碳链长度极为接近。中国耕地少和人口多,不可能用大量耕地发展生物柴油,但山地丘陵资源丰富,因此,适应性广、抗逆性强的文冠果成为中国重点发展的生物质能源树种。笔者结合实地调查研究,将目前关于文冠果栽培、变异选育、开花结实、开发利用和油脂提取与生物柴油生产工艺等方面研究进展综述如下,旨在为文冠果资源的科学研究和开发利用及产业化发展提供理论依据和参考。

1 文冠果资源分布与栽培研究

1.1 资源分布

文冠果在中国分布为北纬 $28^{\circ}34' \sim 47^{\circ}20'$ 、东经 $73^{\circ}20' \sim 120^{\circ}25'$,遍布华北、华东及西北地区。文冠果分布区自然景观带是温带森林草原-黑垆土地带。属暖温带气候区,年均气温 $3.3 \sim 15.6^{\circ}\text{C}$,年均降雨量 $43 \sim 969 \text{ mm}$,无霜期 $120 \sim 233 \text{ d}$ 。分布区土壤多为黄绵土、黑垆土、褐土、棕壤和栗钙土等,土壤 pH $7 \sim 8.5$ ^[1]。在了解文冠果分布范围、适生生态条件基础上,20 世纪 70 年代起,辽宁、内蒙古、黑龙江(牡丹江、双鸭山、齐齐哈尔)、吉林、青海、甘肃(张掖)和新疆(伊犁、塔河、石河子、昌吉)等多地成功引种文冠果。引种后的文冠果苗木抗逆性强,产量和含油量高。文冠果在北京、河北、内蒙、辽宁、河南、山东、安徽、陕西、山西、甘肃、青海、宁夏、新疆和西藏等 14 个省(区、市)都有分布。其中内蒙古的资源量最为集中,且有中国目前最大的文冠果人工林,现存的文冠果 40 年以上的成林约 $3\ 000 \text{ hm}^2$ 。河南陕县、灵宝和卢氏等有小部分成片的文冠果纯林。作为乡土树种,文冠果几乎遍布陕西、山西和甘肃等省各地。

1.2 栽培研究

目前种子繁殖是文冠果主要繁殖方式。种子处理方法常用沙藏法、雪藏法、温水浸种催芽和快速催芽法^[2]。采用沙藏法,出苗率、苗高和地径都显著优于其他方式^[3]。文冠果种子萌发期间断胚根,利于侧根增加,苗木成活率明显提高^[4]。王一等^[5]提出文冠果播种育苗最佳密度为 $8 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 、 $8 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ 。文冠果营养杯育苗的适宜组合为:营养杯规格 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 、种子装杯 1 粒,腐殖酸土,覆土厚度 5 cm ^[6]。另外,用 0.2 mg/L 的芸苔素处理可

以提高文冠果幼苗的抗旱性^[7]。

无性繁殖方面,文冠果嫁接可采用嵌芽接、皮下枝接和劈接法。不同方法对嫁接成活率有极显著影响。春季皮层可剥离时进行嵌芽接效果好。文冠果扦插繁殖时,根插效果好于枝插^[8]。用 ABT6 号生根粉、NAA 或 IBA 处理插条能大幅提高成活率^[9]。文冠果组培繁殖,茎段培养的分化增殖多以 MS 为基本培养基,激素组合多为 6-BA+NAA,6-BA 质量浓度为 $1 \sim 2 \text{ mg/L}$,NAA 质量浓度 $0.1 \sim 0.2 \text{ mg/L}$ 。生根培养基多以 MS+IBA 组合^[10]。以文冠果种胚和子叶为外植体都可得到完整植株^[11-12]。果实发育中期的种胚诱导体细胞胚效果好于幼果期和成熟期种胚^[13]。韩义等^[14]从外植体取材、培养条件、细胞分裂素浓度、培养基中钙浓度等方面基本控制了玻璃化现象。笔者发现,目前文冠果组培繁殖存在基本培养基和激素种类范围窄,继代芽生长缓慢,组培苗驯化移栽技术研究较少等问题。

