

国际生物能源研究开发现状和趋势

朱万斌, 李 杰, 袁旭峰, 程 序, 王小芬

(中国农业大学生物质工程中心, 北京 100193)

[摘要] 通过对国际可再生能源研发的重点, 第二、三代生物乙醇的研发动向, 以及对生物天然气和生物质颗粒燃料异军突起的背景分析, 反映出生物能源研发的总体状况和发展趋势。

[关键词] 生物能源; 研究开发; 国际动向

[中图分类号] TK6 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)02-0096-05

1 国际可再生能源研发的重点是生物能源

奥巴马政府延续了前任的可再生能源战略, 在就职演说中旗帜鲜明地提出, “我们将致力于开发太阳、风和土地, 为汽车和工厂提供燃料和动力”。“开发土地”即开发土地生长的生物质的生物能源。美国能源部于 2009 年底起停止了对氢燃料电池电动车研发的支持, 改而大力支持发展生物燃料和低碳生物能源。2010 年度, 美国生物质能研发的拨款为太阳能和风能的 5.8 倍(生物质能、太阳能和风能 3 项分别为 10.04 亿、1.75 亿和 1.73 亿美元)。

为了促进生物燃料的研发, 奥巴马 2009 年 5 月组建由美国农业部(USOA)、能源部和环境保护署(EPA)首长组成的生物燃料部际工作组(biofuels interagency working group), 并为生物燃料的研发主要是生物炼制增拨 7.865 亿美元^[1]。该工作组 2010 年 2 月 3 日发表第一份报告:《日益增长的美国的燃料——一种新的战略目标》(Growing America's Fuel)。指出, 虽然美国已经具有年产 120 亿 gal(1 gal = 3.785 L, 约相当 3 180 万 t)生物燃料的产能, 但距离 2022 年应用 360 亿 gal 生物燃油(其中 210 亿 gal 为先进的生物燃料)和 2010 年生产 100 亿 gal 纤维类乙醇的目标还相差甚远。为此采取协调促进生物燃料生产的重大措施。一是责

成美国环境保护署制定新的燃料标准(RFS2), 汽油中的乙醇含量上限由目前的 10% 提高到 15%; 自 2000 年开始, 美国汽车业已着手生产可适用于最高可添加 85% 乙醇的燃料即 E85 燃料的灵活生物燃料汽车(flexible fuel vehicle, FFV), 目前已有 800 万辆投入使用。二是责成美国农业部提出生物能源作物生物量援助计划(BCAP), 提供种植者补贴资金, 以增加和确保第二代生物燃料的原料供应——年提供 10 亿 t 生物质原料。该报告强调加强政府与美国私营部门伙伴关系, 通过跨部门努力和以小企业为中心的模式建立先进生物燃料生产及市场。农业部长维尔萨克说:“推进生物质和生物燃料生产有潜力创造绿色就业机会, 这是奥巴马政府正在努力重建(rebuild)和振兴(revitalize)美国农村的多方面努力中的一个。”环保署署长丽莎·杰克逊说, 可再生燃料标准将有助于给数百万美国人, 特别是在农村的人带来新的经济机会^[2]。

针对玉米乙醇的局限性, 美国还提出“先进生物燃料”(advanced biofuel)概念。先进生物燃料指玉米乙醇以外的一类生物燃料, 它们的全生命周期温室气体排放量比石化燃料至少低 50%。包括木质纤维类乙醇, 玉米以外的其他能源作物以及有机废弃物为原料的乙醇, 生物质基(热解气化合成)生物柴油, 各类原料产生的沼气, 生物质基丁醇^[3]。

[收稿日期] 2010-12-09

[基金项目] “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAD75B07)

[作者简介] 朱万斌(1977-), 男, 湖北房县人, 博士, 中国农业大学讲师, 研究方向为生物质能源工程; E-mail: wanbin@cau.edu.cn

