



THE CHINA SUSTAINABLE ENERGY PROGRAM
中国可持续能源项目

威廉与佛洛拉·休斯基金会
能源基金会
项目资助号: G-1104-14045



能源草生物液体燃料利用的关键问题

Energy Grass Crops for Liquid Biofuel Production:

Key Questions



能源与交通创新中心
2012年5月

致 谢

感谢能源基金会中国可持续能源项目为本报告提供资金支持；感谢中国农业大学谢光辉教授、杨富裕副教授，湖南农业大学易自力教授，国能生物发电有限公司科技发展部经理庄会永先生，康泰斯（中国）工程有限公司副总裁何翌先生，北京友和翔新能源科技有限公司总经理左海涛博士，农业部规划设计研究院孟海波博士为本报告提供信息与宝贵建议。

同时也诚挚地感谢为本报告提出宝贵意见与建议的业内专家与同事。

报告作者

康利平、安锋、Robert Earley、马冬

报告声明

本报告所有观点、解释、结论均属作者个人意见，不代表项目资助方。报告仅限于研究、个人学习或某个组织的内部传阅，不得翻印或者用于商业目的。如有不妥与谬误之处，敬请读者不吝批评和指正。

联系方式:

北京市朝阳区光华路丙 12 号数码 01 大厦 1904 室 邮编:100020

电话: 010 -65857324 传真: 010 -65857394 网站: www.icet.org.cn

前 言

从世界各国对生物液体燃料的中长期发展规划及目标，可以看出各国政府对二代液体燃料寄予了厚望，以期实现交通能源的补充替代和温室气体减排。

第二代先进生物液体燃料的原料来源主要有两种：农林废弃物和草本能源作物（能源草）。目前第二代先进生物液体燃料的研究及示范项目主要集中于农林废弃物，尤其是农作物秸秆。而能源草在种植、收获、运输及贮藏可实现全程机械化操作，适合规模化发展，此外，能源草对土地利用要求较低，具有较强的环境抗逆性，可利用边际和荒弃土地种植，因此，能源草在规模化常年连续生产及土地利用上具有较大优势。美国将柳枝稷作为主要能源草进行研究开发利用，欧盟则重点开发利用芒草、藜草及芦竹。中国拥有广泛丰富的能源草种质资源和边际土地，在能源草开发利用上也具有较强优势。

现阶段，中国对能源草的研究开发利用，包括品种选育、对边际土地适应性、稳定性、种植示范、田间管理与收集运输、燃料开发示范等方面，仍处于初始或空白阶段，企业及社会对能源草的了解也非常有限。本报告列出能源草进行生物液体燃料利用的关键问题，并进行了简要回答，其目的是引起科研单位、政府机构及社会各界对能源草生物液体燃料利用的重视，起到一个抛砖引玉及信息分享的作用。因中国能源草相关的参考资料及示范项目较少，且能源草利用的部分观点争议性及数据偏差仍较大，因此，本报告对关键问题所给出的答案及所涉数据、观点与结论均属作者个人意见，不代表项目资助方。报告仅限于研究、个人学习或组织的内部传阅，不得翻印或者用于商业目的。如有不妥与谬误之处，敬请读者不吝批评和指正。

目 录

1. 什么是能源草？	- 1 -
2. 能源草进行生物液体燃料利用需具备哪些特征？	- 1 -
3. 可进行生物液体燃料利用的主要能源草种属包括哪些？	- 1 -
4. 能源草生物液体燃料利用路径主要包括哪些？	- 3 -
1) 纤维素乙醇.....	- 4 -
2) 生物质合成油.....	- 4 -
3) 生物质裂解油.....	- 5 -
5. 能源草其他交通燃料利用路径还包括哪些？	- 6 -
1) 燃烧发电——应用于电驱动汽车.....	- 6 -
2) 生物沼气——应用于清洁燃气汽车.....	- 6 -
6. 能源草进行生物液体燃料利用的主要优势有哪些？	- 6 -
1) 重要的可再生能源.....	- 6 -
2) 缓解能源安全与粮食安全矛盾.....	- 6 -
3) 优良的生物学特性.....	- 6 -
4) 能源产出投入比高.....	- 7 -
5) 纤维素与半纤维素含量高.....	- 7 -
6) 温室气体及污染物减排潜力大.....	- 7 -
7. 能源草纤维素乙醇与其他燃料乙醇对比	- 7 -
8. 能源草纤维素乙醇当前成本及未来期望如何？	- 8 -
9. 国际能源草发展现状及生物液体燃料利用经验	- 8 -
1) 美国典型能源草柳枝稷的研究与生物液体燃料利用	- 8 -
2) 欧洲能源草种植现状及液体燃料利用典型案例	- 11 -
3) 中国台湾.....	- 12 -
10. 中国能源草进行生物液体燃料利用的重要性与必要性	- 12 -
1) 替代化石交通能源，缓解能源安全.....	- 12 -
2) 实现交通污染物与温室气体减排.....	- 13 -
3) 符合“不与人争粮、不与粮争地、不破坏生态环境”发展原则.....	- 14 -
4) 可利用边际及废弃土地进行种植，以解决生物液体燃料原料问题.....	- 14 -

5) 可提供品质稳定的原料, 适合生物液体燃料产业化规模化发展	- 14 -
11. 中国进行能源草生物液体燃料利用潜力与优势	- 14 -
1) 宏观政策层面支持	- 14 -
2) 宜能边际土地资源丰富	- 15 -
3) 纤维素乙醇工艺技术日趋成熟	- 15 -
4) 纤维素乙醇的经济前景可观	- 16 -
12. 中国对能源草生物液体燃料利用的主要科技投入有哪些?	- 17 -
1) “973”计划——草本能源植物培育及化学催化制备先进液体燃料的基础研究 ..	- 17 -
2) “863”计划——边际土地能源草分子育种与新种质创制	- 18 -
3) “863”计划——能源草高效制备生物天然气关键技术研究	- 18 -
4) 国家科技支撑计划——耐盐碱能源草筛选与新品种培育	- 18 -
5) 国家科技支撑计划——生物固碳潜力评估与挖掘技术研究	- 18 -
6) 北京市科技攻关项目——能源草边际土地种植及其利用技术示范研究	- 18 -
13. 中国有哪些机构正在进行能源草研究工作?	- 19 -
1) 中国农业大学——系统的开展能源草选育、能源转化前处理及原料贮藏技术 ..	- 19 -
2) 湖南农业大学——芒草资源调查、收集、评价及培育	- 19 -
3) 北京草业与环境研究发展中心——能源草边际土地规模化种植	- 20 -
4) 四川省草原科学研究院——能源草种质资源研究	- 21 -
5) 其他相关研究	- 21 -
14. 目前中国能源草示范种植基地有哪些?	- 21 -
1) 内蒙古科尔沁地区柳枝稷种植示范基地	- 21 -
2) 湖南洞庭湖南荻示范基地	- 22 -
3) 河北涿州和北京上庄能源草示范种植基地	- 22 -
4) 四川省草原科学研究院甘蔗属能源草基地	- 23 -
15. 能源草进行生物液体燃料利用所存在的主要问题?	- 24 -
1) 缺乏进行生物液体燃料利用的优良能源草品种	- 24 -
2) 对能源草生物液体燃料转化的基础研究投入不足	- 24 -
3) 能源草在收获、收集、贮存方面的经验仍待积累	- 24 -
4) 政策支持、产业经济前景不明确, 企业处于观望状态	- 25 -
5) 农民对能源草的认知存在局限性, 种植积极性仍不高	- 25 -

6) 能源草生物液体燃料产业化发展的其他问题.....	- 25 -
16. 中国能源草生物液体燃料利用的期望与建议?	- 26 -
1) 加强科学研究、加大科研投入.....	- 26 -
2) 在行业规划及实施政策中体现对能源草生物液体燃料利用的重视	- 26 -
3) 强化示范项目资金支持.....	- 26 -
4) 出台边际地认定标准及相关的财税扶持政策.....	- 26 -
5) 利用碳税或者温室气体减排机制促进能源草燃料利用的发展	- 26 -
6) 建立能源草可持续发展原则，尤其是土地利用原则	- 26 -
7) 建立起“政府-科研单位-企业-农户”的合作联盟.....	- 26 -
8) 加强国际交流合作.....	- 26 -

能源草生物液体燃料利用的关键问题

1. 什么是能源草？

能源草，也被称为草本能源植物。通常是指那些植株高大、生长速度快、且具有高生物质产量的多年生根茎禾草，尤其是 C4 光合利用路径禾草¹。目前无法规或标准对“能源草”进行定义。

进行生物液体燃料或者其他能源化利用的能源草，一般都需要品种筛选优化，人工驯化培育，大规模种植。



能源草收获期

2. 能源草进行生物液体燃料利用需具备哪些特征？

- 1) 光合效率高，生物产量大；
- 2) 投入低（肥料、水、杀虫剂等）；
- 3) 环境抗逆性强，适应性广；
- 4) 品性持续稳定；
- 5) 可持续发展、不破坏生态环境；
- 6) 富含纤维素及半纤维素；
- 7) 最好为多年生。



柳枝稷

3. 可进行生物液体燃料利用的主要能源草种属包括哪些？

所有能源草种属均可作为生物液体燃料生产原料，目前备受关注的能源草品种主要包括芒草 (*Miscanthus Anderss.*)、柳枝稷(*Panicum virgatum L.*)、芦竹 (*Arundo donax L.*)、藨草 (*Phalaris arundinacea L.*)、杂交狼尾草 (*Pennisetum americanum x P. purpureum*)、割手密 (*Saccharum spontaneum*) 等。

“芒草”是芒属植物的通称，C4 光合途径，分布在东亚和东南亚地区；中国是芒属植物主要分布中心，共有 6 个种²，其中生物量高、抗逆性强的仅 4 个种，

¹ 解新明, 周峰, 赵燕慧等. 多年生能源禾草的产能和生态效益[J]. 生态学报. 2008.05

² 中国植物物种资源信息数据库——芒属定义. 2012 年 3 月 1 日查询.

