

我国草本纤维素类能源作物产业化发展面临的主要挑战与策略

蒋建雄 孙建中 李 霞 高 璐 耿小燕

(江苏大学生物质能源研究所, 镇江 212013)

doi:10.3969/j.issn.1674-0319.2015.02.003



作者简介

蒋建雄, 江苏大学生物质能源研究所研究员, 博士, 博士生导师。主要从事芒草等草本纤维素类能源植物的遗传改良研究。

E-mail:jxjiang2002@163.com



通讯作者简介

孙建中, 江苏大学特聘教授, 博士生导师, 江苏大学生物质能源研究所所长, 生物质能源与生物过程仿生专家, 美国华盛顿州立大学系统生物工程系兼职教授及生物质能源研究领域博士生导师, 是国际上将白蚁高效生物降解植物木质纤维素特性引入到生物质能源研究中的少数前沿科学家之一, 目前主要从事消化木质纤维素类自然生物系统(如白蚁)的生物过程仿生、能源植物改造、生物基材料与多元生物能源产品开发等方面的研究。

E-mail:jzsun1002@ujs.edu.cn

能源供应和环境问题日益成为制约我国社会经济可持续发展的两大挑战。根据我国的实际情况, 利用宜能边际性土地资源, 大力发展草本纤维素类能源作物种植产业具有广阔的前景。文章简要介绍了我国发展草本纤维素类能源作物的迫切性和必要性, 其产业化过程中所面临的主要科学问题与技术挑战, 以及对这些问题的思考及对策。

能源短缺和环境污染是目前人类社会面临的两个重大挑战, 特别是我国社会和经济经历了改革开放以来30多年的高速发展, 能源供应和环境问题尤为突出。充分利用和开发可替代石化能源的新型能源, 实现低碳减排, 已成为保障我国能源安全和社会稳定、实现社会和经济可持续发展、提高人民健康水平和生活质量的迫切需要。生物质能源是最有发展前景的可再生清洁能源之一, 我国各类清洁能源总资源量中生物质能占比54.5% (折合11.71亿吨标准煤), 2013年我国生物质实际产能0.52亿吨标准煤, 在可再生清洁能源中居首位^①。而木质纤

维素类生物质是地球上储量最为丰富、可再生和环境友好的生物质能资源, 目前, 不少国家都在研究和发展符合本国实际情况的木质纤维素类能源作物, 作为纤维素乙醇等第二代液体生物燃料的生产原料。根据筛选能源作物的自然生物属性、生态经济属性和易转化利用的能源化属性的要求来评价, 芒草、柳枝稷、杂交狼尾草等多年生草本木质纤维素类能源植物所具有的综合优势不断为国内外科学家所充分认识, 这些能源植物的种类多、分布范围广、适应性强、生长速度快、生活周期短、便于大规模种植和产业化生产, 是首选的能源作物。

1 发展我国草本纤维素类能源作物的迫切性和必要性

1.1 满足国家能源安全和社会经济发展需求

我国已是世界上第一大能源消费国,根据国家统计局发布的数据,中国的能源消费总量由2001年的15.04亿吨标准煤增至2013年的38.5亿吨标准煤,年均增速为8.1%。同期中国原油进口量由2001年的6025.5万吨急剧增至2013年的28 195万吨,增长了3.7倍(图1)。2013年我国原油对外依存度达到57.4%,连续第五年突破50%的国际警戒线。早在2008年,《全国矿产资源规划(2008~2015年)》就曾预测,到2020年我国原油对外依存度将达到60%。中国社会科学院2010年发布的《能源蓝皮书》同样预测,到2020年我国原油对外依存

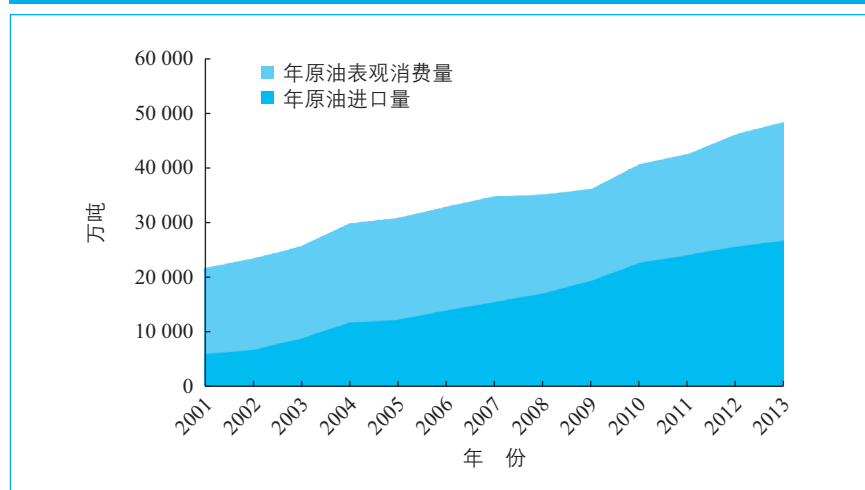
度将高达64.5%。能源对外依存度的不断推高凸现中国的能源安全形势日趋严峻。根据党的十六大报告提出的我国全面实现小康社会总体目标的长期发展战略,到2020年的国内生产总值(GDP)总量在2000年基础上翻两番,要实现这一发展目标,经济仍需持续高速增长,而能源供应将成为至关重要的因素。据预测,2020年我国总人口将达到14.5亿左右,人均能源消费量约为3吨标准煤,届时我国能源消费总量需求将达到40亿~50亿吨标准煤。由于人口基数大,我国人均能源资源占有量远低于世界平均值,人均煤炭占有量仅约为世界人均水平的1/2,石油约为1/10,天然气约为1/20。从经济发展阶段和当前的能耗水平看,我国未来社会经济发展中能源约束日趋强化。因此,开发我国丰富的生物质能资源,迅速提高其在能源消费总量的比例,是保障我国能