瞄准大幅增强国家实力的战略目标,美国能源部推出了类似“前瞻性国防研究计划”的战略性能源换代技术研究计划,并设立了专门管理部门(advanced research projects agency, ARPA)。国会批准在2008—2012财政年间拨款49亿美元^[4]。ARPA-E的特点是针对提高石油自给水平、改善所有部门能效、减少温室气体排放以及维护美国在全球能源技术开发利用方面的领导地位的四大目标,鼓励富有革命性的研究。2010年首轮3700多份研究申报书中,生物能源占15%。太阳能占18%;风能只占5%;核能更少,只占2%;燃料电池占6%;提高能效占14%;智能电网占6%。

瑞典农业科学大学能源和技术系的L. Svetlana研究组2009年查询了ISI Web of Knowledge数据库内所有有关可再生能源的研究文献,共获9724篇。其中,关于生物能源的有4911篇,占第一位(50%)。而关于水电、风能和太阳能的只分别占18%、16%和4%^[5]。

德国是欧盟发展生物能源积极国家之一,可再生能源现已占总能源消费量的16%。2010年政府对新能源和气候变化的研究投入达10亿欧元。2010年9月28日,总理默克尔宣布了该国向低碳能源转型的蓝图^[6],要求在未来40年里,结束几个世纪以来对石化能源的依赖。2050年可再生能源占总能源消费量的比率提高至60%,并减少80%的温室气体年排放量。实现这些目标的手段是采取60项措施,实行能源“绿色革命”,重组能源结构。被列为重大措施的是发展生物能源,风能以及电动汽车(2030年达600万辆),2011年春将出台相应的能源研究计划。

瑞典则是欧盟中对通过可再生能源减排温室气体和实现能源自给最激进的国家。20世纪70年代,其能源消费对石油的依存度高达77%。但到2003年已锐降至32%。2006年,瑞典首相佩尔松宣布,瑞典将在2020年成为全球首个告别石油的国家。自那之后,该国的可再生能源研发明显加速。2010年4月7日,瑞典可持续发展部部长萨林对媒体重申了这一宏伟目标。称到2020年将没有汽车再使用汽油,生活用能(如电力、取暖)不再使用燃料油。

世界生物乙醇两大领跑国之一的巴西,把生物燃料放在该国优先地位,作为应对世界经济危机的重大举措。巴西生产乙醇的潜力非常大:目前全国用于农业的耕地仅占国土面积的7%,而用于生产

甘蔗的耕地仅占耕地面积的6%,为570万 hm^2 (8550万亩)。该国2005年甘蔗乙醇的产量为155亿L(1240万吨),计划到2025年年产900亿L(7200万吨),远期规划年产量4000亿L(3.2亿t)。除国内消费外,主要向美国、日本和印度等国出口。巴西全国公民协会主席Dilma Rossef 2008年在国际生物质能大会上指出:“目前全国以乙醇替代了50%的汽油,这一比例还在快速提高。自2003年启动灵活燃料汽车(FFV)市场以来,已有700多万辆。现在销售汽车中90%以上是FFV汽车。在发展中国家,生物燃料应放在优先地位,以应对世界经济危机。”

2 国际特别是美国生物能源研发的重点是第二代生物乙醇

2009年全世界的燃料乙醇产量是5859万吨,生物柴油1360万吨。其中,美国170家一代生物乙醇企业生产了3400万吨(107.5亿gal)。国际能源署(IEA)2009年发表的《世界能源展望》预测^[7],到2030年,生物燃油将能替代全球交通运输用汽、柴油总需求量的9%(相当于 11.7×10^{18} J);而到2050年,这个比率将达到26%(相当于 112×10^{18} J)。其中,90%的量将是第二代生物燃料(包括纤维类乙醇, Bio-SNG即生物合成天然气, BTL-Diesel即生物质转化的柴油替代品如二甲醚DME)。而其一半将来自非经合组织成员国,中国和印度将占到19%。

近十年来,欧盟生物乙醇的产量从2000年的 200×1000 L,增至2009年的 105000×1000 L。欧盟的生物柴油应用量占全世界的80%以上。产量从2004年的230万吨,2008年产能增为1600万吨。

