

中国能源作物产业特征及环境效应

何丙辉, 曾成

引用本文:

何丙辉, 曾成. 中国能源作物产业特征及环境效应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 882–890.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0111>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术

冯英, 马璐瑶, 王琼, 吴英杰, 黄路宽, 周其耀, 杨肖娥

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2359–2370 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0787>

生物质炭的固碳减排与合理施用

谢祖彬, 刘琦

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 901–907 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0034>

中国粮食作物生命周期生产过程温室气体排放的研究进展及展望

夏龙龙, 颜晓元

农业环境科学学报. 2020, 39(4): 665–672 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0109>

地膜厚度对作物产量与土壤环境的影响

张丹, 王洪媛, 胡万里, 杨虎德, 徐钰, 马兴旺, 赵沛义, 刘宏斌

农业环境科学学报. 2017, 36(2): 293–301 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1008>

基于Web of Science数据库的土壤污染修复领域发展态势分析

串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 赵静娟, 颜志辉, 张晓静, 谭翠萍

农业环境科学学报. 2016, 35(1): 12–20 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

何丙辉, 曾 成. 中国能源作物产业特征及环境效应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 882–890.

HE Bing-hui, ZENG Cheng. Industrial characteristics and environmental effects of energy crops in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 882–890.



开放科学 OSID

中国能源作物产业特征及环境效应

何丙辉, 曾 成

(西南大学资源环境学院, 重庆 400715)

摘 要: 能源安全是国家战略安全的重要组成部分, 推广能源作物、发展能源作物产业对于解决能源安全和促进生态环境和谐发展具有重要意义。本文介绍了我国能源作物的种类、优势, 分析了我国能源作物的环境效应、利用现状和产业发展概况。我国能源作物种类丰富, 能源作物产业发展潜能巨大, 但原材料价格高制约了我国能源作物产业发展, 在生产加工方面与国际先进水平还存在较大差距, 设备和技术方面缺乏核心竞争力。未来发展策略应从优化种质资源、推广丰产技术、提高转化工艺等多方面进行考虑。

关键词: 中国; 能源作物; 产业发展; 环境效应

中图分类号: S216 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)04-0882-09 doi:10.11654/jaes.2020-0111

Industrial characteristics and environmental effects of energy crops in China

HE Bing-hui, ZENG Cheng

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: Energy security is an important part of national strategic security. Promoting energy crops and developing energy crop industry are of great significance to solve energy security and promote the harmonious development of ecological environment. This paper introduced the species, advantages of energy plants in China, analyzed the environmental effects, utilization status and industrial development of energy crops in China. China has a large variety of energy crops and huge potential for the development of the energy crop industry. However, the high price of raw materials restricts the development of China's energy crop industry. There is still a large gap between the production and processing and the international advanced level, and equipment and technology lack core competitiveness.

Keywords: China; energy crops; industrial development; environmental effect

能源直接关系到每个国家的建设发展, 随着油气资源的不断消耗, 全球能源安全面临巨大的挑战。中国是世界上最大的能源消费国, 对油气资源的需求不断上升, 据有关资料统计, 中国的能源消费占到全世界能源消费总量的 23.6%, 原油进口占到世界原油贸易的 15%^[1]。但是国内的油气资源增产难度大, 供应远远不足, 能源供应受外部影响较大, 能源安全难以

得到保障^[2]。同时, 传统的化石能源燃烧带来酸雨、大气破坏、全球变暖、生物多样性降低等一系列严重的生态环境问题, 极大地影响了人类的生存和可持续发展^[3]。因此, 寻找新的可再生能源来取代传统能源的主导地位极为迫切, 发展可再生能源不仅可以降低对石油、天然气等传统能源的依赖程度, 保障我国的能源安全^[4]; 还可以减少氮、硫、温室气体的排放^[5-7],

收稿日期: 2020-01-31 录用日期: 2020-03-26

作者简介: 何丙辉(1966—), 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向为农业生态环境保护。E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771312)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41771312)

促进生态环境的保护和低碳经济的发展。

在可再生能源中,我国对水能和太阳能的开发发展很快,但对生物质能的开发较为滞后,而生物质能特别是能源作物的开发对于保障能源安全、缓解能源紧张、促进循环农业和低碳经济发展等都具有重要作用。我国植物资源丰富,具有发展能源作物产业的优势^[8]。因此,加快能源作物的开发,推进能源作物产业化、规模化发展,加强对能源作物的环境效应研究,对我国的能源安全和生态环境保护都具有十分重要的意义。

1 能源作物的概念及分类

1.1 能源作物的概念

地球上能够供人类利用的可再生能源包括生物质能、风能、太阳能等,其中生物质能源(Biomass energy)是可再生能源的重要组成部分,是唯一可再生的碳源^[9]。能源植物(Energy plant)是生物质能的重要原料,通常是指那些具有合成较高还原性烃的能力,可产生接近石油或柴油成分、可替代石油或柴油使用的产品的植物,以及富含大量油脂的植物^[10]。能源作物是能源植物的主要组成部分之一,是指在保证农作物(如水稻、小麦和玉米)高产稳产的前提下,为达到能源利用目的而种植的作物^[11]。2006年1月颁布实施的《中华人民共和国可再生能源法》对能源作物进行了定义,即能源作物是指经专门种植,用以提供能源原料的草本和木本植物。综上所述,能源植物的科学特点一般可以理解为:能够高效转化太阳能,高效利用水分,高效产出能量,专门种植,环保性能好,低生产成本。

1.2 能源作物的分类

根据能源植物的化学成分及其用途可大致将其分为4类^[12-14]:

