

秸秆利用途径的分析比较

董宇¹,马晶¹,张涛²,申哲民¹,王茜¹¹上海交通大学环境与工程学院,上海 200240;²江苏省环境监测中心,南京 210009

摘要:作为农业大国,中国的秸秆年产量在7亿t左右。以廉价的农业废弃物秸秆作为原料转变成能源是一项非常有价值的研究。文章从秸秆制备乙醇、甲烷-甲醇及气化、液化制备柴油几个方向进行讨论。用秸秆等废弃物制造能源引起了广泛的关注,不仅降低了成本,而且减轻了处理秸秆所造成的环境问题。通过对这些方向的原理、操作条件、设备、经济性等进行比较,进而得出秸秆转变能源途径中最有利的发展方向。结果表明,利用秸秆生产燃料乙醇,每t秸秆产生的热量最多(18900 MJ),且产生的价值可观,纤维素乙醇的发展潜力最大。秸秆制乙醇的利用率以及经济效益较高,是一种较好的利用秸秆能源化的途径。

关键词:秸秆;燃料乙醇;生物能源;转化利用;效益

中图分类号:S216.2

文献标志码:A

论文编号:2010-1595

Analysis and Comparison of Straw Utilization

Dong Yu¹, Ma Jing¹, Zhang Tao², Shen Zhemin¹, Wang Qian¹¹School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240;²Environmental Monitoring Center of Jiangsu Province, Nanjing 210009

Abstract: As a big agricultural country, the yearly capacity of straw is about seven hundred million tons in our country. It is a very valuable study that low-cost agricultural waste straw as a raw material are covered into energy. It talks about in aspect of ethanol, methane-methanol production and gasification, liquefaction for diesel oil product based on feed stock of straw stalk. Using straw to create energy causes concern. It not only reduces costs, but also mitigates the problem that causes by straw. Compare with the principle, operational condition, equipment and economy so that find a most favorable developing orientation among straw stalk converting into energy sources. The final result shows that quantity of heat of fuel ethanol reaches to max (18900 MJ) per ton of straw stalk with obvious benefit and great potential of fibrin ethanol. The utilization rate and economic returns of converting straw to ethanol which is a good way of using energy straw are higher than others.

Key words: straw; fuel ethanol; bio-energy; conversion and utilization; benefit

0 引言

农作物秸秆是当今世界上仅次于煤炭、石油和天然气的第四大能源。由于近些年能源的短缺,用秸秆等废弃物制造能源引起了广泛的关注^[1],不仅降低了成本、增加了产能的新途径等,而且减轻了处理秸秆所

造成的环境问题^[2-3]。中国作为农业大国,秸秆资源非常丰富,年产量7亿t^[4-5],合理利用秸秆,有利于工业、农业和农村经济的合理发展,否则直接焚烧秸秆,不仅释放大量气体严重污染环境^[6]、杀灭土壤微生物,而且造成能源资源的重大浪费^[7-8]。中国目前的秸秆产量为

基金项目:国家水污染控制重大专项“流域面源生物质废弃物资源化技术及其设备化课题”(2009ZX07101-015)。

第一作者简介:董宇,男,1985年出生,河北邯郸人,硕士,研究方向为生物能源。通信地址:200240 上海交通大学闵行校区环境学院B0916092, Tel: 021-54740939, E-mail: xiaoyuzhoua@163.com。

通讯作者:申哲民,男,1970年出生,河南浚县人,教授,博士,研究方向为生物质燃料的催化机理与技术开发,主持国家自然科学基金面上项目、横向项目、863项目子课题部分研究。通信地址:200240 上海交通大学闵行校区环境学院, Tel: 021-54741065, E-mail: zmshen@sjtu.edu.cn。

