

DOI: 10.13376/j.cbls/2014074

文章编号: 1004-0374(2014)05-0503-06

我国优势油脂类生物柴油植物蓖麻 的种质资源发掘和生物柴油利用

邱丽俊¹, 刘爱忠^{2*}

(1 中国科学院西双版纳热带植物园, 昆明 650223; 2 中国科学院昆明植物研究所, 昆明 650201)

摘要: 发展可再生生物质能源是解决人类能源危机和环境污染的重要途径。利用边际土地发展油脂类生物质能是生物质能的重要组成部分。蓖麻因为适应性强和油脂成份独特被誉为“理想的生物柴油植物”。蓖麻是我国优势油脂类能源植物, 利用边际土地, 发展蓖麻产业为我国生物柴油产业化提供原料, 是我国现阶段生物柴油产业化发展的相对理想而又现实的选择, 而且具有重要的发展前景和巨大的发掘潜力。立足我国现阶段生物柴油产业化的瓶颈问题, 着重阐述了蓖麻种质资源发掘的现状、优良品种培育的途径和发展前景, 以及利用蓖麻种子油生产商业化生物柴油的现状, 以期推动我国利用边际土地发展蓖麻产业以及生物柴油商业化生产。

关键词: 蓖麻种子油; 生物质能源; 生物柴油; 蓖麻育种

中图分类号: Q949.93; S216; TQ6; TS22 **文献标志码:** A

The germplasm exploration of castor bean and its utilization perspective for biodiesel production in China

QIU Li-Jun¹, LIU Ai-Zhong^{2*}

(1 Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Science, Kunming 650223, China;

2 Kunming Institute of Botany, Chinese Academy of Science, Kunming 650201, China)

Abstract: Development of renewable biomass energy is an important way to solve energy crisis and environmental pollution. The use of non-food seed oils as feedstock for biodiesel production is an important component part of bioenergy. Plantation of non-food oilseed crops in marginal lands to produce seed oils offers a promise in China. Castor bean is known as “the ideal biodiesel crop” because of its strong adaptability to diverse climatic conditions, different soil types and its unique performance of seed oils for biodiesel production. Planting castor bean in marginal lands to produce seed oils for biodiesel production is, currently, an ideal and realistic option to push the progress of biodiesel industrialization in China. In this paper, we reviewed the availability of castor bean germplasm, the advance of breeding and genetic improvement and the current utilization situation of castor bean seed oils for biodiesel production. In particular, we looked forward to the prospective of planting castor bean in marginal lands and the biodiesel industrialization using castor bean seed oils in China. This review aims to draw more attentions to promote the development of castor bean industry and push eventually the progress of biodiesel industrialization in China.

Key words: castor seed oil; bioenergy; biodiesel; breeding of castor bean

收稿日期: 2013-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(30871548)

*通信作者: E-mail: liuaizhong@mail.kib.ac.cn

油脂类生物质能源主要是利用植物(微生物、动物)油脂作为原料生产出可以替代石化柴油的新型生物柴油燃料,其主要成分为软脂酸、硬脂酸、油酸等长链饱和或不饱和脂肪酸和甲醇或乙醇所形成的酯类化合物。与石化柴油相比,生物柴油具有可再生、能量密度高、燃烧充分、尾气排放少等优点^[1]。因此,发展生物柴油产业化以替代石化柴油受到全世界的高度关注和各国政府的推动。

自20世纪90年代以来,欧盟一直在尝试利用油菜籽油和地沟油,进行生物柴油产业化生产,特别是德国在生物柴油产业化方面取得长足进展。近年来,美国和加拿大加快了分别利用转基因大豆油和油菜籽开展生物柴油产业化的步伐,而且制定了国家中、长期生物燃料发展规划,并从立法层次推动生物柴油的发展。此外,马来西亚和巴西分别在利用棕榈油和棉籽、蓖麻油开展生物柴油产业化发展方面取得了明显的进展。然而,制约当前生物柴油产业化发展的瓶颈因素是能够用于生物柴油产业化生产的油脂类原料有限,加大油脂类原料的供给是促进生物柴油产业化发展的根本途径。