(1)富含碳水化合物型能源植物

富含碳水化合物型能源植物主要用于生产燃料乙醇,可以分为糖类能源植物、淀粉类能源植物和纤维素类能源植物等这3类。其中,能够直接通过发酵法生产燃料乙醇的糖类能源植物有甘蔗、甜高粱、甜菜等;需经过水解反应,然后才能被用于生产燃料乙醇的淀粉类能源植物有甘薯、木薯、玉米等;而纤维素类能源植物可以通过直接燃烧发电,主要包括芒草、桉树等。

(2)富含油脂型能源植物

富含油脂型能源植物——这类植物的某一器官

或种子含油率很高,通过提取它们中的油脂经酯化过程形成脂肪酸甲酯类的物质,可加工成生物柴油,如大豆、油菜籽等都是常见的生产生物柴油的原料。还有富含类似石油型能源植物,这类作物含有大量的油脂类碳氢化合物,可直接利用生产接近石油成分的燃料,如麻疯树、棕榈、油桐、光皮树、黄连木、古巴香胶树等^[15-16],它们通过简单的脱脂处理,就可作为生物柴油使用。

(3)富含木质纤维素类植物

富含木质纤维素作物类——这类植物富含纤维素、半纤维素和木质素,主要被用于生产固体颗粒类燃料,可以通过转化获得热能、电能、乙醇和生物气体等。主要木本类能源作物有桉树、杨树和柳树等,另外,一些轮伐获得的灌木也富含木质纤维素,可用来发电^[15,17]。

(4)速生丰产薪炭树

速生丰产薪炭类植物种植的目的是提供薪柴和木炭,世界上种植效益较好的薪炭树种有加拿大杨、意大利杨、美国梧桐等。近年来我国也有一些适合作薪炭的树种,如银合欢、紫穗槐、沙枣、旱柳、杞柳、泡桐等。

2. 能源作物的特点

2.1 储量丰富

根据国家林业局2013年6月颁布的《全国林业生物质能源发展规划(2011—2020年)》(图1),我国现有薪炭林170多万 hm^2 ,蓄积量3900万 m^3 ,现有林木资源可用作木质能源的潜力约有3.5亿t,全部开发利用可替代2亿t标准煤。油料植物中油棕、无患子等9个树种相对成片分布面积超过100万 hm^2 ,年果实产

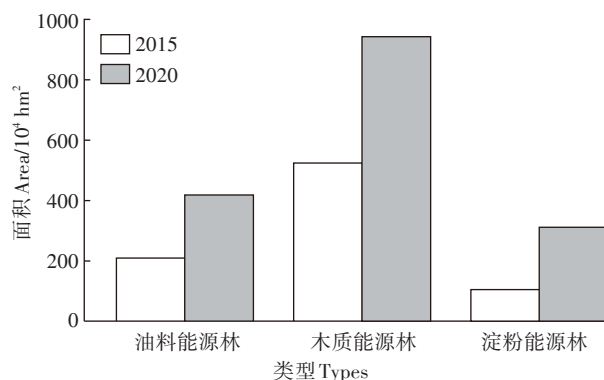


图1 “十三五”期间我国能源林储量变化(引自国家林业局)
Figure 1 Changes of energy forest reserves in China during the "13th Five-year Plan" (from the State Forestry Administration)

量100万t以上,全部加工利用可获得40余万t生物燃油。淀粉类植物中,栎类树种现有面积约1600万 hm^2 ,可年产种子1000万t以上,可用于生产250万t燃料乙醇;葛类总面积约40万 hm^2 ,年资源总量150万t以上,可用于生产50万t燃料乙醇。灌木林地总面积5300多万 hm^2 ,每年灌木平茬复壮可采集木质燃料1亿t左右;全国大约7000多万 hm^2 的中幼龄林,通过正常抚育间伐每年可获取0.2~0.4亿t生物质能原料。

2.2 可再生性

能源作物通过光合作用将太阳能以化学能形式贮存在生物中,原始能量来源于太阳,取之不尽,用之不竭,属于可再生资源。能源作物的种类丰富,分布面积广,能有计划地进行种植和开采。

2.3 环保性好

生物质能源不含硫化物,燃烧以后不会产生酸雨^[8],生物柴油燃烧后还可以借由生物分解,在自然条件下即可实现生物降解,避免对土壤和地下水造成污染,因而不会污染环境^[18]。种植能源作物,可以有效防止现代农业中对作物的高度集约化生产和单一作物的种植导致的土壤流失,还可以帮助土壤建立新土壤层,对土壤起到保护作用^[19]。

2.4 生产简单,储存运输便捷,使用安全

经过多年的发展,现有的生物能源燃料生产的技术已趋成熟,如将各种植物、城乡有机废物、农作物秸秆、林业加工废弃物转化成可再生能源的技术以及生产工艺都已经具备。此外,能源燃料运输和储存也更为方便,如薪柴、沼气、生物柴油、燃料乙醇等都可以便捷地运输和储存。在运输和储存、使用的过程中也较为安全,不会发生爆炸或泄漏。

3 能源作物环境效应

能源作物的环境效应是由于能源作物的生长、加工、利用等各环节对环境造成影响,从而导致环境系统的结构和功能发生变化,如自然环境效应、环境化学效应和环境物理效应。能源作物的发展应用会从各方面改善环境系统的结构和功能,在自然环境效应方面能够减少农业生产中输入及输出性污染,提高废弃物利用率,改善生态环境和缓解能源紧张,促进边际土地开发和资源有效利用;在环境物理化学效应方面能够提供清洁能源,降低对化石燃料的依赖,减少酸雨、温室气体的排放等。与此同时,能源作物的开发也会带来一些负面的环境效应,能源植物的生长会对周围植物和地下水产生影响,能源植物加工过程中

