

# 沼气生产及利用——瑞典经验

刘京，刘志丹，袁宪正

(1.瑞典隆德大学工学院生物技术系，瑞典隆德 S-22100；2.中国科学院青岛生物能源与过程研究所，山东青岛 266071)

**摘要：**沼气是可再生的绿色燃料。能够产生沼气的原料来源极其广泛，包括各种工农业有机废水、废弃物、甚至能源作物等。厌氧产沼气过程在新能源提供、废物处理、减少温室气体的排放、改善土壤环境、构建可持续发展的社会等方面有着巨大的应用潜力，并发挥着越来越重要的作用。沼气已在供热、热电联产、车用燃料、并入天然气管道等方面展现出良好的应用前景。本文以瑞典沼气技术及利用为背景，分析影响沼气产业的动力及阻力，并结合相关科研和工业实例，以期对中国沼气产业的可持续利用和发展提供参考。

## 1 概况

推动当今社会经济发展的主要动力是能源和资源。近年来能源需求危机、资源有限、环境恶化已成为全球化问题，开发可再生能源和有效利用资源显得越来越重要。厌氧消化(沼气化过程)是解决当前环境、能源及卫生等问题的主要手段之一。这主要是因为厌氧消化的特点是物料处理过程中伴有能量产生(沼气)、余料可作生态肥料，并可有效去除致病菌等。从生化角度讲，厌氧消化本身是一个微生物催化的多步骤的复杂过程，有机物料从投入到气体产出主要包括水解、酸化、乙酸化和沼气化，终端气体产物即沼气，其主要成分是甲烷(约60%)和二氧化碳(约40%)，因此消化得到的沼气是一种可实际利用的能源载体。

用于生产沼气的主要原料有工业有机废水、市政有机固体垃圾、畜禽粪便、生产燃料乙醇及生物柴油剩余的下脚料以及农业废弃生物质等。瑞典是一个非常重视可持续发展的国家，从20世纪70年代开始，瑞典政府着力发展风能、生物质能源等可再生能源，并承诺2020年后全面使用生物质燃料，放弃石油燃料，力争成为世界上第一个全面使用可再生能源的无油国。其中对沼气技术的鼓励和应用强有力地支持了瑞典政府的这一绿色能源计划的实施。例如，世界上首列沼气环保火车2005年在瑞典投入运行，时速130公里。瑞典在开发推广工业化厌氧消化技术和沼气纯化技术的同时，正在建造利用气化技术的世界最大沼气

生产厂，预计年产气1400万 $m^3$

，年可减少二氧化碳排放约1.5万吨。沼气产业是一项充满希望而又复杂的工程，高效生产和利用沼气通常需要微生物学、化学工程、过程控制等学科的支持和知识积累，同时更需要机械加工、仪器制造等工业界的参与来促使其商业化和工业化。本文围绕瑞典沼气产业，综述沼气生产和利用技术，介绍瑞典相关学术研究和工业界现状，并通过讨论影响沼气产业的动力和阻力分析沼气产业的发展。

## 2 瑞典沼气产业经验

### 2.1 沼气生产和应用

瑞典政府通过对沼气使用实施免税或减税，提供发展沼气的津贴等激励政策，极大地推动了沼气产业的生产和利用。

#### 2.1.1 沼气生产

瑞典沼气生产原料主要是工业、市政废物和农业生物质，可分为工业市政和农业两部分加以介绍。根据瑞典沼气协会的2001年报告，瑞典沼气生产中约有超过50%(折

合8亿 $kWh \cdot 年^{-1}$

)来源于市政污水处理厂。这些废水处理厂采用厌氧消化的方法最初是为了处理污泥和减少污泥体积。另外，通过填埋(Landfill)处理垃圾的方式在瑞典从2005年开始已被禁止，所以垃圾必须通过其它方式进行处理。据估计，瑞典所有的工业、市政行业废弃物

