

我国农作物秸秆能源化利用产业现状与展望

武国庆

[1 国家能源生物液体燃料研发（实验）中心，北京 100020；

2 中粮营养健康研究院生物技术中心，北京 102209]

doi:10.3969/j.issn.1674-0319.2015.02.001

过度依赖化石能源使我国同时遭遇了能源安全、生态环境以及气候变化问题。生物质能是太阳能以化学能形式贮存在生物质中的可再生能源，是唯一可替代化石能源转化成气态、液态和固态燃料以及其他化工原料或者产品的碳资源。作为较易获得的生物质能原料——农作物秸秆资源丰富，能源化利用方式多样，是解决我国化石能源带来问题的有效途径。文章概述了三种典型的秸秆能源转化产品——生物质发电、纤维素乙醇和沼气产业现状，在此基础上从产业化的角度分析比较了国内三种能源产品的工艺技术、产品经济性及产业面临的问题，探讨了我国农作物秸秆资源的合理利用方式。

我国正处在工业化、城镇化发展阶段，过度依赖化石能源使我国同时遭遇了能源安全、生态环境以及气候变化问题。2014年，国内石油表观消费量达到5.18亿吨，天然气表观消费量达到1830亿立方米，近口同比增长率分别为5.7%和11.5%，对外依存度分别达到59.5%和32.2%^①。2013年，我国CO₂排放量为95.2亿吨，比2012年增加4.2%，占世界CO₂排放量的27.1%^②。近年来，雾霾问题更成

为举国之痛，已影响到我国25个省份，受影响人口达6亿。大气污染治理已到了刻不容缓的地步。党的十八大确定“推动能源生产和消费革命，合理控制能源消费总量”将成为我国长期的能源发展战略。加快调整能源结构，增加可再生替代能源消费量，尤其是生物质能源将成为推动能源生产与消费革命的重要措施。

目前，世界能源体系中，生物质能占总能耗的14%，仅次于石油、煤炭和



作者简介

武国庆，博士，国家能源生物液体燃料研发（实验）中心副主任，中粮营养健康研究院生物技术中心技术总监。主要研究方向为生物质能源与化工，长期从事纤维素乙醇技术开发与生产研究。

E-mail:wugq@cofco.com

① 参考文献

冉永平. 我国石油对外依存度近60%. 人民日报, 2015-01-29(2).

② 参考文献

International Energy Agency. Trends in global CO₂ emissions 2013 Report. The Hague/Bilthoven: PBL, 2013.

③ 参考文献

http://www.nrel.gov/learning/re_biomass.html.

④ 参考文献

田宜水. 生物质发电. 北京: 化学工业出版社, 2010, 19-20.

⑤ 参考文献

吴创之, 周肇秋, 马隆龙, 等. 生物质发电技术分析比较. 可再生能源, 2008, 26 (3): 34-37.

⑥ 参考文献

魏延军, 秦德帅, 常永平. 30MW 生物质直燃发电项目及其效益分析. 节能技术, 2012, 30(173): 278-281.

⑦ 参考文献

吴金卓, 马琳, 林文树. 生物质发电技术和经济性研究综述. 森林工程, 2012, 28(5): 102-106.

⑧ 参考文献

KEMA. Co-firing biomass with coal. Balancing US carbon objectives, energy demand and electricity affordability [EB/OL]. http://www.kema.com/consulting/_/power_generation/sustainable_and_distributed_energy/_bio_energy/cofiring_biomass/.

天然气, 居第4位。据统计, 全球生物质能占可再生能源资源的35%, 在可再生资源中位居首位。生物质能也是唯一可替代化石能源转化成气态、液态和固态燃料以及其他化工原料或者产品的碳资源。根据美国国家可再生能源实验室(NREL)定义, 生物质是地球上人工栽培及野生繁殖的植物总和^①。从资源量和可获得性来看, 农作物秸秆是较好的生物质资源。我国是农业大国, 每年秸秆资源量约7亿吨, 其中农村居民生活用能占21%, 还田肥料占36%, 饲料占20%, 造纸等工业原料占3%, 废弃焚烧占20%, 主要农作物秸秆可能资源化利用资源量为2.65亿吨(包括农村生活用能)^②。对于秸秆资源如何高效资源化利用, 世界各国均制定了适合自己国情的生物质能源发展战略。本文重点介绍三种典型的以农作物秸秆为原料且已规模化生产的生物质能源产业情况, 即生物质发电、纤维素乙醇以及沼气, 通过分析比较三种能源的产品工艺、技术经济性以及面临的问题, 为我国农作物秸秆资源的合理利用提供参考。