分别是芒、五节芒、荻、南荻。此外，原产日本的一个芒、荻天然杂交种——奇岗，目前已在欧美开发种植；芒草的株高、产量与品种与种植区域相关，其干物质最高产量可达 30 吨/公顷以上，寿命可长达 20 年。



芒草

柳枝稷，也是一种 C4 光合植物；广泛分布于美国大部分地区，在中国引种已有 10 多年时间，在黄土高原等北方地区有较好的适应性³。柳枝稷株高约为 1-3 米¹；在美国东南部等优良种植条件下干物质产量可高达 35 吨/公顷，在边际土地上种植多年平均生物量干重为 5.2-11.1 吨/公顷⁴；其根茎系统发达，适应性广，可应用于边际土地；收获寿命可达 10 年或者更长。



柳枝稷及其根系

荻，C4 光合途径；分布在中国与日本；中国拥有荻、南荻两个种，南荻为中国特有品种⁵，主要分布在长江流域湖区及东北、华北地区；荻草与芒草植物学特性很类似，之前中国植物物种分类将其归置于芒属或白茅属，但荻草外形小穗无芒，而后归于荻属⁶，但实际研究中也常被列为芒属植物²。荻草产量最高也可达 30 吨/公顷以上，具有生物质产量高、燃烧特性好和再生能力强等特点，是最理想的能源草之一。

芦竹，C3 光合途径；遍布亚热带和温带地区，中国有分布；株高 3 - 6 米¹；芦竹的生物质产量随种植地和生产条件的不同有较大变化，通常为 5 - 35 吨/公顷，意大利 M&G 集团通过优化芦竹品种及其地域、气候和土壤条件，其最大干物质产量达到了 50 吨/公顷⁷。芦竹根状茎进行无性繁殖，既耐寒耐热，又耐涝耐

http://db.kib.ac.cn/eflora/view/search/chs_contents.aspx?name=Miscanthus%20Anderss

³ Wang H M, Xu B C, Li F R, et al. Preliminary study on growth response of *Panicum virgatum* L. to different sites in the Loess plateau. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13 (3): 91 - 93.

⁴ Schmer M R, Vogel K P, Mitchel R B, et al . Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America ,2008, 105 : 464-469

⁵ 易自立. 芒草研究现状及应用前景. 芒草专题汇报会, 2011.07.09.

⁶ 中国植物物种资源信息数据库——荻属定义. 2012 年 3 月 1 日查询.

http://db.kib.ac.cn/eflora/view/search/chs_contents.aspx?l_name=Triarrhena Nakai

⁷ 生物燃料与绿色化学. 康泰斯. <http://www.chemtex.com.cn/download/brochure.pdf>

旱，也具有广泛的生态适应性。

藨草，C3 光合途径；广泛分布于欧洲、亚洲和北美的温带地区，在中国亦有分布¹；株高 1.5 - 3.0 米，藨草的生物物质产量对环境因素的依赖性较大，如土壤类型、降水量和施肥量等，干物质产量约为 5-12 吨/公顷；寿命可达 10 年。



芦竹（左）与 藨草（右）

杂交狼尾草，三倍体 C4 植物，无性繁殖。是以美洲狼尾草雄性不育系基因和非洲象草基因的杂交种。具有生长快、分蘖多、产量高、抗病、耐旱、根系发达、营养丰富、管理粗放、用途广泛、适应全面、光合效能好等显著特点。目前主要用作牧草，在中等肥水条件下种植，亩产鲜草 20-30 吨。



河北涿州能源草种植基地——杂交狼尾草

以上几种主要的能源草，大部分在我国有自然分布，种质资源丰富。

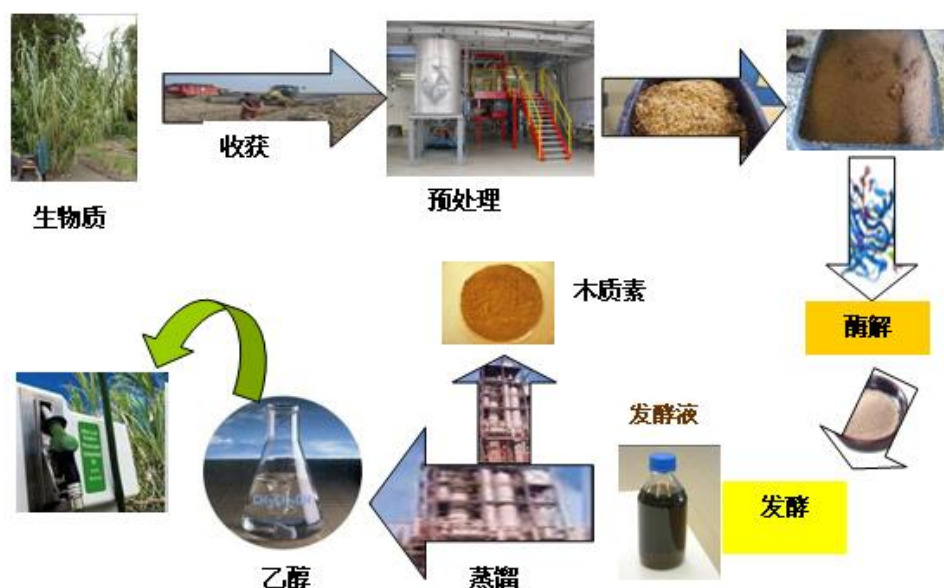
4. 能源草生物液体燃料利用路径主要包括哪些？

能源草生物液体燃料利用路径主要包括三条：纤维素乙醇、生物质合成燃料

和生物质裂解油。从工艺上来说，主要有两种类型：生物化工工艺和热化学工艺，一些新兴工艺也会将两者结合。目前，能源草主要利用方式仍是纤维素乙醇的生物化工工艺路径。

1) 纤维素乙醇

目前纤维素燃料乙醇主要工艺设计为纤维生物质经预处理后，利用纤维素酶水解，酵母发酵生产乙醇，如图所示。另一种新兴的工艺路线为生物质气化后利用厌氧细菌发酵生产乙醇。纤维素乙醇可直接与汽油混合作为交通燃料使用，低比例混合无需改变发动机装置。



纤维乙醇生物化工工艺路径示意图

纤维素乙醇酶解工艺已完成示范应用，达到商业化生产水平。国际大型能源企业已竞相进入纤维素乙醇行业，如 BP, Shell, 中石油等等，此外，一些新兴生物能源生产企业也竞相加入，如加拿大 Iogen 公司, 巴西 Dedini 公司, 美国 POET 公司, 意大利 M&G 集团, 中粮集团等。

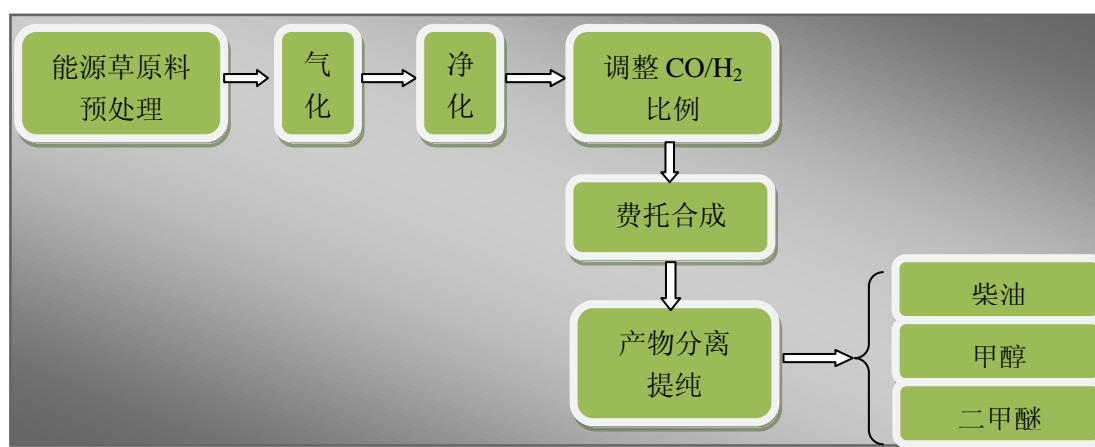
中国乙醇生产企业也积极开展纤维素乙醇中试与商业化项目，河南天冠集团、中粮集团分别完成了 3000 吨、500 吨中试实验；并正筹建大规模商业化装置，天冠集团万吨级生产装置已成功验收，中粮集团 5 万吨生产装置正在筹建中，预计 2014 年可投入生产。

2) 生物质合成油

生物质合成燃料生产是通过热化学和化学合成相结合的方式完成，首先通过先进的生物质气化工艺，生产出生物质合成气，主要成分为 CO 和 H_2 ，合成气经过调整 CO/H_2 比，经费托合成过程合成生物液体燃料。通过控制反应条件，如温度、压力、 CO/H_2 比等，在催化剂的作用下，生产不同燃料产品，主要包括柴油、甲醇、二甲醚。这些生物合成油可直接替代对应的化石燃料，作为交通能源使用。

