

亚麻荠作为生物柴油原料树种的研究现状与前景分析

谢光辉 秦烁 薛帅 梁振兴

(中国农业大学 农学与生物技术学院/国家能源非粮生物质研发中心,北京 100193)

摘要 亚麻荠(*Camelina sativa* (L.) Crantz)是一种新兴的柴油植物。笔者就国内外亚麻荠的研究现状与前景进行综述,从其生物学及农艺学研究现状入手,阐述亚麻荠的生物学特点、栽培特性、良种选育、抗旱及抗病虫害特性,重点介绍了亚麻荠油脂和油脂甲酯的理化性质及其生产生物柴油的可行性研究进展。最终还论述了亚麻荠在我国的发展前景,并根据现阶段存在的问题,给出了相应的建议。

关键词 生物能源; 柴油植物; 亚麻荠; 研究进展

中图分类号 TQ 646.1; S 565.9

文章编号 1007-4333(2012)06-0239-08

文献标志码 A

Research and prospects of *Camelina sativa* (L.) Crantz as a plant of biodiesel resources

XIE Guang-hui, QIN Shuo, XUE Shuai, LIANG Zhen-xing

(College of Agronomy and Biotechnology/National Energy R&D Center for Non-food Biomass,
China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract The aim of this report is to review the research of camelina which was considered as a potential biodiesel plant and analyze its prospects. The biological characteristics, cultivated character, breeding, drought resistance and pest-resistant are firstly reviewed, and then the report focuses on presenting the physicochemical properties of camelina seed oil and methyl ester, and the possibility of the research progress of using its oil for producing biodiesel fuel. Finally, the prospects of camelina are analyzed and our recommendations for effective future research and utilization of camelina seed oil in China are offered according to the current factors that limit the development of camelina.

Key words bioenergy; biodiesel plant; camelina; research progress

随着化石能源消耗对全球经济、政治及环境所带来的负面效应的显现,寻找开发清洁可替代的可再生能源已成为紧迫任务。生物质能作为可再生能源,其原料具有良好的稳定性和储能性,产品具有多样性,能量生产过程具有环保和资源循环利用功能,而被认定为替代化石能源最具有前景的新能源^[1-2]。生物柴油作为生物质能的一种,其能量密度高、便于储存与运输、固有润滑性及安全性能高^[3],已在西方国家产业化发展与市场化利用。但是随着整条产业链的快速发展,诸如原料短缺、原料成本过高等问题开始凸现并限制了产业发展速度,致使全球生物柴

油产业进入瓶颈发展期。比如由于原料短缺,我国2007年的生物柴油产量仅有约30万t,产能利用率只有10%^[4]。

为解决原料匮乏问题,全世界范围内都在积极寻找适合各地区气候与生态条件的柴油植物类型。依据高产油量、低农业投入、可利用农闲季节或在贫瘠边际地生产、副产品可再开发利用等标准,筛选出了诸如麻疯树^[5-6]、海滨锦葵^[7-8]、工程微藻^[9]等优良柴油植物。亚麻荠(*Camelina sativa* (L.) Crantz)作为一种抗逆性极强的油料作物,随着对其油脂及油脂甲酯理化性质和用其生产生物柴油可行性分析

收稿日期:2012-07-12

基金项目:国家科技基础性工作专项重点项目(2008FY110400)

第一作者:谢光辉,教授,主要从事非粮生物质原料研究,E-mail:xiogh@cau.edu.cn

研究的不断深入^[10-14],而被认定为发展潜力巨大的新兴柴油作物。我国的亚麻荠种植及研究历史较短,且集中在对其食用性质及栽培技术方面的研究^[15-17],对其能源性质方面鲜有报道。为此,本文就国内外亚麻荠研究现状尤其是对其能源性质进行详细述评并对亚麻荠在我国的发展前景进行展望。

1 亚麻荠生物学及农艺学研究现状

1.1 植物学特点

亚麻荠(*Camelina sativa* (L.) Crantz)属于十字花科(Brassicaceae),亚麻荠属(*Camelina* Crantz),该属有10多个品种和变种,我国有5个品种和1个变种。目前我国栽培的亚麻荠分为冬型和春型两大类型,均为长日照的一年生草本植物。株高80~140 cm,直根系,叶披针形,有全缘叶和缺刻型叶等多种形态,长1~15 cm,宽1.5~3.0 cm。茎木质化程度中等,在短缩茎和伸长茎上可出生多个分枝,并发育为总状花序,花黄色^[15]。花序呈疏松伞状,在果期伸长,长达20 cm以上。角果呈倒梨形,长6~14 mm,宽4.5~5.5 mm,每株可结荚500~2 000个以上,单荚种子粒数一般为16~20粒^[18]。种子棕褐色,卵圆形,种子小,长约1.2 mm,宽0.8~1 mm,千粒重一般为0.96~1.21 g,最高可达1.81 g^[19]。