1 秸秆资源资源化利用现状

1.1 生物质发电

生物质直燃发电是指在特定的生物质蒸汽锅炉中通入空气使生物质原料燃

烧, 产生蒸汽, 进而驱动蒸汽轮机, 带动发电机发电的过程。单纯的生物质直燃电厂单机容量一般在25~30MW, 锅炉的燃烧效率在80%~90%, 发电效率一般在20%~30%^{③④}。国外在生物质直燃发电产业化方面成果显著。目前, 丹麦已建成130多家秸秆直燃发电厂, 并将秸秆发电技术成功推广到瑞典、芬兰和西班牙等国家。丹麦科学家研究数据表明, 热电联产可以节约28%的燃料, 减少47%的CO₂排放, 热效率可以达到80%~90%^⑤, 因此欧美一些国家通常使用热电联产技术来解决生物质发电或供热不经济的问题。

生物质和煤混燃的电厂单机容量(电功率)通常在50~1000MW, 锅炉热效率可以达到94%, 发电效率可以达到49%^⑥, 因而生物质混燃发电技术在欧洲和美国等地得到广泛应用。根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)统计的数据, 全球已有200多座混燃示范电站, 其中100多套在欧盟国家, 60多套在美国, 其余在澳大利亚等国。截至2011年底, 美国生物质发电装机容量约为13 700MW, 约占可再生能源发电装机容量的10%, 发电量约占美国总发电量的1%。生物质混燃发电在美国生物质发电中占有较大的比重, 以木质废弃物与烟煤煤粉混燃居多, 混烧生物质燃料的比例占3%~12%^⑦。

我国自20世纪90年代末从丹麦引进

生物质直燃发电技术，经过十几年的消化吸收，关键设备基本实现国产化。为兼顾生物秸秆的运输收集半径并实现盈利，机组合理的单机容量为25~30MW。2004年以来，我国先后核准批复了200多个秸秆直燃发电示范项目。2010年7月，国家发展和改革委员会统一执行了0.75元/(千瓦·时)（含税）的标杆上网电价，增加了该产业的盈利空间。截至2012年底，我国生物质发电累计并网容量为5819MW，其中，直燃发电技术类型项目累计并网容量为3264MW，占全国累计并网容量的55%；垃圾焚烧发电技术类型项目累计并网容量为2427MW，占全国累计并网容量的41.71%；沼气发电技术类型项目并网容量为206MW，占全国累计并网容量的3.54%^⑩。2013年1月颁布的《可再生能源“十二五”规划》中明确表示，2015年我国生物质发电装机达到13 000MW，其中农林生物质发电8000MW、沼气发电2000MW、垃圾焚烧发电3000MW，分别为2010年装机量的4.0、2.5和6.0倍。政策的支持与补贴的提高，刺激了行业的发展。国家电网公司、中国节能投资公司、五大发电集团、江苏国信、粤电、皖能电力以及凯迪电力等企业纷纷投资参与建设运营。

1.2 纤维素乙醇

生物乙醇主要作为汽油含氧剂及辛

烷值改进剂在全球广泛使用，通常添加量为10%（体积分数）形成E10乙醇汽油，目前生物乙醇的主要原料仍然是玉米、甘蔗及木薯等。据F.O.Licht统计，2014年世界燃料乙醇产量达到创纪录的7227万吨^⑪，纤维素乙醇产量超过10万吨。美国政府宣布2022年纤维素乙醇产量将超过玉米乙醇产量达到4800万吨，农业废弃物秸秆将被作为未来主要的乙醇生产原料。

纤维素乙醇也称第二代生物液体燃料，利用先进技术从玉米秸秆、麦秆、干草、木材等农林业废弃物中获取燃料乙醇。其原料丰富，但技术难度大，国际上已研究几十年，现已完成中试，进入商业化示范阶段。目前纤维素乙醇研究主要集中在生物酶解发酵路线，截至2012年底，世界已建成上百套纤维素乙醇中试装置^⑫。2013~2014年，国内外先后有7套3万~7.5万吨/年规模的纤维素乙醇示范装置投入试运行，累计产能超过40万吨/年，成本可控制在2.15~3.0美元/加仑（1加仑=3.785升，下同）^⑬，以上装置将在2015~2016年完成产品的技术经济性评价，进入商业化推广阶段^⑭。预计到2017年，全球至少有25个项目投产，纤维素乙醇年生产能力超过100万吨。

