

# 中国城市化进程中的粮食安全与 风/煤制天然气单细胞蛋白的 研究

曹晨<sup>1,2</sup>,余波<sup>1,2</sup>,顾为东<sup>2</sup>

(1.南京大学工程管理学院,南京 210093;2.江苏省宏观经济研究院,南京 210013)

**[摘要]** 据预测2030年我国人口将会达到峰值14.5亿,城市化率达到70%,届时城市人口新增3亿,总数将超过10亿。随着总人口的持续增加以及城市人口的迅速膨胀,我国未来将会面临严峻的粮食不足问题,尤其以蛋白质为代表的营养物质将会出现严重短缺。本文针对这一问题,提出了以风力发电为能源,以煤制天然气为原料的单细胞蛋白制备新思路,新途径。此方法通过煤制天然气生产单细胞蛋白,既解决了传统煤炭利用中碳排放高、环境负荷大等缺点,实现了煤炭的升级、绿色利用,又解决了利用石油、工农业废弃物生产单细胞蛋白所产生的食品安全性等问题。另外,此方法可实现大规模工业化生产,为解决我国未来蛋白质不足提供一条绿色、高效、切实可行的新途径。

**[关键词]** 城镇化;粮食安全;非并网发电;煤制天然气;单细胞蛋白

**[中图分类号]** Q815 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1724(2015)03-0107-06

## 1 前言

### 1.1 我国城市化进程中食品安全现状

中国共产党第十六次全国代表大会以来,我国城镇化发展迅速,2002—2011年,我国城镇化率以平均每年1.35个百分点的速度发展,城镇人口平均每年增长 $2.096 \times 10^7$ 人。2011年,城镇人口比重达到51.27%。据中国社会科学院2013年中国人类发展报告《可持续与宜居城市——迈向生态文明》预测,按照目前的趋势发展下去,到2030年,中国人口将会达到14.5亿,城镇化水平将达到70%,还将新增3.1亿城市居民。届时,中国的城市人口总数将超过10亿。

迅速膨胀的城市人口一方面显示我国综合国力的不断提升,另一方面也会带来很多新的问题,

比如粮食问题、能源问题、环境问题等,而粮食问题是重中之重。粮食安全一直是保证国家稳定发展,人民安居乐业的头等大事,也是顺利推进工业化、城镇化的重要保障。伴随着中国城镇化的快速发展,当前和未来中国粮食安全正面临几个重大难题:一是在工业化、城镇化快速发展的情况下,与城市、工业竞争生产要素的过程中,农业仍处于明显的弱势地位,务农人员的流失,社会资本的逐利趋向性将导致粮食生产面临缺地少水、无人种地的窘境。二是由于总人口基数的不断增加带来的粮食绝对需求量的增加、整体生活水平的不断提高带来的饮食结构相应变化以及城镇化快速发展城市居民人口比重上升带来的对高营养物质的消耗会出现快速增长,尤其以蛋白质为代表的营养物质将会

**[收稿日期]** 2014-12-10

**[作者简介]** 曹晨,1986年出生,男,新疆哈密市人,博士,主要从事生物工程类技术研究;E-mail:caonly@hotmail.com

出现巨大的供给空缺。

图1至图3分别显示了我国人口结构变化,城乡居民饮食结构区别<sup>[1]</sup>以及蛋白质(肉类)人均消费增长情况。以肉类为例,根据国家统计局数据,2013年中国城镇人均肉类消费量为62.7 kg,肉类产量为 $8.535 \times 10^7$  t。