1.2 栽培特性

亚麻荠是一种低投入的油料作物,主要原因是需肥量低、耐旱和抗病虫害^[20]。油料作物的产量及品质主要受水分和氮肥的限制,而亚麻荠需水量及用肥量都明显低于小麦和油菜等作物。在养分平衡的土壤中,增加氮肥施用量能提高其种子含油量和蛋白质产量^[21,23-24]。相比于氮肥,亚麻荠对田间土壤含水量变化的反应更敏感,田间土壤湿度过大及水分缺失对亚麻荠的生长均会产生不利影响^[21-22]。Berti^[20]研究发现亚麻荠种子产量与播种日期、种植品种和环境条件三者交互作用有显著相关关系,但对某一固定品种而言,播种日期对其种子产量没有显著影响。据Crowley^[25]研究,每公顷5 kg的播种量在田间可有较好的长势和产量,而在我国条件下每公顷2.5 kg的播种量(条播)即可保证足够的株数和产量,栽培行距一般为20~30 cm。但在干旱条件下,可通过提高播种密度的方式(≥ 110 万株/hm²)来提高产量^[26]。通过对亚麻荠成熟期的表现性状研究表明,当80%的角果由黄色变成淡褐色时

开始成熟^[27],且成熟时角果果皮较硬,不易破碎,成熟后较长的时间内不会裂开,即使成熟后延迟一个月收获也不易造成产量损失^[25]。这可以延长亚麻荠的收获时间,使其可在成熟后最适宜的天气条件下收获,以减少收获过程中的损失。

1.3 我国的良好选育

我国亚麻荠野生资源丰富,据《中国植物志》第33卷记载,在我国有亚麻荠属5个种和1个变形,它们分别是亚麻荠(*Camelina sativa* Crantz)、小果亚麻荠(*C. microcarpa* Andr.)、小叶亚麻荠(*C. microphylla* Z. X. An)、森林亚麻荠(野生亚麻荠)(*C. sylvestris* Wallr.)、云南亚麻荠(*C. yunnanensis* Smith)和长柄亚麻荠(*C. microcarpa* f. *longistipata* Z. X. An),占全世界野生资源的50%,但栽培历史较短。为了解决规模化生产中品种短缺的问题,国内科学家在育种技术方面进行了诸多探索。张永泰等以亚麻荠无菌苗幼叶为试验材料,建立原生质体培养及植株再生的实用技术体系,为开展原生质体融合及遗传转化提供条件^[28]。中国农业大学与北京康福多生物技术发展有限公司合作,采用由国外引进的栽培亚麻荠与国内野生的长柄亚麻荠进行杂交培育成了一种适合于国内栽培的亚麻荠品种,并在配套栽培技术措施方面也进行了深入研究。在2002—2004年,该品种在我国山西、新疆、河南、山东和河北5个省市进行了示范种植^[29-31]。近几年来,中国农业大学亚麻荠研究组一直致力于新品种选育研究,通过引种、选择育种、诱变育种等技术,目前已经选育出适合春播的春性品系10余份,适合广大北方地区秋播种植的冬性品系20余份。

1.4 抗旱性及抗旱机理

Hunsaker^[26]基于亚麻荠整个生育期的水分蒸腾量模拟了其根系生长的动态模型并用于预测不同生育时期的水分消耗量。研究表明,亚麻荠在干旱地区生长良好且不影响产量。主要原因为其种子外层含有5.67%的胶质,这层胶质可吸贮种子重量181.72倍以上的水分,使种子在很短的时间即可吸足大量水分,供给萌发及苗期所需,因而亚麻荠具有极强的抗旱性能^[32]。另外,亚麻荠的根系能深入到土壤下1.4 m,吸水能力强。虽然如此,当植株处在极端水分胁迫下时,其产量仍会下降^[26]。

1.5 抗病虫害特性及机理

亚麻荠抗病虫害能力强,对十字花科中常见的黑斑病和炭疽病高抗^[33],仅有霜霉病在年际间重复

发生和萝卜菜跳甲有时存在着较大的种群数量^[34-35]。主要原因是亚麻荠叶组织在接受到少量的病原物侵染后会迅速产生并积累一种植物抗毒素,以阻止病原物在叶面上定殖,而这种抗毒素对许多真菌和细菌具有较强的抗性,此种机制使亚麻荠有较强的抗病害能力^[36]。另外,Séguin-Swartz^[33]还发现亚麻荠新品种能抗茎腐、根腐、霜霉病等多种病害。邓曙东^[37]的实验表明,亚麻荠叶片对小菜蛾初孵幼虫具有较强的致死作用(3 d后校正死亡率为79.2%)。