收稿日期:2010-05-21, **修回日期:**2010-08-09。

3.5 亿 t 标准煤^[9], 占能源消耗的 14% 以上^[10]。Xianyang Zeng 等^[11]介绍了目前秸秆生物能源利用技术。Axel Munack 等^[12]阐述了秸秆生成能源的途径, 生物能源利用潜在的未来之路。张燕^[13]简述中国秸秆资源在“5F”利用方式(肥料、饲料、燃料、纤维、原料)的现状基础上, 结合中国农村农业生产的特点, 从生态、经济及社会三大效益方面对“5F”利用方式进行了对比分析。对中国这样一个化石资源短缺、人口众多、经济持续快速发展的大国, 推动农业秸秆的高效转化利用, 具有更突出的迫切性^[14-15]。农业秸秆转化利用的关键是将主要组分(纤维素、半纤维素和木质素)在化学结构基本保持不变的基础上有效分离, 然后对分离组分进行有目的的转化利用。目前尚没有提出清洁有效的农业秸秆组分分离途径^[16-22]。秸秆能源化利用的主要方式有直接燃烧(包括通过省柴灶、节能炕、节能炉燃烧及直燃发电)、秸秆气化(包括生物质燃气、沼气)和液化(包

括燃料乙醇和生物柴油)等。通过对秸秆转换成能源物质的利用率、经济性等效益做比较, 得出秸秆的最佳利用途径。

1 秸秆的主要利用途径

1.1 秸秆发电

1.1.1 生物质秸秆发电工艺 生物质秸秆直接燃烧技术(图 1)是将秸秆原料送入锅炉中直接燃烧, 产生的高压过热蒸汽, 通过汽轮机的涡轮膨胀做功, 驱动发电机发电, 这种发电方式称为秸秆直燃发电^[23]。秸秆直接燃烧, 其能源利用率仅为 13%^[24]。目前, 发达国家生物质发电量已占可再生能源发电量的 70%^[25]。丹麦在生物质直燃发电方面成绩显著, 2002 年丹麦能源消费量约 2.8×10^7 t 标准煤, 其中可再生能源为 3.5×10^6 t 标准煤, 占能源消费的 12.5%, 在可再生能源中生物质能所占比例为 81%^[26]。

1.1.2 秸秆发电意义及存在的问题 秸秆特别是稻、麦

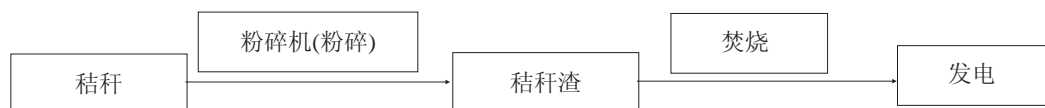


图 1 秸秆直接燃烧技术示意图

秸秆发电, 主要障碍是灰分元素多, 释放量约为秸秆的 40%^[27], 造成熔点下降和锅炉结焦和堵塞。生物质秸秆中硫的平均含量不到 0.15%^[28], 煤炭中硫的含量达到 1.412%, 是秸秆硫含量的 9 倍, 秸秆能源燃烧时, 避免了因产生的 SO_2 、 NO_2 而形成酸雨, 它燃烧排放的 CO_2 与生物质再生时吸收的 CO_2 达到碳平衡, 具有 CO_2 零排放的作用, 从根本上解决能源消耗带来的温室效应问题^[29-30]。

生物质秸秆直接燃烧是最简单, 也是最早被采用的生物质能利用方式。但在过去的传统燃烧方式中, 生物质燃烧效率极低, 一般只有 10% 左右, 造成能源严重浪费。若能开发一种方便、高效的生物质直接燃烧技术, 必将具有很好的经济和社会效益^[31]。

1.2 秸秆生产沼气

1.2.1 秸秆产沼气的工艺 秸秆产沼气的工艺见图 2。

生物法预处理: 生物方法就是利用具有强木质纤



图 2 秸秆产沼气的工艺示意图

维素降解能力的微生物对秸秆先进行固态发酵, 把作物秸秆中的木质纤维素预先降解成易于厌氧菌消化的简单物质, 以缩短随后的厌氧发酵时间、提高干物质消化率和产气率^[32]。