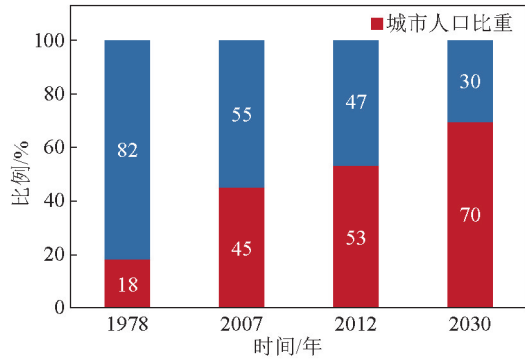


图1 我国人口结构变化

Fig. 1 Urbanization trend of China

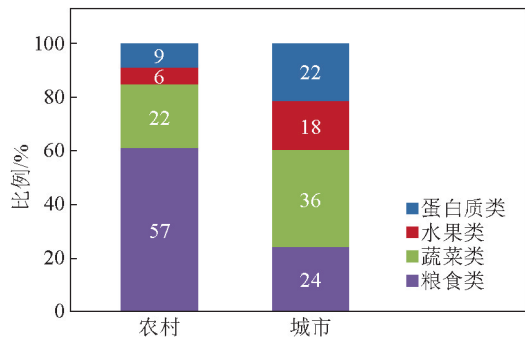


图2 城乡居民饮食结构区别<sup>[1]</sup>

Fig. 2 Differences in diet structure of urban and rural residents<sup>[1]</sup>

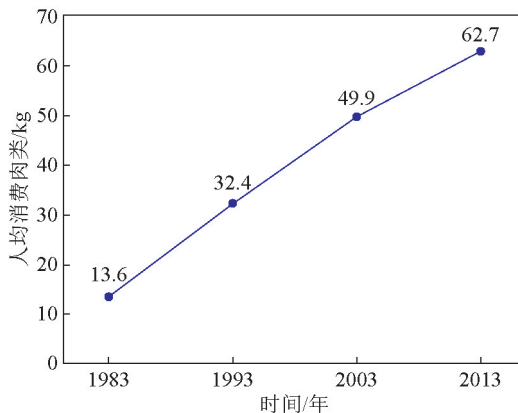


图3 蛋白质(肉类)人均消费增长情况

Fig. 3 Growth of per capita consumption of meat

近年来我国肉类进口额也快速增长,2012年进

口额达到50亿美元(见图4)。发达国家的人均肉类消费量为每年70~120 kg,如果保守假设2030年人均肉类消费为80 kg,我国肉类产量增长为 $1 \times 10^8$  t,届时肉类会有 $1.6 \times 10^6$  t的缺口。另外畜牧家禽业的增长,也会带来粮食消耗的巨大压力,增重1 kg,鸡会消耗2 kg粮食,猪会消耗3 kg粮食,而牛则消耗7 kg粮食。这无疑又加深了我国原本紧张的粮食供给压力。与此同时,大量的牲畜家禽的喂养也需要蛋白类饲料,2013年饲料进口额度达到304亿美元,其中大豆进口达到 $5.6 \times 10^7$  t,鱼粉达到 $9.4 \times 10^5$  t。到2015年国内蛋白饲料需求量将达到 $8.5 \times 10^7$  t,蛋白饲料的供求缺口还将进一步扩大。

不仅我国如此,世界也将面临蛋白质不足的问题,据预测,2015年世界蛋白质缺口将扩大到 $3 \times 10^7$  t/a。面对严峻的蛋白质不足问题,依靠传统农业种植更多的豆类或者养殖更多的动物显然不能解决这一问题,我们必须找到一条可持续发展的解决方案。21世纪随着生物技术的日趋发展,利用微生物的力量解决这一难题为我们提供了一条可行之路。

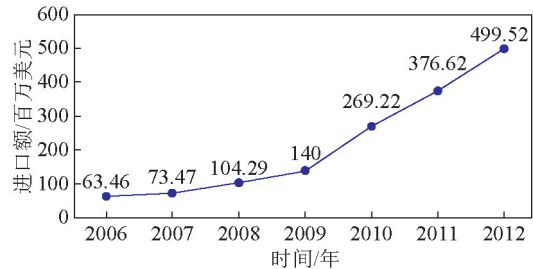


图4 肉类进口总量变化

Fig. 4 Growth of meat import

## 1.2 单细胞蛋白

### 1.2.1 单细胞蛋白概念,特点及发展概况

单细胞蛋白(SCP)又称微生物蛋白或菌体蛋白,是利用工业废水、废气,天然气,石油烷烃类,农副加工产品以及有机垃圾等作为培养基,培养单细胞生物体,然后经过净化干燥处理后制成,是食品工业和饲料工业的重要蛋白质来源。

目前生产SCP的微生物有四大类,即非致病和非产毒的细菌、酵母、真菌和藻类。细菌的生产原料广泛,生产周期短,且生产的蛋白含量高;但细菌含有较复杂的其他成分,核酸含量较高,含有毒物质的可能性较大,且细菌个体小、分离难,经分离的蛋白质不如其他微生物蛋白易消化。酵母菌