2 亚麻荠种子油脂及油脂甲酯特性研究进展

2.1 种子的油脂组成

亚麻荠籽含油率约为40%^[38-41],但不同年际

间、不同气候及水肥条件下会有所变动^[20,23,42-45],且生长条件还会影响亚麻荠油的脂肪酸组成^[46]。通常种子油脂中 α -亚麻酸和亚油酸等不饱和脂肪酸含量高,而饱和脂肪酸含量较低。以下以Moser^[11]的研究为例,种子油脂中不饱和脂肪酸含量高达85.5%以上,而饱和脂肪酸含量仅为11%(表1)。虽然油脂中含有高浓度的不饱和脂肪酸,但是其冷榨油具有较高的稳定性,主要是其中维生素E(含量达700 mg/kg)、极性酚类化合物(含量达128 mg/kg)等抗氧化类物质含量丰富^[11,47],保证了不饱和脂肪酸不被自然因子所氧化。另外,这些不饱和脂肪酸中含有营养丰富的 ω -3^[46],其对动物肉的品质有改善作用^[48-49]。油脂中还含有大量的固醇类物质,其中菜籽甾醇和胆固醇含量极高^[40]。

表1 亚麻荠籽油和油菜籽油的脂肪酸组成

Table 1 Fatty acid composition of camelina oil and canola oil %

脂肪酸种类	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	花生酸	二十碳烯酸	芥酸	其他
亚麻荠油	6.8	2.7	18.6	19.6	32.6	1.5	12.4	2.3	3.5
油菜籽油	4.6	2.1	64.3	20.2	7.6	0.7	0.0	0.0	0.5

注:数据来源于Moser^[11]。

从表1可以看出,亚麻荠油脂的多不饱和脂肪酸(不饱和键 ≥ 2)的含量非常高(52.2%),几乎是油菜油脂含量(27.8%)的2倍;长链脂肪酸含量高,尤其是二十碳烯酸(C20:1 $>10\%$)。Budín^[50]的研究表明,由于多不饱和脂肪酸(PUFA)相比于单不饱和脂肪酸(MUFA)对油脂氧化性的影响更大,所以PUFA/MUFA比饱和脂肪酸/不饱和脂肪酸能更

好的作为其抗氧化性指标。而在亚麻荠油脂中,这个比率和大豆相似,高于加拿大油菜,但低于亚麻和向日葵^[40],说明仅从油脂组成的角度而言亚麻荠油脂的抗氧化性能力仅次于加拿大油菜。

2.2 种子油脂特性

从作为生物柴油原料的角度衡量亚麻荠油脂特性,它表现出如下特点,如表2所示。

表2 亚麻荠籽油和油菜籽油的物理化学性质

Table 2 Physicochemical properties of camelina oil with canola oil shown for comparison

性质	倾点/°C	浊点/°C	110 °C氧化安定性/h	40 °C运动黏度/(mm ² /s)	酸值/(mg KOH/g)	碘值/(g I ₂ /100g)
亚麻荠油	-10	-17	2.2	28.28	2.06	151
油菜籽油	-9	-21	10.3	36.28	0.04	110

注:数据来源于Moser^[11]。

1)碘值作为反映油脂或油脂甲酯的不饱和程度的指标与不饱和脂肪酸的含量成正比。亚麻荠油脂的碘值(151 g I₂/100 g)较高且显著超出了欧盟生物柴油标准的最高限值(120 g I₂/100 g)。而随着不饱和脂肪酸含量的增加,脂肪酸甲酯的不稳定性增强,表现为氧化速率将成几十倍的增长^[51],与之

相反的是低温流动性的增强。鉴于亚麻荠油脂高含量的不饱和脂肪酸,其油脂甲酯在高温条件下抗氧化性较差(110 °C条件下的氧化诱导期仅为2.2 h),但抗低温能力较强(倾点为-10 °C)。

2)亚麻荠油脂的运动黏度较大(28.28 mm²/s, 40 °C),不能在现有压缩柴油机中顺利燃烧,需要对

其改造以使其运动黏度减小到合理水平。经过转酯化反应后,其油脂甲酯的运动黏度减小到了原来的1/7,可直接用于未改造的压缩柴油机并表现出良好的燃烧性能。

3)据 Bernardo^[13]研究表明,亚麻荠油的最大输出功率(43.25 kW)比2号矿物油的输出功率(38.50 kW)高12.3%,因此亚麻荠油更适合做为商用车或航空燃料的来源,也预示其在生物能源领域有巨大的开发潜力。

4)亚麻荠油脂含有高浓度的游离脂肪酸,其酸值(2.06 mg KOH/g)显著高于油菜籽油的酸值(0.04 mg KOH/g),致使其油脂甲酯化需要采用与油菜油脂不同的工艺。据 Fröhlich^[10]研究发现在实验室条件下未经前处理的亚麻荠油脂的甲酯产率仅为86%,远低于油菜油脂的97.4%,而经过脱酸处理后的亚麻荠油脂的甲酯产率达97.8%,还略高于油菜油脂的甲酯产率。

对亚麻荠油脂特性分析结果表明,除了具有较高的碘值与酸值外其它理化特性都优越于现有的生物柴油原料类型。Zaleckas^[52]的研究表明,上述缺陷可以通过与废食用油混合使用得到解决。因此,亚麻荠种子油脂在生物质能源领域的具有广阔的发展潜力。