另外,文冠果抗逆性强,病虫害较少,主要有茎腐病、煤污病、木虱和金龟子等。防治茎腐病可进行土壤消毒,高温时苗床遮荫,苗木栽植时用 50% 多菌灵 400 倍液浸泡茎基部和根部。煤污病、木虱和金龟子的防治可用 1.2% 苦烟乳油 1:1 000 倍液等喷雾。

2 文冠果变异与选育研究

由于异花授粉,文冠果遗传变异基础广泛。彭伟秀等^[15]曾发现文冠果同源异型变异株,变异株的花重瓣,仅具花萼和花瓣,雌雄蕊特化为花瓣。应用扣除杂交技术对变异株和野生株进行基因组差示杂交,获得了样本特异 DNA 片段^[16]。笔者同样在内蒙古、河北、河南等地发现过此类型植株,还发现重瓣植株群体内花性状还有变异。并对单瓣和重瓣花芽 microRNA 进行序列表达,发现了 14 个保守 microRNA 和 2 个 novel microRNA 表现出显著上调或下调表达(包括参与花器官分化调控的 microRNA)^[17]。另外,文冠果不同群体间同样存在变异。牟洪香等^[18]调查了文冠果 14 个分布区的 15 个表型性状,发现分布区内变异大于分布区间变异;出种数随经度的增大而减少,果宽随纬度的增大而增大,但随年平均气温的增大而减小;表型性状与地理距离相关不显著。作为集中分布区,内蒙古境内不同群体间果实和种子性状、脂肪酸含量和种仁油脂脂肪酸化学成分也存在较大变异^[19]。

文冠果性状的显著变异为选择育种提供了基础,20世纪70年代,辽宁、河南和内蒙古等都曾选出优良单株和无性系,这些单株丰产性好,含油率高,抗逆性强。但笔者调查发现,由于多种原因,早期选出的优良单株很多都没有保留下来。目前,原料供应成为限制生物柴油发展的瓶颈,文冠果良种选育工作再次受到重视。刘克武等^[20]通过无性系选择,筛选出适宜黑龙江地区的8个优良无性系。汪智军等^[21]对新疆地区文冠果按花结构和结实特性不同划分为雄树、雌雄同株不结果树和雌雄同株结果树,选出6株高产单株。笔者于2006年至今,在中国文冠果集中和次集中分布区进行选育工作,不仅选出具有优良经济性状优树,还构建了综合性状评价分级标准,选出综合性状优良单株92株^[22]。另外,还可以采用人工诱变的方式创造优良种质资源,路超等^[23]利用返回式卫星搭载文冠果种子,发现种子活力、幼苗成苗率和成活率都明显高于对照,早期生长得到明显促进。

3 文冠果开花座果与产量影响因素研究

3.1 开花座果

笔者根据文冠果花形态特征将其划分为单瓣白花型、单瓣红花型、重瓣紫红型和重瓣黄花型,重瓣花由于雌雄蕊发生变异不结实^[22]。根据花性,文冠果单瓣花被分为雄花和雌花。雌花子房正常,雄蕊退化,花粉无活力,败育可能发生在双核花粉粒时期^[24]。雄花雌蕊败育发生在大孢子母细胞减数分裂期^[25],雄蕊发育正常,花粉可以萌发。关于花发育的分子机制研究,雄性不育和可育花药中特异表达的cDNA以及败育前夕雌蕊差异表达cDNA均已经被发现^[26-27]。马凯^[28]对不同时期雌花和雄花花药蛋白进行差异分析,发现4个在开花期表达存在差异的蛋白。胡青^[29]通过蛋白质双向电泳找到与雌蕊败育相关的差异蛋白点。

文冠果素有“千花一果”之称,综合类型划分和开花特性,其原因主要有:有些单株(重瓣型植株)花而不实。还有花性原因,即侧枝多萌发雄花,雄花占总花数约80%。以雌花为总数统计,结实率约7%左右。笔者发现优良类型座果率多是中等,原因可能是中等水平的座果率最利于植株养分供需平衡^[22]。造成落花落果的原因除花期气候、机械和虫害等,主要是树体营养不良。授粉、幼果生长与幼叶生长同时进行,种粒增重与夏梢、叶片生长、花