消耗化石能源和二次污染问题,能源植物对土地肥力的争夺、引发淡水危机等。

3.1 能源作物的自然环境效应

能源作物的发展可以改善生态环境和缓解能源紧张,促进人与自然的和谐与经济社会的可持续发展。长期以来,我国各种废弃秸秆、残果落果等被大量丢弃在田中或路边,给农村饮用水安全带来隐患,对居民身体健康、高速公路和民航的安全运行造成极大影响。能源作物的开发利用可以变农业废弃物为生产原料,变废为宝,在缓解能源紧张的同时可显著减少农业废弃物对水体、空气的污染,控制农业废弃物对环境的污染,达到能源利用和环境保护的双重效益^[20-21]。

我国人多地少,耕地资源十分有限,农村地区存在大量的土地资源和生物资源未能得到合理的利用,对农村的生产生活环境造成了很大的破坏和污染,使得农村的卫生环境差,农业资源也闲置浪费。合理地开发边际土地,将能源作物的种植与边际地区土地进行整合,调整农业种植结构,让能源作物能够与粮食作物、经济作物共同合理分享农业资源,特别是土地资源,既保障了粮食生产的安全,也做到资源的合理化利用,同时也改善农村生活环境^[22-24]。

3.2 能源作物的环境物理和化学效应

能源作物能够有效地减少温室气体的排放,改善地面水体和土壤的酸化。化石能源燃烧产生的 SO_2 、 NO_2 、 CO_2 、粉尘、固体废渣、悬浮颗粒等有害物质造成很多环境问题,如农业面源污染、温室效应、酸雨等^[25]。且化石能源除了本身的消耗之外,在其开采、运输的过程中还会造成额外的消耗和污染。生物质能源所排放的有害气体、粉尘、固体废渣等远低于化石能源,而且在能源作物生长的过程中还需要从空气中吸收 CO_2 ,所产生的废弃物在自然条件下即可实现生物降解,因而能够有效地改善环境酸化问题。

农业废弃物,如农作物秸秆、脱枯枝落叶、落杂果、陈霉粮食等,是农业污染的源头。通过生物技术将农业大量的废弃物转变成清洁高效的能源,不仅为循环农业提供了清洁能源,生产能源(如生物沼气)所产生的沼液和沼渣也可为循环农业提供肥料,这些肥料为作物生长提供营养物质,还能有效地杀灭田间虫害,减少化肥和农药的投入,达到绿色施肥和生态除害的目的^[26]。

3.3 能源作物减排能力的不确定性

能源作物的种植对于原有植被及耕地土壤的固

碳能力会产生影响甚至是破坏,其影响程度相关方面的研究还不多。各种能源作物的生长效率不同,对周围生长的其他植被甚至地下水也会产生影响^[27]。发展能源作物必须要考虑到在种植、加工过程中各种能源的投入和消耗,以及生物质能源的利用率等问题^[28]。由于作物种类、种植方式、规模、生产技术和生物质能源用途等各个环节的差异性,导致了能源作物减排能力的不确定性。

3.4 其他环境问题

发展能源作物的过程中可能产生其他环境效应问题,例如增加能源作物和种植粮食以及蔬菜生产之间对有限环境资源可能发生冲突;将农作物的秸秆等作为生物能源的生产原料,势必会减少家禽家畜的饲料,也会减少进入耕地中的有机肥力,这样会造成能源作物与土地肥料的争夺^[29],能源作物转化为生物能源过程中和使用过程中可能产生的二次污染^[30]。大幅提高生物能源开发,势必会增加能源作物的种植用水和生产加工用水,必将对农业生产用水和人畜用水造成影响,引发淡水危机^[20]。长期种植某一种作物会使作物从土壤中单项固定吸收某种或多种矿物质,让土壤中的某些营养元素大幅减少,造成土壤养分失衡,以至于肥力下降,土地的耕作效率降低,土地利用周期缩短^[31-33]。

4 能源作物产业开发利用现状

4.1 能源作物利用现状

我国拥有良好的自然条件,生物能资源十分丰富,但各类能源作物资源的基本特性和分布特点差异很大,因此在利用的方式上也有很大区别。我国生物能源的研究和开发较晚,科学合理地开发和利用能源作物,引导能源作物向生物质发电、生物质成型燃料、生物质燃气、生物液体燃料等方面多元发展,可以促进能源结构的调整和发展。

4.1.1 直接燃烧

我国的一些农村地区还存在将作物秸秆、枯枝落叶等作为薪柴、薪炭直接燃烧,这种利用方式的热效率低,既对环境产生不利影响,又对薪柴、薪炭、柴草资源造成浪费。燃烧过程中需要耗费大量的氧气使燃料充分燃烧,产生CO₂和水的同时还会有大量不可燃的烟气排放到空气中。

4.1.2 生物质成型(固化)

生物质成型燃料相对于作物秸秆、植物枯枝落叶等体积更小,结构更加紧密,便于储存和运输;单位体

积的能量也更大,燃烧更加充分,产生的热值也更高^[34-35]。生物质成型燃料燃烧时间长,经济实惠,大大提高了能源作物资源的利用率,是一种低碳无污染的可再生燃料,主要用于城镇供暖和工业供热等领域,当前成型燃料机械制造、专用锅炉制造、燃料燃烧等技术日益成熟,具备规模化、产业化发展基础^[25]。