该技术仍在研究和小范围应用阶段，德国科林公司 (CHOREN) 于 2008 年

建成了年产 1.5 万生物费托合成柴油示范工厂。中国在生物质合成燃料方面的研究较少，但以煤为原料的费托合成技术已较成熟，为生物质合成油技术奠定了基础。



生物质合成油生产工艺流程图

3) 生物质裂解油

生物质裂解油是生物质在中温（500-600 °C）、高速率加热（104-105 °C/s）和极短气体滞留时间的条件下，发生直接热解，产物经快速冷却，中间液态产物分子在进一步断裂生成气体之前冷凝，获得生物质裂解油。生物质裂解油化学组分复杂，品质不高，可直接或者经过精制后替代化石燃料，可替代航海或非道路车辆燃料使用。

该技术目前也在研究示范应用中，国内一些科研院所如中科院过程工程所，浙江大学，东北林业大学分别以玉米秸秆、木屑、林业废弃物进行了中试实验，其中东北林业大学完成了 400 吨/年的示范规模。

以上三种为生物液体燃料，可直接替代化石燃料应用。



生物液体燃料生产工艺设备

5. 能源草其他交通燃料利用路径还包括哪些？

1) 燃烧发电——应用于电驱动汽车

能源草具有热值高，燃烧性能好，不污染环境等性能，是燃烧发电的良好材料。目前主要以 5% - 20% 的比例与原煤混合后燃烧发电。生物质发电可通过电网间接应用于电动汽车，实现交通能源替代。

中国秸秆等纤维生物质直燃与混燃发电技术也渐趋成熟，至 2010 年底，生物质核准发电规模已超过 200 处⁸。国家在政策、经济等上都在大力扶持生物质发电，能源草发电的经济、社会效益潜力大。

2) 生物沼气——应用于清洁燃气汽车

能源草在厌氧发酵的条件下，可生产沼气。沼气与天然气品性相似，经液化后可替代液化天然气作为交通燃料应用。

6. 能源草进行生物液体燃料利用的主要优势有哪些？

1) 重要的可再生能源

能源草作为光合贮能作物，是一种重要的可再生能源，其开发利用在一定程度上可缓解国家能源安全及气候变化问题，协助完成国家可再生能源规划。

2) 缓解能源安全与粮食安全矛盾

生物液体燃料在“能源发展”与“粮食安全”问题上存在较大争议。中国属地少人多的发展中国家，该争议已成为 2006 年至 2011 年生物液体燃料产业发展缓滞的重要原因。能源草为非粮能源作物，既不与粮争粮，又可生产生物液体燃料，可化解争端。



3) 优良的生物学特性

能源草地下根茎发达，对水分和养分利用率高，具有较强的抗旱性、耐瘠性以及耐极端环境能力，且对土壤质量要求不严格，适应于中性、酸性或者碱性的边际土地。与中国“不与粮争夺耕地”，利用废弃荒地发展生物能源的政策相符合。

生长速度快，产量高。能源草定植 2-3 年后便可达到较高产量；芒草在南欧地区种植年最高产量可达 30-45 吨/公顷⁹；柳枝稷在美国东南部种植最高可达 35-40 吨/公顷。柳枝稷引进品种在中国北京郊区种植，最大干物质产量也可达 27 吨/公顷¹⁰。规模化种植，优良条件下平均干物质产量也可达 15-26 吨/公顷¹¹

⁸ 康利平, 孟海波等. 中国纤维生物质四种能源转化技术研究报告[R]. 能源与交通创新中心, 农业部规划设计研究院. 2010.08.

⁹ I. Lewandowski, JC Clifton-Brown, JMO Scurlock, etc. Miscanthus: European experience with a novel energy crop[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 19:209-227

¹⁰ 姜峻. 柳枝稷的生成发育与土壤水分特征. 水土保持学报, 2007, 27(5):75-78

¹¹ IEA, Switchgrass Production in the USA[R]. 2011.

一次种植，多年收获，种植投入成本低。一般能源草一次种植，可连续稳产收获 10 年以上，优良品种甚至可达 25 年；在低水肥投入下也仍能连续多年实现高生物质产量；此外，能源草的抗病性强，无需施用农药，经济产投比较高，效益潜力大。

4) 能源产出投入比高

柳枝稷的能源产出投入比约为 20:1，是玉米投入产出比的 2-2.5 倍¹²，最大能量净产出比甜高粱还要高¹³。按高产量 30 吨/公顷计算，每公顷柳枝稷可产出高达 50 万 MJ 的能量，能源利用潜力极高。

5) 纤维素与半纤维素含量高

柳枝稷、芒草等能源草的纤维素与半纤维素含量可达 60% 以上，且结构相对蓬松，预处理糖转化效率可达 90% 以上¹⁴；是二代纤维素乙醇燃料的优质原料来源。

6) 温室气体及污染物减排潜力大

以柳枝稷为例，其碳能比(kg/GJ)比仅为 1.9，而天然气、石油和煤炭的排放量则为 13.8、22.3 和 24.6；而综合整个能源利用过程，纤维素乙醇与化石汽油相比，生命周期温室气体减排潜力可达 60-120%^{15,16,17}，一般水平值也能达到 90%；此外，纤维素乙醇能大大降低 NO_x，CO，硫化物等常规污染物的排放¹⁸。

此外，在不占用传统农作物的耕地种植柳枝稷、芒草等能源作物可减少土壤侵蚀 90% 以上。草本类能源作物能为贫瘠的土壤增加有机成份，提高天然有机碳储量，吸收空气中的 CO₂，直接影响气候变化。

7. 能源草纤维素乙醇与其他燃料乙醇对比

能源草纤维素燃料乙醇与玉米、木薯乙醇相比，在单位面积乙醇产量，单位能源产出、化石能源投产比、温室气体减排等多方面都具备优势，但是在成本方面仍处于劣势，需通过技术突破来减少成本。

¹² 谢光辉，熊韶峻. 能源作物柳枝稷及科尔沁规模示范. 2011 年 9 月

¹³ Venturi P, Venturi G. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems[J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25 (3): 235~255

¹⁴ Deepak.R.Keshwani, Jay J.Cheng. Switchgrass for bioethanol and other value-added applications: A review [J]. Bioresource Technology 2009,100,1515-1523.

¹⁵ JEC. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context: version 3. JRC, EUCAR, CONCAWE. 2008

¹⁶ California Air Resources Board. Detailed California-Modified GREET Pathway for Transportation Fuels: version 2. Available from <http://www.arb.ca.gov/fuels/lcfs/lcfs.htm>.2009

¹⁷ Ou Xunmin, Zhang Xiliang, Chang Shiyan, Guo Qingfang. Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in China, Applied Energy, 2009, 86(S), 197-208.

¹⁸ Resource Efficient Agricultural Production (REAP). Analysing Ontario Biofuel Options: Greenhouse Gas Mitigation Efficiency and Costs. 2008.01

能源草纤维素乙醇与玉米乙醇、木薯乙醇对比			
指标	纤维素乙醇	玉米乙醇	木薯乙醇
单位面积乙醇产量 (L/ha)	7260	3000	4000
单位能量产出 (toe/ha)	4.24	1.75	2.34
化石能源投产比	2-36	1.03-1.67	1.6
温室气体减排 (%)	70-110%	12-32%	20-50%
成本 (toe/元)	8745	5672	4974

来源：中国生物液体燃料发展战略与政策, 2010. 该书根据 Worldwatch Institute、Convention on Biodiversity 及 U.S. National Renewable Energy Laboratory 等研究结果整理得出。

8. 能源草纤维素乙醇当前成本及未来期望如何？

目前，能源草纤维素乙醇的成本主要聚集于原料收集、纤维素酶及工厂运营成本上，乙醇成本仍高于 2.5 美元/加仑，比玉米乙醇高近一倍；据最近研究进展及行业发展表明，这三个方面都有较大的下降空间，通过技术突破，2020 年能源草纤维素乙醇成本可降低到 1.1 元，比玉米乙醇的利润空间更大，价格竞争性更强。

项目成本 (美元/加仑)	纤维素乙醇	玉米乙醇	2020 年 期望水平
原料成本	1.00	1.17	0.33
副产品回收	-0.1	-0.38	-0.09
酶制剂成本	0.40	0.04	0.10
加工、发酵、人工等其他成本：	0.80	0.62	0.22
生产厂建设投资	0.55	0.20	0.54
净生产成本	2.65	1.65	1.10

来源：中国生物液体燃料发展战略与政策, 2010; 该书根据 Worldwatch Institute、Convention on Biodiversity 及 U.S. National Renewable Energy Laboratory 等研究结果整理得出。纤维素乙醇在中国的现状及未来¹⁹；

9. 国际能源草发展现状及生物液体燃料利用经验

1) 美国典型能源草柳枝稷的研究与生物液体燃料利用

美国政府自 1978 年开始支持能源草研究项目，能源部先后支持了多个草本能源研究计划，筛选出 18 种最具潜力的禾草²⁰。自 2000 起，国家生物质能中心协调各个国家实验室进行了生物质性能、收集、运输、储藏等方面的研发²¹。其

¹⁹ 诺维信. 纤维素乙醇在中国的现状及未来. 2010. 05

²⁰ Lewandowski I, Scurlock JM O, Lindvall E, et al. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe [J]. Biomass and Bioenergy, 2003, 25: 335 - 361

²¹ Zhao XD. Research and development of bioenergy in the US [J]. Global Science and Technology Economy