源供应、确保社会经济可持续发展和推进全面建成小康社会的重要措施之一。近年来,包括中国在内的不少国家加强了投资力度,生物质能源开发利用得到较大发展。美国能源部计划到2030年本国动力汽油需求量的30%将由生物质能源替代^①;欧盟则提出到2020年可再生能源消费占到全部能源消费的20%,生物液体燃料的比例至少达到10%的目标^②;我国2007年制定的《可再生能源中长期发展规划》中提出,到2020年可再生能源消费要占到全部能源消费的16%左右,其中生物质发电3000万千瓦,生物燃料乙醇1000万吨^③。

1.2 有利于环境保护

以石油和煤炭为主的全球能源消费导致CO₂等温室气体排放量增加,引起全球气候变暖,已引起国际社会高度重视。我国是世界上为数不多的几个以煤炭为主要能源来源的国家之一,煤炭消费量占能源消费总量的70%以上,属于“低质型”能源消费结构,是造成我国能源利用效率低、产品能源成本高、环境污染严重等问题的根本原因。2006年我国已取代美国成为世界第一大CO₂排放国,2013年CO₂排放量更达到95.24亿吨,占全球总排放量的29%,超过美国和欧盟的总和。而今后较长时间内,我国经

图1 中国年原油表观消费量和年原油进口量(2001~2013年)



① 参考文献

石元春. 中国能源革命不能缺少生物质煤油气田. 瞭望, 2014, 35: 40-41.

② 参考文献

DOE-EERE (US Department of Energy-Energy Efficiency and Renewable Energy) Office of the Biomass Program (OBP). Biomass multi-year program plan, 2009.

③ 参考文献

Council Directive (EC) 2009/28 of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 2009.

④ 参考文献

国家发展与改革委员会. 可再生能源中长期发展规划, 2007.

⑤ 参考文献

Robbins M P, Evans G, Valentine J, et al. New opportunities for the exploitation of energy crops by thermochemical conversion in Northern Europe and the UK. Progress in Energy and Combustion Science, 2012, 38: 138-155.

⑥ 参考文献

Yan J, Chen W L, Luo F, et al. Variability and adaptability of *Miscanthus* species evaluated for energy crop domestication. GCB Bioenergy, 2012, 4: 49-60.

济将继续保持高速发展, 潜在的能源需求增长将对环境带来越来越大的压力, 若不及时采取节能减排、调整能源消费结构等措施来控制和减少能源消费所衍生的CO₂等的排放, 环境污染将愈演愈烈, 巨大的环境治理成本将成为国家的经济重负, 反过来又将严重制约未来社会经济的持续健康发展。目前, 国际社会正采取积极行动控制CO₂等温室气体排放, 中国被要求承担更多CO₂减排义务的国际压力也越来越大。为了应对石化能源资源日趋短缺与气候变化的挑战, 2009年我国政府决定大力发展可再生能源和核能, 实现到2020年我国单位GDP的CO₂排放量比2005年下降40%~45%, 及到2020年我国非石化能源占一次能源消费的比重达到15%左右的两大减排目标。2014年11月北京APEC会议期间, 作为世界上两个最大的CO₂排放国, 中美两国领导人共同宣布了两国各自2020年后应对气候变化的行动, 美国计划到2025年实现温室气体排放量在2005年基础上下降26%~28%, 中国承诺到2030年左右CO₂排放量达到峰值, 并计划到2030年非石化能源占一次能源消费的比重提高到20%。为实现上述目标, 大力发展生物质能应成为我国能源发展战略的一项长期国策。

1.3 能源农业产业化发展的必然

原料供应是生物质能产业发展的

主要瓶颈之一。目前, 一些国家已把开发能源农业作为国家能源战略的重要组成部分。2007年发布的《中共中央国务院关于积极发展现代农业扎实推进社会主义新农村建设的若干意见》中也提出“以生物能源、生物基产品和生物质原料为主要内容的生物质产业, 是拓展农业功能、促进资源利用的朝阳产业”。能源农业产业化发展需要以充足、稳定的生物质原料供应作为支撑, 农作物秸秆曾被认为是一种可以充分开发利用的生物质资源。我国的农作物秸秆资源估计每年有7亿吨左右, 以玉米、小麦和水稻秸秆为主, 扣除用于造纸、作为饲料(或饲料原料)、造肥还田以及收集的损失, 可作为生物质能源的秸秆资源量约占20%(1.4亿吨左右), 理论上能生产2300万吨纤维素乙醇。但我国各地的秸秆能源密度均偏低, 一般在150吨/平方千米以下, 说明了秸秆资源分布的分散性与收集的困难性, 加之秸秆生物质密度小、体积大、收集半径小、缺乏完整的专业化原料收运储以及供应体系, 制约了产业化规模, 因此实际能够利用的秸秆资源量远低于预期。此外, 传统农作物以收获籽粒为目的, 栽培措施均针对保障籽粒产量和品质, 而作为营养体的秸秆生物质品质则难以保证。同时, 秸秆生产具有明显的地域性和季节性特点, 不同地区农作物种植结构差异大, 秸秆种类多, 生物质理化特性都有所不同。因此, 秸秆生物质品质参差