2007年3月,欧盟首脑会议制订了2020年的三个“20%”目标:a. 减排温室气体20%(比1990年基数);b. 提高能效20%;c. 可再生能源占能源总消费量的20%,其中,生物燃料占到运输燃料的10%。2009年欧盟的若干研究机构推出了《生物能源未来发展路线图》(From inconvenient rapeseed to clean wood: a European road map for biofuels)^[8]。提出为了大幅减少温室气体排放和实现2020年的目标,仅靠第一代生物燃料远远不够。必须大力开发第二代生物燃油,并使之在2015年前后进入实际应用,2030年居主导地位(届时生物能源占总能源的35%)。为了确保木质纤维类原料的供应,必须加

大多年生能源作物的研发力度。此外,还要从7个方面加大政策支持力度。2009年10月,欧盟委员会通过了低碳技术发展计划(SET-Plan),要求在未来10年对低碳技术追加500亿欧元的公共及私营投资,并且制定了低碳技术产业的发展路线图。指出生物燃料的研发重点不能只局限于转化技术,还应重视整个生物质从原料到各种产物的增值利用及相关技术。

2.1 值得注意的动向

国际可再生能源和“第二代生物能源”主要是木质纤维类乙醇,经历了近几年的研发“热”。主要是设法降低生产成本特别是酶的成本,为玉米秸秆纤维素乙醇的大规模产业化生产创造条件。丹麦的Novozymes生物技术公司称,已将玉米秸秆纤维转化成糖所用的酶制剂的成本降低了30%。实验室价格已降至每加仑10~18美分(1 gal=3.785 L)。然而近来这一发展的势头似受到挫折。2010年8月出版的*Science*可再生能源专集传达的信息是,可再生能源成为“支柱性”能源所需的时间,要比原先预测的长,可能需要半个乃至一个世纪^[9]。美国国会2007年通过的《能源独立与安全法》(EISA)曾强制性规定,到2022年须使用可再生燃料360亿gal。其中,纤维素乙醇(“第二代生物燃料”)年用量须达160亿gal。但由于生产成本的下降远未达到预想的速度,加以木质纤维类原料酸预处理造成的环境问题未能妥善解决,发展的势头减退。美国环境保护署2010年7月宣布,将原定到2011年纤维素乙醇须达2.5亿gal的指标,几十倍地大幅度下调为650万~2550万gal。Hoffert和Davis等在最新出版的*Science*分别发表论文,均认为按照目前替代能源的发展速度,到2050年将大气CO₂浓度稳定在450 ppm(1 ppm=10⁻⁶)以及增温效应低于0.7℃的目标无法实现^[10,11]。

2.2 科学界与产业界在第二代生物燃料发展重点上认识有分歧

相对于美国政府和生物燃料业界把重点完全放在一、二、三代生物燃油上,科学界的态度有很大的不同。2009年8月,美国科学院、美国工程院和美国国家研究会联合组建的委员会,完成了大型决策咨询报告——《美国能源的未来》^[12]。报告认为,鉴于美国是世界少数几个煤的开采和使用的最大国家之一,煤的储量也极大,因此,“第二代生物乙醇”起到的将只是“过渡性作用”。更多的将是生物质

热化学转化的烃类燃油(所谓“生物质变油”,biomass to liquid (fuel), BTL)。而且主要是用生物质与煤的混合物作原料转化的一类特殊生物能源,起名为“煤/生物质变油”(coal-and-biomass-to-liquid (fuel), CBTL);由于生物质在CBTL中取代了约45%的煤,而生物质能是全生命周期碳净排放为零,因此,煤/生物质混合基燃油——液态烃类的最终碳净排放量,会比单用煤转化的燃油以及石油基汽/柴油大幅减少,从而有助于实现大幅度减排温室气体特别是CO₂的国家目标。该报告预测,到2035年,煤/生物质混合基燃油,单独使用煤转化的液态烃类燃油,加上第二代生物燃油即纤维类生物乙醇,合计可约日产500万桶,相当于目前美国交通运输用石化燃料日消费量(1400万桶)的35%。