中，柳枝稷作为先进生物液体燃料原料开发，被美国能源部“原料发展项目”列为重点。

美国在政策上大力支持二代先进纤维素液体燃料的开发利用，根据《能源独立与安全法案 2007》制定的“可再生燃料标准”，到 2022 年增加可再生交通生物燃料的使用量到 360 亿加仑（约 1.1 亿吨），增加到 2008 年的 4 倍，预计为当年美国车用能源的 22%，对纤维素乙醇寄予了非常大的期望，2022 年目标值为 160 亿加仑（约 6500 万吨），占先进生物燃料的使用量的 76%，占全部可再生燃料的 44%。为达到此目标，美国能源部还专门启动了“生物质项目”来促进先进生物液体燃料发展²²。

2005 年，美国能源部和农业部在《年供 10 亿吨生物质原料技术可行性报告》中指出，2030 年多年生能源植物将占有所有可再生生物能源的 35%，提供 3.77 亿吨原料^{23, 24}，美国非常看好多年生能源草的未来利用潜能，并已在佛罗里达东南部等州种植了大面积的柳枝稷，并进行了多元化能源利用，如混燃发电、与煤炭共气化、固体成型燃料等²⁵，在原料种植和收集上积累了丰富的经验。

在美国东南部等优良种植条件下干物质产量最高可达 35 吨/公顷，但实际大规模柳枝稷种植产量仍不太高，与试验田水平相差甚远，其中高地生态型柳枝稷干物质产量约 8.7 ± 4.2 吨/公顷，低地生态型产量约为 12.9 ± 5.9 吨/公顷，在南方低地势地区优良条件下种植平均产量约为 15.5-22.6 吨/公顷。柳枝稷作为生物液体燃料利用原料也存在诸多风险，如产量、品性不稳定，成本太高，企业、农民积极性难以调动，难以形成燃料链循环模式等。



美国能源草的收割与运输（David Bransby, 2008）

Observation, 2006, (8): 42 - 46

²² US-DOE. Biomass Program. <http://www1.eere.energy.gov/biomass/>

²³ 杜菲, 杨富裕, M.D. Clasler 等. 美国能源草柳枝稷的研究进展[J]. 安徽农业科学. 2010,38: 20334-20339

²⁴ US-DOE, USDA. Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: The technical feasibility of a billion ton annual supply, 2005. http://feedstockreview.ornl.gov/pdf/billion_ton_vision.pdf

²⁵ 范希峰, 左海涛等. 芒和荻作为草本能源植物的潜力分析[J]. 中国农学通报. 2010,26(14):381-387

美国柳枝稷作为生物液体燃料利用原料的主要风险因素：

- 1) 柳枝稷多年生产量不稳定。第一年产量为最大产量 1/3，第三年可达到最大产量，之后产量会大大降低；
- 2) 柳枝稷品性不稳定。产量受气候、土壤等外界因素影响大，平均变化率可达 50%；
- 3) 柳枝稷对肥料的需求比虽比其他草本植物要低，但比林业生物质能源作物要高，主要是由于收割带走了土壤中养分；
- 4) 要满足燃料生产不间断的原料需求，柳枝稷存贮也有问题，多年储存将造成结构分解；需更好的存贮管理办法；
- 5) 适合生物液体燃料生产的柳枝稷种子仍不能通过商业种子公司购买，大规模种植前 1-2 年，非常有必要设立柳枝稷种子供应站；
- 6) 柳枝稷种植成本仍较高，难以满足生物燃料利用成本利益要求。

来源：IEA,2011. Switchgrass Production in the USA

典型案例：BP 生物燃料公司能源草纤维素乙醇利用项目（Highlands）

自 2010 年 7 月，BP 公司以 9830 万美元并购美国生物燃料技术公司 Verenium 旗下的生物燃料业务后，加大对纤维素乙醇研发、示范及工业化投入力度。在圣地亚哥（San Diego）建立全球纤维素乙醇技术研发中心，在路易斯安娜（Louisiana）进行大型纤维素乙醇示范项目，在佛罗里达州（Florida）开展能源草纤维素乙醇商业化项目（Highlands）。并计划在海湾地区开展更大规模的纤维素乙醇项目来弥补漏油事件的影响。

Highlands 项目 该项目已在美国佛罗里达州将 1400 公顷的废弃荒地开垦成 800 公顷的能源草种植基地，并种植了约 600 公顷的能源草，并正筹建年产量 3600 万加仑的能源草纤维素乙醇商业化工厂，计划 2 年内完工。该项目将整合研发技术、能源草种植与收集、燃料乙醇生产等环节，最终实现商业化，将为提供 600-800 个工作机会。

BP Highlands 项目将是世界上第一个利用能源草进行纤维素乙醇生产的项目，未来还将扩大种植规模，计划充分利用 3500 英亩废弃土地被改造成 2000 英亩的能源草种植田，这些草将会应用于未来的工业化，同时在东南部海湾附近调研扩大规模。



美国佛罗里达州能源草种植基地

2) 欧洲能源草种植现状及液体燃料利用典型案例

欧盟对能源草的研究则更多关注芒属植物,其研究历史超过 50 年。包括丹麦、德国、英国、荷兰和瑞士等都通过了国家项目来资助芒属植物培育、管理实践以加工方面的研究工作²⁰。此外,瑞典和芬兰也开始对藎草和卢竹进行筛选及育种研究,并证实了藎草作为固体生物燃料的可行性。

据欧盟生物质协会介绍,2010 年英国芒草种植面积已达 17000 公顷,并提供 800-1000 英镑/公顷补贴;法国、德国、意大利、奥地利、爱尔兰芒草种植面积分别为 2000、1500、7500、800、2600 公顷,这几个国家给能源草发电提供高补贴措施²⁶。2011 年瑞典藎草种植面积为 800 公顷左右,并给能源草种植提供碳税补偿 500 欧元/公顷²⁶;芬兰藎草种植面积约为 18000 公顷,将能源草列为零碳排放物质可进行碳排放交易;近年,柳枝稷也得到了重视。欧盟生物质协会也总结,能源草目前还不具备大面积种植的条件,主要是经济上仍缺乏优势,难以满足农民和使用者的利用要求;能源草品质也有待提高;另外,在政策上的支持也没有完全到位。

欧盟为减少交通领域温室气体排放,将大力推动先进生物燃料发展。2003 年,欧盟颁布《关于促进交通部门生物燃料及其他可再生燃料指令》,要求达到 5.75% 的交通生物燃料使用量;2008 年欧盟又通过新的《可再生燃料指令》,其目标为 2020 年生物燃料要满足欧盟交通道路运输燃料需求的 20%,约为 3500 万吨石油当量。并且提出了所有生物液体燃料温室气体减排不得低于 35%,2017 年最低减排要求将增加到 60%。欧盟生物燃料的推广政策,给先进生物燃料的发展提供了良好空间。



波兰——收割能源草 (EURONATUR, 2008)

²⁶ Jean-Marc Jossart. Will perennial crops take off in Europe. Brussels. 2011.09.15

典型案例：意大利 M&G 集团利用芦竹生产纤维素乙醇

M&G 集团 2007 年投资 1.2 亿欧元启动以木质纤维素为原料生产生物乙醇的研发计划，2012 年在意大利西北部 Crescentino 筹建年产 4 万吨纤维素商业化生产乙醇装置。该装置主要利用芦竹等能源作物和小麦秸秆等农林废弃物为原料。

技术研发：该集团联合意大利主要科研机构，包括都灵理工学院、热那亚大学、国家新技术、能源和环境局（ENEA）、国家农业研究理事会（C.R.A.）、国家非常规可再生能源研究中心（C.R.E.A.R.）等，近 100 位意大利学者进行乙醇燃料链多学科交叉整合研究，从生物化学和生物技术到农学和植物学；从工程设计到化学；从技术研发到工艺建模；从生物质原料供应链到产品销售。

原料来源与收集：该集团对来自南欧、北非和中国南部的多达 89 种不同的芦竹品种进行了评定，并根据不同的地域、气候和土壤条件相应确定了最佳的品种，干生物质产量可达每公顷 50 吨，将利用意大利边际土地进行种植。同时，小麦、稻草等作物秸秆可补充原料来源。

项目特色：可实现电力自给并盈余。乙醇生产过程中来自生物质提取的副产物木质素在附属的发电厂燃用，发电厂也将多余的电力返回至电网。因此，Crescentino 工厂生产的生物乙醇温室气体减排能力能超过 70%。

3) 中国台湾

台湾（岛屿面积为 36000 平方公里，为大陆面积的 1/100）为了减少单位 GDP 温室气体排放，2005 年确定了生物能源的发展目标，其中 2020 年乙醇目标为 30 亿升（约），生物柴油目标为 1.5 亿升（约），生物质发电 103 万千瓦。2010 年能源植物种植面积达 10 万公顷²⁷。为推进目标实施，环保部、经济事务部及财政部合作出台了一系列财税补贴、技术扶持、经济刺激政策及实施细则，鼓励开发利用 25 万公顷非耕地进行能源植物的种植，其中狼尾草作为主要能源草作物在台湾地区广泛种植。台湾全岛年平均鲜草产量 275 公吨 / 公顷，干物产量为 50 公吨 / 公顷。在适当管理下，台湾屏东地区产量可达鲜草产量 400 公吨 / 公顷、干物产量为 70 公吨 / 公顷以上。

10. 中国能源草进行生物液体燃料利用的重要性与必要性

1) 替代化石交通能源，缓解能源安全

2011 年中国石油对外依存度已经超过 55%，每年增加 2-3 个百分点，据国际能源署预测，2020 年将达到 76.9%²⁸，国家能源安全问题日益严峻。而中国交通能源对石油产品的依赖度达 95% 以上，目前生物燃料、电力、天然气等替代燃料的利用量仍极低。

中国目前处于交通发展初期，人均汽车保有量仅为不到发达国家 10%²⁹，近十年汽车增长速度达 20%，2010 年车用汽油、柴油消耗总量已超过 1.3 亿吨³⁰；

²⁷ Ministry of Economic Affairs (MOEA). Energy situation in Taiwan (ROC). Taipei (China, Taiwan): MOEA: 2006.