长期一直用于烤制面包、酿酒等方面,因此酵母菌是容易被接受生产 SCP 的微生物。同时酵母菌核酸含量较低、容易收获,且在偏酸环境下(pH 4.5~5.5)能够生长,可减少污染。真菌菌丝生产慢且易受酵母污染,因此必须在无菌条件下培养。但真菌的收获分离容易,可从培养液中滤出挤压成形。藻类生产需要足够的阳光和一定的温度。大多数藻类的细胞壁不易被消化、食味不好,且其核酸含量高、对机体健康不利<sup>[2]</sup>。

单细胞蛋白与其他蛋白质来源相比具有很多优点。a.生产速率高:细菌繁殖一代的时间是 0.5~2 h,酵母菌是 1~3 h,藻类是 2~6 h。相反农作物一年至多才能长三季,大牲畜几年才能生出新一代。一头 500 kg 的牛每天可产蛋白质 0.4 kg,而 500 kg 酵母每天至少生成 5 000 kg 蛋白质。b.营养丰富:单细胞蛋白所含蛋白质高,粮食作物中玉米含蛋白质 8%~9%,小麦含蛋白质 10%~12%,大豆含蛋白质 35%~40%,牛肉含蛋白质 18%~22%,鸡蛋含有蛋白质 13%~15%,而单细胞蛋白其蛋白质含量为 40%~80%,而且组成单细胞蛋白的氨基酸种类齐全。c.不用或少用土地:一个年产 10 万吨级的单细胞蛋白工厂,如以酵母计算,按所含蛋白质为 45%,一年所产蛋白质为 45 000 t。一亩大豆按亩产 200 kg,蛋白质含量按 40%,一年所产蛋白质为 80 kg。这样一个工厂的年产蛋白质量相当于 562 500 亩(1 亩≈666.67 m<sup>2</sup>)土地生产的蛋白质<sup>[3]</sup>。

单细胞蛋白生产已有 70 年的历史,早在第二次世界大战期间,德国和前苏联因缺乏蛋白质和维生素食品,建立起生产单细胞蛋白的工厂。20 世纪 60 年代,利用石油的碳氢化合物作为饲料酵母生产得到一定发展,可惜用这种方式生产的单细胞蛋白分离纯化十分复杂而费钱,并且可能含有粗柴油基质中的多环芳烃致癌物,因此一些公司投资开发后并未能坚持下去<sup>[4]</sup>。70 年代以来甲醇蛋白受到了重视。这是因为甲醇可以大量地从甲烷(天然气的主要成分)氧化而成,并且它能与水混溶,对氧与微生物有较大的亲和力。英国帝国化学公司从 1968 年起从事甲醇蛋白的研究,日本三菱瓦斯化学、瑞典 Norprotein 和法国 Institut Français du Pétrole(IFP)等公司也进行了相应的研究<sup>[5]</sup>。

20 世纪 70 年代以来,我国也开始甲醇蛋白的研究。而且早在 1984 年,中华人民共和国国务院办公厅就在转发原国家经济贸易委员会《1984—2000 年

全国饲料工业发展纲要(试行草案)》的通知中,要求把甲醇蛋白列为饲料工业发展的重要产品之一。但到目前为止,甲醇蛋白的产业化因为成本以及技术等问题在我国仍处于起步阶段,国内还没有工业化的甲醇蛋白生产装置,一些单位也停止了对甲醇蛋白的研究开发。近年来,利用农作物废弃物如秸秆,工厂废弃物还有其他原料来生产单细胞蛋白的研究也时有报道,但是这些大多都还处在研发试验阶段,还没有大量成规模的生产。

### 1.2.2 单细胞蛋白发展制约因素

单细胞蛋白也具有其自身的劣势,以致于至今未能得到大规模工业化发展。

1)安全性问题:有些微生物会产生对人体和动物有害的物质,有些微生物因为在培养过程中会携带培养基原料里的某些有毒成分而对食用者带来危害。另外,微生物中含有的核酸量也偏高,大量食用后会造成风湿,结石等疾病。用作饲料或者食品必须降低微生物中核酸的含量。

2)成本偏高:随着石油价格的不断升高,用石油生产单细胞蛋白已经很难有经济效益。现在处于这一产业主流的甲醇蛋白,仅甲醇一项就占到甲醇蛋白生产成本的 50%以上,近几年甲醇价格波动大,导致甲醇蛋白的原料成本不稳定,甲醇蛋白若按目前价格生产,总成本达到 8 600 元/t 以上,同等粗蛋白含量的甲醇蛋白和豆粕的比价关系为 1.5:1,甲醇蛋白目前根本没有价格优势,由于成本比大豆高,代替大豆用于饲料经济上无竞争力;而代替鱼粉,由于甲醇蛋白成本与鱼粉销售价格相当,甲醇蛋白也没有什么价格优势。