发酵: 厌氧消化反应的主要机理是有机物在厌氧的条件下被微生物分解, 转化成甲烷和二氧化碳等, 并合成自身细胞物质的过程^[33]。

李世密等^[34]对秸秆类木质纤维素原料厌氧发酵产沼气进行了研究, 整个发酵过程中产生甲烷体积分数的较高值为 65%, 二氧化碳为 30%。

1.2.2 秸秆产沼气的优势 沼气燃烧的热效率比城市煤气高出 40%。发酵产生沼气, 能源转化效率高^[35], 且成本低廉, 操作简单, 运行平稳。

在燃料的替代效应上, 沼气平均每方热值 20.9 MJ, 而秸秆沼气集中供气技术每方热值可达 23 MJ。从环境效应来看, 沼气作燃料密闭条件下产生、输送, 显著减少温室气体和有害气体的排放; 产气后的废渣富含腐殖酸、氮磷钾及微量元素, 是优质的有机肥料。沼液作为鱼饲料添加剂有免疫及增重的作用^[36-37]。目前农业部推广秸秆沼气集中供气技术具有热值高, 效益高、

无污染的特点^[38],具有广阔的应用前景。

1.3 秸秆热解气化制备混合燃气

1.3.1 秸秆制混合气工艺

秸秆热解气化技术是将秸秆转化为气体燃料的热化学过程(图3)。秸秆在气化反应器中氧气不足的条件下发生部分燃烧,以提供气化吸热反应所需的热量,使秸秆在700~850℃左右的气化温度下发生热解气化反应,转化为含氢气、一氧化碳和低分子烃类的可燃气体。这些可燃气体既可以作为锅炉燃料供热,又可以经过除尘、除焦、冷却等净化处理后,为燃气用户集中供气,或者驱动燃气轮发电机或燃气内燃发电机发电。上述生物质的气化过程的实现是通过气化反应装置(即制气炉)完成的^[39]。

蒋剑春等^[40]研究开发的内循环锥形流态化气化炉,对稻草、麦秸等秸秆粉碎后,气化反应在600~820℃的一个较宽温度范围内,原料气化所产生的煤气热值达7.7 MJ/m³,加CaO催化剂能明显提高煤气热值,降低CO组分,Na₂CO₃催化气化能提高气体H₂的含量。

1.3.2 秸秆制混合气的优缺点

秸秆气化技术可以把秸

秆高温裂解生成以CO为主并含H₂、CH₄等多种可燃成分的煤气,热值为5~12 MJ/m³,总效率可达35%~45%,比直燃提高2倍^[41]。新型的综合利用技术生产燃气,使能源资源的配置更为合理,还减少了CH₄等有害气体排放,提高能源利用效率。通过对中国1998—2000年的数据^[42]分析可以看出,秸秆气化集中供气节省标煤9.5万t,加强秸秆资源综合利用,可大大替代传统能源的使用量,是传统能源的替代选择途径之一。目前该技术存在的主要问题是秸秆燃烧产生的大量焦油附着在炉体及管道内,炉内的焦油清除相对容易,但输气管道被焦油堵塞后无法疏通,导致送气不畅,并形成安全隐患。燃气热值低,热能利用效率低,前期投入资金短期很难回收,气体成本较高,农户难以承受。

1.4 秸秆热解转化制备生物柴油技术

1.4.1 秸秆制生物柴油工艺

生物质热裂解是指生物质在完全没有氧或缺氧条件下,最终生成液体产物、木炭和可燃气体的过程。以秸秆等木质纤维素为原料,通过快速热解液化、加压催化液化等进行转化^[43]。经过水解、发酵、用碱催化转酯化^[44]过程制备生物柴油(图4)。