2.3 亚麻荠种子油脂甲酯的重要特性

亚麻荠种子油脂甲酯化产物形成的生物柴油,已经在波音747-30飞机及美国战斗机上进行试验,表明喷气式飞机无需进行发动机改造就可以采用亚麻荠柴油调合油作为动力来源^[13-14,53]。从表3可以看出,在亚麻荠油甲酯的理化指标数据中除了碘值与氧化安定性超出标准之外,其他各项指标均符合国家《柴油机燃料调和用生物柴油(BD100)国家标准》(GB/T 20828)。低含硫量,高十六烷值及原料来源的可再生性,是低硫柴油无法与亚麻荠柴油比拟的优势。

表3 亚麻荠油甲酯的理化特性及与低硫柴油和国标 GB/T 20828 的比较

Table 3 Physical properties of camelina oil methyl ester with low sulfur diesel and National Standard GB/T 20828 shown for comparison

性质	冷滤点/℃	110℃氧化安定性/h	40℃运动黏度/(mm ² /s)	酸值/(mg/g)KOH	碘值/(g/100g)I ₂	十六烷值	硫含量/10 ⁻⁶
国标 ^a	报告	>6	1.9~6.0	<0.80	120 ^b	>49	<50
亚麻荠油甲酯	-3	2.5	4.15	0.31	151	52.8	3
低硫柴油	-17	>24	2.30	0	— ^c	41.4	8

注:数据来源于 Moser^[11]; a 国标指 GB/T 20828.; b 欧盟标准; c 没有测定。

运动黏度作为衡量流体内部摩擦阻力大小的尺度,影响燃料的流动性能及雾化性能^[54]。燃料在发动机的燃烧过程中首先在喷油口处进行雾化,然后喷射入压缩缸中进行燃烧。运动黏度影响燃料雾化颗粒的尺寸及在喷油口处的渗透性能^[55]。燃料运动黏度高,导致其流动性差、雾化后的油滴颗粒直径大,表现为喷油器喷油困难、混合气组成不均匀、燃烧不完全、燃料消耗量增大;而运动黏度过低,燃料流动性能过强,导致燃料流失,表现为喷入气缸的燃料减少,发动机效率下降。这也正是要将植物油脂进行甲酯化的真正原因:植物油脂甲酯的运动黏度(2~8 mm²/s)仅为植物油脂黏度(40~60 mm²/s)的1/8左右。据实验室测定,亚麻荠柴油运动黏度为4.15 mm²/s(40℃)(表3),符合我国生物柴油标准对运动黏度的限定范围(1.9~6.0 mm²/s)。

生物柴油的低温流动性能是限制其使用区域的重要指标,通常用冷滤点、倾点、浊点表示。冷滤点作为最接近柴油实际最低使用温度的指标,是生物柴油低温流动性能的一个最为科学的表征参数。但由于我国纬度范围跨度大,南北气温特别是南北冬季气温的差异极大,以单一的冷滤点对全国的冬用生物柴油做出限制是不科学且不可行的。因此,国标 GB/T 20828 对生物柴油冷滤点没有做硬性规定,但需要报告。亚麻荠柴油冷滤点较高为-3℃,与柴油(冷滤点-17℃)(表3)相比,其使用地区会受到一定限制。但是可以通过与其他矿物柴油或者生物柴油混合,来扩大其使用范围。据 Fröhlich^[10]研究,将亚麻荠柴油与矿物柴油按照10:0.6:4,4:6,0:10的比例混合后,混合柴油的冷滤点从-3℃降低到-15℃。由此可以看出,冷滤点较高

并不能真正限制亚麻荠柴油的使用。

氧化安定性是生物柴油作为燃料的一个非常重要的指标。不饱和脂肪酸的自动氧化主要受其双键数量和位置的影响,其过程尚未摸清。一般来说不饱和脂肪酸含量越高,氧化安定性越差^[56-57]。亚麻荠油甲酯的氧化安定性(2.5)低于国标的最低标准值(6)(表3),但可以通过添加抗氧化剂和稳定剂的方式提高其抗氧化性能,Zaleckas还通过研究筛选出了高效的抗氧化剂和稳定剂^[52]。

柴油的经济性能是消费者选择哪类柴油的首要参考指标。Fröhlich^[10]的车试结果表明(表4)无论采用何种发动机,测试多远的距离,亚麻荠柴油与矿物柴油在燃料经济性能方面均没有显著性的差异。在五十铃越野车上亚麻荠柴油的燃料经济性能只比矿物柴油的低2%,而在标志306上的测试结果低1.5%~4.6%。Bernardo^[12]有相似的研究结果,亚麻荠柴油的燃料经济指标为12.57 km/L,略低于2号矿物柴油(14.03 km/L)。日本在波音747-300上使用由亚麻荠油(84%)、麻疯树油(15%)、藻类(1%)精制混合的生物燃料与普通航空燃油混制而成的“混合生物航空燃油”进行了1.5 h的试飞。试飞结果表明,由生物燃料混合燃油驱动的发动机的性能没有任何不同^[13]。美国可持续油品公司(Sustainable Oils)使用50%亚麻荠油混配物的HRJ8-JP8燃料在美国空军A-10C飞机上试飞,与石油喷气燃料相比,该燃料可减少超过80%的碳排放量^[14,53]。