2.3 “第三代生物燃油”的研发

虽然对用藻类生产生物柴油——“第三代生物燃油”的研究已有50年的历史。美国能源部燃油开发办也曾在1978—1996年间设立过利用水塘水面及发电厂排出的CO₂废气生产油藻、进而转化生物柴油的“水生物种研究计划”(ASP),但真正全球性大规模的研发工作还是近十余年的事。近年来世界各国十分重视微藻生物柴油技术的研发。Shell与美国从事生物燃料业务的HR Biopetroleum组建Cellena合资公司,投资70亿美元开展微藻生物柴油技术的研究。美国第二大石油公司Chevron与美国能源部可再生能源国家实验室合作研究微藻生物柴油技术。以色列Inventure Chemical与Seambiotic合资建设开放池光生物反应器系统的微藻生物柴油工业示范装置。美国国防部试用了微藻生物柴油,发现其具有优异的低温性能,特别适宜寒冷地区使用。荷兰AlgaeLink已开始向全球销售其封闭式光生物反应器,并提供相关技术支持,该公司还与荷兰皇家航空公司共同开发用于航空领域的“微藻航油”。

然而当前全世界已有的油藻生产的主要目的,尚非生物能源而是食物及饲料的添加剂。其年产量(5000 t,干藻重)也完全无法与已大量用作生物柴油原料的棕榈油的年产量(400万t)相比。通过对全部替代欧洲国家年柴油消费总量(4亿m³)的理论测算,以油藻的生产率4万L/(hm²·a)(含油率50%)计,不仅目前的油藻生物质产量须增加3个数量级,而且成本须降低10倍。即便如此,尚需要相当于葡萄牙一国面积的土地。专家确信,“第三

代生物燃油”将在未来 10 ~ 15 年后走上大规模生产和应用之路^[13]。

在藻类生物柴油的开发上,目前存在着两种对立倾向:一种是急于扩大生产性试验的规模,希望尽快实现商业化。另一种则强调尚需进一步加大研究的深度,主张稳步发展。笔者认为,可行的途径必定是经过多学科研究的配合,对整个产业链即从基础生物学研究,藻种选育和基因工程的遗传改良,生物过程工程,直到生物炼制和全系统设计,作分别的研究和优化的整合,最终实现对油藻所有成分的高价值利用^[14]。

在提高油藻生产效率方面,重点是优良品种的选育乃至采用基因工程人工合成兼具若干优异光合和储存生理特性的“理想光合型”藻细胞,包括尽快绘制出若干品种的全基因系列测序图谱。其次是进一步探明藻细胞组织内成油的机理。例如,应激(培育藻的环境条件恶变)会使藻细胞内油脂的形态和储存点发生变化,从而增加嗣后提取油脂的能量消耗。又如如何使油藻在光饱和条件下(晴天的一般情况),仍能有较高的光合效率。

在降低成本和能量投入方面,改进收获、(离心机)浓缩和破细胞壁后超临界 CO₂ 萃取藻油提取油等工艺是关键。例如,培育细胞壁(藻油的储存处)较薄但又较坚固的藻种便是一条可行途径。

经济地生产油藻,应是在低成本获取大量生物柴油原料的同时,还要通过生物炼制产出相当数量的、高价值的有机化学合成基础物(又名“砌块”化学物质如乙醇、丙三醇等),食物营养物和饲料添加剂等。以植物蛋白为例,由于油藻的蛋白质含量为 40%,如果以油藻生物柴油全部替代欧洲国家每年的柴油消费总量,则可年产 3 亿 t 油藻蛋白。这个数量是目前欧洲国家每年进口 1 800 万 t 大豆获得的蛋白质质量的 40 多倍。

3 生物天然气和生物质颗粒燃料两类生物能源异军突起

近年来,国际上对可再生能源前景的评价出现了两种趋势。一种观点以美国前副总统戈尔为代表,认为美国可以在 10 年内在发电领域用可再生能源和真正洁净无碳能源完全取代化石能源^[15];持更激进观点的还有美国斯坦福大学教授 Jacobson 和 Delucchi,他们 2009 年在《科学美国人》上发表宏伟设想,目标是全球在 2030 年实现可再生能源化^[16]。