²⁸ IEA, Transportaion Energy and CO₂, 2009

²⁹ 康利平, Robert Earley, 安锋. 发展中国低碳汽车燃料政策建议报告. 能源与交通创新中心. 2010.12.

改革开放以来，航空业也以每年 17.5% 的速度快速发展，2010 年航空燃油消耗量已超过 2000 万吨³¹；航海燃油的消耗量增长速度也较快。交通部门石油消耗量已超过石油总消耗量一半以上。国际能源署（IEA）、石油出口组织(OPEC)、美国能源信息局(EIA)等国际机构预测中国 2030 年石油液体燃料消耗量将达到 7.5-8.3 亿吨³²。

交通能源亟需补充和替代，而生物液体燃料被认为是未来主要的交通替代能源之一。根据国际能源署（IEA）于 2011 年发布的《生物液体燃料技术路线图》³³报告的估计，2050 年，全球 27% 的交通燃料将使用生物燃料。生物液体燃料也是当前替代石油基燃料唯一可行的生物质能源利用路径，促进该技术路径的应用，具有非常重要的意义。

而能源草作为一种可再生能源载体，生物液体燃料可直接替代化石燃料，这是其他新能源载体难以实现的。

2) 实现交通污染物与温室气体减排

中国环保部《中国机动车污染防治年报（2011）》³⁴中指出，2010 年全国机动车排放污染物 5226.8 万吨，是空气污染的重要来源，也成为大气环境最突出、最紧迫的问题之一。治理交通污染物排放迫在眉睫。

2010 中国整个交通领域温室气体排放已 7 亿吨，据国际能源署（IEA）预测，到 2030 年达到 23 亿吨²⁸；为促进交通领域温室气体减排，《交通运输“十二五”发展规划》³⁵对道路、航空、航海部门均提出减排要求，其中 2015 年道路单位运输周转量二氧化碳排放比 2005 年下降 11-12%；航海运输需下降 14-16%；民航运输 2015 年比 2010 年减排大于 3%。

乙醇作为车用替代燃料已在美国、巴西及中国推广，中国自 2004 年开始，已在 6 省 27 市进行乙醇汽油示范，被证明可减少污染物与温室气体排放，其中乙醇汽油可减少汽车尾气一氧化碳排放 35% 以上、碳氢化合物排放 15% 以上³⁶；2011 年 10 月，中国生物燃料作为航空替代燃料成功试飞，标志着生物燃料作为航空燃料也大有前途，尤其是 2012 年欧盟开始把航空纳入排放交易体系，更会促进生物燃料的利用。

生物液体燃料作为替代燃料广泛应用于交通领域，来减少污染物与温室气体排放。能源草为满足生物液体燃料原料供给开拓了一条新的途径。此外，能源草在种植过程中，还能固定大量的生物碳到土壤中。

³⁰ 能源与交通创新中心根据汽车工业年鉴、中国石油和化学工业协会、国家统计局等数据计算获得。

³¹ 中国民用航空局副局长李健在中石化 1 号生物航空煤油适航审定申请受理仪式上讲话。2011.02.28

³² 清华大学中国车用能源研究中心. 中国车用能源展望 2012[M]. 科学出版社. 2012.02

³³ IEA. Biofuel for Transportation—Technology Roadmap. 2011.04

³⁴ 环境保护部发布中国机动车污染防治年报：尾气排放成重要污染源。2011.12.20

http://www.gov.cn/jrzq/2011-12/20/content_2024234.htm

³⁵ 交通运输部. 交通运输“十二五”发展规划.

<http://www.moc.gov.cn/zhuantizhuanlan/jiaotongguihua/shierwujiatongyunshufazhanguihua/>

³⁶ 闵恩泽. 航空生物燃料潮涌，中国发展生物航油正当时. <http://www.cannews.com.cn/2012/0305/183974.html>

3) 符合“不与人争粮、不与粮争地、不破坏生态环境”发展原则

生物液体燃料实现交通燃料替代具有重要意义已是不争的事实。而自 2006 年国家提出“不与人争粮、不与粮争地、不破坏生态环境”的生物燃料发展原则，原料供应问题就成了一个很大的挑战。

其中，玉米、小麦等粮食作为生物燃料原料，明显与原则相悖，国家将不再扩大生产规模或批准新的项目；木薯等非粮作物虽不与人争粮，但仍未能摆脱与粮争地的局面，目前仍主要利用耕地进行种植，长期来看，也不可能大规模推广来满足生物燃料的发展需求；而能源草，作为一种低成本、抗逆性强的能源作物，符合中国生物液体燃料“不与人争粮、不与粮争地、不破坏生态环境”的发展原则，将是未来生物燃料的主要原料来源之一。

4) 可利用边际及废弃土地进行种植，以解决生物液体燃料原料问题

目前生物液体燃料，尤其是第二代纤维素液体燃料的发展，最关键的问题是原料问题，而土地又是限制生物液体燃料原料的最重要因素。能源草对土地质量、水肥要求比其他原料更低，可利用边际土地和废弃土地种植，解决能源发展与粮食安全的“土地”争夺，从而解决生物液体燃料原料问题。

5) 可提供品质稳定的原料，适合生物液体燃料产业规模化发展

生物质能源化利用路径很多，但生物液体燃料对原料的均一性、品质稳定性、供应持续性、纤维含量及结构等都有非常严格的要求，比生物质发电、成型燃料等利用路径对原料的要求要高得多。而能源草能充分满足生物液体燃料的生产要求，且在种植、收获、预处理、运输及贮藏等方面可全程实现机械化运作，是最具有规模产业化潜力的生物质。

11. 中国进行能源草生物液体燃料利用潜力与优势

1) 宏观政策层面支持

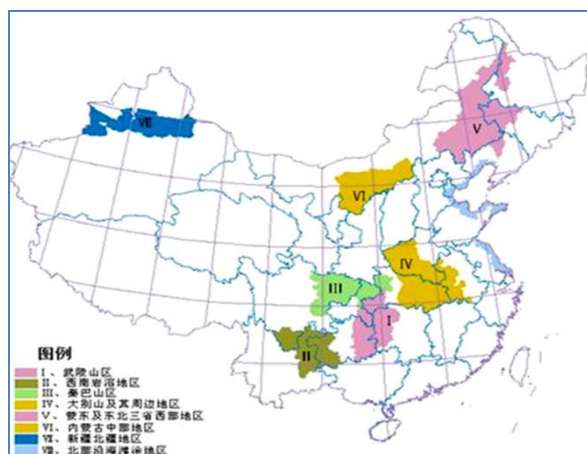
中国在法律法规条例、战略规划与计划、行政监督与管理等方面都体现了对发展生物质能的支持。其中，《可再生能源法》为生物液体燃料的生产和销售提供了法律保障；“十二五”规划、《可再生能源中长期发展规划》、《农业生物质能产业发展规划》等规划明确了生物质能源化利用的支持态度，提出了液体燃料发展目标，确定了“不与人争粮、不与粮争地、不破坏生态环境”生物质能源发展原则。这些宏观政策在一定程度上为能源草进行生物液体燃料利用铺垫了基础。

此外，《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》中农业优先主题明确提出“重点开发林草优良种质资源发掘与构建技术，研究开发高效、低成本、大规模农林生物质能的培育、收集与转化关键技术”；国家“十二五”科学和技术发展规划中新能源产业技术专栏指出：积极发展新一代生物质能源，加强生物燃气、生物液体燃料、能源植物良种选育等五个方面的研发部署；科技部《生物质能源科技发展“十二五”专项规划》中将支持“能源草良种选育”、“草本纤维素乙醇制备”及生物质车用燃料工程示范等研发。

2) 宜能边际土地资源丰富

为了摸清我国宜能边际土地资源的现状,农业部组织各级农村能源管理部门,以县为单位,对适宜种植生物质液体燃料专用能源作物的边际土地资源进行调查与评价工作³⁷,《中国宜能荒地资源调查与评价》³⁸结果显示,我国共有各类宜能边际土地 3 420 万公顷。其中,宜能冬闲田约 740 万公顷,主要分布于我国长江以南的云南、湖南、四川、贵州、湖北、江西、广东等地区;全国宜能荒地约 2 680 万公顷,在宜能荒地中,I 等宜能荒地 433 万公顷,占 16.2%; II 等宜能荒地 873 万公顷,占 32.6%; III 等宜能荒地 1373 万公顷,占 51.2%。

按 60% 的平均垦殖指数计算,当前 I 类可直接利用的宜能荒地面积约 260 万公顷,可满足年产 910 万吨生物液体燃料的原料种植需求;经一定改造可以利用的 II 类宜能荒地面积约 873.3 万公顷,可满足年产 1572 万吨生物液体燃料的原料种植需求。如果能够充分利用 I 类, II 类宜能荒地,就可完全满足国家生物能源发展目标,也能为能源草的种植与培育创造了良好的条件。



宜能边际土地包括宜能荒地和宜能冬闲田。其中,宜能荒地是指以发展生物液体燃料为目的,适宜于开垦种植能源作物的天然草地、疏林地、灌木林地和未利用地;宜能冬闲田是指在基本不影响春播的条件下可种植一季能源作物的空置冬闲田面积³⁸。