不齐，难以标准化，降低了预处理工艺及发酵工艺效率，不能满足产业化发展的要求。而发展专用草本纤维素类能源作物，是实现能源农业产业化发展的关键。芒草、芦竹、柳枝稷等植物植株高大，生长迅速，生物质产量高，适应性极强，能够在较为贫瘠的边际性土地上种植。我国成规模的边际性土地主要分布于北方、西部和东部沿海等地区，这些地区的气候和土壤状况一般只适合种植草本植物，特别是多年生草本植物，不仅每年都可以收获生物质，而且地下部生物量大，有利于水土保持和储碳固碳。

1.4 具有丰富的草本纤维素类能源植物资源

理想的草本纤维素类能源作物应具备高光合效率、高效水肥利用、高效能量产出、高抗逆能力、低生产成本和生态环境友好等特性。欧洲国家通过对一个起源于日本的多年生草本植物——天然异源三倍体芒草品种*Miscanthus x giganteus*的研究和比较，认为芒草（*Miscanthus*）是最具有开发利用潜力的纤维素类能源作物之一，而美国则将一种本土的多年生草本植物——柳枝稷（*Panicum virgatum*）视为是适合本国发展的纤维素类能源作物，目前已选育出大量的商业化品种^⑤。我国地跨温带、亚

热带和热带地区，气候类型多样，草本纤维素类植物资源种类和数量极其丰富（表1）。中国是芒草的原产地和遗传多样性中心，其中一个最优良的种类——南荻（*M. lutarioriparius*）是中国的特有种类^⑥，江苏大学、湖南农业大学、武汉大学和北京市农林科学院等科研单位收集保存了3000多份芒草种质资源。我国还有很多其

他草本纤维素类植物具有作为能源作物开发利用的潜力，包括河八王属（*Narenga*）、芦竹属（*Arundo*）、蔗茅属（*Erianthus*）、狼尾草属（*Pennisetum*）和藨草属（*Phalaris*）等，在国内各科研单位收集保存有2000~3000份种质资源。中国农业大学、四川农业大学等单位还从美国引进了不少柳枝稷品

表1 世界草本纤维素类能源植物资源的主要种类、特点及分布				
植物种类	分类学名称	干生物质产量	生物学特性	原产地
芒草	禾本科 芒属	20 ~ 50 吨 / 公顷	多年生，株高 3 ~ 7 m，丛生或散生，分蘖数 40 ~ 200 个，耐旱、耐涝、耐瘠、耐寒、耐储藏、抗病虫害能力强，但耐盐碱能力较弱	中国除青藏高原和西北的广大地区，东亚、东南亚、西伯利亚
杂交狼尾草	禾本科 狼尾草属	40 ~ 70 吨 / 公顷	高度不育，株高 2 ~ 6 m，丛生，株型紧凑，分蘖数 15 ~ 20 个，耐旱、耐瘠、耐盐、抗病虫害能力强，但不耐低温和霜冻	以一年生的美洲狼尾草和多年生的象草杂交产生的三倍体，适合热带和亚热带地区种植
象草	禾本科 狼尾草属	15 ~ 60 吨 / 公顷	多年生，株高 2 ~ 5 m，丛生，分蘖数 30 ~ 50 个，在沙土和黏土中均能生长，喜肥水，耐酸性土壤，但不耐瘠和低温	非洲热带地区
芦竹	禾本科 芦竹属	30 ~ 40 吨 / 公顷	多年生，株高 3 ~ 6 m，丛生但株型披散，适应性强，易于繁殖，耐旱、耐涝、耐热、耐冻、耐瘠	中国广泛分布，亚洲、非洲、大洋洲
河八王	禾本科 河八王属	35 ~ 45 吨 / 公顷	多年生，株高 3 ~ 5 m，丛生，耐瘠、耐旱、早熟、直立抗倒，抗病能力强，不耐低温	中国秦岭—淮河以南地区，东亚、东南亚、南亚
斑茅	禾本科 蔗茅属	30 ~ 50 吨 / 公顷	多年生，株高 2 ~ 6 m，丛生，喜温暖潮湿气候，耐盐、耐酸性土壤、耐旱、耐瘠、抗病虫害能力强	中国长江以南地区，东南亚、南亚
柳枝稷	禾本科 黍属	10 ~ 30 吨 / 公顷	多年生，株高 1 ~ 3 m，丛生，根系发达，适应性广，耐寒、耐旱、耐涝	北美洲
须芒草	禾本科 须芒草属	4 ~ 13 吨 / 公顷	多年生，株高 1 ~ 3 m，丛生，喜湿、耐旱、耐瘠、耐酸性土壤	南、北美洲
藨草	禾本科 藨草属	6 ~ 15 吨 / 公顷	多年生，株高 0.6 ~ 1.5 m，多散生，分蘖旺盛，抗旱、耐涝、耐低温、不耐盐	中国北方地区，北美、北欧和亚洲温带地区，大洋洲，南非
芨芨草	禾本科 芨芨草属	5 ~ 12 吨 / 公顷	多年生，株高 0.5 ~ 2.5 m，丛生，根系强大，适应性强，耐寒、耐旱、耐瘠、耐盐碱	中国北方和青藏高原，中亚、西伯利亚