表4 亚麻荠油甲酯与矿物柴油在五十铃越野车及标志306中的燃料经济性能比较

Table 4 Fuel economy of camelina ester and diesel oil in Isuzu Trooper and Peugeot 306 for comparison

测试车辆 型号	测试 距离/km	测试用油 类型	燃料经济性/ (km/L)
五十铃越野车	7509	亚麻荠柴油	10.92
	8915	矿物柴油	11.18
标志306	58	亚麻荠柴油	17.61
		矿物柴油	18.07
	101	亚麻荠柴油	18.06
		矿物柴油	18.93

注:数据来源于Fröhlich^[10]。

Hoekman^[56]的研究认为,影响生物柴油燃料的两个关键指标是低温流动性和氧化安定性。从以上对亚麻荠油脂甲酯特性的分析结果表明,虽然上述两个指标均未达到国家标准值,但可以通过加工、混合的方法使其达到标准。亚麻荠柴油与矿物柴油在燃料经济性能方面也没有显著性的差异。因此,亚麻荠柴油可以在我国作为矿物柴油的替代燃料进行利用。

3 国内外有关亚麻荠作生物柴油的可行性研究

亚麻荠作为生物柴油的原料植物被许多国家的学者认可,他们针对大规模种植和应用问题,从油脂特性、栽培措施、生产成本、市场概况与制造工艺等方面进行了研究并依据各地条件进行可行性分析。

Zaleckas^[52]分析了在立陶宛用亚麻荠油生产生物柴油的可行性,认为影响生物柴油品质的主要因素是油脂中的碘值与氧化安定性,并对其改造以使其达到立陶宛的生物柴油标准。

在生物柴油生产成本方面的研究表明加拿大油菜和芥菜的成本为MYM810/hm²,而亚麻荠的成本仅为MYM490/hm²^[20],主要原因是亚麻荠是一种低投入性的作物,并且副产物 ω -3可以作药物。而当前亚麻荠发展的最大的障碍是市场需求小,所以开辟新的市场是亚麻荠生物柴油得以发展和应用的关键。另外,目前亚麻荠生物柴油的生产成本还高于2号石化柴油,产业发展还需要政府的扶持。

Young^[59]从农艺特性、风险管理及市场的不稳定性等方面进行分析,认为亚麻荠并不适合在华盛顿地区种植用以生产生物柴油。

Shonnard^[53]用生命周期评价的方法分析了亚麻荠柴油混配物的碳排放量,显示这种燃料可比石化燃料减少75%~80%的碳排放;另外,通过分析亚麻荠的栽培特点也证明了其适合在美国北部地区轮作。

亚麻荠的入侵风险也有学者进行了评估,分析结果表明亚麻荠的生态入侵能力非常低^[60-61],可安全种植。

亚麻荠生物柴油生产工艺条件的优化也是研究的热点。Wu^[58]用碱催化转酯法,通过分析设计的16个正交试验结果确定了亚麻荠生物柴油的最佳生产工艺。研究结果表明,工艺条件对产品质量影响的重要性依次为催化浓度>反应时间>反应温

度>甲醇/油;亚麻荠柴油生产工艺的催化浓度、反应时间、反应温度、甲醇/油分别为1%,70 min,50℃,8:1。基于这种条件下生产的生物柴油其特性符合美国标准 ASTM D6571 和欧盟标准 EN14214。

4 亚麻荠在中国的发展前景及建议

4.1 亚麻荠柴油产业的发展前景

国内外的诸多研究表明,亚麻荠可以作为生物柴油,特别是生物质航空用柴油的主要原料作物,它在我国有巨大的发展潜力和广阔的前景,对我国非粮生物质能源的研发及利用有重要现实意义和战略意义。我国发展亚麻荠生产及利用其油脂生产生物柴油有多方面的优势。

1) 亚麻荠具有抗旱、抗寒、耐瘠、耐盐碱、抗病虫害等优良特性,可以利用我国广阔的边际性土地进行种植。依据国土资源部 1996 年的全国土地资源调查、2002 年的土地利用变更调查、2003 年国土资源部“耕地后备资源调查”显示,我国有自然条件相对较好,经适当改良即可种植能源植物的边际性土地约 $2\ 136 \times 10^4$ hm^2 。按照 10% 的种植比例,可年产亚麻荠生物柴油 140~160 万 t,仅此一项即可替代约 1% 的柴油消费量(以 2011 年消费量为基准)。

2) 亚麻荠作为节肥、节水、节药的低投入型的新兴作物,农户的接受程度高。据中国农业大学研究表明,亚麻荠生产投入成本仅为油菜生产成本的 60%。在规模种植条件下,可以利用稍加改造的现有的油菜、小麦生产机械即可完成播种、田间管理和收获等生产环节,减少前期研发投入,缩短了投资回报周期。