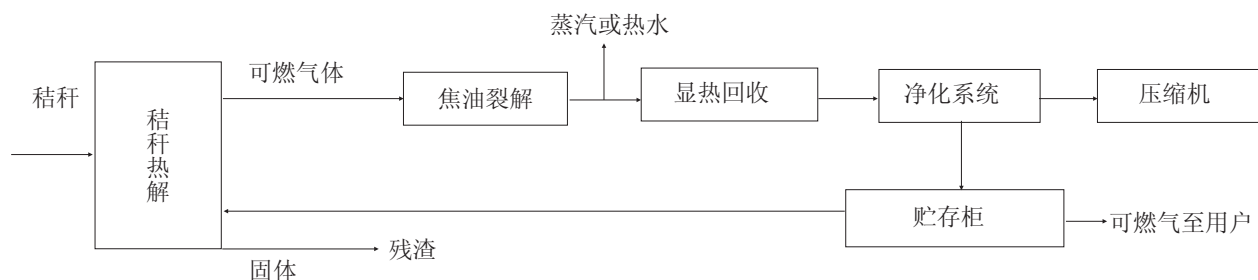


图3 秸秆气化制备混合燃气示意图

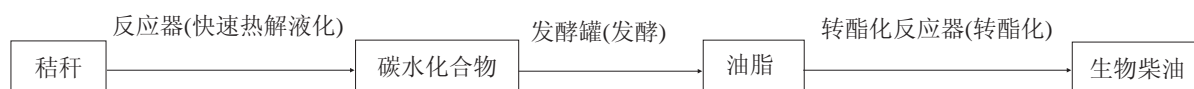


图4 秸秆热裂解技术示意图

Putun等^[45]采用固定床技术研究了热解温度、秸秆粒径和氮气流速对棉秆热解的影响,认为粒径和氮气流速对热解无显著影响,而温度影响极大。终温为550℃,粒径为0.85~1.85 mm的条件下,最大液体产率为24.77%。Putun等^[46]对水稻秸秆快速热解液化技术进行了研究,生物油最大产率为30.23%。

1.4.2 秸秆制生物柴油优缺点 目前精制后的生物油可以制成车用油,而且已成功应用于锅炉燃料,但由于技术和成本的因素,还无法替代化石燃料。要想充分广泛地利用生物油,应对该技术的机理、反应器的放大、生物油的特性、生物油的精制及生物油的应用等方面进行更深入的研究,使该技术在中国早日实现商业化^[47-48]。利用热解技术获得的生物柴油的收率一

一般在50%~70%。热解获得的生物油是一种棕褐色液体,高位热值约18 MJ/kg,相当于柴油热值的五分之一,此热值与秸秆制的沼气相比有点逊色(22 MJ/kg)。

1.5 秸秆制燃料乙醇

1.5.1 秸秆生产燃料乙醇技术

由秸秆生产乙醇(图5)主要包括3大步骤:预处理、水解和发酵。预处理和水解的最终目的是降解植物细胞壁中碳水化合物聚合物,使之变成能被微生物发酵的单糖,最后发酵六碳糖和五碳糖生成乙醇。秸秆物质在一定温度和催化剂作用下,其中的纤维素和半纤维素加水分解成为单糖的过程即为水解。利用秸秆液化技术,将纤维素最大程度地分离,再利用微生物固定化细胞发酵技术,将其转化为乙醇。

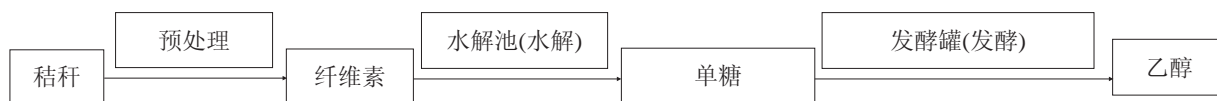


图5 秸秆生产燃料乙醇技术路线

1.5.2 秸秆制乙醇的优缺点及发展前景 在秸秆制燃料乙醇的过程中,如何提高其转化率以及降低成本是主要的考虑因素,必须经过预处理和水解过程破坏木质素的缠绕作用与纤维素的结晶结构,使其在溶剂、催化剂或酶的作用下进行水解。而新兴的秸秆等木质纤维原料的超(亚)临界预处理与水解技术,一方面能够对秸秆资源化利用制取乙醇的实际生产提供重要的理论依据和技术支持,另一方面也能够带来巨大的经济和社会效益,具有广阔的研究和应用前景^[49]。

朱道飞等^[50]在 340~420℃、30~40 MPa 条件下,亚临界和超临界水中纤维素液化试验研究表明,稳定产物的主要成分是糠醛、5-甲基糠醛、5-羟甲基糠醛和一些含甲基、羟基、羟甲基等官能团的酮类、苯酚类化合物。由此可见,超临界条件下纤维素在极短时间内即