种，柳枝稷被证明在中国适应性广，具有推广种植前景。

2 发展我国草本纤维素类能源作物产业化种植的主要问题与挑战

2.1 缺乏适宜边际性土地种植的草本能源作物品种，无法满足生物质规模化生产的需要

持续充足的生物质原料供给是保证生物质能源产业健康发展的重要基础。近年来，我国不少企业陆续建设了生物质发电或生物乙醇项目，但是都遭遇了原材料短缺，生产难以维系的尴尬局面，主要原因是忽视了生物质原料的特殊性，认为项目只要有了资金和设备，原料供应可以走市场化途径解决。生物质原料的稳定供给依赖于大量的土地资源，据预测，美国和欧盟如果仍以传统谷物、糖类和油料作物为原料生产生物燃料，以达到替代10%交通用生物燃料的目标，将需要占用10%~43%的耕地^①。在使用的土地类型上，发达国家目前大都是使用宜耕地来种植能源作物。美国的总耕地面积居世界第一位，约1.74亿公顷，其中近一半为休耕地，耕地后备资源丰富。而尽管我国总耕地面积约1.43亿公顷，居世界第三，但人均耕地面积仅1.4亩（1亩约为666.67平方米），不到世界人均耕地面积的

一半，不仅耕地资源已非常稀缺，其他农用地利用潜力也已基本挖掘殆尽。为了达到《可再生能源中长期发展规划》中制订的生物质能源替代目标，我国除了利用部分农林废弃物之外，在宜能边际性土地发展非粮能源作物是符合我国国情的基本思路。目前，我国宜耕边际性土地资源约为2408万公顷，其中，集中连片、具备规模化开发潜力、适合于生物燃料乙醇能源作物种植的宜耕边际性土地约为700万公顷^②。可见，在不与粮争地的原则下，草本纤维素类能源作物仍有广阔发展空间。通过专用能源作物品种选育，可以显著提高生物质产量，改善能源利用品质，降低成本，增强生物能源产品的市场竞争力。我国草本纤维素类能源植物资源极其丰富，仅收集保存的种质资源就达几千份，但以前主要是应用于造纸、牧草和水土保持等用途，而将其作为专用能源作物开发利用的研究还刚刚起步，远落后于欧美等国家。品种选育方面，目前仅有芒草、杂交狼尾草和藨草有育成新品种的报道，但它们通常是以提高和改善生物质产量为育种目标，抗逆性等性状则较少关注，这些品种是否适合在我国北方干旱地区的荒地、沙地、盐碱地及东部沿海滩涂地等主要类型的边际性土地上推广种植，还没有开展过相应的示范试验。缺乏适宜在不同边际性土地上种

植的优良品种，使得我国草本纤维素类生物质的生产及能源化利用难以实现规模化。

2.2 不具备草本纤维素类能源作物的标准化生产能力，生物质收储运体系有待完善

农业标准化是规范农产品生产行为的技术基础，是推动农业产业化经营的重要前提，其通过控制和规范农产品的生产过程、优化农业生产要素的配置和提高农业生产组织的管理水平，达到稳定农产品质量与安全水平的目的。农作物秸秆之所以难以得到有效利用，除了生物质分散度高、收集成本高之外，还与目前农作物是以分散农户为单位开展生产导致生物质品质参差不齐，从而影响预处理工艺和发酵工艺的稳定性有关。目前，像芒草、杂交狼尾草等能源作物品种尽管已发展有一定规模的种植面积，但其生物质原料生产标准化程度低，产量和品质千差万别，难以保持统一。通过促进草本纤维素类能源作物生物质的标准化生产，有助于维持原料品质的一致性，提高纤维素乙醇的生产效率和降低成本。草本纤维素类能源作物生物质生产的标准化是一个系统工程，概括起来就是要实现“两个标准化技术、两个标准化基地和三个标准化体系”。其中，“两个标准化

技术”是指能源作物优良品种的种子（种苗）生产标准化技术和高产高效标准化种植管理技术，“两个标准化基地”是指能源作物优良品种良种繁育标准化基地和原料生产标准化基地，“三个标准化体系”包括能源作物新品种审定标准化体系、良种繁育标准化体系和生物质收储运标准化体系。草本纤维素类能源作物生物质收储运体系的特征是高度机械化。高效的机械化收储运体系可以在生物质的最佳收获期内集中时间完成收获，保证了原料加工品质的一致性，还可以减少原料损失和降低成本。目前国内外在农作物秸秆收储运机械化方面取得了很好的进展，可以为草本纤维素类生物质的收储运提供参考和借鉴，但也要注意两者之间的差别，不能完全照搬，如芒草、狼尾草等能源作物植株都为丛生，具多个分蘖，茎秆剪切力大，而玉米等农作物植株一般都为单茎秆，茎秆剪切力较小，因此，在生产实践中若直接用秸秆收割机来收获能源作物生物质，就会发现效果不理想。