另一种观点则认为,从近三百年的历史表明,能源的换代和转型是较漫长的过程。Smil 认为,可再生能源全面替代化石能源需要 1 ~ 2 个世纪^[17]。国际应用系统科学研究所(IIASA)的 Arnulf Grubler 指出,可再生能源需面临从制取、转换到运输的一系列基础设施的巨大挑战。并且为了全面使用,还要像当年为了使用化石能源那样,研发出诸如蒸汽机、内燃机、气轮机和燃气轮机专用设备。为了实现这些目标,需要更长的时间和更多的投资^[18]。

Richard Kerr 等人更认为,化石能源的三大独特优点——能量密度大,易于运输和储存,以及能量利用的转化率高——是可再生能源无法与之匹敌的。基于石油、天然气这类高质能源的社会,很难在使用可再生能源后仍保持高的生活质量。因此他们对可再生能源全面替代化石能源的前景更表示怀疑^[19]。然而这种看法却完全忽略了一个事实:即沼气和生物质颗粒燃料(“生物煤”)虽然也属于可再生能源,但在与化石能源特性的相比居于劣势的众多可再生能源中,它俩却是例外。近年来,生物天然气和生物质颗粒燃料两类生物能源在欧盟国家异军突起,发展势头强劲。

使用天然气能减少二氧化硫和粉尘排放量近 100%,减少二氧化碳排放量 60% 和氮氧化物排放量 50%,并有助于减少酸雨形成,延缓温室效应,从根本上改善环境质量。因此,作为一种洁净能源,天然气的研发广受青睐。

“非常规天然气”——页岩气,煤层气,以及沼气、垃圾填埋气等正在成为世界天然气行业新的生长点。页岩气(shale gas)现已成为美国最热点勘探对象之一。对页岩气的研究特别是黑色页岩沉积、页岩气生成等方面的持续研究和取得的大量研究成果,极大地促进了页岩气勘探开发和生产。1998 年,页岩气仅占全美天然气总产量的 2.3%,而 2008 年已占 15%(1 000 亿 m³);并由于潜在资源量多达 28.3 万亿 m³,“拯救了正陷于资源枯竭中的美国天然气产业”^[20]。而在欧洲,由沼气净化和提纯得到的“生物天然气”正在形成大的“气候”^[21]。

20 世纪 90 年代中期以来,沼气在欧盟国家的利用态势发生了重大的转折,进入一个全新的产业化和商品化阶段。如今,在不少欧盟国家,尤其是德国、瑞典、奥地利等,由城市和乡村的固、液有机废弃物加上专用能源作物产出的沼气,经净化和提纯成为生物天然气,或直接通入天然气管网,或以压缩气方式送至汽车加

气站。正在成为一大可再生能源产业^[22]。

大规模生产的沼气不但替代煤发电和供热(热电联产, CHP),而且净化和提纯后(“生物天然气”)还替代天然气作为车用燃料和民用燃气。瑞典、奥地利和瑞士已分别有数万辆使用生物天然气的汽车。德国2010年已有5 000座大型沼气工厂,以往沼气主要用于热电联产,2009年发电产能达1 597 MW,超过水电而仅次于风电(德国是全球第一风电大国)。预计到2020年,沼气发电产能将占总发电产能的10%。近年来,开始转向经净化和提纯成为生物天然气后,直接注入天然气管网或用压缩罐送至汽车加气站。出现以上态势的背景,首先是欧盟的《生物燃料指令》规定到2010年底,生物燃油在交通运输燃油总消费量中的比例必须不少于5.75%,以及出台对替代燃油的补贴政策。其次是这些国家的政府希望扩大清洁能源,包括由可再生能源生产的所谓“绿色电能”的使用,从而大幅度减少温室气体的排放量;再次是为了减少对从俄罗斯进口天然气的过分依赖,提高能源自给水平。