可完成水解并获得低聚糖、葡萄糖等产物^[51]。

2 结果与讨论

2.1 秸秆利用途径经济效益

每 t 秸秆能发 800 度电,每度电的上网电价是 0.56 元^[52]。秸秆发酵产气量按平均值计算,即秸秆产气量为 0.27 m³/kg,据农业部沼气科学研究所测定,每立方米沼气的发热量约为 22000 kJ,沼气燃烧的热效率约为 40%~60%^[35]。而单位秸秆产气量 1.7 m³/kg^[53]。试验结果表明,2.5 t 的秸秆能生产 1 t 的生物柴油^[54];试验显示,每 4 t 秸秆(玉米秸秆、麦草秸秆等)可生产 1 t 燃料乙醇^[55]。

通过以上的论述与数据,得到如下的秸秆利用途径的分析表格(表 1)。

根据发改委和电监会相关文件,生物质发电补贴

表 1 秸秆利用途径的比较

利用途径	秸秆直接燃烧发电	沼气(甲烷)	秸秆气化	生物柴油	乙醇
主要生产设备	流化床或链条锅炉、蒸汽轮机等	粉碎机;沼气罐	秸秆气化炉等	快速热解液化反应器;冷凝器;转化反应器等	粉碎机;发酵罐
秸秆转化量 p/t	800 kWh	270 m ³	1700 m ³	0.4 t	0.25 t
产品热值 r	3.6 MJ/kWh	22 MJ/kg	5~12 MJ/m ³ ^[41]	18 MJ/kg	27 MJ/kg
热值利用率 $a/\%$	16 左右	40~60	35~45	50~70	70
产品平均价格 f	0.56 元/kWh	2 元/m ³	0.5 元/m ³	6 000 元/t	4500 元/t
秸秆产生的价值 $v/(元/t)$	448	540	850	2400	1125
单位产热量 $T/(MJ/t)$	460.8	8800~13200	2975~9180	9000~12600	18900
生产成本平均价格 b	0.8 元/kWh	1.2 元/m ³	0.48 元/m ³	5000 元/t	3500 元/t
每 t 秸秆预计利润 $y/(元/t)$	-192	216	34	400	250

注:表中 $V=p*f$; $y=(f-b)*p$; $T=p*r*a$ 或 $T=m*r*a$ 。

实际达到 0.35 元/kWh。从而在秸秆发电的过程中产生的经济利益为 88 元/t。

在秸秆生产燃料乙醇的工艺中,国家及政府给与一定的补贴,其金额为生产每吨乙醇补助 2200 元左右,即每 t 秸秆补助 550 元,因此在实际生产燃料乙醇中,加上表 1 中预计利润,实际收益为 800 元/t 左右,要远高于生产生物柴油和沼气工艺。

2.2 秸秆利用途径的环境效益

农作物秸秆的综合利用一直是国家解决秸秆焚烧、农民增收的有效途径,同时也是缓解能源危机的主要措施。国家为了推动农作物秸秆科技创新与科技进

步,提出了秸秆利用开发的重点领域,并颁布了一系列有利于农作物秸秆利用的政策法规,促进秸秆利用新技术的研究开发和推广应用。

秸秆综合利用,改善了生态环境和投资环境,提高了生活质量,秸秆资源化利用,使农民享受到管道煤气的便捷,节省了开支;秸秆综合利用率的提高,不但解决了大量剩余秸秆的出路,实现了节能减排,减少了农业面源污染;秸秆综合利用增加农作物产量,实现了节本和增效。

秸秆资源化利用的主要方式有直接燃烧、气化和液化等。目前在中国这些秸秆优质资源化利用方式都

已初见成效, 秸秆发电厂的实施及秸秆制燃料乙醇厂的投入等, 证明了秸秆能源化的可行性。

农作物秸秆发电既可以缓解农村能源紧张, 又有利于保护生态和资源。农作物秸秆是一种很好的清洁可再生能源。利用秸秆发电技术已在北欧得到较广泛应用。但是秸秆发电和秸秆气化后灰分的生成对仪器设备产生腐蚀, 以及产生的气体会对环境带来影响, 有待解决。