2.3 对大规模发展草本纤维类能源作物可能带来的生态环境影响关注不够，缺少宏观与微观研究

目前，大多数能源植物的研究集中在提高生物质原料产量以及品种资

源收集与评价方面，而对能源作物产业化种植可能对我国农业生态环境带来的宏观与微观的影响却没有引起足够的重视。众所周知，边际性土地的生态系统通常较脆弱，而边际性土地又多为生物多样性与景观多样性分布的重要场所或一些珍稀动植物的栖息地，如果大面积种植单一植物物种，将可能破坏生态系统内部的生物多样性，改变其生态结构与稳定性。如在云南和广西很多的原始荒山野林被砍伐，重新改种了近百万公顷的桉树人工速生林，但该树种在生长过程需要由土地供给大量的养分，对土壤肥力的消耗较大，改变了土壤结构，减少了地表的植被覆盖，因而造成林地土壤水分下渗量减少和水土流失的严重问题。显然，能源作物的规模化、产业化种植需要全面考虑农业生态环境特别是我国不同边际性土地的水资源、土壤资源、生物多样性资源以及气候资源的承载量及相互之间的影响。作为我国的芒草特有种类，南荻在湖南洞庭湖、湖北洪湖等湖区的湖洲上有规模化的人工种植，共十多万公顷，以前主要作为造纸原料加以利用。南荻在湖区的大面积人工种植一方面加剧了洞庭湖泥沙淤积，使湖水面积逐步缩小，但另一方面也为大量野生鸟类提供了良好的栖息环境。我国北方边际性土地的生态环境更加脆弱，目前尚无大规模发展草本纤维素

类能源作物的实践，其潜在的生态风险尚缺乏系统的实证研究。因此，在规划草本纤维素类能源作物在这些地区的布局与种植规模时，应该对其引起的生态环境变化以及各类生态资源条件进行充分的宏观与微观评估。

综上所述，草本纤维素类能源作物产业化种植在我国还处于起步阶段，存在诸多亟待解决的问题，特别是在能源作物优良抗逆品种选育、生物质原料标准化生产技术以及能源作物产业化对生态环境的潜在影响等方面需要开展深入细致的研究，以更好地促进草本纤维素类能源作物产业化的健康发展。

3 我国草本纤维类能源作物产业化种植的思考及对策

3.1 构建科学合理的草本纤维素类能源作物评价指标体系，指导优良品种的筛选与开发利用

能源作物的研究方兴未艾，提出来的可作为能源作物开发利用的草本纤维素类植物种类繁多，如芒草、柳枝稷、狼尾草、斑茅和芨芨草等。这些不同物种之间乃至同一物种的不同基因型之间，在生育期、抗逆性、生物质产量、木质纤维素化学成分及其结构等性状上都有差异，甚至差别悬殊，对于它们是否都适合作为能源

⑦ 参考文献

AEA Technology Group PLC. Review of works on the environmental sustainability of international biofuels production and use, 2008.

⑧ 参考文献

严良政, 张琳, 王士强, 等. 中国能源作物生产乙醇的潜力及分布特点. 农业工程学报, 2008, 24(5): 213-216.

⑨ 参考文献

Fu C X, Mielenz J R, Xiao X R, et al. Genetic manipulation of lignin reduces recalcitrance and improves ethanol production from switchgrass. PNAS, 2011, 108: 3803-3808.

⑩ 参考文献

Sun J Z, Ding S Y, Doran-Peterson J. Biological conversion of biomass for fuels and chemicals: Exploration from natural utilization systems. The Royal Society of Chemistry (RSC Publishing), 2014.

⑪ 参考文献

Richard C, Clough R C, Pappu K, et al. Manganese peroxidase from the white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* is enzymatically active and accumulates to high levels in transgenic maize seed. Plant Biotechnology Journal, 2006, 4: 53-62.

作物开发利用, 还缺乏行之有效的筛选评价技术指标体系, 实际工作中盲目性很大, 对开展能源作物新品种选育难以提供科学的指导。不同类型边际性土地的生态条件各异, 且草本植物一般对光温较敏感, 同一植物在不同纬度或海拔地区的表现有较大差异, 其生物质利用方式也可能多样, 因此, 制定能源作物筛选评价指标的统一标准有较大困难, 因为不同地区、不同情况下同一指标的权重可能有高低。另一方面, 由每家科研单位自己负责制定适宜不同类型边际性土地的某一种或几种能源作物筛选评价体系的工作量和难度又太大。可行的方案是在国家有关部门的协调和指导下, 根据我国草本纤维素类能源作物发展的总体规划和区域布局, 组织各单位在不同的代表性边际性土地类型上开展评价试验, 研究建立适合某一特定区域气候、水分和土壤特性的能源作物筛选评价指标体系的国家标准。总体来说, 在评价指标的选择上应遵循全面性、科学性、代表性、可行性等基本原则, 重点考察生物质产量、木质纤维素化学成分、热力学特征以及生态适应性(包括耐瘠、耐盐碱、抗病虫害、抗旱、抗涝等能力)等。值得注意的是, 我国能源作物的抗逆性评价处于十分重要的特殊战略地位, 遵循“不与人争粮、不与粮争地”的发展原则, 充分利用边际性土地种植专用能源作物, 是我国未来发展的主要趋势。这些地区通常生产条件