芽分化同时进行,都造成养料竞争激烈。防止落花落果可从树体管理、水分养分管理、化学技术措施等方面进行^[30]。修剪能促使枝条开放雌花,通过疏除不孕花及盛花期喷洒液体花粉也可提高座果率^[31]。此外,施肥应注意施果肥和复壮肥。浇水应浇花前水、果前水、冬灌水。喷射脱离抑制剂和微量元素(萘乙酸、硼酸、硫酸锌、硫酸亚铁等)对防止落果效果明显。

3.2 产量影响因素

充足的原料供应是发展文冠果生物柴油产业的前提。关于文冠果主要性状与结实量的关系研究也比较多。树形为多主枝丛生形和开心形有利于提高单位面积种子产量^[1]。长度在41 cm以上或径粗在0.71 cm以上的结果枝产量最高。笔者研究文冠果各性状与产量之间关系发现产量与地径、冠幅、叶长、叶面积、花序长、果长、果宽、每果种子数、果实鲜重、结果个数极显著正相关,与枝下高极显著负相关。果实鲜重、出籽率、结果个数、每果种子数和种宽是影响单株种子产量的主要因素^[32]。此外,通过类型划分得出单瓣白花球果形和圆柱果形植株高产^[22]。养分供应情况对文冠果结实也很重要。文冠果产量随植株年龄增长而增加,30年后进入盛果期。而刘波等^[33]在赤峰市发现8年生单株结实数明显大于处于结果盛期的50年生单株,认为此现象与土壤可供有效养分差异有关。

4 文冠果化学成分与开发利用

文冠果油不饱和脂肪酸含量接近90%,组成基本是油酸约30%,亚油酸约45%,棕榈酸约6%,硬脂酸约2%^[34-35]。种仁中粗脂肪含量62%、粗蛋白29%以上。种仁蛋白质氨基酸组成包括精氨酸,丝氨酸,谷氨酸等共17种。文冠果叶含蛋白19.8%,16种氨基酸^[36]。目前为止,已从文冠果各组织中发现大量化合物^[37-40]。种仁和叶片中都含有多种皂苷、黄酮类和香豆素类化合物。从文冠果茎与心材中分离出的化合物有杨梅素、dl-白藜素、表茶精、槲皮素等化合物。果壳、果柄中含有多种甾醇、脂肪酸、三萜皂苷、香豆素糖苷。种皮中含有十九烷酸、豆苗醇、香豆素类等化合物。

基于对化学成分的了解,文冠果的药用价值得到深入开发。果壳乙醇提取物、总皂苷对可以改善记忆障碍^[41];叶片乙醇提取物可以降低动脉血管压力^[42];杨梅树皮甙具有杀菌、止血、降胆固醇作用;

文冠果皂苷有较强的抗癌活性^[38]；种仁油可用于生产治疗心血管病的中成药^[43]；种仁、果柄和叶的水浸膏治疗糖尿病；花萼中的萘皮甙有解热、安眠、抗痉作用；正丁醇提取物、乙酸乙酯对炎症有明显镇痛消炎作用^[44]；文冠果中还具有抑制 HIV 蛋白酶活性成分^[45]。文冠果种皮具有良好的吸附废水中污染物的性能，具有作为生物吸附剂的潜力^[46]。

此外，文冠果油脂可制高级润滑油、增塑剂、喷漆及肥皂等。油中非皂化部分的甾醇可作液晶材料。种壳、果壳可做活性炭、糠醛、木糖醇和酒精等化工原料。果粕可制造精饲料。文冠果适合用于园林绿化，也是很好的蜜源植物^[47]。