1 我国油脂类生物质能产业化发展的现状

随着经济的发展,我国正面临着能源短缺和环境污染的巨大挑战。据能源信息机构(Energy Information Agency)的报告,到2030年,全球的能源需求量将比现在增加60%,而我国和印度将占45%^[2]。发展生物质能源是缓解我国能源短缺和改善环境的重要手段。因此,我国政府在制定“十一五”、“十二五”和《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》等规划中,将生物质能源产业作为可持续发展战略的重要内容,并置于重要地位加以发展和推动。然而,由于我国人口众多,耕地面积相对贫乏,粮食安全的任务依然严峻,特别是我国目前食用植物油脂的产量还难以满足食用油市场的需要,每年我国食用植物油进口近1 000万t。在生物柴油的产业化方面,尽管中海油、中石化已经建立了多个生物柴油加工厂,年生产能力达100多万t,但由于生产原料的限制,每年我国生物柴油的产量相当有限,我国生物柴油产业化发展尚处于起步阶段。另一方面,如果利用大量的耕地来种植、发展油脂类作物,必将形成粮油争地的格局。利用食用植物油脂,开展生物柴油产业化生产,显然不符合我国的国情。因此,我国政府已经明确了我国发展油脂类生物质能源的原则是

“不与人争粮、不与粮争地”。虽然我国耕地面积远低于世界平均水平,但我国尚有大量未被充分利用的边际土地,如沙荒地、盐碱地、山坡地、退耕还林地等。据不完全统计,我国尚有约1亿多 hm^2 未被充分利用的边际土地。利用边际土地,加强非食用油脂植物资源的培育与研发是我国现阶段生物柴油产业发展的中心任务,也是我国生物柴油产业发展的根本出路。

2 蓖麻是我国现阶段发展生物柴油产业化相对现实的选择

利用边际土地,发展蓖麻产业为我国生物柴油产业化提供原料是我国现阶段生物柴油产业化发展的相对理想而又现实的选择。蓖麻(*Ricinus communis* L)属大戟科蓖麻属植物,是世界上最重要的非食用木本油料植物之一。因为蓖麻不仅气候适应性强,能广泛生长于我国北至内蒙古、新疆、东北大部分地区,南至海南省热带地区,而且对土壤的适应性也很强,能够在多种类型土壤上生长,耐旱、耐瘠薄。特别是蓖麻籽含油量高(一般在50%左右),其种子油主要由蓖麻油酸(顺式-12-羟基十八碳-9-烯酸)组成(占种子脂肪酸的90%以上),由于其12碳位的羟基化,形成了其独特的理化性质,即高温下不易挥发,低温下不凝固,而且极性很强,能够和酒精互溶,容易生产出生物燃料(通过蓖麻油和酒精一定比例的混合,直接产生能够替代石化汽、柴油的生物燃料),燃烧充分,与石化汽柴油相比,尾气排放量降低90%以上。因此,蓖麻油被誉为“绿色可再生石油资源”,是最理想的生物柴油原料。近年来,利用蓖麻种子油作为原料开展生物柴油生产在巴西、印度等多个国家已经形成了商业化。此外,蓖麻重要农艺性状(如花序数目、种子产量、种子大小、植株高矮等)的表型变异大,遗传基因库宽,便于优良性状的选育,而且我国已有1500多年的蓖麻栽培和利用历史,有较好的种植和育种基础,易于推动规模化种植。当前,我国每年种植蓖麻约13万 hm^2 ,栽培种植区主要集中在华北、东北等地区,占全国蓖麻种植的80%,其他地区主要以零星种植为主。虽然在适宜的耕地上,最近几年培育的少量杂交蓖麻品种产量能达到250 kg以上,但大部分品种的产量较低,特别是在边际土地上粗放种植的蓖麻产量相对更低,一般不足1 500 kg/hm^2 ^[3]。培育在边际土地上种植,且相对高产的优良品种是我国现阶段蓖麻产