差, 缺乏灌溉条件或盐碱危害严重, 通过筛选或培育抗逆性强的能源作物品种, 不仅可以提高生物质产量, 还能扩大适种区域, 有利于解除制约我国能源作物利用宜能边际性土地规模化、产业化种植的主要障碍。此外, 在我国北方生态条件脆弱的边际性土地上, 改良土壤、固沙和保持水土等生态效益的能力也可以作为草本纤维素类能源植物的一个评价指标, 如与一年生植物相比较, 多年生草本植物地下部生物量大, 在地上部生物质收获后, 仍可以有效地固定土壤和碳。

3.2 开展草本纤维素类能源作物细胞壁抗降解屏障的分子改良, 提高生物质的转化效率

基于能源作物改造的木质纤维素高效转化与利用已成为各国可再生能源发展的重大战略选择。近年来的研究证实, 能源作物的遗传改良有可能在很大程度上帮助我们克服木质纤维素在结构上形成的坚固抗降解屏障。目前, 对于植物抗降解屏障的研究, 主要侧重于对木质素生物合成与调控途径方面的探索, 科学家们试图从分子水平解析木质素的结构形成、合成过程中关键酶功能及相关代谢途径, 明确能源作物的细胞壁结构改造和调控的科学基础。随着植物木质素生物合成途径研究的持续深入, 通过木质素合成过程的调控来解决

植物细胞壁抗降解屏障的挑战已在许多研究中获得证实，其主要是通过基因工程技术反向抑制或过表达木质素合成途径中的一些关键酶基因，进而调控木质素和纤维素的生物合成。其中，通过植物RNAi或反义RNA技术来修饰代谢途径中的关键酶基因可以有效地影响木质素生物合成，使细胞壁中的木质素含量明显下降（表2）。通过应用RNAi技术下调COMT基因（咖啡酸-O-甲基转移酶基因）在能源作物柳枝稷细胞内的表达，使得转基因植株中的木质素含量降低了4.6%~14.7%，用这样的生物质原料

进行发酵，使纤维素乙醇产量提高了29.2%~38.3%^⑩。由此可见，能源作物木质素生物合成途径的遗传改良是应对细胞壁抗降解屏障挑战的有效途径。但是，木质素的作用是增强植物体的机械强度，有利于输导组织的水分运输和抵抗不良外界环境的侵袭。因此，在木质素生物合成关键酶基因的表达被沉默后，转基因植株往往发生组织器官坍塌或植株矮化畸形，无利用价值。

3.3 开发新型能源作物的概念与功能，奠定能源作物产业化利用的基础

外源木质纤维素酶基因在草本纤维素类能源作物细胞中高效表达与调控机理的研究是提高生物质转化效率、降低预处理和酶水解工艺成本的一条新途径^⑩。近年来，科学家们开始在能源作物细胞内进行外源木质纤维素酶基因的表达研究，希望这些植物作为生物反应器，在其生长过程中大量表达并在细胞内积累木质纤维素酶。收获后生物质经过粉碎和预处理后，在进一步的发酵过程中能利用自身表达的酶，不添加或少添加来源于通过转基因表达的外源木质纤维素酶，就可以达到将纤维素和半纤维素迅速降解为单糖的目的，进一步用于发酵生产乙醇，降低生产成本。考虑细胞质表达途径对植物生长影响较

表2 通过木质素生物合成途径遗传改良改变植物细胞壁抗降解屏障的研究进展

基因	表达载体类型	受体植物	基因表达方式	转基因后代植物表现
咖啡酸-O-甲基转移酶基因 (COMT)	RNAi	柳枝稷	组成型表达	生物质产量无显著变化，但乙酰溴木质素含量下降4.6%~14.7%，在温和预处理条件下糖化效率提高16.5%~21.5%，无预处理条件下糖化效率增加29.2%~38.3%
咖啡酸-O-甲基转移酶基因 (COMT)	RNAi	甘蔗	木质部特异表达	植株生物质产量下降15.1%~71.4%，木质素含量下降8%~12%，生物质糖化效率提高28%~32%
4-香豆酸辅酶A连接酶基因 (4CL)	RNAi	柳枝稷	组成型表达	植株生物质产量无明显变化，但酸不溶性木质素或总木质素含量均下降22%，生物质糖化效率提高57.2%
肉桂酰辅酶A还原酶基因 (CCR)	RNAi	丹参	组成型表达	植株矮化，G型和S型木质素单体含量分别下降60%和90%
肉桂醇脱氢酶基因 (CAD)	amiRNA	二穗短柄草	组成型表达	植株开花推迟，分蘖增加，生物质含量提高，乙酰溴木质素含量无明显变化，但S型木质素单体含量显著降低，H型含量增加，发酵效率提高9%~17%
咖啡酸-O-甲基转移酶基因 (COMT)	amiRNA	二穗短柄草	组成型表达	植株开花提早，分蘖增加，生物质产量无显著变化，但乙酰溴木质素含量下降24%~31.5%，其中G型和S型单体含量分别下降17%和10%，发酵效率提高4%~10%
木质醇单体4-O-甲基转移酶基因 (MOMT)	过表达	拟南芥	木质部特异表达	植株形态无明显变化，但木质素含量减少约24%，G型和S型单体含量显著下降，糖化效率提高22%
肉桂酰辅酶A还原酶基因 (CCR)	RNAi	多年生黑麦草	组成型表达	植株形态无变化，但木质素含量降低了28.58%~50.18%
肉桂醇脱氢酶基因 (CAD)	RNAi	多年生黑麦草	组成型表达	植株形态无显著变化，但木质素含量降低了26.40%~45.04%
R2R3-MYB转录因子 (MYB4)	过表达	烟草	组成型表达	植株形态正常，但木质素含量降低了15.6%~23.1%，S/G值提高36.0%~66.3%，总黄酮类含量增加21.7%~28.8%
肉桂酰辅酶A还原酶基因 (CCR)	反义RNA	杨树	组成型表达	植株高度下降4%~20%，木质部的酸不溶性木质素含量降低8%~47%
非编码RNA 397a (mi-R397a)	过表达	毛果杨	组成型表达	酸不溶性木质素含量降低12%~22%