4.1.3 生物质液化

生物质液化就是以各种植物体及残渣为原料,利用发酵或化学热解等方法,制成甲醇、乙醇等清洁液体燃料的过程^[36]。目前大规模使用的生物液体燃料主要包括燃料乙醇、生物柴油等,我国生物液体燃料产业较好,纤维素燃料乙醇加快发展,我国自主研发生物航煤成功应用于商业化载客飞行示范。生物质液化转化技术包括从植物体中直接提取碳氢化合物、生物质发酵生产乙醇、热分解技术几个方面^[37]。

从植物体中直接提取碳氢化合物:富含碳氢化合物的植物能够通过叶绿素把太阳能固定下来,把能量转化为燃料,从植物的茎、叶、花、果、籽等部位流出的液体,可以直接或间接作为汽油、柴油或石油的代产品^[38]。生物质发酵生产乙醇:高粱、玉米等经过微生物的糖化发酵可以生产燃料乙醇。燃料乙醇燃烧产生的CO₂和水不会对环境造成污染,排放的CO₂气体也比汽油燃烧所排放的低^[39]。热分解技术:在无氧条件下,对能源作物进行加热,使生物质受热分解为固相、液相和气相的燃料,生物质热解技术的主要产物有燃气、燃油和碳产物。用于生产的能源作物种类多,加工的过程短,对于能源的转化效率高^[40]。

4.1.4 生物质气化

在高温条件下,以空气中的氧气、水蒸气或者含氧物混合气等作为气化剂,使生物质的中分子质量较高的有机碳氢化合物发生热解、氧化、还原重整反应,产生分子质量较低的一氧化碳、氢气、甲烷等,将生物质燃料中的可燃部分转化为可燃气^[41]。目前运用最广泛的是生物质的沼气发酵(厌氧发酵),主要成分是甲烷,作为燃料广泛用于民用和工业当中^[42]。

4.2 能源作物产业发展现状

4.2.1 中国燃料乙醇产业发展现状

2017年我国的燃料乙醇产量已经达到265万t,仅次于美国、巴西和欧盟,居全球第4位,但仅占全球燃料乙醇总产量的3%^[43],产能和产量偏小,优势并不明显。目前我国的燃料乙醇生产方式主要有3类:玉米乙醇、纤维质乙醇和煤制乙醇,玉米乙醇、纤维质乙醇都属于生物质乙醇,煤制乙醇属于煤基乙醇^[44]。随

着燃料乙醇的不断推广使用,以玉米为主要原料的燃料乙醇市场需求也不断增大,原料价格上涨是制约我国燃料乙醇产业发展的主要因素,另外原料种植分散、规模小等因素也导致了燃料乙醇生产成本过高。我国燃料乙醇产业起步较晚,与美国、巴西等国家相比,无论是生产工艺、环境效应,还是原料转化效率、转化过程的能源消耗都要落后。装备的生产制造、效率、稳定性等都与国际先进水平存在较大的差距,缺乏核心竞争力。随着陈化粮的消耗,全球石油价格下跌,国家对于燃料乙醇产业的补贴幅度逐年减少,特别是“不与人争粮、不与粮争地”的指导思想,以及对燃料乙醇征收消费税等,使燃料乙醇产业面临的压力加大^[29, 45-46]。

4.2.2 中国生物柴油产业发展现状

2018年我国生物柴油的产量达到103万t。我国每年约有1000万t废弃油脂,所以当前我国主要是以废弃油脂为原料来制取生物柴油,生物柴油产业的发展推动了地沟油的回收,防止地沟油回流餐桌,是解决废弃油脂污染环境最直接和有效的方法^[47-49]。废弃油脂制取生物柴油主要的方法有酸-碱两步法、酸催化法、生物酶法等,然而废弃油脂的分布分散,收集系统也不健全,导致原材料短缺,收集和运输的费用过高,限制了生物柴油产业,只能就地取材,小规模发展。为了扩大生物柴油的原料来源,我国还利用盐碱地、荒草地、荒山荒坡等未开发的宜能荒地种植小桐子、油桐、黄连木、无患子等油料能源作物,仅小桐子油全国每年可获取资源量就达5400t。根据2013年国家林业局发布的《林业生物质能发展规划(2011—2020年)》,到2020年,油料能源林规模将达到422万hm²,全部进入结实期后,全部利用可折合约580万t标煤。

4.2.3 中国生物沼气产业发展现状

截至2015年,全国户用沼气4380万户,大型沼气工程10万处,年产气量约50亿m³,沼气年产量达到190亿m³^[50-51]。我国目前的生物沼气项目多是将工业和农业生产活动中产生的各种有机废弃物进行回收发酵,并将生成的沼气根据市场需要提纯净化成

CNG、LNG,或采用燃气发电机发电、供热,所产生的沼渣也可以制成有机肥料,避免了对环境形成二次污染。经过中央投资带动以及多年的发展和推广,生物沼气产业在全国已经有大中小型的工程上万处,沼气发电装机也已经初具规模。但目前生物沼气规模化、企业化、商品化主要集中在畜禽养殖业,占比小,大量的沼气利用还是以低品位的热利用为主^[52-53]。

4.2.4 中国生物质发电产业发展现状

2017年底,全国共有30个省、区、市、投产了747个生物质发电项目,并网装机容量1476.2万kW,年发电量794.5亿kW·h时。我国当前的生物能源发电方式有3种:农林生物质发电、生活垃圾发电、沼气发电。生物质发电产业依赖于生物能源的供应,由于我国生物质能源资源分布的空间差异性,造成生物质发电行业在区域上的分布特点比较明显。原料丰富的地区有利于成本降低,易于生物质发电产业的发展和规模化,因此我国华东地区是生物质发电装机的主要聚集地。目前生物质发电需要的原材料容易受到季节因素的影响,价格波动较大,造成原材料的成本较高,且原材料的存储和运输也容易受到各种不确定因素的影响,这些各种因素叠加使得生物质发电产业的运营成本较高。生物质发电主要设备虽然已经实现国产化,但核心的技术还依赖于国外。虽然国家有关部门在生物质发电项目的规划、选址、建设规模、核准程序等方面出台了管理规定,随着项目的增多,规范管理、项目扎堆、政策补贴滞后等问题也日益凸显^[13, 15, 54-55]。