业发展的核心任务。

3 蓖麻的种质资源

蓖麻种质资源的收集、调查是蓖麻优良品种选育或培育的前提,也是蓖麻品种遗传改良的基础。蓖麻种质资源主要是以种子的形式收集与保存,早在20世纪60年代,美国农业部(USDA)就开展了全世界蓖麻种质资源的收集工作,当前收集的种质资源来自51个国家,并建立专门的蓖麻种质资源繁育中心(The USDA-ARS Plant Genetic Resources Conservation Unit at Griffin, GA, USA)^[4];印度国家油料种子研究所(Directorate of Oilseeds Research)也收集了蓖麻种质4 307份,其中365份来自其他国家^[5];此外,巴西、中国、哥伦比亚、埃塞俄比亚、肯尼亚、罗马尼亚、俄罗斯、塞尔维亚、乌克兰等10多个国家都有蓖麻种质资源保存。如表1所示,目前约有17 995份蓖麻种质保存在世界不同国家的种质库内。基于蓖麻种质资源不同农艺性状的表型,印度学者根据产量、株型矮、超早熟、种子含油量等性状,鉴别了878份优良种源^[5]。Wang等^[6]对保存在USDA的来自48个国家的1 033份种质资源的种子大小和种子含油量进行了统计分析,为旨在选育或改良蓖麻种子性状的育种实践提供了参考依据。此外,蓖麻在抗瘠薄、抗干旱和抗盐碱等方面表现了丰富的种质特异性。进一步开展蓖麻种质抗瘠薄、抗干旱和抗盐碱等抗性筛选方面的研究,有助于利用边际土地培育相对高产和抗性强的蓖麻育种实践。

4 蓖麻优良品种培育的途径与进展

实现蓖麻良种培育是我国现阶段蓖麻产业发展的核心任务。当前,实现蓖麻良种培育的主要手段有杂交育种、诱变育种和分子育种。这些育种手段从不同的途径为蓖麻良种培育做出重要的贡献。

表1 世界蓖麻种质资源的收集现状^[5]

种质库	数量
植物遗传资源国家统计局(NBPGR), 印度	4 307
中国农业科学院作物种质资源所(ICGR-CAAS), 中国	2 111
美国农业部(USDA), 美国	1 390
国家棉花等油料种子作物研究中心(CNPA), 巴西	1 000
瓦维洛夫植物产业研究所(VIR), 俄罗斯	696
生物多样性保护研究所(IBC), 埃塞俄比亚	510
其他(52个所)	8 699

4.1 杂交育种

利用杂种优势或将不同优异性状杂交整合是提高蓖麻品质的有效手段。研究已经发现,蓖麻开花时间、花序数、种子单粒重,以及油含量、产量等性状的种内杂种优势十分明显^[7]。Kaul和Prasad^[8]的研究显示,大多数自交系间杂交种的产量可达到其优良亲本的100%~130%,最高的可达194%。印度第一个商业杂交种GCH3,其种子产量和含油量都显著高于原来的亲本品种;其后,印度相继培育出抗枯萎病、高产的蓖麻杂交种15个^[9]。当前,蓖麻杂交种是印度规模化种植的主要品种。蓖麻杂交品种的出现,大大的增加了蓖麻的产量。在20世纪70年代第一个商品杂交种育成^[10],因为杂交蓖麻的种植使原来约350 kg/hm²产量提高到了1 970 kg/hm²^[4]。我国从1977年开始就开始蓖麻杂交优势利用方面的研究。1984年,山东省淄博市农业科学研究院首次发现蓖麻孤雌单株,诱导培育成一系列雌性自交系。用这些全雌系做母体相继育成了一系列淄蓖麻杂交种,使杂交种在适宜耕地上的产量达到3 750~5 250 kg/hm²^[11]。80年代至90年代,内蒙古哲盟农科所又选育了一批高产优质抗病品种,如哲蓖3号、哲蓖4号。山西省农科院经济作物研究所培育的晋蓖麻2~5号杂交种,在早熟或产量上,也表现了优异的性状。近年来,山东省淄博市农业科学研究院培育的淄蓖麻2号,在优质耕地上的平均亩产达到329 kg^[12]。特别是中蓖1号、晋蓖2号、淄蓖3号和通杂6号等,都是适合我国不同地区种植的优良杂交种栽培的杂交种^[13]。此外,云南省农科院培育的云蓖1~2号在西南山地湿热地区栽培具有明显的优势。