3) 亚麻荠的加工副产物较多,可以通过高附加值产品的开发增加利润,降低亚麻荠油脂生产生物柴油的成本。亚麻荠果皮重量约占种子的 6%,果皮中含有大量天然果胶。原料种子经剥壳(去皮)后加工冷榨,不仅提高油的品质,去除某些不利成分,还可生产提炼食用果胶。经冷榨后亚麻荠饼粕中的蛋白质含量约为 42%~45% 之间,可做为饲料出售,还可以深加工成食用蛋白质粉、蛋白质饮料、活性肽和活性蛋白等。初榨油中的维生素 E 可单独提取纯化作为医药和化妆品的原料,深加工后利润空间更大。

4) 亚麻荠油脂甲酯热值高、燃料经济性能好、碳排放低,环保效益高。经美国军方初步测试,与石

油喷气燃料相比,50% 亚麻荠柴油与 50% 可再生加氢喷气(HRJ)混配物的混合动力燃料可以减少超过 80% 的碳排放量,且混合燃油驱动的发动机的性能没有任何不同^[14]。

5) 我国的科学工作者已经利用多种育种手段和技术,培育出适合我国秋冬播种和春播的多类型亚麻荠品种(品系),并在我国北京、河北、河南、山东、山西、陕西、甘肃、新疆、云南和江西等地试种成功,并形成了各种植区域及高产优质种植模式,为大规模种植提供技术支持。

4.2 建议

虽然用亚麻荠发展非粮生物质能源的优势明显,但由于国内研究力量较为薄弱且研究经费较少,我国的亚麻荠研究工作还处于起步阶段,而亚麻荠柴油制备工艺研究工作还刚刚开始。为了加速亚麻荠生物燃料产业的发展,建议从以下几个方面入手。

1) 组织专家评估论证亚麻荠作为生物燃料原料的可行性,为产业发展提供理论支持。通过做亚麻荠柴油生命周期评价,亚麻荠可种植区域划分,亚麻荠柴油产业对环境影响等项目,形成亚麻荠在中国发展生物质能源的可行性分析报告。

2) 根据可行性评估报告,制定亚麻荠生物柴油产业的中长期发展规划,并投入相应资金保证产业的健康持续发展。中长期规划应着重以下两个方面:①加速亚麻荠新品种选育工作。将常规育种与分子育种技术相结合,培育出适合各个生态区域种植的高含油量、高产量、高抗逆的更适合生产生物柴油的亚麻荠新品种。为亚麻荠柴油产业发展提供原料保障;②支持扶植企业研发亚麻荠种子的优化制油工艺和转化工艺,为亚麻荠生物能源产业化铺垫道路。

3) 加快以亚麻荠种子为原料的高附加值产品开发。通过研发亚麻酸提取技术、亚麻荠油脂维生素 E 提取技术、果胶提取加工技术、饼粕饲料化、食品化等先进技术,以提高亚麻荠油脂附加产品的利润,使亚麻荠柴油取得价格优势。