我国能源作物产业虽然起步较晚,但发展迅速,开发利用规模不断扩大,生物质发电和液体燃料形成一定规模。生物质成型燃料、生物天然气等发展呈现良好势头。当前,原材料价格高是制约我国能源作物产业发展的主要因素,另外原材料短缺、收集系统不健全、运输费用过高,都给能源作物产业发展造成了困难。在生产加工方面,部分生产设备已经实现国产化,但与国际先进水平还存在较大差距,无论是设备的原料转化率、稳定性等都缺乏核心竞争力,优势并不明显。

表1 “十三五”生物质能发展目标(引自国家能源局)

Table 1 "13th Five-year Plan" biomass energy development goal(from National Energy Administration)

年份 Year	生物质发电 Biomass power/10 ⁴ kW	生物质成型燃料 Biomass fuel/10 ⁴ t	生物质燃气 Biomass gas/10 ⁸ m ³	燃料乙醇 Fuel ethanol/10 ⁴ t	生物柴油 Biodiesel/10 ⁴ t
2015年	1030	800	190	290	80
2020年	1500	3000	80	400	200

5 中国能源作物的发展策略

5.1 能源作物种质收集保存与新品种发掘选育

我国能源作物资源丰富,包括碳水化合物型能源植物(玉米、甜高粱、甘蔗)、油脂型能源植物(油菜、麻疯树、花生)、木质纤维素类作物(芒草、柳枝稷、桉树)、薪炭类作物(松、刺槐、冷杉)等。现阶段种植的能源作物品种多而杂,没有品种方面的优势,今后的能源作物发展策略应该加大对能源植物资源的种类、空间分布、生长状况、资源赋存等方面的调查统计,在此基础上由国家有关部门牵头,联合各级地方政府对能源植物进行类别划分,编制我国能源植物资源赋存现状的名录,筛选优质的能源作物,收集和存储种质资源,并建立能源作物数据库;此外,还要充分利用我国能源植物的多样性,注重不断筛选质优的种质资源,以及结合现代生物技术方法和育种技术,选育高品质的种质资源^[56-58]。

5.2 能源作物规模化高效种植、丰产技术研究

我国生物质能源发展遵循“不与人争粮,不与粮争地”的基本原则,因此要充分合理地利用荒山荒地、边角地等边际土地资源发展能源作物。我国国土面积广大,能源作物受空间水土资源差异和季节变化的影响大,导致我国的能源作物分布破碎、难以规模化种植,在大面积栽培和规模化种植推广方面还存在很大困难。今后要重点研究不同能源作物在不同水土协同条件下的生长规律和栽培模式,突破能源作物种植受区域水土肥限制的瓶颈,考虑土地的承载力和休养生息,在不同的水热资源条件下推广优质高效的能源作物规模化、丰产种植,如在水热资源集中的地区推广种植生长周期短、收获期长的能源作物,在干旱地区、盐碱化地区推广种植耐旱耐盐碱的能源作物。建立区域化的能源作物规模种植基地,对适宜的优质品种进行规模化种植、丰产栽培,集成能源作物规模化高效种植技术并推广^[59-60]。

5.3 能源作物高效转化工艺技术研究

我国生物质能技术创新实力较弱,先进的技术设备和高科技材料基本来自国外,在系统集成研究上也远远落后于其他发达国家;我国对能源作物提取和加工的技术也相对简单粗糙,工业流程等方面与发达国家还存在较大差距,生产的生物燃料的水分和杂质含量偏高,限制了生物燃料的应用范围和产业的发展。在能源作物发展策略中,要将能源作物高效转化工艺技术作为今后重点攻关方向,改进生产设备,加快推

进生物质催化剂技术、液化技术、发酵系统技术、微生物制油技术、重整和组分调整技术、高耐磨成型燃料技术、混合燃烧技术的研发,提高能源作物的转化率和品质,降低生产成本,缩短生产时间^[61]。

中国能源作物的未来发展,需要通过能源作物优质种质资源的选育、规模化高效丰产种植、高效转化工艺技术,尽快形成种植-生产-销售的完整产业链,将研究成果尽快转化为生产力,促进我国经济健康发展,实现节能减排和环境改善。

参考文献:

- [1] BP. BP世界能源统计年鉴[R]. 2019.
BP. BP world energy statistics yearbook[R]. 2019.
- [2] 李文彦. 21世纪前期我国能源战略的若干问题[J]. 经济地理, 2000, 20(1): 7-12.
LI Wen-yan. Some problems of Chinese energy strategy early days of 21 Century[J]. *Economic Geography*, 2000, 20(1): 7-12.
- [3] 刘平阔, 王志伟. 中国“能源转型”是否合理? ——能源替代-互补关系的实证研究[J]. 中国软科学, 2019(8): 14-30.
LIU Ping-kuo, WANG Zhi-wei. Is it Reasonable for China to promote “Energy Transition” now? An empirical study on the substitution-complementation relationship among energy resources[J]. *China Soft Science*, 2019(8): 14-30.
- [4] 李富兵, 白国平, 王志欣, 等. “一带一路”油气资源潜力及合作前景[J]. 中国矿业, 2015, 24(10): 1-3, 26.
LI Fu-bing, BAI Guo-ping, WANG Zhi-xin, et al. The oil and gas resources potential and prospects for cooperation of “One Belt and One Road”[J]. *China Mining Magazine*, 2015, 24(10): 1-3, 26.
- [5] Peter C, Helming K, Nendel C. Do greenhouse gas emission calculations from energy crop cultivation reflect actual agricultural management practices? A review of carbon footprint calculators[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 461-476.
- [6] Wang X, Zhang L, Zou J, et al. Optimizing net greenhouse gas balance of a bioenergy cropping system in southeast China with urease and nitrification inhibitors[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 83:191-198.
- [7] Hou M M, Lv F L, Zhang H T, et al. Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N₂O emission in the winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1):321.
- [8] 刘春英, 肖娜. 我国生物能源产业发展的现状、问题及对策[J]. 中央财经大学学报, 2011(5): 77-82.
LIU Chun-ying, XIAO Na. Research on the development status, problems and solutions of bio-energy[J]. *Journal of Central University of Finance & Economics*, 2011(5): 77-82.
- [9] 姚小华, 余泽平, 熊勇, 等. 江西官山国家级自然保护区主要能源植物资源[J]. 南方林业科学, 2017, 45(6): 36-41.
YAO Xiao-hua, YU Ze-ping, XIONG Yong, et al. Main energy plant resources (NFBP) in Jiangxi Guanshan National Nature Reserve[J]. *South China Forestry Science*, 2017, 45(6): 36-41.

- [10] 杜宁. 能源植物专题资料汇编(后续)[J]. 云南植物研究, 2006(4): 437-438.
DU Ning. Compilation of special information on energy plants (follow-up)[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2006(4): 437-438.
- [11] 彭良才. 论中国生物能源发展的根本出路[J]. 华中农业大学学报(社会科学版), 2011(2): 1-6.
PENG Liang-cai. Fundamental solution for biofuel production in China[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University (Social Sciences Edition)*, 2011(2): 1-6.
- [12] 谢光辉. 能源植物分类及其转化利用[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(2): 1-7.
XIE Guang-hui. An overview on classification and utilizations of energy plants[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(2): 1-7.
- [13] 谢光辉, 段增强, 张宝贵, 等. 中国适宜于非粮能源植物生产的土地概念、分类和发展战略[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(2): 1-8.
XIE Guang-hui, DUAN Zeng-qiang, ZHANG Bao-gui, et al. Definition, classification and development strategy of land suitable for non-food energy plant production in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(2): 1-8.
- [14] 沈光, 徐海军, 周琳, 等. 论能源植物的定义及其评价指标体系的建立[J]. 国土与自然资源研究, 2014(1): 64-67.
SHEN Guang, XU Hai-jun, ZHOU Lin, et al. Discussion on definition of energy plant and its evaluation indicator system[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2014(1): 64-67.
- [15] 傅登祺, 黄宏文. 能源植物资源及其开发利用简况[J]. 植物科学学报, 2006(2): 183-190.
FU Deng-qi, HUANG Hong-wen. Brief introduction of exploitation and utilization of fuel plants resources[J]. *Plant Science Journal*, 2006(2): 183-190.
- [16] 边归国. 陆生植物化感作用抑制藻类生长的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(2): 90-95.
BIAN Gui-guo. Review on inhibition of terrestrial plant allelopathy of algae growth[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(2): 90-95.
- [17] 李红强, 王礼茂. 能源作物的推广模式和替代效应初探——以云南省双江县膏桐推广种植为例[J]. 可再生能源, 2009(4): 82-86.
LI Hong-qiang, WANG Li-mao. Study on the extension pattern and substitution effect of energy crops: A case study on *Jatropha curcas* planted in Shuangjiang County, Yunnan Province[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009(4): 82-86.
- [18] 杨玲. 我国石油植物的开发与利用分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2008: 3-5.
YANG Ling. The development and usage analysis of petroleum plant in China[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2008: 3-5.
- [19] 曹蕾, 衣兰智, 孙娟. 生物质能源在燃料生产与发电方面的应用现状与前景[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 49-53.
CAO Lei, YI Lan-zhi, SUN Juan. The application and prospect of biomass energy source in the fuel production and power generation[J]. *Pratacultural Science*, 2009, 26(9): 49-53.
- [20] 王厚全, 刘巍, 李辉, 等. 生物能源与循环农业协调发展探析[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(2): 10-12.
WANG Hou-quan, LIU Wei, LI Hui, et al. On the coordinated development of bioenergy and circular agriculture[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2011, 39(2): 10-12.
- [21] Hu L, Jianjun Q, Ligang W, et al. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat-maize rotation system in China[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1): 24-33.
- [22] 何蒲明, 王雅鹏. 要理性和谨慎处理生物能源与粮食安全问题[J]. 农业现代化研究, 2008(3): 302-305.
HE Pu-ming, WANG Ya-peng. Rational and careful to handle problems on bio-energy and food security[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2008(3): 302-305.
- [23] Helliwell R. Where did the marginal land go? Farmers perspectives on marginal land and its implications for adoption of dedicated energy crops[J]. *Energy Policy*, 2018: 117: 166-172.
- [24] 付传琴, 董泰丽, 孙颖材. 优选适宜边际土地栽培的高产能源作物及其厌氧发酵产气潜力研究[J]. 中国沼气, 2017, 35(2): 72-76.
FU Chuan-cui, DONG Tai-li, SUN Ying-cai. Selection of high yield energy crops for marginal land and its biogas production potential[J]. *China Biogas*, 2017, 35(2): 72-76.
- [25] Wang D J, Liu L S, Ye Y, et al. Design and key heating power parameters of a newly-developed household biomass briquette heating boiler[J]. *Renewable Energy*, 2020(147): 1371-1379.
- [26] 张美丽, 毛勇, 张志敏, 等. 微生物生产清洁能源的研究进展及前景[J]. 陕西农业科学, 2014, 60(1): 50-52.
ZHANG Mei-li, MAO Yong, ZHANG Zhi-min, et al. Research progress and prospect of microbial production of clean energy[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 60(1): 50-52.
- [27] Fabio S, Rattan L, Michael H E, et al. Potential soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2006, 25(5): 441-472.
- [28] Cannell M G R. Carbon sequestration and biomass energy offset: Theoretical, potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2003, 24(2): 97-116.
- [29] 娄岩. 中国乙醇汽油和燃料乙醇市场供需现状[J]. 国际石油经济, 2019, 27(7): 68-74.
LOU Yan. The supply and demand market for ethanol gasoline and fuel ethanol in China[J]. *International Petroleum Economic*, 2019, 27(7): 68-74.
- [30] 刘建国, 龙元嵩, 黄园, 等. 微藻生物柴油研究现状与发展策略[J]. 海洋科学, 2013(10): 134-143.
LIU Jian-guo, LONG Yuan-ru, HUANG Yuan, et al. The research status, problems and developmental strategies in culture microalgal for biodiesel[J]. *Marine Sciences*, 2013(10): 134-143.
- [31] Solinas S, Deligios P A, Sulas L, et al. A land-based approach for the environmental assessment of mediterranean annual and perennial energy crops[J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 103: 63-72.
- [32] Yuan X F, Song T J, Yang J S, et al. Changes of microbial community in the rhizosphere soil of *Atractylodes macrocephala* when encountering replant disease[J]. *South African Journal of Botany*, 2019, 127:

- 129-135.
- [33] Tian L, Shi S H, Ma L N, et al. Community structures of the rhizobiomes of cultivated and wild soybeans in their continuous cropping[J]. *Microbiological Research*, 2020, 232: 126390.
- [34] 杨伟, 朱有健, 成伟, 等. 黏结剂对生物质成型燃料燃烧过程中颗粒物排放特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4515-4522.
- YANG Wei, ZHU You-jian, CHENG Wei, et al. Effect of binders on particulate matter emission characteristics[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(15): 4515-4522.
- [35] 李伟振, 姜洋, 王微, 等. 温度对4种典型生物质成型特性的影响[J]. 生物质化学工程, 2019, 53(5): 27-33.
- LI Wei-zhen, JIANG Yang, WANG Wei, et al. Effects of temperature on pelletization of four typical types of biomass[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2019, 53(5): 27-33.
- [36] Chand R, Babu B V, Qiu M, et al. Evaluating the potential for bio-fuel upgrading: A comprehensive analysis of bio-crude and bio-residue from hydrothermal liquefaction of agricultural biomass[J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113679.
- [37] 王霜, 翟玉玲, 李法社, 等. 16种生物柴油的液体燃料特性试验研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(12): 45-50.
- WANG Shuang, ZHAI Yu-ling, LI Fa-she, et al. Liquid fuel characteristics of 16 kinds of biodiesels[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(12): 45-50.
- [38] 黄文婕. 鄂尔多斯高原能源植物筛选与利用研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2010: 7-8.
- HUANG Wen-jie. Screening and utilization of energy plants in Ordos Plateau[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2010: 7-8.
- [39] 王风芹, 张炎达, 谢慧, 等. 生物质气化气发酵生产乙醇优良菌株的筛选[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 221-226.
- WANG Feng-qin, ZHANG Yan-da, XIE Hui, et al. Microorganism screening for ethanol production using gasification gas from agricultural residue[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 221-226.
- [40] 蒋恩臣, 何光设. 生物质热分解技术比较研究[J]. 可再生能源, 2006(4): 58-62.
- JIANG En-chen, HE Guang-she. Comparison study on three biomass pyrolysis technologies[J]. *Renewable Energy Resources*, 2006(4): 58-62.
- [41] Gabin M, Adrien B, Silvana M. The role of biomass gasification and methanisation in the decarbonisation strategies[J]. *Energy*, 2020, 193: 116737.
- [42] 邓良伟, 吴有林, 丁能水, 等. 畜禽粪污能源化利用研究进展[J]. 中国沼气, 2019, 37(5): 3-14.
- DENG Liang-wei, WU You-lin, DING Neng-shui, et al. A review of energy utilization of animal manure[J]. *China Biogas*, 2019, 37(5): 3-14.
- [43] 费华伟, 王利宁, 赫春燕, 等. 中国燃料乙醇发展现状及对石油行业的影响[J]. 国际石油经济, 2017, 25(11): 40-44.
- FEI Hua-wei, WANG Li-ning, HE Chun-yan, et al. Fuel ethanol's status quo and impacts on petroleum industry[J]. *International Petroleum Economics*, 2017, 25(11): 40-44.
- [44] 李振宇, 李顶杰, 黄格省, 等. 燃料乙醇发展现状及思考[J]. 化工进展, 2013, 32(7): 1457-1467.
- LI Zhen-yu, LI Ding-jie, HUANG Ge-sheng, et al. Insights on current development of fuel ethanol[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2013, 32(7): 1457-1467.
- [45] 王亚静, 毕于运, 唐华俊. 中国能源作物制备液体生物燃料现状及发展趋势[J]. 可再生能源, 2009, 27(2): 100-105.
- WANG Ya-jing, BI Yu-yun, TANG Hua-jun. The status of producing liquid bio-fuels from energy crops and its development trend in China[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(2): 100-105.
- [46] 田芳, 李凡, 袁敬伟, 等. 纤维素乙醇产业现状及关键过程技术难点[J]. 当代化工, 2019, 48(9): 2051-2056.
- TIAN Fang, LI Fan, YUAN Jing-wei, et al. Industrialization status and key process technical difficulties of cellulose ethanol[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2019, 48(9): 2051-2056.
- [47] 李扬, 曾静, 杜伟, 等. 我国生物柴油产业的回顾与展望[J]. 生物工程学报, 2015, 31(6): 820-828.
- LI Yang, ZENG Jing, DU Wei, et al. Progress and prospect of biodiesel industry in China[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2015, 31(6): 820-828.
- [48] 高德健, 张彩虹. 发展木本生物柴油的环境效益及路径分析[J]. 环境保护, 2014, 42(5): 47-48.
- GAO De-jian, ZHANG Cai-hong. Environmental benefits and path analysis of developing woody biodiesel[J]. *Environmental Protection*, 2014, 42(5): 47-48.
- [49] 莫笑萍, 庞斌, 白璐, 等. 我国生物柴油产业发展的态势分析[J]. 生态经济, 2012(6): 85-89.
- MO Xiao-ping, PANG Bin, BAI Lu, et al. The SWOT analysis of biodiesel industry development in China[J]. *Ecological Economy*, 2012(6): 85-89.
- [50] 牛超, 薄翠梅, 丁键. 生物沼气加压水洗脱碳过程研究及其控制系统设计[J]. 现代化工, 2017, 37(3): 171-174, 176.
- NIU Chao, BO Cui-mei, DING Jian. Biogas upgrading process with high pressure water scrubbing and its control system[J]. *Modern Chemical Industry*, 2017, 37(3): 171-174, 176.
- [51] 高振, 侯建国, 王秀林, 等. 焦炉尾气耦合生物沼气制取天然气的工艺集成研究[J]. 化学工程, 2016, 44(11): 74-78.
- GAO Zhen, HOU Jian-guo, WANG Xiu-lin, et al. Process integration of coke oven gas coupling biogas to synthetic natural gas[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2016, 44(11): 74-78.
- [52] 武斌. 生物沼气生产利用系统建模分析及可持续性评价[D]. 北京: 中国科学院研究生院(过程工程研究所), 2016: 102-112.
- WU Bin. Modeling analysis and sustainability evaluation of biogas production and utilization system[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Process Engineering), 2016: 102-112.
- [53] 李巡安, 包先斌, 慕峰. 生物沼气产业价值链探索与分析[J]. 可再生能源, 2014, 32(3): 348-353.
- LI Xun-an, BAO Xian-bin, MU Feng. Exploration and analysis of industry value chain for biogas[J]. *Renewable Energy Resources*, 2014,