2014年，我国燃料乙醇产量达到233.2万吨，混配E10乙醇汽油约2140万

⑨ 参考文献

蒋大华, 孙康泰, 元伟, 等. 我国生物质发电产业现状及建议. 可再生能源, 2014, 32(4): 542-546.

⑩ 参考文献

2014年全球燃料乙醇产量有望增长5%. 世界农业, 2014, 418(2): 174.

⑪ 参考文献

Bacovsky D, Ludwiczek N, Ognissanto M, et al. Status of advanced biofuels demonstration facilities in 2012. IEA Bioenergy Task 39: Commercializing 1st and 2nd generation liquid biofuels from biomass, 2013. http://demoplants.bioenergy2020.eu/files/Demoplants_Report_Final.pdf.

⑫ 参考文献

US Department of Energy. Replacing the whole barrel to reduce US dependence on oil[EB/OL]. [2014-01-26]. http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/replacing_barrel_overview.pdf.

⑬ 参考文献

<http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2014/09/03/poet-dsms-cellulosic-biofuels-plant-opens-as-fantasy-becomes-real/>.

⑭ 参考文献

岳国君, 武国庆, 林鑫. 纤维素乙醇工程化探讨. 生物工程学报, 2014, 30(6): 816-827.

⑮ 参考文献

武国庆, 郝小明. 2014年度生物能源发展态势. 中国生物产业发展报告2014. 北京: 化学工业出版社, 2015.

⑯ 参考文献

Rasi S, Veijanen A, Rintala J. Trace compounds of biogas from different biogas production plants. *Energy*, 2007, 32(8): 1375-1380.

⑰ 参考文献

屠云章, 吴兆流, 张密. 借鉴德国经验推动我国沼气工程发展. *中国沼气*, 2012, 30(2): 31-32.

⑱ 参考文献

李子富, 余敏娜, 范晓琳. 德国沼气工程现状分析. *可再生能源*, 2010, 28(4): 141-144.

⑲ 参考文献

陈祥, 梁芳, 盛奎川, 等. 沼气净化提纯制取生物甲烷技术发展现状. *农业工程*, 2012, 2(7): 30-34.

⑳ 参考文献

马燕合, 黄晶, 等. 2014中国生物技术与产业发展报告. 北京: 科学出版社, 2014: 135-142.

㉑ 参考文献

蔡昌达, 谭娟. 中国生物甲烷产业市场前景与概览. 第2卷. 董仁杰, 伯恩哈特·蓝宁图. 沼气工程与技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2012: 276-282.

吨, 占当年汽油总消费量的近1/4, 目前已在黑龙江、吉林、辽宁、河南、安徽、广西6省区及湖北、山东、河北、江苏、内蒙古5省区的30个市试点车用乙醇汽油, 实现了乙醇汽油的封闭运行。纤维素非粮乙醇产量仅3.2万吨^⑮。国内已建成山东龙力5.15万吨/年装置(以玉米芯废渣为原料)与河南天冠3万吨/年的乙醇-沼气联产示范装置, 以上两套装置均未采用戊糖/己糖共发酵生产乙醇技术。在建及规划的项目包括中粮集团采用自主知识产权预处理工艺及戊糖/己糖共发酵技术的5万吨/年醇电联产项目、安徽国祯和意大利M&G公司的合资项目以及河南天冠的3万吨/年纤维素乙醇规划项目。

1.3 沼 气

沼气是微生物群体在厌氧条件下协同发酵可降解有机物的产物, 主要由甲烷(50%~60%)、二氧化碳(35%~45%)和少量的硫化氢、水蒸气等组成, 净化提纯后用来加热、发电, 输入天然气管网或者作为车用燃料^⑯。

欧洲的沼气技术处于世界领先水平, 德国、丹麦、奥地利等国的沼气工程技术及装备已经达到了标准化、系列化、工业化水平。德国目前是世界上沼气产量最大的国家, 其中能源作物和农业废弃物占到原料的61.6%, 大量采用秸