4) 加强媒体宣传与试点研究,深化大众对亚麻荠的认识,促进对亚麻荠柴油及附加产品的消费,以保证产业健康快速发展。

参 考 文 献

[1] 石元春. 决胜生物质[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2010

- [2] Karpenstein M M. Sustainable cultivation concepts for domestic energy production from biomass (Special issue on bioenergy) [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2001, 20 (1): 1-14
- [3] 黄凤洪, 黄庆德. 生物柴油制造技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009
- [4] 尹克荣, 宓淑娟, 丁凯. 生物柴油的现状及存在的问题 [J]. *农业装备与车辆工程*, 2009(5): 3-5
- [5] Berchmans H J, Hirata S. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L seed oil with a high content of free fatty acids [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99: 1716-1721
- [6] 张国武, 彭彦, 黄敏. 我国麻疯树产业化发展现状·存在问题及对策 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(8): 3821-3823
- [7] 杨庆利, 禹山林, 秦松. 海滨锦葵油制备生物柴油工艺条件优化 [J]. *中国生物工程杂志*, 2008, 28(10): 90-94
- [8] Ruan C J, Li H, Guo Y Q, et al. *Kosteletzkya virginica*, an agroecoengineering halophytic species for alternative agricultural production in China's east coast: Ecological adaptation and benefits, seed yield, oil content, fatty acid and biodiesel properties [J]. *Ecological Engineering*, 2008, 32: 320-328
- [9] 夏金兰, 万民熙, 王润民, 等. 微藻生物柴油的现状与进展 [J]. *中国生物工程杂志*, 2009, 29(7): 118-126
- [10] Fröhlich A, Rice B. Evaluation of *Camelina sativa* oil as a feed stock for biodiesel production [J]. *Industrial Crops and Products*, 2005, 21: 25-31
- [11] Moser B R, Vaughn S F. Evaluation of alkyl esters from *Camelina sativa* oil as biodiesel and as blend components in ultra low-sulfur diesel fuel [J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101: 646-653
- [12] Bernardo A, Howard H R, O'Connell A, et al. Camelina oil as a fuel for diesel transport engines [J]. *Industrial Crops and Products*, 2003, 17: 191-197
- [13] 中新网. 日本航空利用亚麻芥生物燃料进行全球首次试航 [EB/OL]. <http://www.chinanews.com/gj/sjkj/news/2009/02-04/1549936.shtml>, 2009-02-04
- [14] 国际能源网. 亚麻芥基 HRJ 燃料 50% 混合物用于美国空军试飞 [EB/OL]. <http://newenergy.in-en.com/html/newenergy-1315131536609238.html>, 2010-03-29
- [15] 黄凤洪, 谢笔钧, 刘昌盛. 新型油料作物-芥蓝 [J]. *中国油脂*, 2005, 30(10): 76-77
- [16] 李引平. 新型油料作物芥蓝 1 号栽培技术要点 [J]. *山西农业科学*, 2009, 37(12): 82-84
- [17] 马天祥. 芥蓝一号油菜不同密度及施肥量试验报告 [J]. *农业科技与信息*, 2010, 9: 14-15
- [18] 刘慎谔. 东北草本植物志 (第 4 卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1980
- [19] Johann V, Thomas M, Christine K, et al. Agronomic evaluation of camelina genotypes selected for seed quality characteristics [J]. *Industrial Crops and Products*, 2007, 26: 270-277
- [20] Berti M, Wilckens R, Fischer S, et al. Seeding date influence on camelina seed yield, yield components, and oil content in Chile [J]. *Industrial Crops and Products*, 2011, 34: 1358-1365
- [21] Pan X, Lada R, Caldwell C D, et al. Photosynthetic and growth responses of *Camelina sativa* (L) Crantz to varying nitrogen and soil water status [J]. *Photosynthetica*, 2011, 49(2): 316-320
- [22] Bonjean A, Gofic F L. False flax-*Camelina sativa* L Crantz, an opportunity for European agriculture and industry [J]. *OCL*, 1999, 6(1): 28-33
- [23] Lošák T, Vollmann J, Hlušek J, et al. Influence of Combined Nitrogen and Sulphur Fertilization on False Flax (*Camelina Sativa* [L] Crtz) Yield and Quality [J]. *Acta Alimentaria*, 2010, 39(4): 431-444
- [24] Lošák T, Hlusek J, Martinec J, et al. Effect of combined nitrogen and sulphur fertilization on yield and qualitative parameters of *Camelina activa* [L] Crtz (false flax) [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil and Plant Science*, 2011, 61(4): 313-321
- [25] Crowley J G, Frohlich A. Factors affecting the composition and use of *Camelina* [R]. Dublin: Report of Teagasc, 1998
- [26] Hunsaker D J, French A N, Clarke T R, et al. Water use, crop coefficients, and irrigation management criteria for camelina production in arid regions [J]. *Irrigation Science*, 2011, 29(1): 27-43
- [27] Rode J. Study of Autochthon *Camelina sativa* (L) Crantz in Slovenia [J]. *Journal of Herbs, Spices & Medicinal Plants*, 2002, 9(4): 313-318
- [28] 张永泰, 毛善婧, 李爱民, 等. 亚麻芥原生质体培养再生植株的研究 [J]. *扬州大学学报*, 2006, 27(4): 78-80
- [29] 张玉玲, 焦登学, 王茉莉. 新型油菜作物品种芥蓝一号 [J]. *中国农业推广*, 2006, 22(10): 24-25
- [30] 黄凤洪. 新型油料芥蓝的评价与功能因子 α -亚麻酸的调节血脂作用机制 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2006
- [31] 王荣成, 翟军海, 王宏军, 等. 芥蓝在陕西省渭北旱塬的推广应用效果 [J]. *陕西农业科学*, 2007(2): 66-68
- [32] 崔江, 姜伟, 孙群, 等. 亚麻芥种子萌发抗旱性研究初报 [J]. *中国农学通报*, 2006, 22(10): 203-205
- [33] Séguin-Swartz G, Eynck C, Gugel R K, et al. Diseases of *Camelina sativa* (false flax) [J]. *Plant Pathol*, 2009, 31: 375-386
- [34] Vollmann J, Steinkellner S, Glauning J. Variation in resistance of camilina (*Camelina sativa* L Crantz) to downy mildew (*Peronospora camelinae* Gaum) [J]. *Journal of Phytopathology*, 2001, 149: 129-133
- [35] Paul V H, Tewari J P, Tewari I. Joint field experiment on cultivation, yield, and diseases of false flax (*Camelina sativa*) in Germany and Canada [J]. *Bulletin-OILB-SROP*, 2000, 23 (6): 205-207
- [36] Jejelowo O A, Conn K L, Tewari J P. Relationship between conidial concentration, germling growth, and phytoalexin production by *Camelina sativa* leaves inoculated with