沼气具有重要的生态环境效益, 庄稼秸秆入池发酵, 消灭了细菌, 改善了农村卫生条件, 提高了农民生活质量。尤其是生产沼气产生的沼肥(沼液与沼渣)替代化肥使用能改良土壤, 是一种缓速兼备的优质有机肥料。沼肥的综合利用, 是发展绿色生态农业, 生产无公害食品的重要措施。可是沼气的制取需要先前的资金投入, 对仪器设施要有严格的要求, 其产生的气体泄漏也会产生危害, 如温室效应等, 因此秸秆沼气化仍难以实现较好的生态效益。

秸秆制生物柴油和燃料乙醇, 提供了新能源的生产方法, 有效的利用剩余秸秆, 使其转变成清洁能源, 具有潜在的生态和环境效益。尤其是现在石油的紧缺, 开发新能源是每个国家努力的方向, 巴西甘蔗乙醇, 美国玉米乙醇等, 走在世界的前列, 而发展纤维素乙醇是第二代产品, 具有很大的前途。

2.3 秸秆利用途径的社会效益

中国是一个农业大国, 目前每年产生的农作物秸秆量正在随着农作物种植技术的进步逐年增加, 秸秆的合理利用得到全球的重视, 正确的使用这些废弃资源, 不仅减轻了污染, 还能创收新的利益。

秸秆的综合利用, 是主动对废弃垃圾的利用, 变废为宝, 使废物资源化, 消除了被动处理秸秆的状态, 一方面解决并处置了大量可用的闲置资源, 另一方面为农民增加了部分收益, 同时为社会提供了新的产业, 可以和其他产业链一同并进, 具有广阔的发展前景。秸秆的资源化, 是受到众人关注的, 如今石油资源的紧缺等, 给秸秆带来了一定的发展道路, 以其转化为生物柴油, 燃料乙醇等社会必需的产品, 以满足这种快节奏的生活方式, 因此秸秆的研究在迅速前进, 这样就可以弥补将来能源的匮乏, 为制造新能源开创新的道路。农作物秸秆的利用也为农村循环经济的实行奠定了基础, 为社会主义新农村建设做出了巨大贡献。

3 结论

(1)从长期看, 表1中对比可知道, 在秸秆制乙醇的途径中每t秸秆中产生的热量最多(18 900 MJ), 且产生的价值可观, 在经济效益、环境效益以及社会效益

当中, 都具有较大的市场, 因此纤维素乙醇的发展潜力最大。利用秸秆生产乙醇, 不仅降低了成本, 而且材料来源丰富, 还解决了秸秆燃烧带来的环境问题, 也不会影响到国家的粮食问题, 同时还减轻了农民的负担等。但需找到一个更好的秸秆制乙醇的工艺, 使其产业化、自动化等, 才能给人类带来更好的效益。

(2)利用秸秆生产乙醇是利用再生资源解决液体燃料的一个国际性大问题, 不少国家在多年以前就开展此项工作, 目前还没有实现大规模工业化生产; 而且到目前为止, 还没有一种经济、高效的预处理技术可应用于秸秆的预处理上。因此, 今后应开发预处理新技术, 研发出流程短、效率高、能耗低的秸秆生产乙醇新工艺, 从而降低乙醇生产成本。

