

## 低劣生物质制备生物甲烷的研究进展与展望\*

# Progress and Prospect of Biomethane Production with Low-valued Biomass as Material

欧阳平凯,陈可泉,贾红华,杨蕴毅,郑涛,韦萍

OUYANG Ping-kai, CHEN Ke-quan, JIA Hong-hua, YANG Yun-yi, ZHENG Tao, WEI Ping

(南京工业大学生物与制药工程学院, 江苏南京 210009)

(College of Biotechnology and Pharmaceutical Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing, Jiangsu, 210009, China)

**摘要:**我国低劣生物质种类丰富、总量巨大,其中每年产生的城市垃圾、秸秆、禽畜粪便等低劣生物质达到  $3 \times 10^9$  t 之多,大量的原料基础为我国生物甲烷开发和利用提供了良好的条件。本文介绍低劣生物质制备生物甲烷在我国的发展现状,发展存在的问题和对策,重点介绍以生物甲烷为核心的一种可以使生物甲烷更加清洁高效、利用全面的环保型能源产业新模式。最后通过能源产业链延伸对生物甲烷利用的广阔前景进行了展望。

**关键词:**生物甲烷 低劣生物质 产业新模式 产业链

**中图分类号:**TK63 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2014)01-0001-05

**Abstract:** Low-valued biomass is very rich and tremendous in China, such as municipal waste, straw and livestock manure which are more than 3.0 billion tons in one year. This low-valued biomass provide a good condition for development of biomethane. In this paper, we introduced the development status, problems and countermeasures of biomethane in China. We also introduced a new pattern of environmentally friendly energy industry to biological energy as the core could make use of biomethane more cleanly and effective comprehensively. At last, the prospects of biomethane utilization was discussed through the extension of energy industry chain.

**Key words:** biomethane, low-valued biomass, a new pattern of industry, industry chain

当前社会发展正面临严重的环境污染与能源危机。全球 CO<sub>2</sub> 排放量持续增加,2012 年全球化石资源燃烧排放的 CO<sub>2</sub> 为  $3.45 \times 10^{10}$  t,其中,我国占世界排放量的 29%,居世界第一,问题已相当严峻<sup>[1]</sup>。此外,以化石资源为基础的能源危机也日益严重,我国的石油依赖度已经达到 56%,成为全球第二大原油进口国。

转变生产方式,发展生物质能源是缓解能源危机、减少污染物排放的重要途径之一。人类仅需利用

全球生物量的 7%,即可以解决资源、能源的难题。然而,采用什么样的原料,发展何种生物质能源是首先要解决的问题。世界各国均制定了生物质能源发展战略,例如地广人稀的美国采用粮食制乙醇;巴西具有雨林气候,生物量产丰富,采用蔗糖制乙醇;德国资源短缺,但工业技术发达,采用废弃资源制备沼气<sup>[2,3]</sup>。

中国该如何发展生物质能源,应该结合我国人口多、土地少的国情,制定适合自身的生物质能源发展战略<sup>[4]</sup>。低品位生物质,如农作物秸秆、禽畜粪便、生活污水、工业有机废水、城市固体废物等,在我国非常丰富,同时这些物质正是水体污染的主要来源。例如我国养猪数量占世界 51%,养殖家禽数量占世界 20%以上(1 头猪的粪便排放量相当于 7 个人,1 只鸡的生化需氧量排放量相当于 0.7 个人),每年产生禽畜粪便约  $8.5 \times 10^8$  t,其中大部分直接排放到水体

收稿日期:2013-12-20

作者简介:欧阳平凯(1945-),男,中国工程院院士,教授,博士生导师,主要从事生物化工研究。

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目“新一代生物催化与生物转化的科学基础”(2009CB724700)资助。

中,导致水体的富营养化。据估算<sup>[5]</sup>,若要治理 $3.0 \times 10^9$  t 的低劣生物质资源,将消耗  $1.17 \times 10^{10}$  t 标煤,排放  $3.04 \times 10^{10}$  t  $\text{CO}_2$ 。但如果用这些废弃低劣生物质资源生产甲烷,将可以产生约  $2.0 \times 10^{11}$   $\text{m}^3$  生物甲烷,减少  $1.0 \times 10^9$  t  $\text{CO}_2$  排放,剩余物可以代替 30% 的化肥。因此,高效利用低劣生物质产生物甲烷兼具节能、减排、资源化的三重战略意义。