- Alternaria brassicae*[J]. Mycological Research, 1991, 95: 928-934
- [37] 邓曙东, 口桂玲, 张青文, 等. 亚麻荠对小菜蛾幼虫取食和成虫行为反应的影响[J]. 昆虫学报, 2004, 47(4): 474-478
- [38] Putnam D H, Budin J T, Field L A, et al. Camelina: a promising low-input oilseed[C] // Janick J, Simon J E, ed. New Crops, Exploration, Research and Commercialization. Proceedings of the Second National Symposium, Indianapolis. New York: John Wiley and Sons, 1993: 314-322
- [39] 邓曙东, 张青文. 亚麻荠种植和利用的研究现状[J]. 植物学通报, 2004, 21(3): 376-382
- [40] Shukla V K S, Dutta P C, Artz W E. Camelina oil and its unusual cholesterol content[J]. JAOCS, 2002, 79(10): 965-969
- [41] Pilgeram A L, Sands D C, Boss D, et al. *Camelina sativa*, a Montana omega-3 fuel crop[M] // Janick J, Whipsey A, ed. Issues in New Crops and New Uses. Alexandria: ASHA Press, 2007: 124-131
- [42] Luciana GA, Elisabetta M, Giusefiana C, et al. Variation in agronomic characteristics and seed oil composition of new oilseed crops in central Italy [J]. Industrial Crops and Products, 1997, 6: 313-323
- [43] Abramovi H, Abram V. Physico-Chemical Properties, Composition and Oxidative Stability of *Camelina sativa* Oil [J]. Food technology and biotechnology, 2005, 43(1): 63-70
- [44] ŠÍPALOVÁ M, LOŠÁK T, HLUŠEK J, et al. Fatty acid composition of *Camelina sativa* as affected by combined nitrogen and sulphur fertilization [J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(16): 3919-3923
- [45] Zubr J. Qualitative variation of *Camelina sativa* seed from different locations[J]. Industrial Crops and Products, 2003, 17: 161-169
- [46] Zubr J, Matthäus B. Effects of growth conditions on fatty acids and tocopherols in *Camelina sativa* oil[J]. Industrial Crops and Products, 2002, 15: 155-162
- [47] Helena A, Bojan B, Vojko N. Changes occurring in phenolic content, tocopherol composition and oxidative stability of *Camelina sativa* oil during storage[J]. Food Chemistry, 2007, 104: 903-909
- [48] Aziza A E, Quezada N, Cherian G. Feeding *Camelina sativa* meal to meat-type chickens; Effect on production performance and tissue fatty acid composition[R]. JAPR; Research Report, 2010
- [49] Peiretti P G, Mussa P P, Prola L, et al. Use of different levels of false flax (*Camelina sativa* L) seed in diets for fattening rabbits[J]. Livestock Science, 2007, 107: 192-198
- [50] Budin J T, Breene W M, Putnam D H. Some Compositional Properties of Camelina (*Camelina sativa* L Crantz) Seeds and Oils[J]. JAOCS, 1995, 72(3): 309-315
- [51] Vangerpen J. Cetane number testing of biodiesel[C] // Cundiff J S, Gavett E E, Hansen C, et al. Proceedings, Third Liquid Fuel Conference: Liquid Fuel and Industrial Products from Renewable Resources. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, 1996: 197-206
- [52] Zaleckas E, Makarevičienė V, Sendžikienė E. Possibilities of using *Camelina sativa* oil for producing biodiesel fuel [J]. Transport, 2012, 27(1): 60-66
- [53] Shonnard D R, Williams L, Kalnes T N. Camelina-Derived Jet Fuel and Diesel: Sustainable Advanced Biofuels [J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2010, 29(3): 382-392
- [54] Shu Q, Yang B L, Yang J M, et al. Predicting the viscosity of biodiesel fuels based on the mixture topological index method [J]. Fuel, 2007, 86: 1849-1854
- [55] Ertan A, Mustafa C. Determination of the density and the viscosities of biodiesel-diesel fuel blends [J]. Renewable Energy, 2008, 33: 2623-2630
- [56] Hoekman S K, Broch A, Robbins C, et al. Review of biodiesel composition, properties, and specifications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16: 143-169
- [57] Knothe G. Oxidative stability of biodiesel: literature overview [M] // Knothe G, Van G J, Krahl J, ed. The biodiesel handbook. Urbana: AOCS Press, 2005: 122-126
- [58] Wu X, Leung D Y C. Optimization of biodiesel production from camelina oil using orthogonal experiment[J]. Applied Energy, 2011, 88: 3615-3624
- [59] Young D L, Galinato S P, Marsh T L. Feasibility of *Camelina* as a Biofuels Feedstock in Washington[R]. IMPACT Center Report, 2012
- [60] Davis P B, Menalled F D, Peterson R K D. Refinement of weed risk assessments for biofuels using *Camelina sativa* as a model species[J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 48: 989-997
- [61] Davis P B. The invasion potential and competitive ability of *Camelina sativa* (L) Crantz (Camelina) in rangeland ecosystems[M]. Montana; Montana State University, 2010