4.2 诱变育种

利用物理或化学诱变的技术产生突变体,进一步根据重要农艺性状的表型筛选优良性状是植物育种常用的方法。由于蓖麻坚硬的种皮使得诱变效率通常较低,因此,蓖麻的诱变育种在生产实践中的应用相对较少。Athma^[14]利用甲基磺酸乙酯、二乙基硫酸酯、水合肼对不同蓖麻品种(279、Hc6、Hc8)进行化学诱变,发现诱变突变体变异谱系与品种、诱变剂及处理时期有着密切关系,最普遍的效应是株高的改变;在配子体时期处理,单株产量的表型变异范围显著增加。在物理诱变方面,利用 γ -射线、快中子和热中子辐射处理,已获得了多样性状的蓖麻突变体植株,如低日照敏感度、早熟、单雌花、矮化等,这些突变体为进一步选育蓖麻的优

良品种提供了重要的种源^[15]。值得一提的是, 20世纪60年代末, 印度的 Ankinedu 等^[16]利用快中子($2.5 \times 10^{12}/\text{cm}^3$)处理 Hc-6, 植株在 M_2 代株矮化。用热中子($0.87 \times 10^{13}/\text{cm}^3$)处理后育成新品系 NPH、Aruna(阿鲁姆)。该品系的生育期缩短为原品系的一半, 与对照 Hc6 相比, 增产 53.7%, 含油量提高 2.4%; 进一步选育获得短生育期的品种, 并在印度得到广泛种植。另外, 用 γ 射线($5 \times 10^2 \text{ Gy}$)处理蓖麻种子, M_2 代花器出现 4 种类型: 雌雄同株同花; 单雌花和雌雄同株花; 雌雄同株花、单独雄花和雌花; 雌雄同株异花^[17]。Chauhan 等^[18]用剂量为 1 500 Gy 的 γ 射线辐射蓖麻种子, 也获得了 3 个单雌植株。这些突变体为研究蓖麻的花序发育提供了基础材料。我国蓖麻诱变育种的研究始于 20 世纪 80 年代。内蒙古通辽市农科院 1985 年利用 ^{60}Co γ 射线处理蓖麻品系永 283 干种子, 获得具有标记性状的雌性系^[19]。徐宁生等^[20]利用植物生长调节剂(2,4-D)处理 NES 型雌性单株来诱导雄花, 建立了 2 个蓖麻纯雌系 693 和 821, 雌株率均为 100%。近年来, 中国科学院新疆地理与生态研究所利用等离子辐射的诱变技术, 获得一些列高产和抗旱性好的优良突变体, 这些突变体为在我国西北旱区边际土地上选育相对高产的蓖麻品种提供了有益的参考。大量的实践证明, 诱变育种是改良种质性状, 创造新种质的有效手段。在今后蓖麻育种工作中, 应配合应用多种诱变因素、理化因素复合处理, 提高诱变效果, 尝试照射更多的器官(种子、花粉、子房等)以增加突变率, 选育出符合育种目标要求的新品种^[21]。特别是结合产量性状和抗旱性状, 从多样的突变体中筛选适合我国不同边际土地特点, 且相对高产的优良品种是我国诱变育种的发展方向。