(3)为了使乙醇在生产的工艺流程具有经济可行性, 并且进一步提高乙醇的总产量, 提高转化阶段的生产率, 降低生产成本, 必须明确研究方向, 找到突破的瓶颈, 才能为中国秸秆转化燃料乙醇的规模化、产业化、低成本生产奠定基础。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)[M]. 北京: 中国法制出版社, 2006: 17.
- [2] H Guo, T Wang, I J Simpson, et al. Source contributions to ambient VOCs and CO at a rural site in eastern China[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(27): 4551-4560.
- [3] 孟庆福, 黄明智, 董德军. 综合利用秸秆资源发展农村循环经济[J]. *农村牧区机械化*, 2007(3): 26-27.
- [4] 王丽, 李雪铭, 许妍. 中国大陆秸秆露天焚烧的经济损失研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(2): 170-175.
- [5] 汪海波, 秦元萍, 余康. 我国农作物秸秆资源的分布、利用与开发策略[J]. *国土与自然资源研究*, 2008(2): 92-93.
- [6] 李庆军, 陈枚章, 闫颖. 农作物秸秆能源化利用研究探讨[J]. *农业机械*, 2010(S3): 43-45.
- [7] 李涛, 卓海峰, 王文富, 等. 探讨秸秆焚烧的危害与秸秆的综合利用[J]. *科技信息*, 2008(20): 35.
- [8] 徐玉宏. 我国秸秆焚烧污染与防治对策[J]. *环境与可持续发展*, 2007(3): 21-24.
- [9] 江得厚, 姚伯兴. 发展生物质发电的必要性及存在的问题[J]. *发电设备*, 2008(2): 152-155.
- [10] 韩佳慧, 杨扬, 张景来. 利用回归模型比较秸秆利用方式[J]. *安徽科技学院学报*, 2009, 23(6): 87-91.
- [11] Xianyang Z, Yitai M, Lirong M. Utilization of straw in biomass energy in China[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11(5): 976-987.
- [12] Axel M, Jürgen K. Generation and Utilization of Bio-Fuels-National and International Trends[J]. *Clean - Soil, Air, Water*, 2007, 35(5): 413-416.
- [13] 张燕. 中国秸秆资源“5F”利用方式的效益对比探析[J]. *中国农学*