3)消费者心理因素:以甲醇蛋白为例,虽然英国 ICI 公司曾进行 8 年的毒性理学试验,结果表明甲醇蛋白无毒,是一种十分安全的动物饲料添加剂,而且德国赫斯德公司生产的甲醇蛋白主要用于人类食用;但大部分消费者在接受单细胞蛋白方面仍存有疑虑。尤其是我国消费者在经历了“三鹿奶粉”、“瘦肉精”和目前的“牛奶黄曲霉素”等一系列食品安全事件之后,人们对食品、饲料中的添加剂和染色剂之类更加敏感。用微生物生产出来的蛋白质能保证安全吗?会不会存在对人身有害的成分?类似的担心也会在一定程度上阻碍市场的开拓。

## 2 煤制天然气单细胞蛋白

针对前述我国蛋白质短缺以及单细胞蛋白发



展制约因素等问题,笔者等提出以风能发电为能源,以煤制天然气为原料制备单细胞蛋白发展新途径。

### 2.1 风电/煤制天然气工艺

风场的随机性、波动性给风力发电并网带来一系列的影响,随着风电并网的增加,对电网系统的安全性、稳定性及经济性的影响愈加明显。非并网风电是指风电系统终端负荷不再是传统的单一电网,而是直接应用于一系列能适应风电特性的高能耗产业及其他特殊领域,主要适应于0.5~10 GW以上大规模风电场<sup>[6]</sup>。为了实现煤制天然气的低碳排放,需要提供低碳排放的制氢系统。风电/煤制天然气耦合系统即利用风电电解水制得氢气和氧气,用来完全或者部分代替空分系统和水煤气变换系统。由于电解氢气的加入,极大地减少了水煤气变换系统过程中所产生的二氧化碳量,实现煤制天然气系统真正意义上的低碳环保。

### 2.2 甲烷蛋白发展概况

利用甲烷生产单细胞蛋白始于20世纪70年

代,1970年英国壳牌公司在英国建立了一个规模为年产300 t的天然气蛋白试验装置,1974年,壳牌公司宣布在英国建立一个规模更大的试验装置,并筹备在荷兰阿姆斯特丹筹备一个规模为年产 $1 \times 10^5$  t装置的发展计划。但在1976年,壳牌公司决定停止该发展计划并无限推迟,当时的原因归结为:大豆和玉米的价格很低。1999年挪威国家石油公司与英国Nycomed Amer-sham公司联合投资建设了世界上第一套用天然气生产甲烷氧化菌单细胞蛋白的工业装置。这套装置具有年产 $1 \times 10^4$  t生物蛋白的能力。生产出的单细胞蛋白含70%蛋白质、12%碳水化合物、10%脂肪和8%矿物质,目前在挪威已有农业合作社作为饲料出售<sup>[7]</sup>。

### 2.3 工艺流程

图5显示了以风能发电为能源,以煤制天然气为原料制备单细胞蛋白发展新途径简易工艺流程。利用此工艺思路可实现新能源风能与传统能源煤炭的嫁接,最终将二者转化为可供食用的食品或者动物饲料。

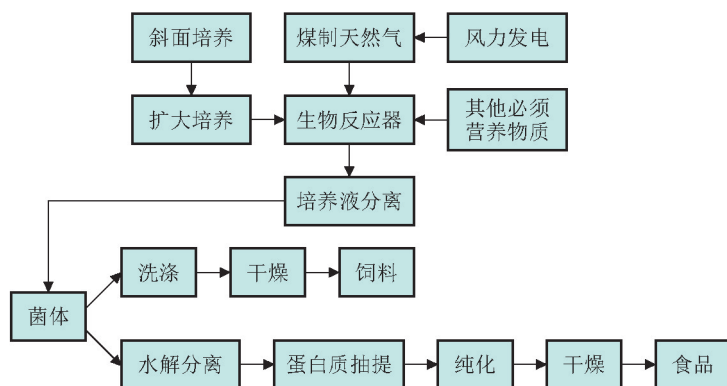


图5 煤制天然气单细胞蛋白简易工艺流程

Fig. 5 Simplified model of coal to gas SCP

### 2.4 优势分析

1)能源环境优势:此工艺思路利用风能发电为能源,以煤制天然气为原料制备单细胞蛋白。利用此工艺思路可实现新能源风能与传统能源煤炭的嫁接,产出的单细胞蛋白50%来源于风力发电,50%来源于煤炭,碳排放几乎为零,对环境的负荷微乎其微。利用微生物对风电和煤炭的综合利用,提高了煤炭的利用功效,传统煤炭得到升级优化利用。