## 1 我国生物甲烷的发展现状

据 2012 年国家发展和改革委员会发布的《可再生能源发展“十二五”规划》,2015 年生物燃气(甲烷)产量将达到  $2.20 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ 。我国政府在哥本哈根会议上郑重承诺,2020 年碳排放强度在 2005 年基础上降低 40%~45%,包括生物甲烷在内的非化石能源比重提高到 15%。2013 年 7 月,全国政协副主席、科技部部长万钢在生物燃气产业商业模式应用推进现场会上指出,党中央国务院高度重视能源利用方式变革问题,发展生物燃气产业是促进克霾减排、保护生态环境的有效手段,是发展清洁能源、缓解化石能源短缺、维护能源安全的重要力量<sup>[6]</sup>。由此可见,政府决心要开创中国生物燃气发展的新局面。

当前我国正成为世界上生物甲烷发展速度最快、建设规模最大、普及最广的国家。据统计 2009 年中国生物甲烷工程总产量已达到  $2.10 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$  沼气(约 50% 甲烷),其中农业生物甲烷工程占  $1.4 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ ,工业和城市废弃物生物甲烷工程占  $0.7 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ <sup>[7]</sup>。对比其它国家,中国生物甲烷工程产量为世界之冠,如河南天冠集团建成的日产  $5 \times 10^5$   $\text{m}^3$  沼气的规模已处于世界第一位。虽然我国的生物甲烷总产量很大,但也存在如下问题:

### 1.1 户用生物甲烷工程已不能满足能源体系的发展需求

低劣生物质生产沼气作为生活能源在我国农村已取得很好的成效。但是传统的农村户用沼气工程的缺点也很明显:生物转化效率较低、发酵原料单一,以人畜粪便为主等。然而新时代下养殖业和种植业的集中化和规模化使生物质资源更加集中。与此同时,新农村、乡镇的现代化发展也对能源的质量有了更高层次的要求,因此传统的分散式、低效率的户用沼气能源体系已经越来越不适应新时代农业和村镇的发展需求<sup>[8]</sup>。

### 1.2 规模化生物甲烷工程技术与国外仍有较大差距

#### 1.2.1 生物甲烷工程原料单一

欧洲国家的农业生物甲烷工程普遍采用混合原料。在德国有 30 多种原料被用作生物甲烷工程的原

料;城市大型生物甲烷工程也多采用工业废弃物、城市废水污泥和生活有机废弃物等混合原料<sup>[7]</sup>。这样既扩大了原料来源,也减轻了环境污染,不同原料混合发酵还能保证系统稳定运行。然而,中国的生物甲烷工程基本上采用单一原料——畜禽粪便进行发酵。

#### 1.2.2 生物甲烷工艺技术落后

德国、丹麦、奥地利等发达国家的沼气工程技术及其装备已经达到标准化、系列化、工业化水平。中国与欧洲先进国家均有较大的差距,这也是造成中国沼气工程相对运行稳定性差、发酵效率平均水平不高、经济效益较低的原因。完善全天候发酵技术和热电联产技术等,提高现有沼气工程的效率是目前技术研究的重点<sup>[2,7]</sup>。

#### 1.2.3 生物甲烷制造过程的副产物利用效率低

厌氧发酵结束后沼渣、沼液的产量巨大,多数得不到合理的处理和利用;在生物甲烷净化过程中产生的大量  $\text{CO}_2$  往往直接排放。这些副产物如果不能合理处理和利用,不仅制约生物甲烷工程的发展,还会造成二次污染。

## 2 以生物甲烷为核心的环保型能源产业新模式

为了高效利用我国农村以及城市每年产生的巨大的分散的生物质资源,克服传统户用沼气效率低下、无法适应高端用户的需求的特点,可依据原料来源合理布局,利用现代生物技术和工程技术,建设批量的小规模沼气工程,实现高效的、工业化的沼气发酵,进而通过构建管网替代车辆运输,将各工程所产沼气利用大规模净化装置进行集中净化提质,生产高纯度生物甲烷,用于管道燃气、车用燃气和化工原料,建成分散集中式的农工一体化的高效生物甲烷体系,创建以生物甲烷为核心的环保型能源产业新模式(如图 1)。