5 油脂含量影响因素、油脂提取与生物柴油生产工艺

5.1 油脂含量影响因素

关于文冠果种子油脂形成规律，赵翠格^[48]研究发现，种子发育过程中油脂累积呈现出“慢-快-慢”的模式，但油体在胚发育的较晚阶段才出现。在种仁发育阶段 I（花后 0~33 d）及阶段 II（花后 34~47 d）前半时期，油脂累积缓慢。快速累积始于阶段 II 后半时期，直至阶段 III（花后 48~68 d）结束，含量已达到 95%。在阶段 IV（花后 69~82 d）油脂含量增长不显著。油脂含量与可溶性糖、淀粉含量呈显著负相关，与蛋白质含量正相关。随种子的发育饱和脂肪酸含量逐渐下降，不饱和脂肪酸逐渐增长。

影响文冠果油脂含量的因素很多，首先受地理条件和群体影响。文冠果油脂脂肪酸组成及含量随着种植区纬度和经度的变化有所差异。亚油酸、“蜜”酸、亚麻酸、11,14-二十碳二烯酸、山萘酸含量随纬度和经度增加而增加；棕榈酸、花生酸、硬脂酸含量随纬度增加而增加，但随经度增加而减小；油酸含量随经纬度增加而减小^[49]。笔者曾分析文冠果主要分布区的 6 个群体之间和内部种子含油率变异情况，发现不同分布区群体种子含油率存在显著差异。含油率与气候因子相关性不明显^[50]。其次，施肥条件对油脂含量也有影响。在种子发育与充实期施有机肥和根外喷施氮、磷混合肥，以及喷施 0.1% 硫酸锌、0.1% 或 0.02% 高锰酸钾、0.1% 硫酸亚铁对文冠果油脂积累有显著促进作用^[51]。另外，根据笔者分析，文冠果种子含油率与果长、果宽，百果重，种子长、宽，每果种子数都显著正相关，与枝下高、心皮数显著负相关。

5.2 油脂提取工艺

文冠果油脂提取工艺主要采用溶剂萃取法、冷榨法、超临界 CO₂ 萃取法、水酶法、超声波辅助萃取法、微波辅助萃取法等。提取工艺对文冠果油的提取率和脂肪酸组成也有显著影响，以上方法在优化条件下油得率可分别达 62.49%、40.44%、61.28%、78.67%、60.18% 和 53.27%^[52-55]。不同方法提取的文冠果油化学成分有所差异，主要成分为油酸、亚油酸、棕榈酸、二十烯酸等；超声波提取的油成分最多为 11 种。通过比较可见，水酶法油得率最高，无溶剂残留，是提取文冠果油的理想方法。有机溶剂萃取虽然油得率较高，但存在潜在的食用安全性问题。冷榨油成分较少、得率低。超临界 CO₂ 萃取法是一种绿色、环保、高效的技术。超声波萃取法提取率高、油品质量好及工艺简单，也是提取文冠果油的较理想方法。另有研究显示，利用超声波辅助预处理种仁样品，采用水酶法提取文冠果油，纤维素酶和碱性蛋白酶能有效促进蛋白质水解，提高油得率；优化条件下，游离油总提取率达 81.2%，也是目前研究中油提取率最高的方法^[56]。微波辅助萃取技术虽省时、高效，但技术成本较高，技术成熟度较低，存在一定微波辐射安全隐患。

对文冠果种仁油的氧化稳定性研究得出，由于含有少量 V_E (123.24 mg/100 g)，起到抗氧化作用，所以文冠果油的氧化稳定性好，适当添加复合抗氧化剂 (0.02% 叔丁基对苯二酚 + 0.01% 抗坏血酸) 的冷榨文冠果籽油，常温贮藏期达 30 个月以上^[57]。同时，避光低温保存是降低文冠果种仁油氧化速率和延长贮藏期的重要措施。