- 32(3): 348–353.
- [54] 吴创之, 周肇秋, 马隆龙, 等. 生物质发电技术分析比较[J]. 可再生能源, 2008(3): 38–41.
- WU Chuang-zhi, ZHOU Zhao-qiu, MA Long-long, et al. A comparative study on biomass power generation technologies[J]. *Renewable Energy Resources*, 2008(3): 38–41.
- [55] 林宗虎. 生物质能的利用现状及展望[J]. 自然杂志, 2010, 32(4): 196–201.
- LIN Zong-hu. Status and prospect of biomass energy utilization[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2010, 32(4): 196–201.
- [56] 陈松笔, 安飞飞, 张振文, 等. 木薯综合育种理论探讨[J]. 生命科学, 2016, 28(7): 807–816.
- CHEN Song-bi, AN Fei-fei, ZHANG Zhen-wen, et al. Theoretical consideration of cassava integrated breeding[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2016, 28(7): 807–816.
- [57] 黎 裕, 李英慧, 杨庆文, 等. 基于基因组学的作物种质资源研究: 现状与展望[J]. 中国农业科学, 2015, 48(17): 3333–3353.
- LI Yu, LI Ying-hui, YANG Qing-wen, et al. Genomics-based crop germplasm research: Advances and perspectives[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(17): 3333–3353.
- [58] 寇一翮, 吕世奇, 刘建全, 等. 寡糖类能源植物菊芋及其综合利用研究进展[J]. 生命科学, 2014, 26(5): 451–457.
- KOU Yi-xuan, LÜ Shi-qi, LIU Jian-quan, et al. The review of *Helianthus tuberosus* L. and its comprehensive utilization as a bioenergy plant rich in oligosaccharide[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2014, 26(5): 451–457.
- [59] 刘惠惠. 中国不同地区能源作物甜高粱规模化生产的可持续性[D]. 北京: 中国农业大学, 2015: 60–66.
- LIU Hui-hui. Sustainability of sweet sorghum large-scale production for biofuels in different regions of China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015: 60–66.
- [60] 王银柱, 王 冬, 刘 玉, 等. 不同水分梯度下能源植物芒草和柳枝稷生物量分配规律[J]. 草业科学, 2015, 32(2): 236–240.
- WANG Yin-zhu, WANG Dong, LIU Yu, et al. Biomass allocation of *Miscanthus sinensis* and *Panicum virgatum* response to different water conditions[J]. *Pratacultural Science*, 2015, 32(2): 236–240.
- [61] 杜海凤, 闫 超. 生物质转化利用技术的研究进展[J]. 能源化工, 2016, 37(2): 41–46.
- DU Hai-feng, YAN Chao. Study progress on technologies of biomass conversion and utilization[J]. *Energy Chemical Industry*, 2016, 37(2): 41–46.