秆作为沼气发酵原料是德国沼气产业迅猛发展的主要因素^⑰。截至2011年, 德国约有7000座沼气工程, 生产的沼气主要用于发电上网^⑱。2010年, 德国沼气发电总装机容量达2300MW, 年发电量为200亿千瓦时, 占德国总发电量的3.2%。目前, 德国对沼气的利用由直接驱动发电机组的热电联产, 开始向生产管道生物天然气和车用燃气方向转变。截至2011年, 德国约有83个沼气工程在运行时将沼气提纯为生物天然气用于民用或车用, 总生物天然气提纯量约为4.6亿立方米/年(标准状态下), 预计未来几年将有更多的沼气提纯项目实施^⑲。

据统计, 2010年我国大型沼气工程有50 000处, 沼气产量为10亿立方米(标准状态下)^⑳。我国沼气建设逐步由小型、分散化、经济效益差的农村户用沼气向规模化的沼气工程发展。近几年, 通过引进并结合自主开发的技术, 已建成以畜禽粪便为主要原料的蒙牛澳亚牧场(装机容量1.26MW)、北京德清源(装机容量2MW)、山东民和牧业(装机容量3MW)等大型沼气并网发电项目。我国沼气净化提纯制取生物天然气正处于起步阶段, 部分净化提纯关键技术还需从国外引进, 目前在广西南宁、山东博兴、内蒙古通辽等地已建成沼气净化提纯制取生物天然气示范项目^㉑。

2 我国秸秆能源化利用产业存在的问题及技术经济性分析

2.1 产业存在的问题

2.1.1 生物质发电效率偏低，市场竞争力弱

我国目前建设、运行的上百个生物质发电装置大都为农林剩余物直燃发电项目，采用高温高压振动炉排锅炉或流化床燃烧锅炉，基本实现了技术与装备的国产化。一代生物质发电厂，发电机组规模一般为 $2 \times 12\text{MW}$ ；二代电厂，发电机组规模一般为 $1 \times 30\text{MW}$ 机组。生物质电厂投资基本是燃煤火电厂的2倍左右，达到 $0.8\text{万} \sim 1.0\text{万元/千瓦}$ ，其锅炉热效率虽可提高到 $88\% \sim 90\%$ ，但由于炉膛温度偏低，整体发电效率仅为 $26\% \text{ }^{\text{①}}$ 。其发电标准煤耗达到 $500 \sim 650\text{g} / (\text{kW} \cdot \text{h})$ ，是国内 1000MW 级的发电煤耗 $285\text{g} / (\text{kW} \cdot \text{h})$ 的2倍左右，发电效率也仅为大型煤电厂效率的 $50\% \text{ }^{\text{②}}$ 。生物质氯含量高，燃烧灰熔点低、易结渣，生物质直燃电厂一直存在受热面易结焦、碱金属腐蚀、检修时间长、运行时间短等问题。

生物质发电历来是“小电厂、大燃料”，产地实际可收集的量和理论计算的量之间有很大差距。近几年

出现生物质发电项目“扎堆”建厂，进一步加剧了燃料来源供应不足的矛盾。一个 30MW 的机组一年消耗约25万吨秸秆，原料的收集物流难度非常大。目前电厂原料实行委托代理收购，从收集、打包、储存再集中向电厂输送，去掉运输储存成本和代收点等中间环节的扣除，农民收益较低，没有形成良性的产业链。其次，项目之间存在恶性竞争，使原料成本已接近或超过电厂盈亏平衡点的平均收购价格（约 350元/吨 ），仅 $1/3$ 的电站运营收支能够平衡^③，一些生物质能发电厂在建成投运后不久就因为亏损而停产。从国家发展和改革委员会历年发布的可再生能源发电项目补贴表中可见，国内生物质电厂的锅炉技术层次不齐，其发电量、年利用小时数差异巨大，2013年全国生物质发电年等效满负荷运行小时数仅为5844小时，无法达到7000小时/年的盈利平衡点，这些数据也侧面印证了产业普遍亏损的问题。

混燃发电涉及生物质与煤掺烧，虽然有更好的发电效率和经济效益，也避免了单纯生物质电厂锅炉易结焦、腐蚀等问题，但与现有补贴政策冲突（掺煤比例超过20%即无法享受生物质发电补贴），难以监管操作实施。