4.3 分子育种

分子育种是利用现代分子生物技术, 改变植物种质的遗传基础, 实现目的性状的改良。随着现代分子生物学的快速发展, 分子育种已经成为当今和未来作物育种的主要手段。通常所谓的分子育种主要包括分子标记辅助育种和基因工程育种两方面。

分子标记辅助育种是指通过在分子水平上分析与目标基因紧密连锁的 DNA 分子标记对目标基因进行间接检测, 以在早代就能够对目标基因进行准确选择, 从而加速育种进程, 提高育种效率^[22]。目前, RAPD、AFLP、SRAP、SSR、ISSR、SNP 等多种分子标记技术已经应用到蓖麻的种质鉴定和遗传多样性研究方面^[23-27]。然而, 尽管利用不同的分子

标记技术鉴别了多样的种质特异性分子标记, 但在特定性状目标基因连锁的分子标记鉴别方面, 无论是研究还是蓖麻育种实践, 相关报道非常有限。蓖麻全基因组测序的完成^[28]和大量 EST 文库的构建, 为发展和鉴别重要农艺性状连锁的分子标记(特别是 SSR 和 SNP)提供了极大的方便。近年来, 中国科学院昆明植物研究所蓖麻种子性状(如种子大小和含油量等方面)连锁分子标记的鉴别和 QTL 制图方面, 获得了一些可喜的研究成果, 这为旨在蓖麻产量性状的分子辅助育种提供了基础。

随着现代转基因技术的日益成熟, 通过修饰控制重要农艺性状的关键功能基因, 实现重要农艺性状改良的基因工程实践已经广泛应用于主要作物的遗传改良。尽管在若干重要农艺性状关键功能基因的鉴别方面取得了一系列研究成果^[29-32], 但在蓖麻基因工程的育种实践方面, 因为蓖麻的转基因体系尚未完善, 在生产实践中通过基因工程育种获得转基因品种尚未见报道, 主要原因是蓖麻的组织再生体系尚需进一步完善。虽然有大量关于蓖麻再生体系构建和转基因方面的报道^[33-36], 但成功的转基因研究案例或基因工程实践并不多见。Mckee 等^[37]于 2003 年发展了农杆菌侵染有创伤蓖麻花芽的基因转化方法, 并获得了美国专利局专利的保护(专利号: 6620986), 但该专利在生产实践中的应用依然有限。Sujatha 和 Sailaja^[38]首先利用农杆菌介导法转化蓖麻胚轴, 获得了转基因植株, 但转化效率很低。Kumar 等^[39]用农杆菌介导法将 *cryIacF* 基因转化蓖麻芽尖, 成功获得了抗虫植株, 并在 T_2 代稳定表达。这些研究为蓖麻的基因工程育种实践提供了重要的探索。同时, 加强蓖麻重要农艺性状形成的分子基础研究, 鉴别形成主要农艺性状(如种子产量、种子含油量、抗旱和矮秆等)的关键功能基因是发展蓖麻基因工程育种的前提条件。尽管蓖麻基因工程的育种实践尚有许多问题亟需解决, 但毫无疑问蓖麻基因工程的育种实践将是未来蓖麻定向育种的主要手段之一。

5 蓖麻种子油的生物柴油利用

利用蓖麻种子油作为可再生生物柴油主要有两种途径: 一是利用甲醇(或乙醇)通过酸、碱或磁性固体纳米催化剂完成的甲酯化反应产物和一定比例的石化柴油混合, 生产商业化的生物柴油。该方法制备生物柴油的技术成熟, 是利用植物油生产生物柴油的主要方法。目前, 在生产实践中主要通过