- 通报,2009,25(23):45-51.
- [14] Klemm D, Heublein B, Fink H-P, et al. Cellulose :Fascinating biopolymer and sustainable raw material[J]. *Angewandte Chemie - International Edition*,2005,44(22):3358-3393.
- [15] Ragauskas A J, Williams C K, Davison B H, et al. The path forward for biofuels and biomaterials [J]. *Science*,2006,311(5760):484-489.
- [16] Excoffier G, Toussaint B, Vignon M R. Saccharification of steam-exploded poplar wood[J]. *Biotechnology and Bioengineering*,1991,38(11):1308-1317.
- [17] Xia Z, Yoshida T, Funaoka A. Enzymatic degradation of highly phenolic lignin-based polymers (lignophenols) [J]. *European Polyme J*,2003,39(5):909-914.
- [18] Messner K, Fackler K, Lamaipis P, et al. Overview of white-rot research : Where we are today[C]. *Wood deterioration and preservation. ACS Symposium Series*,2003,845:73-96.
- [19] Yaman S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feed stocks [J]. *Energy Conversion Management*,2004,45(5):651-671.
- [20] Saddl E R J N, Ramos L P, Breuil C. Steam pretreatment of lingo-cellulosic residues.In : *Bioconversion of forest and agricultural plant residues*[M]. Oxon: CBA International,1993:73-92.
- [21] Pérez J, Munoz-Dorado J, De La Rubi T, et al. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview[J]. *International Microbiology*,2002,5(2):53-63.
- [22] Li X T, Grace J R, Lim C J, et al. Biomass gasification in a circulating fluidized bed[J]. *Biomass and Bioenergy*,2004,26(2): 171-193.
- [23] 张卫杰,关海滨,姜建国,等.我国秸秆发电技术的应用及前景[J].*农机化研究*,2009(5):10-13.
- [24] 贾小黎.秸秆直接燃烧供热发电项目资源可供性调研和相关问题的研究(1)[J].*太阳能*,2006(2):9-15.
- [25] Cahly M, Piskorz J. The hydrogasification of wood[J]. *Industrial and Engineering Chemistry Research*,1988,27(2):256-264.
- [26] 汪业林.北欧国家的生物质能开发及启示[J].*安徽电气职业技术学院学报*,2006,11(3):72-75.
- [27] Kalpit V S, Mariusz K C, Christine I B, et al. Correlating the effects of ash elements and their association in the fuel matrix with the ash release during pulverized fuel combustion[J]. *Fuel Processing Technology*,2010,91(5):531-545.
- [28] 万晓红.秸秆资源化利用技术分析及其新途径探讨[J].*农业环境与发展*,2006,23(3):39-42.
- [29] 小宫山宏,迫田章义.日本生物质综合战略[M].北京:中国环境科学出版社,2005:52-54.
- [30] 张茜,尚俐君.秸秆发电生态效益可观[J].*华北电业*,2005(1):22-23.
- [31] 骆俊.我国发展生物质发电技术的前景分析[J].*江苏电机工程*, 2006,25(5):67-69.
- [32] 武少菁,刘圣勇.秸秆干发酵产沼气技术的概述和展望[J].*中国沼气*,2008,26(4):20-23.
- [33] 刘耕,刘亚红.厌氧消化技术在生态环境保护上的应用[J].*农业环 境与发展*,1999,16(4):23-27.
- [34] 李世密,魏雅洁,张晓健,等.秸秆类木质纤维素原料厌氧发酵产沼 气研究[J].*可再生能源*,2008,26(1):50-54.
- [35] 庞凤梅,李玉浸,杨殿林,等.农作物秸秆沼气发酵与直接利用效益 比较[J].*中国沼气*,2008,26(2):34-37.
- [36] 海生.农作物秸秆的利用[J].*湖南农机*,2009(2):31.
- [37] 王珏,寇巍,卞永存.秸秆资源现状及秸秆沼气效益分析[J].*环境保 护与循环经济*,2009(12):39-41.
- [38] 农业部科教司主持的沼气技术应用取得进展 [EB/OL]. (2007-5-28) [2010-4-15]. <http://www.ebiotrade.com/news/2007-5/2007527193849.htm>.
- [39] 于英林,董文哲,谢涛,等.浅谈玉米秸秆的综合利用[J].*农业与技术*, 2009,29(6):73-74.
- [40] 蒋剑春,应浩,戴伟娣,等.生物质液化催化气体技术工程化研究 [J].*太阳能学报*,2004,25(5):678-684.
- [41] 陈冬冬,高旺盛,陈源泉.中国农作物秸秆资源化利用的生态效应 和技术选择分析[J].*中国农学通报*,2007,23(10):143-149.
- [42] 韩鲁佳,闫巧娟,刘向阳,等.中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. *农业工程学报*,2002,18(3):87-91.
- [43] 常杰.生物质液化技术的研究进展[J].*现代化工*,2003,23(9):13-16.
- [44] 安文杰,许德平,王海京.生物柴油的化学制备方法[J].*粮食与油脂*, 2005(7):3-6.
- [45] Putun A E, Ozbay N, Onal E P, et al. Fixed - bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products[J]. *Fuel Processing Technology*, 2005,86(11):1207-1219.
- [46] Putun A E, Apaydm E, Putun E. Rice - straw as a bio-oil source via pyrolysis and steam pyrolysis[J]. *Energy*,2004,29(12-15): 2171-2180.
- [47] 黄彩霞,刘荣厚,蔡均猛,等.生物质热裂解生物油性质的研究进展 [J].*农机化研究*,2007(11):6-9.
- [48] 刘荣厚.生物质快速热裂解制取生物油技术的研究进展[J].*沈阳农 业大学学报*,2007,38(1):3-7.
- [49] 赵岩,王洪涛,陆文静,等.秸秆超(亚)临界水预处理与水解技术[J]. *化学进展*,2007,19(11):1832-1838.
- [50] 朱道飞,王华,包桂蓉.纤维素亚临界和超临界水液化实验研究[J]. *能源工程*,2004(5):6-10.
- [51] 金辉,赵亚平,王大璞.纤维素超临界水解反应技术[J].*现代化工*, 2001,21(12):56-59.
- [52] 陈一夫.生物质发电设备租赁市场分析(1)[EB/OL].(2009-01-20) [2010-4-16].[Http://blog.sina.com.cn/s/blog_4985aeed0100c5g7.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_4985aeed0100c5g7.html).
- [53] 吕忠志,张沈生.农村秸秆气化项目的经济性分析[J].*现代农业科 学*,2008,15(8):86-87.
- [54] 李绍庆.生物柴油亟待破题 [N]. *济南时报*,2008-08-08(A11) [2010-4-18].
- [55] 李陈续.安徽丰原燃料乙醇技术实现重大突破[N].*光明日报*, 2006-02-09(2版)[2010-4-18].