2.1.2 纤维素乙醇酶制剂成本偏高，总糖利用率低

纤维素乙醇在我国仍处于产业化验证阶段，需要经过长期连续稳定运转的考核评价。其产业化关键技术仍然是高效预处理技术与装备、低成本纤维素酶制剂的生产和戊糖发酵菌种技术。

预处理对过程的影响几乎涉及纤维素乙醇生产的所有环节，包括纤维素生物质原料选择、水解液脱毒、底物的酶解发酵水平、精制过程能耗、废水处理工艺等。国内外产业界正在示范装置上对稀酸、中性和氨爆预处理三种工艺路线进行考核，以形成经济可行的实用路线。三种工艺路线各有所长，需要在设备材质腐蚀、糖的收率、酶制剂成本、污水处理及总成本方面进行平衡^④。预处理装备方面则借鉴现代制浆造纸设备厂的成熟经验，由间歇转向连续设备，并在潘地亚（Pandia）横管连续蒸煮系统方面取得突破，但更大处理能力的卡米尔（Kamyrr）立式连续蒸煮系统仍需从国外进口^⑤。

如何降低酶制剂成本仍然是目前纤维素乙醇示范装置经济性考核面临的问题。虽然经过诺维信和杰能科等酶制剂公司几十年的研发，小规模实验室评价酶制剂的成本已从20世纪

90年代的5美元/加仑纤维素乙醇降为目前的0.5美元/加仑纤维素乙醇,但规模化生产中酶制剂成本仍占总成本的20%~30% (根据工艺不同,在1000~2000元/吨乙醇间变动)。除了酶的自身生产成本外,酶制剂的精制、运输等过程的成本占到总成本1/3以上。因此可以考虑从三方面入手降低酶制剂成本,一是酶制剂公司通过技术进步提高菌株产酶效率,二是与预处理工艺协同,减少或去除酶抑制物,并进一步提高底物的可及性,三是通过原位产酶方式,减少酶制剂的加工精制成本。

国外商业化装置均采用了戊糖/己糖共发酵方式来提高原料的利用率(可降低原料单耗近1/3),降低乙醇的成本。而国内仅中粮集团500吨/年的中试装置及计划在建的5万吨/年的秸秆纤维素乙醇装置采用戊糖/己糖共发酵工艺,其他已建成的万吨级装置均无法实现戊糖转化生产乙醇,戊糖只能生产沼气(降低了纤维素乙醇的经济性),或其他产品如木糖醇等(限制了燃料乙醇的规模)。以戊糖生产乙醇和沼气作比较,在木质纤维素酶解液中,1吨木糖经酵母发酵后可生产约400kg乙醇,厌氧处理仅可生产沼气约400m³(含甲烷60%),无论从产品热值还是从产品价值来说前者均占优势。因此采用戊糖/己糖共发酵工艺、提高乙醇收率是降低纤维素乙醇生产成本的有效措施,还可以进一步提高纤维素

乙醇的能量产出/投入比。

2.1.3 沼气规模化程度低,高值化利用途径少

尽管我国大中型沼气工程的发展速度较快,但规模及效益却远远不如德国、丹麦等国,在技术装备上仍然有待进一步突破^②。“重工艺、轻装备”的开发思路以及“重装置、轻产品”的补贴激励机制是制约我国沼气产业规模化发展的重要因素。我国是沼气工程厌氧发酵工艺路线最多的国家,但与工艺配套的大型装备研究很少,而德国和丹麦等大中型沼气工程发达的国家,多采用技术成熟、设备可靠的传统全混式沼气发酵工艺(CSTR)。沼气工程的规模化是维持其稳定运行的重要因素之一,在德国,沼气工程平均池容约为1000m³,是中国的3.5倍;在产气率方面,国外CSTR工艺的产气率可达15m³/m³,而我国现在的技术水平仅为0.8~5.0m³/m³,差距较大;在能耗方面,国外的厌氧反应器热耗较低,利用率较高,发电余热利用率达90%,而国内厌氧反应器热耗大,利用率低,发电余热利用率仅为35%。同时,我国厌氧消化装备制造也未全面推行标准化^③。

规模化沼气工程通常以混合原料为主(包括能源作物、秸秆废弃物、畜禽粪便和有机废弃物等),以适合菌群生

② 参考文献

马龙海,邓宇昆,董胜亮.我国生物质发电现状分析及研究.电力勘探设计,2012,6(3):70-74.