(含工业废水、城市废物、家庭和餐饮废物等)可产

生33亿 $kWh \cdot 年^{-1}$ 的能量，可见这些城市废物资源还有很大的开发潜力。

农业上沼气生产资源主要包括畜禽粪便和农作物。现在瑞典共有10多家沼气厂采用了畜禽粪便与其它废物共消化(CO-

digestion)技术。根据资料,瑞典所有的畜禽粪便可产生26亿kwh·年<sup>-1</sup>的能量,农作物残余物可贡献10亿kWh·年<sup>-1</sup>的能量。另外,单纯从畜禽粪便获取沼气已不能满足工业化沼气生产对生物质原料的需求,政府于是鼓励发展不与粮食生产相冲突的能源作物。据估计整个农业上的沼气生产资源对能源的贡献约为110亿kWh·年<sup>-1</sup>。

关于生产沼气的技术,主要包括反应器设计、流程设计以及运行技术等。瑞典现行的反应器通常采用基于泥浆式的生物反应器。而针对生物质物料的不同性状也可能需要不同的处理流程。对于固体颗粒较少的废液,可采用高速反应器(如UASB、固定床反应器等)进行处理;而对于固体颗粒较多的废液废浆(如食品加工和餐饮业废物、废液等)进行简单的预处理,稀释后即可进行生物处理;对于较难生物降解的固体废弃物,则必须进行前期的预处理,或采用干法消化、多级消化的方式进行处理。在过程优化技术方面也可采用共消化技术,可以使物料的碳、氮、磷等营养元素的比例均衡,适合微生物生长,使反应器稳定高效地产气。另外,高温消化处理、先进的消化过程在线监测和控制技术、对厌氧微生物的深入理解都会增加厌氧过程高效并长期稳定运行的可行性。例如:瑞典Bioprocess Control公司为大中型沼气生产企业提供生产运行的技术支持和服务,保障沼气生产可以在高效稳定状态下常年运行。该公司的核心技术凝结了研究者多年的研究成果,并已在沼气工业界取得了很好的推广和应用。

### 2.1.2 沼气过程的应用

厌氧消化的终端产物主要有沼气、消化物(即沼渣)和消化液(即沼液)。厌氧消化过程的综合利用实现了有机废物能源化和资源化的多重生态效益。沼气可用于供热、热点联产、车用燃料及并入天然气网。由于近年国际原油价格的不断攀升和瑞典实施无油国的目标,沼气作为车用燃料在瑞典极具商业发展前景,而且政府和学术界分析得出提纯后的沼气是最清洁和环保的燃料。当然沼气用作车用燃料前需要气体纯化技术和车辆燃气技术,经过十几年的发展这些技术和商业供应在瑞典都已成熟。

沼液、沼渣都是厌氧消化产甲烷的副产物。无论从经济考虑还是实际操作中,利用沼液和沼渣作为肥料都是沼气产业综合利用的重要部分。沼液中富含N、P等营养元素和微量元素,可以有效的减少N流失,增加作物产量,甚至增加作物抗病、抗逆能力。另外,沼液还可用来浸种、作为猪饲料、养鱼等。

沼渣的主用成分是难降解的有机高分子等,可以有效改善土壤质量,是良好的“土壤空调”。为了确保沼肥的质量,针对其中的重金属浓度、致病菌及气味等,瑞典的一些组织也出台了一些措施和规定,例如瑞典农民协会(Federation of Swedish Farmers)就推荐城市污水处理厂污泥为原料所产生的沼渣不用作生产食品和饲料的肥料,因为其中可能还有重金属等有害物质。

### 2.2 沼气研究机构和工业现状

瑞典沼气的研究机构主要分布在瑞典南部隆德市的隆德大学(Lund University),中部乌普萨拉市的瑞典农业科技大学(Swedish University of Agricultural Sciences)和林雪平市的林雪平大学(Linköping University)。隆德大学的沼气研究主要集中在以下几个方面:沼气过程优化(包括消化过程的智能控制、生物质物料预处理、共消化)、能源作物筛选和预处理、厌氧微生物特征及分类筛选、厌氧消解在生物处理方面的应用、以及对包括沼气在内的生物能源政策的研究等。瑞典农业大学侧重能源植物和厌氧消解在农业生态系统中的研究,林雪平大学的沼气研究则注重厌氧微生物的研究和消化过程优化。