宜能荒地被分为 I、II、III 等,其中 I 等宜能荒地指对农业利用无限或少限制的宜能荒地,不需改造或略加改造即可开垦种植能源作物; II 等宜能荒地是指对农业利用有一定限制的宜能荒地,经一定的改造才能开垦种植能源作物; III 等宜能荒地质量差,对农业利用有较大限制。这类荒地需大力改造后才可种植能源作物。

中国宜能荒地分级及八个重点开发区域

3) 纤维素乙醇工艺技术日趋成熟

世界范围内正加快纤维素乙醇工业化进程,在原料预处理、酶制剂成本、设备工艺优化等方面都作出了重要努力。预计到 2014 年,有 12 个项目将实现产业

³⁷ 农业部科教司. 关于开展对我国适宜种植能源作物边际土地资源进行调查评估的函.2007

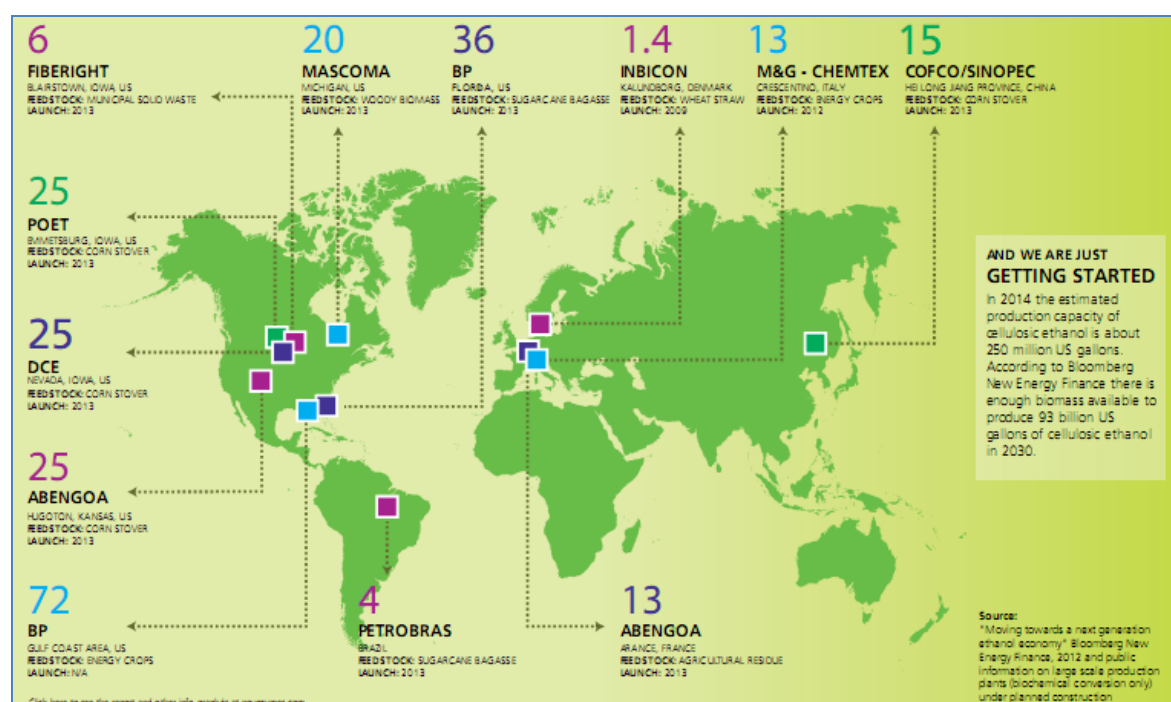
http://www.stee.agri.gov.cn/nyst/gzdt/t20070420_779556.htm

³⁸ 寇建平. 中国宜能荒地资源调查与评价[J]. 可再生能源,2008.26(6):3-9

化生产，将达到 2.5 亿加仑的纤维素乙醇的产量。

近几年中国纤维素乙醇研究与示范也紧跟世界步伐，吉林燃料乙醇公司、中粮生化能源（肇东）公司、河南天冠集团公司和安徽丰原集团公司等主要燃料乙醇公司均建立 500-10000 吨的纤维素乙醇（以秸秆为原料）示范装置。2012 年初，天冠集团万吨级纤维素乙醇生产装置已通过验收，中粮集团也即将开建 5 万吨生产项目。纤维素乙醇项目示范运行结果显示，6 吨左右秸秆可产出 1 吨乙醇，理论转化率超过 18%³⁹，已达到世界先进水平，具备工业化生产条件。

日趋成熟的纤维素乙醇转化技术为能源草进行生物液体燃料利用打下了坚实基础。



注：数字代表乙醇年产能，单位：百万加仑（美）

世界纤维素乙醇产业化分布图（来源：诺维信，2011）⁴⁰

4) 纤维素乙醇的经济前景可观

2011 年 9 月，中美先进生物燃料论坛上，据美国最大的乙醇生产企业 POET 公司介绍，POET 启动 4 万吨产能的纤维素乙醇工厂建设项目（目前以秸秆为原料），年可消耗生物质原料 26 万吨，带动当地 1400 万美元的经济收入，且每加仑纤维素乙醇成本仅比玉米乙醇高 50 美分⁴¹。

全球最大的纤维素酶生产企业诺维信近日宣布，第三代纤维酶 CTec3 问世，可大大降低纤维素酶成本，并经意大利生物燃料生产企业 M&G 集团测算，用芦竹、麦秆的混合物做原料，结合残渣发电的收入，可将芦竹生产生物乙醇的成本控制在 2 美元/加仑以内⁴²，未来随着能源草原料及收集成本的降低，下行空间较

³⁹ 中粮集团. 国内外纤维素乙醇的产业化进展. 2010 年.

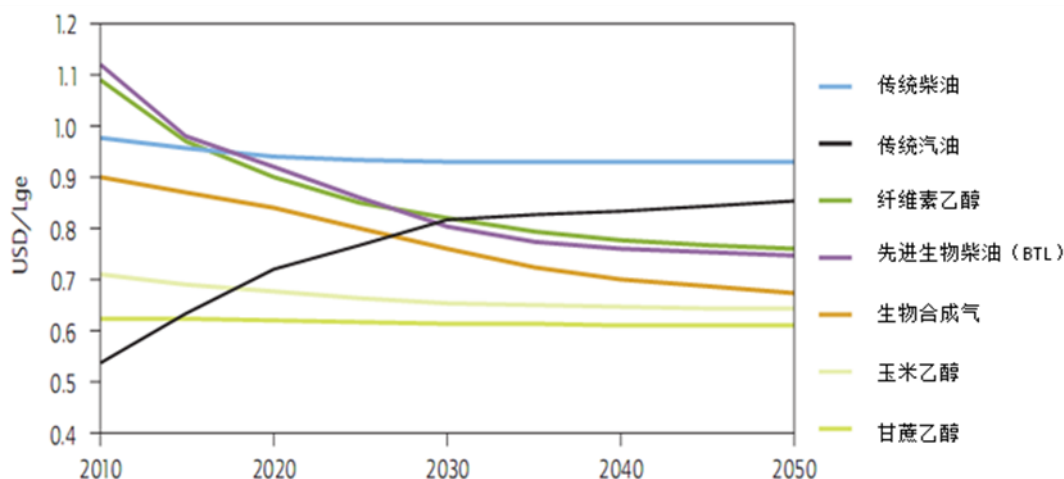
⁴⁰ 诺维信. 全球在建中的大型纤维素乙醇生产设施.

⁴¹ POET. US-China Advanced Biofuel Forum. 2011.09.

⁴² 诺维信内部咨询.

大。可见其经济前景仍比较乐观，潜力较大。

中国几个示范项目也对纤维素乙醇的经济性前景表乐观态度。中粮集团生化能源（肇东）公司纤维素乙醇的目标成本可达 6500 元/吨，其中纤维素酶的目标成本可达 1500 元/吨乙醇；河南天冠集团也期望其生产成本可降到 5000-5500 元 / 吨左右的水平；安徽丰原集团项目在进行纤维素乙醇生产时，联产丁二酸等高价化合物以降低成本，秸秆转化为纤维素乙醇的成本可降约为 4000-4300 元/吨，比玉米生产乙醇的成本低 300 元-500 元/吨。但要达到这样的经济成本，仍有较长的路要走。



生物液体燃料经济性情景（来源：IEA）

12. 中国对能源草生物液体燃料利用的主要科技投入有哪些？

“十二五”以来，中国开始加大对能源草的科技研发投入，分别启动了国家“973 计划”和“863 计划”，重点进行草本能源植物品种选育、边际地利用及先进生物液体燃料转化研究，主要项目包括：

1) 国家重点基础研究发展计划（“973”计划）——草本能源植物培育及化学催化制备先进液体燃料的基础研究

该项目于 2012 年 1 月启动，由中国科学院广州能源研究所马隆龙研究员为项目首席科学家，并组织广州能源所、中国农业大学、华南理工大学、中国科学技术大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、中国科学院山西煤炭化学研究所等国内重点高校和科研院所的专家和技术力量，重点围绕草本能源植物选择性培育遗传学、生物质水热解聚、解聚产物催化转化制备先进燃料机理与选择性调控等关键科学问题开展多学科交叉与综合研究，以突破生物质原料高生物量与结构可控、木质纤维素定向温和全组分解聚及解聚产物的高效高选择性转化等技术瓶颈，发展和完善草本能源植物培育及化学催化制备先进液体燃料的基础理论，构建草本能源植物有效驯化和育种与液体燃料的水相催化转化新途径，建立一套完整的先进生物液体燃料的验证系统。