2)成本优势:甲烷蛋白和市场上已有的甲醇蛋白相比,化学成分几乎是相同的。但是,由于直接使用甲烷可以减少能耗转换,降低生产成本,甲烷

比甲醇作为碳源更有优势。此外,甲烷气体便于运输。20世纪90年代,美国的相关研究表明,以甲烷含量17%的煤矿瓦斯为原料生产单细胞蛋白,年产 $7.6 \times 10^4$  t单细胞蛋白的装置,生产成本仅为73.8美元/t,经济效益非常好。近年特立尼达和多巴哥评价以天然气为原料单细胞蛋白项目,以2006年价格为基础, $1 \times 10^6$  t/a规模的单细胞蛋白项目,总投资约为1.3亿美元,投资回报率分别为20%和17%。2009年松原鸿鹤天然气有限公司与丹麦优尼拜尔公司合作投资兴建了以天然气为原料生产SCP的工厂,项目总投资为5.5亿,年产单细胞蛋白 $5 \times 10^4$  t,项目建成后可实现年产值5亿元<sup>[8]</sup>。

3)安全性优势:甲烷单细胞蛋白营养成分、质量与天然蛋白一致,并且不受四季变换的影响;没有病毒,无致敏性;没有沙门氏菌和其他致病菌。另外甲烷气体对培养的微生物没有毒性,不会抑制和影响微生物的生长。据相关研究以甲烷蛋白作为猪饲料日食蛋白,试验中没有任何迹象显示对猪、肉鸡等动物的健康有负面影响,在猪的血浆代谢物中以及蛋白质相关的酶和脂肪代谢的产物中都不受甲烷蛋白的影响。欧盟已经通过了利用天然气生产单细胞蛋白的批准(Council Directive No.82 / 471 / EEC),1995年,欧盟对甲烷蛋白在饲料中的添加比例做出规定:猪饲料中的使用量为8%,牛饲料为8%,咸水鲑鱼饲料为33%,淡水鲑鱼饲料为19%。2009年,欧盟对蛋白质来源做了修订(Regulation(EC)No.767 / 2009),对利用天然气发酵制备的单细胞蛋白有了进一步的促进。

4)可以大规模工业化:甲烷是气体物质,很容易将其从发酵产物中分离出来,也不会给发酵培养体系中引入其他物质,方便生产过程的控制和产物的分离和制备。而且,我国煤炭资源充足,煤制天然气可以提供稳定的原料来源。另外,此工艺程序简单,操作易行,无需高温高压等高耗能条件,可实现连续化、工业化生产,并保证其绿色健康。

### 2.5 应用前景

随着我国城镇化的快速发展,蛋白质短缺等问题为煤制天然气单细胞蛋白带来了广阔的应用前景。

1)饲料:2012年,中国进口粮食达到 $8 \times 10^7$  t,在进口的 $8 \times 10^7$  t粮食中,主要作为饲料用的大豆、玉米占80%。2012年,中国进口大豆 $5.838 \times 10^7$  t,为全球大豆生产总量的1/4,为世界大豆贸易量的63.9%,中国大豆消费量的80%依赖进口。到2015年国内蛋白饲料需求量将达到 $8.5 \times 10^7$  t,蛋白饲料的供求缺口还将进一步扩大。煤制天然气单细胞蛋白将在填补这一蛋白饲料短缺中发挥巨大作用。