③ 参考文献

潘少军.仅三成企业尚有微利 生物质发电如何走出困境?人民日报,2009-12-07.

④ 参考文献

岳国君.纤维素乙醇工程概论.北京:化学工业出版社,2014.

⑤ 参考文献

邓良伟.中德沼气工程比较.可再生能源,2008,26(1):110-114.

⑥ 参考文献

党锋,毕于运,刘研萍,等.欧洲大中型沼气工程现状分析及对我国的启示.中国沼气,2014,32(1):79-83.

长需要,且有更高的缓冲能力保证系统稳定,同时有更高的产气效率。理论上,能源作物或青鲜秸秆原料的产沼气率(含甲烷50%)可达到330立方米/吨干物质(标准状态下)或更高^⑧。以实际大型沼气工程为例,如世界上最大的沼气工程德国Nawaro沼气项目,每小时可生产出10 000m³的沼气,年消耗青贮玉米秸秆、青草和谷类等原料共45万吨,产气率约180立方米/吨干物质(标准状态下)^⑨;比利时专门针对农业废弃物、能源植物而设计开发的Dranco-farm工艺,进料的总固体浓度为15%~40%,中高温发酵(中温35℃~40℃、高温48℃~57℃),停留时间为15~30天,沼气产率100~200立方米/吨干物质(标准状态下)^⑩。对于干秸秆等低劣生物质原料来说,通常产气率要低于200立方米/吨干物质(标准状态下)^⑪。

将沼气净化提纯后并入天然气管网或用作车用燃气,是沼气高值化利用的重要方向。沼气净化关键技术是除去沼气中的CO₂、H₂S、H₂O及其他杂质,以提高生物燃气中的CH₄含量。目前国内常用氧化铁脱硫法,考虑到脱硫效率、成本、二次污染等因素,生物脱硫法更具有竞争力,国外应用较多。目前国内生物脱硫技术还不成熟,须进一步研究及改进。沼气

提纯脱碳技术经过十几年的发展,已形成变压吸附法和压力水洗法为主的成熟技术,国内也已开展沼气净化提纯技术的研发,并开始应用于实际工程中^⑫。在沼气发电方面,我国能够生产最高达700kW系列的燃气内燃机发电机组,但运行效果不理想,更大规模的燃气内燃机或者燃气轮机发电机组需要从国外进口。国际上先进的燃气发电机可将1m³沼气(标准状态下)(含甲烷55%~60%)转化为2.5 kW·h电力,国产沼气发电机仅能转化1.6kW·h电力。进口发电机组发电效率可超过40%,热效率达40%,而国产机组发电效率为33%,热效率为35%^⑬。

我国建立大中型沼气工程多以处理废弃物和生产能源为出发点,很多沼气工程采用常温发酵或外加热源近中温发酵工艺,在冬季不能维持稳定产气,运行效果差。沼气的利用方式仍然以替代原煤直接燃烧为主,目前我国只有约1%的沼气项目进行沼气发电,提纯作为车用燃气的项目更少,工程的经济效益较差,同时影响了能量的转化效率^⑭。

2.2 产品初步技术经济性分析

以农业废弃物秸秆为原料生产不同的能源产品具有不同的效益,国内

外秸秆资源规模化利用的最常用、最成熟的方式是生物质发电,秸秆发酵生产沼气也颇具规模,秸秆纤维素乙醇已进入商业化示范阶段。由于三种产品目前国内都需要政策性补贴,还未实现商业化盈利,因此之前未见对三种以秸秆为原料的产品技术经济性的公开报道。但随着技术进步与产业化的推进,补贴将会逐步减少甚至取消,未来产品最终都会走向市场化。因此,在原料资源有限的情况下,竞争将会加剧,产业发展将面临三种能源产品的选择。