我国南方许多地区的典型特点是化石能源资源相对匮乏,而生物质资源丰富,因此,生物甲烷尤其适合在我国南方地区进行推广。以广西为例,2012 年,广西全区只有 22 个城市利用天然气,供应量为  $2.32 \times 10^8$   $\text{m}^3$ 。初步预计,2013 年广西天然气需求量为  $1.43 \times 10^9$   $\text{m}^3$ ,到 2017 年,这一数字可达到  $8.0 \times 10^9$   $\text{m}^3$ ,2020 年将突破  $1.0 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ 。2013~2020 年,广西天然气需求年均将增长  $1.15 \times 10^9$   $\text{m}^3$ ,年均增长率达到 41.15%。另一方面,广西每年农业秸秆量约 4000 多万吨,禽畜粪便约 7000 多万吨,可产沼气约  $1.4 \times 10^{10}$   $\text{m}^3$ ,完全可满足即将面临的天然气供应缺口。为保障能源供应,调整能源结构,生物资源

丰富的南方地区理应把生物甲烷作为可再生资源的重要组成部分进行发展。

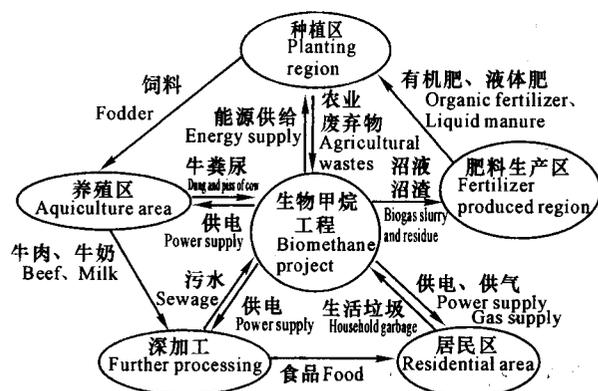


图1 以生物甲烷为核心的环保型能源产业新模式

Fig. 1 A new pattern of environmentally friendly energy industry to biological energy as the core

按照农工一体化的生物甲烷体系建设思路,我们对在南方地区建立县级行政区生物甲烷体系工程进行了方案设计及投资成本分析。南方地区一个县级行政区的平均生物资源量(主要有秸秆  $1 \times 10^6$  t 以及其他畜禽粪便)完全足够支撑  $1 \times 10^8$  m<sup>3</sup> 生物甲烷工程。年产  $1 \times 10^8$  m<sup>3</sup> 生物甲烷工程项目总投资约 7 亿人民币。生物甲烷作为车用燃料销售额可达到 4.6 亿元(车用天然气价格 4.6 元/m<sup>3</sup>);年产沼渣  $5 \times 10^3$  t 用做肥料,按照价格在 300 元/t 计,肥料年销售额为 1.5 亿元。两项总的销售额为 6.1 亿元,测算年总生产成本 4.3 亿元,预计年利润 1.8 亿元。表 1 对天然气管道输送与利用当地低劣生物质制造生物甲烷这两种能源产业方式进行了综合比较。可见,采用生物甲烷制造方式比天然气管道运输在经济效益与社会效益方面更具有优势。

然而,要构建以生物甲烷为核心的环保型能源产业新模式仍需要进一步完善以下 5 个方面的不足:

表 1 生物甲烷制造与天然气管道运输综合比较

Table 1 The comprehensive comparison of Biomethane production and natural gas pipeline transportation

产业方式 Industry way	总投资(亿元) Total investment (Billion yuan)	甲烷成本(元) The cost of Methane (Yuan)	能源性质 Nature of the energy	附带效益 Fringe benefits	带动产业 Driven industries
天然气管道输送 Natural gas pipeline transportation	1500 <sup>①</sup>	4(进口天然气价格) price of imported gas	不可再生 Non-renewable	/	钢铁,建材,石化,电力 Steel, building materials, petrifaction, electricity
生物甲烷制造 Biomethane production	840 <sup>②</sup>	2.86	可再生 Renewable	减少碳排放,治理环境 Reduce carbon emissions, environmental governance	钢铁,建材,石化,电力,环保,农业 Steel, building materials, petrifaction, electricity, environmental protection, agriculture

①以年输气能力  $1.20 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup> 计算(西气东输工程数据)。②年产  $1 \times 10^8$  m<sup>3</sup> 生物甲烷工程造价约为 7 亿,  $1.20 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup> 总投资 840 亿元。

① Annual capacity of exporting gas is  $1.2 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup> calculated according to the data of the project of gas transmission from west to east. ② The project of annual production of  $1 \times 10^8$  m<sup>3</sup> bio-methane costs about 700 million RBM, and total investment is 84 billion RBM.