精细的工业分工、高层次的工业合作是瑞典工业沼气得以顺利发展的成功经验之一。沼气产业的相关机构涉及多个行业和部门,包括农业协会、城市废物处理企业、沼气技术研究机构、国家和市政机构、天然气和沼气输送企业、能源供给公司、汽车制造公司、交通部门、以及最终消费者等。沼气的工业化生产和推广利用是一项系统性的大工程,需要不同类别公司和机构的参与和分工协作。目前在瑞典沼气工业界较活跃的既有传统的从事水处理工程设计和工程承包为主的公司(如PURAC, Grontmij等),也有新兴的专门进行工业沼气项目管理和生产运营的公司(如Scandinavian Biogas, Swedish Biogas International等)。

近年来,越来越多的传统地方水务处理公司和能源公司也加入到工业沼气生产和供气的商业活动中,典型的代表就是E.ON gas Sveige, Svensk Biogas, G.teborg Energi等公司。以Svensk Biogas为例,该公司是林雪平市(Linköping)能源提供和废物处理署的下属机构,是瑞典示范和推广将沼气作为车用燃料的先行者之一。该公司利用污水处理厂污泥和其它有机废弃物生产沼气,提纯后为该市67辆公交车和250辆轻型服务车提供等同于天然气品质的车用燃料,而且销量还在不断增加;而E.ON瑞典分公司作为瑞典最大的能源公司之一,是通过将提纯后的沼气并入天然气网的销售方式,不断扩大其可再生清洁能源的供应量。厌氧消化工艺作为一种有机废物和废水的处理手段,已经广泛被人们所了解和利用。但是随着近年来人们对该工艺产能特性的重视程度和要求提高,厌氧消化工艺在瑞典已经向着侧重产能或产能

和废物处理并重的方向发展。

这就对厌氧消化工艺的运行效率和稳定性提出了更高的要求。Bioprocess Control是瑞典以及全球范围内提供工业沼气过程系统优化和运行服务的开创者。旨在通过减少沼气生产环节中的制约因素和进行智能化的运行管理，提高沼气生产企业的生产效率和运行稳定性，从而极大地改善大中型沼气工程投资和运行的经济回报性。

### 2.3 沼气生产的动力和阻力

推动瑞典沼气生产和利用的因素很多，包括当今世界能源供给的不稳定性、本国及欧盟设立的环境目标和社会可持续发展目标等。从能源和环境政策上讲，全球范围内有联合国框架下的东京协议，欧盟也提出到2010前10%的能源供应来自可再生能源。而瑞典本国实施的能源和环境政策更为严厉和苛刻。政府向社会承诺到2020年瑞典将成为不依靠石油的绿色国家，工业沼气生产和推广利用是实现这一目标的主要组成部分。成功实施该计划离不开政府配套的税收、补贴和调控政策。以下根据物料不同介绍沼气生产的动力和阻力。

对于工业和市政废物，处理方法主要有焚烧、物料循环、填埋和厌氧消化。2001年下达的禁止用填埋处理市政有机废弃物的政策客观上推动了其它处理方法的应用。而其它方法之间的竞争则通过税收来调节，例如：产沼气可以得到减税或免税的优惠，因此增加了沼气的吸引力。另外，瑞典制订的环境目标也推动了沼气生产，如：政府规定到2010年所有市政家庭可生物降解的有机废物的35%都必须通过生物法处理。厌氧处理和堆肥都是生物法，似乎形成了竞争。但是由于后者在处理过程中伴随着氨气等物质的排放而污染环境，因此从环保角度考虑，厌氧消化法仍然更有前景。当然，通过生物法处理有机废物也存在一些问题，例如：处理废物前需要对废物细致分类，并需将分散的废物运送到集中的沼气厂等，相关设备和运行成本的额外投入目前还没有得到政府方面的补贴，是工业和市政有机废物生产沼气的阻力。