调整酯化反应中的催化剂和试剂的种类、比率,以及反应时间、催化体系、温度等条件,产生了一系列高效和优化的蓖麻种子油生物柴油制备工艺。特别是用甲醇替代乙醇^[40]、用酸催化剂替代传统的碱催化剂^[41]等在生物柴油制备的生产工艺上都已广泛应用。然而,利用固体磁性纳米催化剂替代酸(或碱)催化剂,形成清洁化、环境友好型生物柴油制备工艺是近年来发展起来的新型技术,也是将来生物柴油制备、加工的发展方向。虽然蓖麻种子油甲酯化产物的主要成分是油酸甲酯,其理化性能与矿物柴油基本相当,但单纯的油酸甲酯因为其密度高、黏度大,难以直接用于柴油内燃发动机^[42-45]。因此,将蓖麻种子油甲酯化产物与石化柴油按一定比例混合,即能配制成达到生物柴油标准的混合燃料。蓖麻种子油的甲酯化产物以40%的体积比和石化柴油混合,能够产生理想的生物柴油燃料^[43]。二是利用蓖麻油脂极性、能够和酒精完全互溶的特性,将蓖麻种子油和酒精按一定比例混合,混合后形成燃点低、燃烧充分的生物柴油(包括航空柴油)燃料^[46]。这种生产生物柴油的办法不需要任何化学加工过程、操作简单、无任何副产品生成,而且燃烧充分,尾气排放少,是相对理想的生物燃料,也是蓖麻油特有的性能;但这种生物柴油的生产必须消耗大量的乙醇(或甲醇),而且油和乙醇(或甲醇)混合的比例决定了这种生物燃料的燃烧特性。进一步将蓖麻种子油和乙醇的混合物按一定比例和石化柴油混合,能够直接形成商业化的生物柴油。然而,由于蓖麻种子油一直有较高的经济价值,利用蓖麻种子油进行生物柴油的商业化生产,容易使生物柴油生产的成本过高。因此,除了巴西和印度外,目前很少有利用蓖麻种子油进行生物柴油的商业化生产。在我国,由于生物柴油的标准和市场规范的缺乏,以及蓖麻油的成本过高,尚未见利用蓖麻种子油进行生物柴油的商业化生产。

6 展望

加大生物质能发展的力度是我国中长期国家发展规划的重要内容之一。油脂类生物质能源是生物质能的重要组成部分。利用我国尚未充分利用的边际土地发展优势油脂类蓖麻作物,特别是利用多种途径促进蓖麻优良品种的培育,结合不同边际土地类型的生态特点,开展优良品种在边际土地上的种植示范,提高蓖麻在边际土地上种植的产量。同时,在国家层面进一步规范生物柴油生产、加工和商业

化的标准,通过税收和补贴等途径降低生产和消费生物柴油的成本,鼓励生物柴油的商业化生产和消费。以蓖麻油为基础的生物柴油商业化发展在我国一定能开花、结果,并产生显著的经济和生态效益。让我们克服困难、共同努力、拭目以待我国生物柴油产业欣欣向荣的明天!

[参 考 文 献]