(1)低劣生物质收集和储运方面:需要在政策引导下,建立稳定、低廉的分散低劣生物质收集和储运体系。

(2)生物甲烷转化过程方面:需解决发酵原料由低浓度向高浓度、由单一原料发酵向多元原料共发酵转变;发酵温度由常温发酵向中温或高温发酵转变;装备向标准化和成套化转化过程中产生的问题。

(3)生物甲烷及副产品提质方面:净化工程装备需实现设计标准化和制造成套化,以满足不同规模的工业化生物甲烷工程的需求。

(4)生物甲烷应用方面:需要在国家政策的引导下,明确其在能源战略中的定位,建立能源终端应用体系,使其更好地融入现有的能源体系。

(5)政策扶持方面:可以参照现有燃料乙醇体系,将沼气工程建设补贴变为生物甲烷销售补贴,改变现有沼气工程建成后实际难以正常运行的现状。

### 3 生物甲烷的利用前景与展望

低劣生物质通过厌氧发酵产生含有约 50% 甲烷的沼气,再通过净化提纯工艺达到含甲烷 95%~97%,提纯后的生物甲烷可用作车用燃料、发电、并入天然气管道或者衍生化将生物甲烷高值化利用、发挥更大经济价值是当前发展的重要方向(图 2)。

#### 3.1 生物甲烷作为车用燃料

甲烷被世界公认为目前最为现实和技术上比较成熟的车用汽油、柴油的代用燃料。将生物甲烷用于汽车燃料已经在欧洲广泛应用,在中国才刚刚起步。瑞典等欧洲政府对沼气用作车用生物燃气有一系列的优惠政策,包括免征能源税、H<sub>2</sub>S 排放税和 CO<sub>2</sub> 排放税,减收气体燃料的车辆使用税,享受政府购车补贴等<sup>[9]</sup>。要将沼气作为车用燃料,需要采用水吸收、

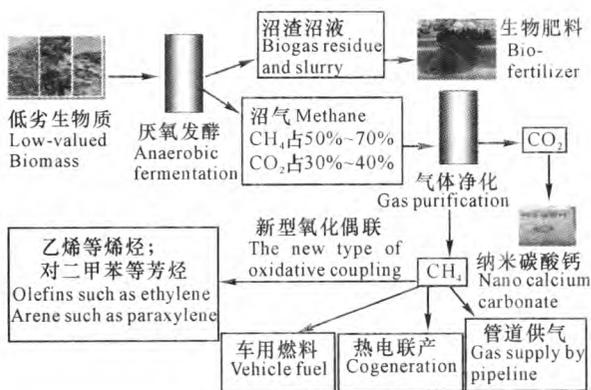


图2 生物甲烷高值化利用

Fig. 2 High-valued use of biomethane

化学吸附等方法,将沼气中甲烷提纯至97%,然后压缩,达到汽车内燃机对车用燃料的要求。然而,国内尚无专门针对沼气净化提纯制取生物甲烷及车用生物燃料的标准。

### 3.2 生物甲烷发电

我国现有80、200、500、700kW系列生物甲烷发电机组供应。国际上先进的发电机可将1m<sup>3</sup>生物甲烷(含甲烷60%)发电2kW·h以上,国产沼气发电机可将1m<sup>3</sup>生物甲烷发电1.6kW·h。进口发电机组发电效率达37%,热效率达40%,而国产机组发电效率达33%,热效率达35%<sup>[7]</sup>。工业生物甲烷工程具有一定的规模,产甲烷量大,目前绝大部分企业都将生物甲烷通入锅炉燃烧。若生物甲烷发电并入现有电网,同时国家给予上网补贴,则可大大提高生物甲烷发电的开发速度。

### 3.3 生物甲烷衍生化产品

甲烷是一种分子结构类似于惰性气体,堪称结构最稳定的有机分子。它的活化要比其他烃类困难,特别是希望得到的转化产物的化学活性往往比甲烷分子高得多。如何实现选择性的活化一个C-H键形成甲基取代物成为甲烷活化中最具有挑战性的课题之一。

甲烷转化可分为直接转化与间接转化两种方式。间接转化方式已经实现工业化,即通过甲烷氧化水蒸气重整技术,即耦合了甲烷水蒸气、二氧化碳重整及甲烷部分氧化三个制合成气反应之后,再转化成其它有机化学品,包括甲醇,链烃等,同时该过程大量生成的氢气也被广泛应用到合成氨生产中<sup>[10]</sup>。

甲烷直接转化目前仍处于实验室开发阶段。一种方式是甲烷氧化偶联反应制乙烯与乙烷;此外在无氧的条件下,甲烷也可以直接转化生成苯以及其他芳烃<sup>[11]</sup>。近年来,将甲烷卤代化后再转化合成烯烃、芳烃的技术受到越来越多的关注<sup>[12]</sup>。