5.3 生物柴油生产工艺

文冠果油酸值小，制备生物柴油时可直接进行酯交换反应；油碳链长，属半干性油，理化性能良好；以 C18 脂肪酸为主，与理想柴油替代品分子组成类似。这些特点使其非常适合生产生物柴油。于海燕等^[58]将制得的文冠果生物柴油进行指标测定。除 90% 回收温度稍高外，密度 (20 °C, 0.872 g/cm³)、运动黏度 (40 °C, 4.181 mm²/s)、凝固点 (-3 °C)、硫质量浓度 (14 mg/L)、10% 蒸余物残炭 (0.23%)、硫酸盐灰分 (0.014%)、含水率 (0.035%)、机械杂质 (无)、十六烷值 (58.0)、酸值 (0.36 mg/g)、游离甘油含量 (0)、总甘油含量 (0.11%) 等生物柴油质量指标均符合 GB/T 20828-2007《柴油机燃料调合用生物柴油 (BD100)》标准。

目前,利用文冠果油脂生产生物柴油主要方法为碱催化法、固体酸催化法和生物酶法。碱催化酯交换法使用催化剂基本为 NaOH 和 KOH^[59-60],转化率一般在 89.93%~96.7%。微波酯转化省时且低成本^[61]。此外,采用两步酯交换法制备文冠果生物柴油,转化率明显提高^[57]。近几年,用乙醇作为酯交换原料倍受关注,该方法也适用于制备文冠果生物柴油^[62-64]。采用固体酸催化法制备文冠果生物柴油所用的催化剂有:三氟甲基磺酸稀土盐^[65]、杂多酸固体催化剂 Cs_{2.5} H_{0.5} PW₁₂ O₄₀^[66],收率均达 95%以上。生物酶法方面,孙俊^[67]以 Novo435 固定化脂肪酶为催化剂,以甲醇为酯交换原料,采用固定化酶法将酶固定在相应的载体上,可提高酶稳定性和利用效率。综合比较,碱催化法被广泛采用,反应产率较高,成本低,生产工艺简单,但对环境有污染;固体酸催化法优点是反应快,温度低,无环境污染,催化剂和共溶剂还可循环利用,但反应时间较长,温度较高,反应物转化率不高;生物酶法对游离脂肪酸和水不敏感,醇用量小,无污染,但成本高、反应慢。此外,文冠果油生物柴油副产物粗甘油中含有皂类、甲醇和酯类等,通过微波辅助提取法可以高效提取三萜系化合物^[68]。

6 存在问题与发展对策

侯元凯等^[69]估算得出,密度为 1 200 株/hm² 的 20 年生文冠果林年产带果皮种子 6 000 kg/hm²,产油量为 1 961.25 kg/hm²,年经济收益=年产值(即:生物柴油产值+油渣产值)-一年成本(即:化肥+采收用工费+运输费+土地使用费+林地管理费+生物柴油加工费)=7 545 元/hm²。据笔者近年调查,文冠果林分实际产量略低于侯元凯的估算值,以 840 株/hm² 计算,赤峰市结实较好林分去果皮后种子平均产量可达 1 020 kg/hm²;河北承德的产量约 720 kg/hm²;河南文冠果与刺槐、酸枣混交林则大约产量 270 kg/hm²。

目前,各地文冠果生产多处于相对低效状态。原料供应成为制约文冠果生物质能源林发展的瓶颈。导致低产的因素主要有:

1)“繁花少实”现象。雄花多,雌花少的生物学特性导致产量低下。另外,落花落果现象严重。2)缺乏优良种质。文冠果多为天然杂交种,遗传变异广泛,单株产量相差悬殊。目前生产上用于育苗的种子多为混杂种子,不分级别和品种,影响产量、

品质。3)管理粗放。大部分成林多年未进行抚育管理,水肥条件严重滞后。树木枝条密集,树冠郁闭,生长不良。株间结果的差异和大小年结实现象比较明显。

针对这些问题可从以下几方面采取措施提高产量:1)防止落花落果措施如 3.1 所述。2)优良类型、单株选择及扩繁技术研究。目前优良种质的选择已经取得初步成果,下一步应重点开展优良类型、单株的保护以及扩繁工作。文冠果分子改良研究方面还比较欠缺,应着重进行。3)现有林的集约化经营是提高文冠果产量和经济效益的主要途径。低产林分改造可采用截干、平茬、加强水肥和树体管理等措施。赤峰市翁牛特旗经济林场对 46 年生文冠果低产林分平茬复壮,第 3 年单株结果多达 30 个。4)制定和实施丰产栽培技术规程。