2) 国家高技术研究发展计划(“863”计划)——边际土地能源草分子育种与新种质创制

该项目于2012年1月启动,由中国农业大学牵头,联合湖南农业大学、武汉大学、四川省草原科学研究院和四川农业大学共同实施。项目将通过4年的集中研究,收集一批国内外重要能源草种质资源,并揭示其遗传多样性;初步克隆柳枝稷、芒、狼尾草等能源草重要能用性状表达调控基因及初步构建柳枝稷等能源草高密度遗传连锁图谱。培育一批能源草新品种(系)。课题成果将为能源草生物能源转化产业化提供科研平台和技术储备。

3) 国家高技术研究发展计划(“863”计划)——能源草高效制备生物天然气关键技术研究

该项目于2012年1月启动,由中国科学院广州能源研究所牵头,联合中国农业大学和北京科技大学等单位共同实施。项目以能源草等草本植物纤维素来源为研究对象,研究其高效安全储存技术,不同原料的高效物理、化学和生物预处理关键技术及其配套成套设备,研制能源草等草本植物纤维素制备生物燃气最佳的系统技术集成方案,建立能源草产气预测模型并设计高效连续的反应器。建立能源草品种创制、菌种筛选、到生物燃气转化、至转化工艺技术设备研发的能源草生物质转化体系。

4) 国家科技支撑计划——耐盐碱能源草筛选与新品种培育

该项目于2009年1月启动,由中国农业大学牵头,联合山东省农业科学院等单位共同实施。项目以杂交狼尾草、柳枝稷、葛等能源草为主要研究对象,广泛引进国内外品种和野生种质资源,进行能源草耐盐碱比较、评价和筛选;研究能源草产量构成因子,耐盐机制和水平,改良和选育出适应我国黄河三角洲利用的能源草新品系(种),为提高我国能源草新品种(系)选育效率提供共性技术支撑。

5) 国家科技支撑计划——生物固碳潜力评估与挖掘技术研究

该项目于2009年1月——2012年1月,由中科院遗传与发育研究所农机研究中心主持实施。由中国农业大学承担的子课题“能源植物品种筛选与固碳效应分析”,对柳枝稷、杂交狼尾草等能源草产量、固碳能力、光合效率等进行了研究和分析,筛选具有高固碳潜力的能源草种及品种,并对提高固碳潜力的能源草栽培技术体系进行了研究。

6) 北京市科技攻关项目——能源草在京郊边际土地的规模化种植及其利用技术示范研究

北京草业与环境研究发展中心于2007年5月至2010年2月主持完成,在国内首次系统开展了以能源草为原料的纤维素乙醇制备技术研究,并利用生命周期评价理论对能源草纤维素乙醇生产进行了技术经济性评价;系统开展了能源草边际土地规模化种植关键技术研究;提出了适应不同边际土地类型规模化种植的能源草品种与种植技术规程。

13. 中国有哪些机构正在进行能源草研究工作？

1) 中国农业大学——系统的开展能源草选育、能源转化前处理及原料贮藏技术

中国农业大学草业科学系多年来从事草类植物的研究,自 2007 年以来开始狼尾草属等能源草种植搜集评价、新品种选育及栽培管理措施、能源草转化前处理技术和原料贮藏技术等相关研究。目前承担能源草方面的国家 973、863、支撑计划课题。

拥有柳枝稷、狼尾草、藜草、葛、五节芒等国内外能源草种质资源 200 余份,在北京、河北、广州、辽宁等地拥有近千亩能源草引种、筛选、选育和示范基地。评价了多种种质的能用潜力及耐盐特性,筛选出多份耐盐的柳枝稷和藜草种质;建立了柳枝稷和狼尾草属植物的 SSR 和藜草 SRAP 分子标记平台,开展遗传多样性研究和品种鉴定;开展能源草分子育种工作,已克隆藜草耐盐相关基因 2 个,柳枝稷木质素合成调控基因 2 个,申报国家专利 2 项;柳枝稷和狼尾草属转基因研究正在进行,已建立柳枝稷组织培养体系;结合田间性状观测和分子标记辅助选择,筛选高纤维素、低木质素、耐盐、耐旱、耐寒等优异基因资源。已选育出高产能源草品种“京西”葛、“神禾 1 号”杂交狼尾草及 1 个多分蘖杂交狼尾草新品系。在能源草研究方面与美国农业部牧草研究中心、美国 Noble Foundation 及俄克拉荷马州立大学等科研机构及部分科研人员建立了合作关系。

此外,谢光辉教授对芒草和柳枝稷的生产原理、存在的问题及前景进行了研究⁴³。程序教授引种柳枝稷等能源作物。

2) 湖南农业大学——芒草资源调查、收集、评价及培育





湖南农业大学自 2006 年起进行了中国芒草种质资源调查、收集、评价与选育工作;进行了中国芒属植物的系统分类与分布总结;开发了中国芒属植物标本和性状数据库;对芒属植物的遗传多样性进行了研究;建立了面积 30 亩的种质资源圃、分别在海南、河南、山东、内蒙等地建立了育种和品种比较试验圃;培育出了 3 个人工种间杂交新品种,湘杂芒 1、2、3 号;并有多个新品系等待后续申报与登记。

湖南农业大学易自力教授所带团队研究得出中国的芒、五节芒、荻、南荻 4 个种生物质产量高,可作为能源植物开发,如表 1;南荻为中国特有品种,产量最高,其能源潜力最大⁴⁴。2008 年,湖南农业大学还与美国孟德尔公司合作在湖南长沙进行芒草品种开发与种植。

⁴³ 谢光辉,庄会永等.非粮能源植物——生产原理和边际地栽培[M].中国农业大学出版社.北京.2011.08

⁴⁴ 易自力.芒草研究现状及应用前景.芒草专题汇报会,2011.07.09

芒草主要品种及在中国小面积实验种植表现

品种名称	芒 <i>M. sinensis</i>	五节芒 <i>M. floridulus</i>	荻 <i>M. acchariflorus</i>	南荻 <i>M. lutarioriparius</i>
株高 (m)	2-3	3-5	1-3	4-6
生产特性	丛生、株型紧凑、冬季枯黄, 适应性广	丛生、株型蓬松、冬季不完全枯黄、耐高温	散生、具根状茎、具腋芽、冬季落叶、抗寒性强	散生、根状茎发达、具腋芽、冬季落叶、水陆两生
干物质产量 (t/ha)	14.2	20.2	12.1	30.0
生长图片				

来源: 根据易自力教授⁴⁴演讲稿整理。

3) 北京草业与环境研究发展中心 —— 能源草边际土地规模化种植研究

北京草业与环境研究发展中心从 2005 年开始在北京昌平区小汤山镇草圃实验基地对柳枝稷、荻、芦竹等多种能源草进行了种植试验研究。同时, 在北京市密云、延庆、大兴和昌平等区县选择具有代表性的地块进行了试种植, 总计 3000 亩。

柳枝稷、荻和芦竹近年最高干生物质产量分别达 28.3、29.7 和 34.5 吨/公顷⁴⁵。

经过多年种植分析, 发现三种植物热值差别不大, 均为 18 MJ/kg 左右, 高于一年生的农作物秸秆⁴⁶; 纤维素、半纤维素和木质素, 总含量在 69.76% 以上, 生物质中 C、H 两元素总含量在 50% 左右, 灰分含量只有 3.58% - 4.79%; 但柳枝稷和荻的纤维素含量明显高于芦竹。

2006-2009 年连续三年北京郊区试种能源草干物质产量

草种类型	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
柳枝稷	6.8	15.4	28.3	27.9
荻	7.0	17.7	29.7	29.3
芦竹	16.2	30.5	34.5	34.4

北京草业与环境研究发展中心与首都师范大学生命科学院合作研究了以能源草为原料的纤维素乙醇制备关键技术, 获得了高效代谢葡萄糖和木糖产乙醇并代谢发酵抑制剂的酵母菌种; 纤维素转化率达 85.99%, 半纤维素转化率达 66.99%, 总糖转化率达 77.26%; 实现了 4.4 吨能源草干物质生产 1 吨乙醇; 建成了能源草纤维素乙醇制备实验室小试装置一套。

⁴⁵ 范希峰, 侯新村, 左海涛等. 三种草本能源植物在北京地区的产量和品质特性[J]. 中国农业科学. 2010,43(16):3316-3322

⁴⁶ 王革华, 原鲲. 生物质燃料用户手册. 北京: 化学工业出版社, 2007. 17-18.