为此,本文借鉴相对成熟的生物质发电产业,以国内可以实现的较为合理的收集规模25万吨/年秸秆原料为基准,从装置规模、装置投资、产量、成本、能量转化效率及效益等角度对以上三种秸秆能源产品进行初步的技术经济性评价(详见表1,数据仅供参考)。其中装置投资依据国内建设水平估算,技术指标参照国际先进水平。考虑到实际情况,产品售价基于近4年的平均价格。在计算效益时,仅对生物质发电给予补贴0.35元/度,未考虑纤维素乙醇及车用燃气的补贴。其中沼气应用较为复杂,考虑了代煤直燃、发电与车用燃气三种用途,并逐一进行了分析评价。为简化过程,三种产品均未考虑副产品的收益和能量产出。

从表1可以看出, 25万吨秸秆可供应1个30MW的生物质发电机组或者1个5.5万吨纤维素乙醇示范装置或者11个日产20 000m³(标准状态下)沼气项目的原料需求。而生物质发电在项目投资(3亿元)上是有优势的, 仅约为纤维素乙醇和沼气发电项目的1/2, 车用燃气项目介于两者之间, 达到4.4亿元。但从产值来看, 沼气及下游转化产品较低, 代煤直燃为4125万元, 仅分别为沼气发电和车用燃气的1/3和1/4; 沼气发电略低于生物质发电, 仅达到1.29亿元; 车用燃气高于发电达到1.69亿元, 但都远低于纤维素乙醇的4.4亿元的产值。从产品能量产出来看, 生物质发电(包括沼气发电)最低, 其次是沼气代煤燃烧或用作车用燃气, 生物质发电产生能量仅约为纤维素乙醇能量的50%(即使耗能较大的纤维素乙醇采用醇电联产后, 装置生产过程中也不用消耗额外的化石能源)。从产品效益角度看, 纤维素乙醇效益最好, 年收益为8250万~16 500万元, 平均6年内收回投资; 生物质发电在0.35元/度补贴情况下可获取1890万~2835万元的收

⑳ 参考文献

Hopfner-Sixt K, Amon T, Bodiroza V, et al. State of the art of biogas technology in Austria. Landtechnik, 2006, 61(1): 30-31.

㉑ 参考文献

陈永生. 欧洲沼气工程原料预处理装备技术. 中国沼气, 2010, 28(5): 18-23.

㉒ 参考文献

梁芳, 包先斌, 陈祥, 等. 国内外干式厌氧发酵技术与工程现状. 中国沼气, 2013, 31(3): 44-49.

㉓ 参考文献

欧阳平凯, 陈可泉, 贾红华, 等. 低劣生物质制备生物甲烷的研究进展与展望. 广西科学, 2014, 21(1): 1-5.

㉔ 参考文献

徐海云, 李长生, 张玮, 等. 中国沼气工程产业发展研究产出二: 中国沼气产业发展现状报告. 北京: 轻工业环境保护研究所, 2011.

表1 25万吨秸秆(绝干)转化产品技术经济性评价

| 产品 | 生物质发电 | 纤维素乙醇 | 沼气 | 沼气发电 | 车用燃气 |
|----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 装置规模 | 30MW 机组 | 5.5 万吨/年 | 680万立方米/年(标准状态下), 11个 ^① | 2MW 机组, 11个 ^② | 340万立方米/年(标准状态下), 11个 ^③ |
| 装置投资 | 3 亿元 | 6.6 亿元 | 未计算 | 6.6 亿元 | 4.4 亿元 |
| 年产量 | 1.89 亿度电 ^④ | 5.5 万吨 | 0.75 亿立方米(标准状态下) | 1.72 亿度电 | 0.375 亿立方米(标准状态下) |
| 产值/万元 ^⑤ | 14 175 | 44 000 | 4125 | 12 903 | 16 875 |
| 产品能量/MJ ^⑥ | 6.80×10 ⁸ | 1.50×10 ⁹ | 1.18×10 ⁹ | 6.19×10 ⁸ | 1.18×10 ⁹ |
| 成本 | 0.6~0.7 元/度 | 5000~6500 元/吨 | 1.4~1.8 元/立方米 | 0.76~0.92 元/度 | 2.86~3.0 元/立方米(标准状态下) |
| 效益/万元 | 1890~2835 | 8250~16 500 | 亏损 6375~9375 | 亏损 172~2924 | 5625~6150 |