此外,为保证将来文冠果产业的跨越式发展,应加强文冠果生物炼制技术的研究,包括果皮、种皮、种仁中有效成分的提取及高效炼制技术。另外,还应强化文冠果果皮、种皮、种仁油和蛋白质在保健食品、功能食品、医药工业中的应用,使产品进入生产领域,形成规模效益。

参 考 文 献

- [1] 牟洪香. 木本能源植物文冠果的调查与研究[D]. 北京:中国林业科学研究院,2006:16-71
- [2] 吴明山,龙作义,逢宏扬,等. 文冠果种子处理技术对苗木生长的影响[J]. 林业勘察设计,2010(2):81-82
- [3] 韩少琼,黄浦娜. 文冠果育苗技术试验研究[J]. 陕西林业科技,2011(1):24-26
- [4] 王承义,李晶,毕连柱. 断胚根处理对文冠果育苗的影响及配套技术研究[J]. 中国林副特产,2010(4):1-3
- [5] 王一,段磊,德永军,等. 文冠果不同密度播种育苗试验[J]. 经济林研究,2011,29(1):140-143
- [6] 闫彩峰,胡春元,赵娜,等. 神东矿区文冠果营养杯育苗技术[J]. 安徽农业科学,2009,37(8):3510-3511,3545
- [7] Kai Rong Li, C H Feng. Effects of brassinolide on drought resistance of *Xanthoceras sorbifolia* seedlings under water stress[J]. Acta Physiol Plant,2011(33):1293-1300
- [8] 赵国锦,戴双. 文冠果扦插繁殖试验研究[J]. 山东农业科学,2006(4):22-24
- [9] 马明呈,雷建元,杨海文,等. 不同基质和不同浓度的生根剂对文冠果的扦插育苗的影响[J]. 中国农学通报,2006,22(2):310-312
- [10] 任皎,芦静,李岩,等. 文冠果离体培养技术研究[J]. 吉林林业