4) 四川省草原科学研究院 —— 能源草种质资源研究

收集国内外甘蔗属、藨草属、芒属等能源草种质资源近千余份，涉及斑茅、割手密、蔗茅、芒、藨草、苞子草等多个种，涵盖中国干旱干热河谷、亚热带、热带、暖温带等几个气候带的野生资源，建立了 30 亩能源草引种、评价和选育基地。构建了甘蔗属、披碱草属、藨草属等多种植物分子标记分析平台，已开展斑茅、割手密野生基因资源遗传多样性研究，农艺性状评价，木质素含量、热值等产能特性研究。熟练掌握草本植物转基因技术，获国家发明专利 2 项。培育出高产多抗的藨草新品种和新品系。



四川省草原科学研究所进行能源草资源采集

5) 其他相关研究

中国科学院水土保持研究所在黄土高原地区开展了柳枝稷的适应性与生理生态方面的研究；武汉大学生命科学学院李立家教授认为柳枝稷是生物能源转化的理想作物⁴⁷；中国科学院广州能源研究所袁振宏等⁴⁸对芒草稀酸水解工艺的正交试验研究，为利用芒草作为生产燃料乙醇的原料提供技术支持。

2011 年 9 月，在美国华盛顿召开的“中美先进燃料论坛”，中美就纤维素生物燃料（包括能源草）在原料品种选育、可持续性研究、原料收集及物流运输、加工转化等方面达成了多项合作意向。

14. 目前中国能源草示范种植基地有哪些？

1) 内蒙古科尔沁地区柳枝稷种植示范基地

内蒙古通辽三和草叶有限责任公司在通辽市科尔沁地区种植约 5400 亩柳枝稷，主要作为牧草来饲养牛群，此外，该公司还在河南南阳种植了 500 亩。目前已连续种植 6 年，干生物产量达 7.5-9.0 吨/公顷。

⁴⁷ 刘吉利, 朱万斌, 谢光辉. 能源作物柳枝稷研究进展[J]. 草叶学报. 2009(3): 232-240

⁴⁸ 袁振宏. 芒草稀硫酸水解工艺条件的正交实验[J]. 太阳能学报, 2006, 27(6)



科尔沁柳枝稷种植基地（谢光辉教授提供）

2) 湖南洞庭湖南荻示范基地

在湖南洞庭湖湖区有近百万亩的南荻生长面积，其干物质亩产约为 1.5 吨左右。其价格年年攀升，已达 750 元/吨。目前主要作为造纸原料利用。



湖南洞庭湖区域种植的南荻（易自力教授提供）

3) 河北涿州和北京上庄能源草示范种植基地

中国农业大学正在河北涿州及北京上庄地区建立能源草示范种植基地，打造百亩柳枝稷、杂交狼尾草、藜草等能源草种质资源圃。目前已种植的 2 个柳枝稷品种适应性良好，杂交狼尾草也能达到较高产量。



神禾 1 号杂交狼尾草-中国农业大学涿州能源草基地

4) 四川省草原科学研究院甘蔗属能源草基地

四川省草原科学研究院在成都市大邑县建立了近 30 亩甘蔗属为主的能源草种质资源圃。保存了收集自我国亚热带、热带、暖温带和干旱干热河谷区的斑茅、割手密、蔗茅、芒、苞子草等近 130 个野生居群，共计 2200 余份材料，涵盖我国 8 个省，51 个县（市）。种植的斑茅生物产量高，种植第一年分蘖数最高达 90 个，株高 430cm，单株干重 0.96kg，木质素含量低于柳枝稷，热值、纤维素、半纤维素含量与柳枝稷相当，生物质能源潜力巨大。



割手密——四川省草原科学研究院能源草基地

15. 能源草进行生物液体燃料利用所存在的主要问题？

目前中国及世界关于纤维素乙醇的研究及示范项目主要集中于作物秸秆，尤其是玉米秸秆。而能源草作为第二代生物液体燃料的原料仍具有较大的优势，将是未来发展趋势，潜力较大。一些国际先进生产企业也开始进行能源草纤维素乙醇示范开发利用，如意大利 M&G 集团利用芦竹进行乙醇生产，美国利用柳枝稷生产乙醇。



现阶段能源草进行生物液体燃料利用亟待解决的问题主要集中于原料阶段，如优良品种的培育、原料收集与运输、示范种植项目的推广；随着能源草生物液体燃料示范项目开展，上下游结合及下游问题，如原料贮藏、加工转化技术等问题也将逐步呈现。

1) 缺乏进行生物液体燃料利用的优良能源草品种

能源草大规模种植利用，其品种一定得具备抗逆性强、稳定高产的特征，作为液体燃料利用原料，还要求纤维素及半纤维素含量高，木质素含量低，目前仍缺乏这种高品质优良品种，现有品种难以满足规模化工业需求。

2) 对能源草生物液体燃料转化的基础研究投入不足

世界各国对能源草生物液体燃料的利用潜能寄予了厚望，在该领域的科研投入仍显不足。美国在柳枝稷品种选育和转化乙醇方面投入了大量资金，中国在能源草利用基础研究方面投入非常有限，目前能源草资源调查、收集、评价，品种筛选与培育，环境抗逆性及生态适应性等各方面的研究都很薄弱，对能源草生物液体转化技术也缺乏针对性研究，很多研究领域仍为空白。

3) 能源草在收获、收集、贮存方面的经验仍待积累

能源草的收割、打捆等机械设备可与牧草通用，但收割时间、原料收集及贮存方式都非常迥异，与农作物秸秆差别也较大。要满足常年不间断的生产需求，能源草在收获、收集、贮存方面的经验仍显不足，有待积累。国际上有一些成功经验及典范值得中国借鉴。



能源草的收割与贮存

4) 政策支持、产业经济前景不明确，企业处于观望状态

能源草生物液体燃料利用在政策支持仍不明朗，短期产业经济前景也不确定，而项目前期投入却非常大，项目风险系数较高，企业都处于观望状态。

5) 农民对能源草的认知存在局限性，种植积极性仍不高

目前能源草原料出路仍不明确，农民对能源草的认知也存在局限性，而能源草生物液体燃料产业刚起步处于萌芽阶段，受品种稳定性差、土地利用回报率低等因素影响，农民种植积极性仍不高。

6) 能源草生物液体燃料产业化发展的其他问题

能源草作为纤维生物质的一种，也同样存在纤维素乙醇产业化发展的共性问题，如纤维素酶成本高、纤维素乙醇预处理技术有待突破、农户-企业-市场的融合等，但随着纤维素乙醇技术和市场的进一步成熟，将得以解决。

中国能源草生物液体燃料利用仍处于空白或初级阶段，最主要的原因归结于两点：

第一，科学研究支撑仍显不足。中国在能源草资源筛选与品种培育，环境抗逆性及生态适应性、生物液体燃料转化等方面的科研投入仍然不足，整个能源草生物液体燃料研究系统处于分散、无序的初始状态。

第二，政策上对能源草开发利用不够重视。中国目前所有关于生物能源利用的法律规范、规划指南、行政管理及经济财税政策上极少体现出对能源草生物液体燃料的开发利用的支持。支持发展能源植物，也主要是指木薯、甘薯、甜高粱等淀粉质非粮能源作物，以及黄连木、麻疯树、油桐、文冠果、光皮树、乌桕等油料植物。能源草除了在“专项科技规划”有所提及外，在其他扶持政策及实施细则中不被提及。目前，中国能源草生物液体燃料利用的重要战略地位仍未被重视。

能源草缺乏示范项目及政策扶持

目前，在缺乏科学研究支撑及政策扶持的情形下，中国能源草示范种植与利用项目很少，而能源草品种培育，产量优化，抗逆性、适应性以及稳定性的研究必须通过示范项目来提升。

与扶持能源草最为接近的政策为 2006 年国家多部委联合发布《关于发展生物能源和生物化工财税扶持政策的实施意见》，但是该政策仍很宏观，具体财税补贴及管理辦法却寥寥无几，直到 2008 年，财政部出台《生物能源和生物化工原料基地补助资金管理办法》中提及进行非粮生物液体燃料原料基地补助，每亩林业原料基地补助 200 元，农田原料基地补助 180 元，这补贴力度太小很难调动农民积极性，来进行盐碱地、荒山和荒地等的开发利用。

16. 中国能源草生物液体燃料利用的期望与建议？

1) 加强科学研究、加大科研投入

进一步完善能源草资源的调查、收集与评价，确定并培育适合中国各地区的高产能、高抗逆性品种，或者引进国际优良品种并进行本土驯化；定向培育优化直接燃烧型及乙醇燃料利用型的能源草作物属性；同时培育多种类型新品种，满足不同边际土地和生态地区的种植要求；从产业发展角度出发，重点研究优化产业链中的关键技术。

2) 在行业规划及实施政策中体现对能源草生物液体燃料利用的重视

在行业规划及实施政策体现对能源草生物液体燃料支持，奠定能源草作为未来主要生物能源利用原料的战略地位，推动能源草的中长期利用。

3) 强化示范项目资金支持

进行产业链相对完整的小规模试点示范是技术发展必经之路，也是产业化的必经阶段。国家应从资金和政策上加大对能源草种植及生物液体燃料技术开发的试点示范，建立专项示范资金，积累示范经验，以便大规模推广；

4) 出台边际地认定标准及相关的财税扶持政策

边际地是未来能源草种植的主要土地来源，出台认定标准及开发扶持政策非常重要，可将宜能边际土地开发政策与能源草生物液体燃料利用的财税扶持政策相结合，可加强对“边际土地——能源草——生物液体燃料”整个产业链的扶持力度。

5) 利用碳税或者温室气体减排机制促进能源草燃料利用的发展

能源草纤维素乙醇或其他液体交通燃料，具有较大的温室气体减排潜力，是交通领域温室气体减排的主要手段之一，将碳税机制或者温室气体减排机制与能源草燃料利用相结合，有利于促进能源草发展。

6) 建立能源草可持续发展原则，尤其是土地利用原则

能源草的开发利用需要遵循可持续发展原则，尤其是土地使用机制，否则将带来负面影响。因此在可持续发展。

7) 建立起“政府-科研单位-企业-农户”的合作联盟

加强上游与下游、研究与生产的对接。能源草生物液体燃料转化是一个新兴产业，各方的积极性仍优化能源草生物液体燃料工艺研究，提高能源草的能源转化效率，调动工业界的积极性；

8) 加强国际交流合作

可从能源草优良品种引进，能源草种植、收集、贮存经验，能源草液体燃料加工技术转化，能源草可持续土地利用原则等方面加强国际交流合作。



先进生物燃料通往绿色、低碳交通之路！
*Advanced bio-fuels for green, low carbon
transportation.*