北欧国家地处泰加原始森林,林木采伐和下脚料资源极其丰富。地处寒温带至寒带的这些国家常年有长达7~8个月的取暖期。以往取暖的能源主要靠电和天然气。20世纪70年代的世界能源危机,激发了对森林资源的开发利用。树皮、锯末、枝叉及木材加工下脚料是最主要的生物质原料,其次是农作物秸秆。为了适应工业化利用的需要,松散、体积大而能量密度低的生物质原料必须通过压粒(pellet)或压块(briquette),改变形态、能值特性,燃烧效率大幅度提高。为此,以瑞典为代表的欧洲国家的的科研单位和生物能企业对压粒(块)工艺和设备开发做了大量的工作。仅瑞典一国即有十几家制造压粒(块)设备及其附带的取暖、发电设备的跨国企业。早在2002年,瑞典全国采暖用能总量(546亿kW·h)中,来自生物质能的已占到60%。2005年生物质颗粒(块)燃料的消费量达150万t,比上一年增加25%;此后继续快速增长,2009年已超过200万t。

参考文献

[1] Office of the Press Secretary, The White House. President Obama Announces Steps to Support Sustainable Energy Options, Departments of Agriculture and Energy, Environmental Protection Agency to Lead Efforts[EB/OL]. http://www.whitehouse.gov/the_press_office/President-Obama-Announces-Steps-to-Support-

Sustainable-Energy-Options/, 2009-5-5.

- [2] USDA, DOE, EPA. Biofuels Interagency Working Group report: Growing America's fuel [P]. February 4, 2010.
- [3] PRNewswire. 2010-2011: Pivotal Years for Next Generation Biofuels[EB/OL]. <http://advancedbiofuelsusa.info/2010-2011-pivotal-years-for-next-generation-biofuel>, 2010-5-14.
- [4] Mervis J. US Energy Agency stumbles out of the blocks[J]. Science, 2009, 325: 925-926.
- [5] Department of Energy and Technology. Swedish University of Agricultural Sciences. Report 013 [P]. Uppsala, 2010.
- [6] Annette Schavan. Germany's Energy Research Plan[J]. Science, 2010, 330: 295-296.
- [7] IEA. World energy outlook 2009 - Global energy trends to 2030. [R]. 2009: 98.
- [8] EU Biofuel Roadmap. Editorial [J]. Biomass and Bioenergy, 2010, 34(1): 157-158.
- [9] Richard A Kerr. Scaling up alternative energy[J]. Science, 2010, 329: 727-801.
- [10] Hoffert Martin. Farewell to Fossil Fuels? [J]. Science, 2010, 329: 1292-1293.
- [11] Steven J Davis, Ken Caldeira, Matthews H Damon, et al. Future CO₂ emissions and climate change from existing energy infrastructure[J]. Science, 2010, 329: 1330-1333.
- [12] NRC. America's Energy Future, Technology and Transformation [M]. Washington D C: National Academy Press, 2009.
- [13] Dismukes I Charles, Carrier I Damian, Bennette Nicholas, et al. Aquatic phototrophs: efficient alternatives to land-based crops for biofuels[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2008, 19: 235-240.
- [14] René H, Wijffels, Maria J. Barbosa an outlook on microalgal biofuels[J]. Science, 2010, 8(13): 796-799.
- [15] Al Gore. Al Gore's speech on renewable energy[EB/OL]. <http://www.npr.org/templates/story.php?storyId=92638501>, 2008-7-17.
- [16] Mark Z Jacobson, Mark A Delucchi. A plan to power 100 percent of the planet with renewables[J]. Scientific American, 2009, 10(26): 96-98.
- [17] Smil V. Energy Transitions: History, Requirements, Prospects [M]. New York: Praeger Publishers, 2010.
- [18] Grubler A. Transitions in energy use[J]. Encyclopedia of Energy, 2004, 6: 163-176.
- [19] Richard Kerr. Do we have the energy for the next transition? [J]. Science, 2010, 329: 780-781.
- [20] Richard A Herr. Natural gas from shale bursts onto the scene [J]. Science, 2010, 328: 1624-1626.
- [21] 程序, 梁近光, 郑恒受, 等. 中国“产业沼气”的开发及应用前景[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 1-6.
- [22] Martina Poescha, Shane Warda, Philip Owendea B, et al. Prospects for expanded utilization of biogas in Germany[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2010, 14(7): 1782-1797.

(下转 112 页)