①标准状态下, 日产沼气20 000立方米, 1吨秸秆产沼气300立方米(高于现有装置200立方米的产气率), 含甲烷50%。

②标准状态下, 1立方米沼气(含甲烷50%)发电2.3度, 年运行8000小时。

③车用燃气甲烷含量>97%。

④年运行7000小时, 10%自耗电。

⑤生物质发电(包括沼气发电)上网价0.75元/度(补贴0.35元/度), 燃料乙醇8000元/吨, 标准状态下, 沼气折0.55元/立方米(1立方米沼气替代1千克原煤, 吨煤按550元/吨计算), 车用燃气4.5元/立方米。

⑥标准状态下, 车用燃气热值为31.4MJ/m³, 乙醇热值为27.3MJ/kg(6530大卡)。

益，需要10年以上收回投资，没有补贴就处于亏损状态；沼气项目只有在作为车用燃气情况下，年收益达到5625万~6150万元，平均8年内收回投资，而沼气发电即使有补贴也仍旧处于亏损状态。

综合以上各种因素，纤维素乙醇具有更好的收益，其次是沼气作为车用燃气项目，这两个项目在没有政府补贴情况下仍旧可以盈利。生物质发电项目在有补贴情况下有收益，沼气发电在现有补贴情况下仍旧亏损，代煤直燃效益更差。

3 生物质能源产业发展趋势

我国生物质能源产业发展是一项横跨不同行业、不同学科的系统工程，要加强科研投入，在考虑能源安全、减排等社会、环境因素下，也要兼顾经济效益，因地制宜，分阶段选择技术上成熟的生物质能源利用模式。就目前来看，国内以秸秆为原料的生物质发电、沼气及纤维素乙醇会长期共存，随着技术进步与资源竞争的加剧，产品将会向能量密度大、经济性更好的生物液体燃料转变。

3.1 生物质发电经济性难过关，应发展热电联产及混燃技术

从全球范围来看，生物质发电仍

旧是目前最普遍、最现实的现代化生物质能利用方式。各国均通过政府补贴机制，保持该行业的发展运行。虽然生物质发电存在发电效率低、能量利用效率低等问题，但通过发展热电联产和与煤掺烧等方式可以缓解上述问题。热电联产可以将生物质直燃发电的热效率提高至80%以上，在常年需要热能（蒸汽）供应的工业园区有发展空间。大型火电厂生物质掺烧模式，相对于生物质直燃具有季节适应性强、发电效率高、运行费用低、没有结焦腐蚀等一系列显著优势，已被国际上认为是高效、安全的生物质发电模式。政府应该积极扶持和引导，并着手有关政策细节的研究，同时加强监管措施，避免弄虚作假，使掺烧企业能够得到应有的收益。

3.2 沼气应注重装备开发，高值化利用解决经济性问题

我国沼气产业以往因受“环保主导”模式以及工艺技术的约束，多数大中型沼气工程的技术经济指标普遍低下，不具备经济上的可持续性，在秸秆规模化转化沼气工程技术上与国外差距较大。未来国内沼气应重视开发标准化和成套化装备，重点解决高干物浓度发酵、多元原料共发酵、中/高温发酵过程中产生的问题。沼气应向高值化利用途径方向发展，如净化

后沼气发电，尤其是净化提纯后用作车用燃气，解决自身经济性问题。

3.3 纤维素乙醇应继续降低成本，发展“醇-电-沼气联产”工艺

纤维素乙醇产业发展的关键问题是协同预处理技术开发，降低酶制剂成本，提高戊糖转化乙醇效率。虽然该产品仍旧处于产业化实践阶段，但从国内外POET-DSM以及Abengoa两套7.5万吨/年的示范装置现有情况来看，运行测试基本达到预期，具备产业化推广条件。上述技术经济性评价也表明，从能量转化效率、产品价值及效益等角度分析，纤维素乙醇竞争力更强。随着生物技术的进步，产酶菌株的效率、酶的活性以及共发酵菌株的糖醇转化效率会不断提高，酶制剂成本与能耗会不断下降，纤维素乙醇成本更有竞争力，成为最具发展潜力的秸秆能源转化产品。从能源转化角度来看，对秸秆最好的利用方式应该是以生产液体燃料纤维素乙醇为主，醇-电-沼气联产，实现原料的梯级利用，吃干榨尽，带动产业持续健康发展。

[基金项目：国家高技术研究发展计划（“863”计划）2012AA022304；国家高技术研究发展计划（“863”计划）2014AA021906。]