- [1] 张纪红,杨红健,侯凯湖.生物柴油研究进展.天津化工,2006,20(6):15-7
- [2] Ahmad AL, Yasin NH, Derek CJ, et al. Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: a review. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15(1): 584-93
- [3] 刘红光,王光明,张宝贤,等.蓖麻种质资源创新与杂交种选育目标的探讨.山东农业科学,2013,45(6):30-3
- [4] Severino LS, Auld DL, Baldanzi M, et al. A review on the challenges for increased production of castor. *Agron J* 2012, 104(4): 853-80
- [5] Anjani K. Castor genetic resources: a primary gene pool for exploitation. *Ind Crop Prod*, 2012, 35(1): 1-14
- [6] Wang ML, Morris JB, Pinnow DL, et al. A survey of the castor oil content, seed weight and seed-coat colour on the United States Department of Agriculture germplasm collection. *Plant Genet Resour*, 2010, 8(3): 229-31
- [7] Okoh JO, Ojo AA, Vange T. Combining ability and heterosis of oil content in six accessions of castor at makurdi. *Nat Sci*, 2007, 5(4): 18-23
- [8] Kaul SL, Prasad MV. Procongress scientific meeting on genetics and improvement of heterotic system[C]. Coimbtore, India, 1983
- [9] Lavanya C, Solanki SS. Crop improvement of castor bean. The challenges ahead. In: Hegde DM (ed.). *Research and development in castor. Present status and future strategies*. India Soc of Oilseeds Res, Hyderabad, 2010
- [10] Ankineedu G, Rao N, Prasada G, et al. Development of pistillate castor. *Indian J Genet Plant Breed*, 1973, 33(3): 416-22
- [11] 张研,乔金友.浅析中国蓖麻产业化发展前景.中国农学通报,2009,25(16):316-9
- [12] 高彩婷,高宝力,刘涛.蓖麻研究概况.内蒙古民族大学学报:自然科学版,2010,25(2):178-81
- [13] 孙振钧,吕丽媛,伍玉鹏.蓖麻产业发展:从种植到利用.中国农业大学学报,2012,17(6):204-14
- [14] Athma P. Induced polygenic variation in castor. *Crop Improvement*, 1982, 9(2): 169-71
- [15] Dick LA, Zanutto MD, McKeon T, et al. Castor. *Handbook of Plant Breeding*, 2009, 4: 317-32
- [16] Ankineedu G, Sharma KD, Kulkarni LG. Effects of fast neutrons and γ rays on castor. *Indian J Genet Plant Breed*, 1968, 28(1): 31-9
- [17] 陈叔平,陈贞.国外蓖麻研究概况.世界农业,1993,(4):17-8
- [18] Chauhan SVS, Singh KP, Kinoshita T. γ -ray induced pollen sterility in castor. *J Fac Agr Hokkaido Univ*, 1990,