烯烃和芳烃是基础工业原料,在石化工业中发挥

重要的作用。我国对低碳烯烃需求量很大而且还在逐年增加,这决定了低碳烯烃市场前景十分广阔,然而我国在生产能力上却存在明显的不足。开展甲烷制烯烃不仅可以供给低碳烯烃的市场需要,而且可以提高附加值。

我国拥有世界22%的人口,却只占有世界7%的耕地,能源消费居世界第一,环境污染问题不断加深。我国每年产生的大量低劣生物质的堆积和不当处理既导致资源浪费,也造成环境污染。有必要结合我国自身的国情,利用低劣生物质生产生物甲烷对国家实现“节能减排”战略目标,为国民经济的可持续发展发挥重要作用。

### 参考文献:

- [1] International Energy Agency. Trends in global CO<sub>2</sub> emissions 2013 Report[R]. The Hague/Bilthoven: PBL, 2013.
- [2] 谭天伟,俞建良,张栩.生物炼制技术研究新进展[J].化工进展,2011,30(1):117-125.  
Tan T W, Yu J L, Zhan X. Advance in biorefinery technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(1): 117-125.
- [3] Perlack R D, Wright L L, Turhollow A F, et al. Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply[M]. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2005.
- [4] 林琳.中国生物质能产业可持续发展经济学分析[J].鄱阳湖学刊,2010(6):62-68.  
Lin L. Analyses on sustainable development economics of biomass energy industries in China[J]. Journal of Poyang Lake, 2010(6): 62-68.
- [5] 刘畅,陆小华.我国碳减排模式探讨——CCS路线与生物甲烷路线的比较[J].化工学报,2013,64(1):7-10.  
Liu C, Lu X H. Carbon reduction pattern in China: comparison of CCS and biomethane route[J]. CIESC Journal, 2013, 64(1): 7-10.
- [6] 李良.生物天然气开发利用应进一步加快[N].中国能源报,2013-10-28(14).  
Li L. Development and utilization of Biological natural gas should be further accelerated[N]. CHINA ENERGY NEWS, 2013-10-28(14).
- [7] 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[R].北京:轻工业环境保护研究所,2011.  
Xu H Y, Li C S, Zhang W, et al. China biogas engineering industry development research output two: Chinese biogas industry development status report[R]. Beijing: Guangxi Sciences, Vol. 21 No. 1, February 2014

- Light industry institute of environmental protection, 2011.
- [8] 王飞,蔡亚庆,仇焕广. 中国沼气发展的现状、驱动及制约因素分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 184-188.  
Wang F, Cai Y Q, Qiu H G. Current status, incentives and constraints for future development of biogas in China[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 184-188.
- [9] 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[J], 农业工程, 2012, 2(7): 31-34.  
Chen X, Liang F, Sheng K C, et al. Development of bio-gas purification and upgrading technologies for producing Bio-methane[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(7): 31-34.
- [10] 郝世雄,余祖孝,刘兴勇. 甲烷二氧化碳催化重整制合成气研究进展[J]. 化学世界, 2010(5): 314-318.  
Hao S X, Yu Z X, Liu X Y. Progress in studies of CO<sub>2</sub>-
- reforming of methane to synthesis gas[J]. Chemical World, 2010(5): 314-318.
- [11] 王华,刘中民. 甲烷直接转化研究进展[J]. 化学进展, 2004(04): 593-602.  
Wang H, Liu Z M. Progress in direct conversion of methane[J]. Progress In Chemistry, 2004 (04): 593-602.
- [12] 刘振. 甲烷经溴氧化途径制备高碳烃催化性能及工艺研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2010.  
Liu Z. The Catalytic Synthesis of Higher Hydrocarbon from Methane via Oxidative Bromination Reaction[D]. Changsha: Hunan University, 2010.

(责任编辑: 陆 雁)

### 《广西科学》荣获 2012~2013 年度广西期刊奖提名奖

近期,经广西壮族自治区新闻出版局组织专家综合评审,2012~2013 年度“广西期刊奖”评选活动落下帷幕,由广西科学院和广西壮族自治区科学技术协会主办的《广西科学》杂志,在学术水平和编校质量方面都得到了评委的肯定,荣获 2012~2013 年度“广西期刊奖提名奖”。本次共评出期刊奖 15 种,提名奖 25 种,提名奖中科技类 9 种,社科类 16 种。

本次评选旨在贯彻落实党的十八大和十八届三中全会精神,推动社会主义文化大发展大繁荣,建立民族文化强区,树立典型,表彰先进,促进广西期刊业的繁荣和发展。