- 科技,2011,40(6):13-16
- [11] 臧国忠,陈尚武,张文,等.文冠果子叶同步胚的高效诱导及植株再生[J].西北林学院学报,2008,23(5):91-94
- [12] 顾玉红.文冠果体细胞胚胎发生及形态建成机理的研究[D].北京:北京林业大学,2005:37
- [13] 李晶,王承义,孙海滨,等.文冠果体细胞胚胎发生体系建立[J].北方园艺,2010(11):140-143
- [14] 韩义,许飞雁,陈林晶,等.文冠果组织培养的玻璃化控制研究[J].山西农业科学,2011,39(4):304-306
- [15] 彭伟秀,李凤兰,王保柱.文冠果同源异型变异株的发现[J].北京林业大学学报,1999,21(5):92-94
- [16] 彭伟秀,沈昕,李凤兰,等.文冠果变异株和野生型植株基因组差示杂交研究初报[J].北京林业大学学报,2000,22(1):29-32
- [17] 敖妍.文冠果不同类型花芽分化与相关 microRNA 研究[D].北京:北京林业大学,2012:40-62
- [18] 牟洪香,侯新村,刘巧哲.木本能源植物文冠果的表型多样性研究[J].林业科学研究,2007,20(3):350-355
- [19] 张雷,王宝霞,季雪峰,等.内蒙古不同种源文冠果果实特征及种子含油率调查研究[J].内蒙古林业科技,2011,37(3):16-18
- [20] 刘克武,张海林,张顺捷,等.文冠果优良品系选择[J].中国林副特产,2008(3):15-18
- [21] 汪智军,张东亚,古丽江.文冠果树种类型的划分及优良高产单株的筛选[J].经济林研究,2011,29(1):128-131
- [22] 敖妍.木本能源植物文冠果类型划分、单株选择及相关研究[D].北京:中国林业科学研究院,2010:46-98
- [23] 路超,袁存权,李云,等.3种木本植物种子航天诱变研究初报[J].核农学报,2010,24(6):1152-1157
- [24] 马凯,高述民,胡青,等.文冠果雄蕊发育的解剖学及雄性不育蛋白的研究[J].北京林业大学学报,2004,26(5):40-43
- [25] Yan Zhou, Shumin Gao, Xiaofang Zhang, et al. Morphology and biochemical characteristics of pistils in the staminate flowers of yellow horn during selective abortion[J]. Australian Journal of Botany, 2012(60):143-153
- [26] 杜希华,陆海,高述民,等.文冠果雄性可育性相关 cDNA 片段的克隆与序列分析[J].北京林业大学学报,2003,25(5):29-33
- [27] 范春霞.文冠果雄花性别决定中雌蕊败育相关基因的克隆及初步鉴定[D].北京:北京林业大学,2009:27-44
- [28] 马凯.文冠果雄性不育相关蛋白的研究[D].北京:北京林业大学,2004:16-21
- [29] 胡青.文冠果两种不同类型花中雌蕊发育情况的比较研究[D].北京:北京林业大学,2004:17-34
- [30] 丁明秀,敖妍.文冠果开花座果率研究进展[J].中国农学通报,24(10):381-384
- [31] 乔晓宇.提高文冠果座果率的技术措施研究[J].河北林果研究,2009,24(3):298-230
- [32] 敖妍.文冠果种子产量影响因素分析[J].中国农学通报,2008,24(8):300-304
- [33] 刘波,王力华,阴黎明,等.两种林龄文冠果的生长和结实特性[J].中国科学院研究生院学报,2011,28(1):73-79
- [34] 赵芳,李桂华,刘振涛,等.文冠果油理化特性及组成分析研究[J].河南工业大学学报:自然科学版,2011,32(6):45-49
- [35] Yu-Jie Fu, Yuan-Gang Zu, Li-Li Wang, et al. Determination of Fatty acid methyl esters in biodiesel produced from yellow horn oil by LC[J]. Chromatographia, 2008(67):9-14
- [36] 马养民,王佩.文冠果叶化学成分的研究[J].中成药,2010,32(10):1750-1753
- [37] Zhang WenXia, Bao WenFang. Studies on the chemical constituents of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge [J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2000, 35(2):124-127
- [38] 王红斗.文冠果的化学成分及综合利用研究进展[J].中国野生植物资源,1998,17(1):13-16
- [39] 崔承彬,姚新生,陈英杰,等.文冠木中五种黄酮类成分的 NMR 研究[J].沈阳药学院学报,1991,8(1):36-38,57
- [40] Chao Mei Ma, Norio Nakamura, As'ari Nawawi, et al. A novel protoilludane sesquiterpene from the wood of *Xanthoceras sorbifolia* [J]. Chinese Chemical Letters, 2004, 15(1):65-67
- [41] 孙静丽.文冠果皂苷对小鼠学习记忆功能及海马内胆碱酯酶和颌下腺内神经生长因子活性的影响[D].沈阳:中国医科大学,2001:16-19
- [42] Song Nan Jin, Jin Fu Wen, Hye Yoom Kim, et al. Vascular relaxation by ethanol extract of *Xanthoceras sorbifolia* via Akt- and SOCE-eNOS-cGMP pathways [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 132(1):240 - 245
- [43] 王力川.文冠果化学成分·综合利用及栽培技术[J].安徽农业科学,2006,34(9):1850-1851
- [44] 匡荣,包文芳,赵明宏,等.文冠木正丁醇提取物的抗炎作用[J].沈阳药科大学学报,2001,18(1):53-56
- [45] Ma C M, Nakamura N, Hattori M, et al. Inhibitory effects on HIV-1 protease of constituents from the wood of *Xanthoceras sorbifolia* Bunge [J]. J Nat Prod, 2002, 63(2):238-242
- [46] Zengyu Yao, Lihua Wang, Jianhua Qi. Biosorption of methylene blue from aqueous solution using a bioenergy forest Waste: *Xanthoceras sorbifolia* seed coat [J]. Clean, 2009, 37(8):642-648
- [47] 刘丽,何勇,田建保.文冠果的利用价值与开发前景[J].安徽农学通报,2009,15(1):111-113
- [48] 赵翠格.文冠果种子发育过程中油脂累积规律研究[D].北京:北京林业大学,2010:19-20
- [49] 牟洪香,侯新村,刘巧哲.不同地区文冠果种仁脂肪酸组分及含量的变化规律[J].林业科学研究,2007,20(2):193-197
- [50] 敖妍.不同地区文冠果群体种子含油率,产量变异规律[J].安徽农业科学,2009,37(25):11967-11969
- [51] 王秋霞,翟文继,方占莹,等.文冠果脂肪积累规律及提高油脂产量的技术措施[J].安徽农业科学,2010,38(9):4503-4504
- [52] 邓红,孙俊,范雪层,等.文冠果籽油的不同提取工艺及其组成成分比较[J].东北林业大学学报,2007,35(10):39-41
- [53] 王黎丽,付玉杰,张漫.文冠果种子油提取工艺[J].植物研究,2008,28(4):509-512
- [54] Su Zhang, Yuan-Gang Zu, Yu-Jie Fu, et al. Super critical carbon dioxide extraction of seed oil from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge.) and its anti-oxidant activity [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(7):2537-2544