2)食品加工:煤制天然气单细胞蛋白也可广泛使用在食品加工业中。表1显示了其在食品加工领域的应用以及功效。

3)与3D打印等技术结合直接生产食品。由生物反应器发酵产生的细胞,经破碎提纯干燥后会生成均匀的单细胞蛋白粉末,这可作为3D打印的材

料与其他可食用原料生产直接可食用的食品。

表1 单细胞蛋白在食品加工业中的应用

Table 1 Applications of SCP in the food processing industry

应用领域	食品功效
改变食品物理性能	提高食品的某些物理性能,如利用单细胞蛋白质的蛋白质组织形成性,制造“人造肉”等新食品;如意大利烘饼中加入活性酵母可提高饼的延薄性
营养强化剂	单细胞蛋白蛋白质含量高,且具备人体必需8种必需氨基酸及丰富维生素和多种矿物质,可用于补充多种食品(如面条、饮料等)需维生素和矿物质
食品添加剂	单细胞蛋白经破碎并提取而制得浓缩蛋白,被广泛用作汤汁、肉汤等食品增鲜剂;还被用作焙烤食品增香剂
提高谷类产品蛋白质生物价	补充富含赖氨酸蛋白可提高植物蛋白生物价值和营养价值

### 3 结语

此工艺思路利用风能发电为能源,以煤制天然气为原料制备单细胞蛋白,可实现新能源风能与传统能源煤炭的嫁接,产出的单细胞蛋白50%来源于风力发电,50%来源于煤炭,碳排放几乎为零,对环境的负荷微乎其微。利用微生物对风电和煤炭的综合利用,提高了煤炭的利用功效,传统煤炭得到升级优化利用。煤制天然气单细胞蛋白将为解决未来我国14.5亿人口的粮食问题,尤其是蛋白质短缺问题发挥巨大作用。

### 参考文献

- [1] 2013年中国新型城镇化驱动冷链食品迎来长期增长[EB/OL]. 2013-09-17,中国产业研究报告网 <http://www.chinairr.org>.
- [2] 段永兰.单细胞蛋白和菌体蛋白饲料的生产及发展前景[J].畜牧与饲料科学,2010,31(11-12):44-46.
- [3] 黄现青,高晓平,中新生,等.单细胞蛋白的开发及其在畜禽生产中的应用[J].广东农业科学,2008(5):70-72.
- [4] 李廷生.国外单细胞蛋白的开发利用[J].郑州粮食学院学报,1994,15(4):75-79.
- [5] 谷小虎,李晓辉,杨旭,等.甲醇蛋白的技术与市场[J].煤化工,2011,10(5):5-8.
- [6] 顾为东.大规模非并网风电系统开发与应用[J].电力系统自动化,2008(19):1-9.
- [7] 刘轲,辛嘉英,徐宁,等.单细胞蛋白生产及应用研究进展[J].科技与实践,2013,49(10):56-60.
- [8] 朱红威,邵菊芳,陶秀祥,等.煤矿甲烷生物转化生产高附加值产物的研究[J].洁净煤技术,2013,19(2):47-50.

# Coal to gas single cell protein- contribute to resolving the food crisis of China in future

Cao Chen<sup>1,2</sup>, Yu Bo<sup>1,2</sup>, Gu Weidong<sup>2</sup>

(1.School of Management and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China;  
2. Jiangsu Institute of Macroeconomic Research, Nanjing 210013, China)

**[Abstract]** It is predicted that the population of China will be growing to 1.45 billion, the urbanization rate will be 70 % by 2030, the total urban population will be exploded to 1 billion comparing with 0.7 billion urban population of 2013. As the continuously growing of population of China and urban population, China will face severe food crisis, especially the protein shortage problem in future. This paper presents a new theoretical model that by combining non-grid-connected wind power and coal to gas with bioengineering to produce single cell protein to contribute to resolving the food crisis. By combining non-grid-connected wind power and coal to gas with bioengineering to produce single cell protein can not only use the coal resource more efficiently, environmental friendly, but also produce nutrient rich protein for forage and human food.

**[Key words]** urbanization; food crisis; non-grid wind power; coal-to-gas; single cell protein

---

(上接87页)

# The enlightenment of distributed energy in foreign countries to China

Du Caicai<sup>1,2</sup>

(1.School of Management and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Jiangsu Institute of Macroeconomic Research, Nanjing 210013, China)

**[Abstract]** At present, China is vigorously promoting the development of distributed energy, in the background, learning from foreign experience in the development of distributed energy can contribute to the development of distributed energy in China. The paper reviews goals, practice and related policies of distributed energy development in the United States, Germany and Japan, respectively. Then the paper summarizes five enlightenments: the establishment of rules; the set of goals; the reform of power system; the establishment of grid standards; the establishment of economy prompting policies.

**[Key words]** distributed energy; foreign countries; enlightenment