大，一般采用定向胞外或细胞器积累表达（如质外体、叶绿体、溶酶体和液泡等），达到不影响植物正常生长的目的（表3）。同样，利用植物基因工程技术，还可以将外源木质素酶基因（如漆酶或其他木质素氧化酶）导入到能源作物的体内表达并积累^①。显然，这种能自身产生木质素酶、可调控其活性的生物质原料，通过采用生物预处理途径，结合仓储过程时间的需要，将其与预处理工艺过程有机结合，有望解决目前热化学生物质预处理过程耗能高、副作用大等难以克服的技术瓶颈。因此，基于木质纤维素酶转基因工程改造的优良能源作物，可以在很大程度上改进目前生物质原料的品质，使其形成易于转化利用的细胞壁特征，以提高转化效率并降低用酶成本。近年来，该研究方向已成为能源作物改良的重要研究和探索方向之一，江苏大学在该领域的研究亦取得了重大进展（未发表）。

3.4 发展草本纤维素类能源作物生物质原料培育标准体系和新型生产技术，促进产业链的形成

生物质生产标准化体系的建立和实施，既是草本纤维素类能源作物种植产业化的必然要求，也是生物质原料品质的技术保证。目前国家能源非粮生物质原料研发中心（NECB）下

设了一个能源行业非粮生物质原料标准化技术委员会，正在逐步推进能源作物生物质标准化体系的建设。值得注意的是，不同边际性土地类型、不同能源作物品种类型，其标准化体系的要求都可能有所不同，而且标准化体系的构建也不可能一蹴而就，需要在生产实践中不断修改完善。此外，标准化生产体系的落实还必须通过组织化来保证，要推进农业生产经营组

织的创新，建立适合当地实际情况的各种产业化经营模式。如果不解决农业生产的组织化问题，能源植物生物质原料生产的标准化、产业化就无从谈起。

能源作物产业化新型种植技术的开发，如能源作物的内生菌促生技术，对提高土壤中营养物质的利用率、增强植物对逆境的适应性、耐受性以及促进植物的生长发育等方面有

表3 外源木质纤维素酶基因在植物细胞中表达以提高生物质转化效率的研究进展

基因	基因来源	受体植物	蛋白表达部位	转基因后代植物表现
内切木聚糖酶基因 (<i>Endoxynalase</i>)	<i>Bacillus subtilis</i>	小麦	胚乳的胞质或内质网	籽粒皱缩，重量降低 25% ~ 33%，细胞壁中阿拉伯糖 / 木糖比值提高 10% ~ 15%，水溶性阿拉伯木聚糖含量增加 50% 左右
阿魏酸酯酶基因 (<i>FAE</i>)	<i>Aspergillus niger</i>	小麦	胚乳的胞质或内质网	籽粒皱缩，重量降低 20% ~ 50%，细胞壁中水不溶性阿拉伯木聚糖含量增加 15% ~ 40%，阿魏酸单体含量降低 13% ~ 34%
木聚糖酶 A 基因 (<i>xynA</i>)	<i>Clostridium thermocellum</i>	水稻	胞质	植株形态正常， <i>xynA</i> 基因稳定表达，在干燥种子中也可检测到酶活性，且在 60℃ 下热稳定性高
木聚糖酶 B 基因 (<i>xynB</i>)	<i>Clostridium stercoararium</i>	烟草	胞质	植株形态正常， <i>xynB</i> 表达量达到叶片中总蛋白含量 0.08% ~ 0.10%
木聚糖酶 B 基因 (<i>xynB</i>)	<i>Clostridium stercoararium</i>	水稻	胞质	不带信号肽序列的转基因植株生长发育正常，但带信号肽序列的转基因植株生长缓慢并逐渐枯萎。 <i>xynB</i> 表达量占叶片中总蛋白含量 0.10% ~ 0.17%，酶活性热稳定性高且能降解半纤维素底物
木聚糖酶 B 基因 (<i>xynB</i>)	<i>Thermotoga maritima</i>	烟草	叶绿体	植株形态正常， <i>xynB</i> 表达量达到叶片中可溶性蛋白总量的 11% ~ 15%，在 85 ~ 90℃ 酶活稳定，可降解多种木聚糖底物
锰过氧化物酶基因 (<i>MnP</i>)	<i>Phanerochaete chrysosporium</i>	玉米	全株或种子的质外体	多数种子质外体表达的 <i>MnP</i> 蛋白含量达到可溶性蛋白总量的 11% ~ 14%，植株生长发育正常；而全株表达的 <i>MnP</i> 蛋白含量最高只能达到 2% ~ 3%，且茎秆和叶片出现锈斑损伤
阿魏酸酯酶基因 (<i>FAE</i>)	<i>Aspergillus nidulans</i>	拟南芥	质外体	植株形态正常，阿魏酸单体含量下降 60%，糖化效率提高 20.7%
木聚糖酶 B 基因 (<i>xynB</i>)	<i>Dictyoglomus thermophilum</i>	玉米	质外体	植株形态正常，在 75℃ 预处理条件下产生的葡萄糖和木糖量可分别达到理论产量的 90% 和 63%
内切葡聚糖酶 A 基因 (<i>celA</i>)	<i>Thermotoga maritima</i>	烟草	叶绿体	表达量达到可溶性蛋白总量 4.5% ~ 5.2%，生物质自降解时产生 1.422mg/mL 和 1.891mg/mL 葡萄糖