- [55] 刘苗苗,王晓东,赵兵,等.利用水解酶提取文冠果油脂[J].过程工程学报,2007,7(4):778-781
- [56] 邓红,仇农学,王军.超声辅助水相酶解提取文冠果油[J].农产品加工,2008(7):53-57
- [57] 李招娣,邓红,范雪层,等.冷榨文冠果籽油的氧化稳定性研究[J].中国油脂,2008,33(9):33-35
- [58] 于海燕,周绍箕.文冠果油制备生物柴油的研究[J].中国油脂,2009,34(3):43-45
- [59] 王璐,陶玲,赵福生,等.文冠果种仁油与棉籽油制备生物柴油对比实验[J].农业机械学报,2010,41(10):103-106
- [60] Zu Yuan-gang, Zhang Su, Fu Yu-jie, et al. Rapid microwave-assisted transesterification for the preparation of fatty acid methyl esters from the oil of yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge)[J]. Eur Food Res Technol, 2009 (229): 43-49
- [61] Ji Li, Yu-Jie Fu, Xue-Jin Qu, et al. Biodiesel production from yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge) seed oil using ion exchangers in as heterogeneous catalyst [J]. Bioresource Technology, 2012, 108(3): 112-118
- [62] 梁志霞.文冠果的生物炼制工艺与技术经济分析[D].大连:大连理工大学,2010:35-53
- [63] Alamu O J, Waheed M A, Jekayinfa SO. Effect of ethanol-palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield [J]. Fuel, 2008, 87(8/9): 1529-1533
- [64] Eugena L, Xu Z P, Rudolph V. MgCoAl-LDH derived heterogeneous catalysts for the ethanol transesterification of canola oil to biodiesel [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2009, 88(1/2): 42-49
- [65] 常有龙.一种利用文冠果籽油制备生物柴油的方法:中国, CN101503628[P]. 2009-8-12
- [66] Zhang S, Zu Y G, Fu Y J, et al. Rapid microwave-assisted transesterification of yellow horn oil to biodiesel using a heteropolyacid solid catalyst [J]. Bioresource Technol, 2010 (101): 931-936
- [67] 孙俊.文冠果油的提取及其生物柴油制备工艺研究[D].西安:陕西师范大学,2008:24-48
- [68] Ji Li, Yuan-Gang Zu, Yu-Jie Fu, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of triterpene saponins from defatted residue of yellow horn (*Xanthoceras sorbifolia* Bunge) kernel and evaluation of its antioxidant activity [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11 (4): 637-643
- [69] 侯元凯,李阳元,赵生军,等.文冠果结实情况的调查与产量的预测[J].经济林研究,2011,29(3):144-148

责任编辑:王燕华