- 64(3): 229-34
- [19] 姚远, 李凤山, 陈永胜, 等. 国内外蓖麻研究进展. 内蒙古民族大学学报:自然科学版, 2009, 24(2): 172-5
- [20] 徐宁生, 杨建国, 张尧忠. 利用雌性单株建立蓖麻雌性系的三种方法比较. 西南农业学报, 2000, (3): 67-72
- [21] 李靖霞, 赵桂荣, 于金刚. 辐射诱变在蓖麻育种上的应用研究. 内蒙古农业科技, 2007, (1): 73-4
- [22] 贾继增. 分子标记种质资源鉴定和分子标记育种. 中国农业科学, 1996, (4): 2-11
- [23] Allan G, Williams A, Rabinowicz PD, et al. Worldwide genotyping of castor bean germplasm (*Ricinus communis* L.) using AFLPs and SSRs. Genet Resour Crop Evol, 2008, 55(3): 365-78
- [24] Qiu LJ, Yang C, Tian B, et al. Exploiting EST databases for the development and characterization of EST-SSR markers in castor bean (*Ricinus communis* L.). BMC Plant Biol, 2010, 10: 278
- [25] Bajay MM, Zucchi MI, Kiihl TA, et al. Development of a novel set of microsatellite marker s for castor bean, *Ricinus communis* (Euphorbiaceae). Am J Bot, 2011, 98(4): E87-9
- [26] Foster JT, Allan GJ, Chan AP, et al. Single nucleotide polymorphisms for assessing genetic diversity in castor bean (*Ricinus communis*). BMC Plant Biol, 2010, 10: 13
- [27] Gajera BB, Kumar N, Singh AS, et al. Assessment of genetic diversity in castor (*Ricinus communis* L.) using RAPD and ISSR markers. Ind Crop Prod, 2010, 32(3): 491-8
- [28] Chan AP, Crabtree J, Zhao Q, et al. Draft genome sequence of the oilseed species *Ricinus communis*. Nat Biotechnol, 2010, 28(9): U951-3
- [29] Van de Loo FJ, Broun P, Turner S, et al. An oleate 12-hydroxylase from *Ricinus communis* is a fatty acyl desaturase homolog. Proc Natl Acad Sci USA, 1995, 92(15): 6743-7
- [30] Bursal J, Shockey J, Lu C, et al. Metabolic engineering of hydroxy fatty acid production in plants: RcDGAT2 drives dramatic increases in ricinoleate levels in seed oil. Plant Biotechnol J, 2008, 6(8): 819-31
- [31] Kim HU, Lee KR, Go YS, et al. Endoplasmic reticulum-located PDAT1-2 from castor bean enhances hydroxy fatty acid accumulation in transgenic plants. Plant Cell Physiol, 2011, 52(6): 983-93
- [32] van Erp H, Bates PD, Bursal J, et al. Castor phospholipid: diacylglycerol acyltransferase facilitates efficient metabolism of hydroxy fatty acids in transgenic *Arabidopsis*. Plant Physiol, 2011, 155(2): 683-93
- [33] Sujatha M, Lakshminarayana M, Tarakeswari M, et al. Expression of the *cryIEC* gene in castor (*Ricinus communis* L.) confers field resistance to tobacco caterpillar (*Spodoptera litura* Fabr) and castor semilooper (*Achoea janata* L.). Plant Cell Rep, 2009, 28(6): 935-46
- [34] Sailaja M, Tarakeswari M, Sujatha M. Stable genetic transformation of castor (*Ricinus communis* L.) via particle gun-mediated gene transfer using embryo axes from mature seeds. Plant Cell Rep, 2008, 27(9): 1509-19
- [35] Ahn YJ, Chen GQ. *In vitro* regeneration of castor (*Ricinus Communis* L.) using cotyledon explants. Hortscience, 2008, 43(1): 215-19
- [36] Malathi B, Ramesh S, Rao KV, et al. Agrobacterium-mediated genetic transformation and production of semilooper resistant transgenic castor (*Ricinus communis* L.). Euphytica, 2006, 147(3): 441-9
- [37] McKeon TA, Richmond CA, Chen GQ, et al. Transformation of *Ricinus communis*, the castor plant[P]. US 6620986 B1, 2003
- [38] Sujatha M, Sailaja M. Stable genetic transformation of castor (*Ricinus communis* L.) via *Agrobacterium tumefaciens*-mediated gene transfer using embryo axes from mature seeds. Plant Cell Rep, 2005, 23(12): 803-10
- [39] Kumar AM, Sreevathsa R, Reddy KN, et al. Amenability of castor to an *Agrobacterium*-mediated in planta transformation strategy using a *cryIacF* gene for insect tolerance. J Crop Sci Biotechnol, 2011, 14(2): 125-32
- [40] Meneghetti SM, Meneghetti MR, Wolf CR, et al. Biodiesel from castor oil: a comparison of ethanolysis versus methanolysis. Energy Fuels, 2006, 20(5): 2262-5
- [41] Meneghetti SM, Meneghetti MR, Wolf CR, et al. Ethanolysis of castor and cottonseed oil: a systematic study using classical catalysts. J Am Oil Chem Soc, 2006, 83(9): 819-22
- [42] Scholza V, da Silva JN. Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. Biomass Bioenergy, 2008, 32(2): 95-100
- [43] Canoira L, Garcia GJ, Alcantara R, et al. Fatty acid methyl esters (FAMES) from castor oil: production process assessment and synergistic effects in its properties. Renewable Energy, 2010, 35(1): 208-17
- [44] Pena R, Romero R, Martinez SL, et al. Transesterification of castor oil: effect of catalyst and co-solvent. Ind Eng Chem Res, 2009, 48(3): 1186-9
- [45] Berman P, Nizri S, Wiesman Z. Castor oil biodiesel and its blends as alternative fuel. Biomass Bioenergy, 2011, 35(7): 2861-6
- [46] 王赫麟, 张无敌, 刘士清, 等. 蓖麻油制备生物柴油的研究. 能源工程, 2007, (3): 24-6