重要作用，成为能源植物产业化种植技术的重要发展方向。植物促生内生菌可以通过固氮作用、分泌植物生长调节物质、合成铁载体及抑制一些疾病的发生等方式促进植物的生长，同时可以大幅度减少除草剂等农药及化肥的使用，有助于提高生物质原料品质和降低种植成本。几年来，江苏大学已成功地在象草、杂交狼尾草等植物中筛选、开发出多种植物促生内生菌，它们具有分泌IAA、固氮、产铁载体等促生性能，特别是可促进高盐胁迫下杂交狼尾草植株的生长，有助于促进象草及杂交狼尾草作为能源作物在盐碱性边际土地上的产业化种植，显著提高生物质产量，具有广阔的应用前景。

3.5 重视草本纤维素类能源作物发展对宏观与微观生态环境的影响，确保生物质原料生产的可持续性发展

能源作物生物质生产是一种土地集约型的生产方式，而大规模改变土地用途可能会对CO₂排放、土壤、水分和生物资源等产生直接或间接的影响。因此，决策者应慎重规划我国草本纤维素类能源作物的种植布局与发展规模，对于其对生态环境的潜在效应要给予足够重视。在具体实践中，应遵循以下几个原则：

一是要做好能源作物物种或品种

的选择。尽量选用本土的草本纤维素类植物，若使用外来物种，则需要先进行严格的环境风险评价，防止发展成恶性杂草。尽可能选用多年生能源作物，达到减少土地耕作次数、降低土壤侵蚀风险、增加土壤速效养分含量和土壤碳蓄积的目的。采用现代生物技术选育抗逆性强的能源作物新品种，减少生物质生产过程中对水分、肥料、农药等的过度需求，避免造成水资源短缺、土壤肥力下降和环境污染等严重问题。

二是因地制宜采用不同的能源作物种植模式。如选用适宜当地种植的多个物种或品种进行合理配置，减少单一物种的集约化种植模式，维持原有生态环境的完整性。对于利用具有原生植被的土地资源如荒山、滩涂等发展能源作物的，可考虑采用带状种植等其他模式，减少其对土壤和原生植被的扰动。

三是引入和施行生物多样性影响评价制度。这是实现生物多样性保护与可持续利用最有效的手段之一，已经日益受到重视。2010年，国务院发布了《中国生物多样性保护战略与行动计划》（2011~2030年），将“评估能源作物种植对生物多样性的影响”列为生物多样性保护的优先行动之一。现阶段的工作重点应该是尽早建立将草本纤维素类能源作物种植项目纳入生物多样性影响评价的指标体

系和标准。今后涉及在生态环境脆弱地区发展能源作物项目的立项，应要求先进行生物多样性影响评价研究。

4 展 望

开发利用草本纤维素类能源作物，对于缓解日益突出的能源供应和环境污染等问题、促进我国全面实现小康社会总体目标的长期发展战略具有十分重要的意义。我国草本纤维素类植物资源极其丰富，且已具备一定的产业化基础，发展前景广阔。同时，也应该看到其产业化过程目前还存在品种、技术、成本和生态环境等诸多制约因素，特别是我国受土地资源的限制较大，在“不与人争粮、不与粮争地”的指导原则下，能源作物产业化的难度比欧美国家更大。在借鉴国外先进经验与技术的基础上，有必要根据各地的实际情况，因地制宜，研发适宜的草本纤维素类能源作物品种以及相配套的高效高产规模化种植技术、收储运技术和机械化装备，并有机地整合各个生产环节，在政府政策的引导下以及相关行业协会的指导下，以推动区域经济、社会和生态环境协调发展为根本目标，坚持走专业化、标准化生产草本纤维素类生物质的发展道路，以此来实现其产业化的长足进步。