农业废弃物中畜禽粪便的无害化处理还没有相关的优惠政策。农民的意愿很大程度上决定了处理的方法。动力之一是厌氧消化可以使禽畜粪便和农牧业废弃物变成沼液、沼渣等高质量的肥料。在瑞典使用化学肥料需要交纳氮素的赋税，而沼肥降低了农民对化学肥料的依赖、减少了N、P元素的流失和对环境的影响，也保障了地下水的品质，而且沼肥可以改善土壤环境，甚至增加生物多样性等。不过农民对厌氧消化认识有限、沼肥的实际运用等都可能是推广沼气生产的阻力。Lund大学的Bel·glund指出，如何让农民接受厌氧处理的沼液、沼渣作为肥料可能是沼气产业的不确定因素之一，施加沼肥所带来的后果相关的争论较多，比如城市下水道污泥厌氧消化后的沼渣中可能含有重金属等有害物质等。

瑞典农民专用作能源作物(如草和玉米等)的种植并用于沼气生产的能源生产方式已得到政府的鼓励和支持。欧盟也鼓励发展能源作物，规定在非

保留地上种植能源植物会得到每公顷45欧元，约30元·亩<sup>-1</sup>

的补贴。另外，部分粮食作物的市场价格降低也促进了能源作物种植面积的扩大。阻力是种植草类能源作物用于产沼气所获得的利润可能低于种植谷类植物用于生产燃料乙醇等获得的利润。不过除了可以提供产能外，种植草类植物也有很多环境方面的优势，包括改善土壤质量、增加土壤固氮能力、促进有机农业等。而且在瑞典新建立的户用规模化沼气工程中，有机农业也是被农民广泛接收的理念之一，这也促进了基于草类能源植物的沼气生产在瑞典的发展和推广。不过任何产业都需要一个被公众认可和接受的过程，沼气产业也一样需要考虑当地政府的意愿及市民的心态，但是经济因素已对瑞典沼气产业产生了巨大影响。例如2002年地方投资计划(LCP)被国家环境投资计划(KLIMP)所取代，而后者极大的推进了沼气产业的发展。对于农民来说，瑞典还有农业发展计划(LBU)来支持户用沼气的发展。

### 2.4 沼气利用的动力和阻力

总的来说，沼气利用的最大动力是政府对石化能源加收的能源和二氧化碳税，而沼气等可再生能源可以免除相应赋税。另外一个重要因素是减少温室气体排放的考虑。沼气的主要成分甲烷排放所造成的温室效应约为二氧化碳的二十倍，如果不充分利用生物质物料，环境中排放的沼气将会加剧温室效应。

前面谈到沼气可以被用来供热、热电联产、车用燃料、并入天然气网等。在瑞典，沼气用作车用燃料被认为是最具前景、最环保的选择。而将提纯后的生物甲烷并入天然气网更加方便沼气的远距离输送，可以进一步推动沼气作为可再生绿色能源融入当今的能源供应体系。下面结合瑞典特点，分别以沼气作为车用燃料和并入天然气管网来讨论。

(1) 车用燃料(Vehicle fuel)：沼气作为车用燃料在瑞典有一系列的优惠政策，包括免收能源税和二氧化碳税、减收气体燃料的车辆使用税等，另外，使用该类环保型车辆也可以享受国家购车补贴，以及一些区域性优惠政策，如免费停车等。当然推行使用沼气的汽车也存在着阻力，包括沼气的成本略高、同乙醇及生物柴油等其它生物燃料间的竞争、

有限的沼气输送网络和储存能力、有限的沼气加气站等。

因此，沼气燃料的使用和推广不仅依赖于沼气生产和提纯技术，也取决于输送网络和加气设备的综合完善。根据统计，单从价格考虑，沼气作为车用燃料在过去相当长的一段时间相比于传统的车用燃料并不具有吸引力。瑞典鼓励沼气燃料的初衷更多是从环保和绿色能源考虑，因为沼气作为车用燃料存在诸多优点，如减少由于温室气体带来的负面影响、降低 $\text{NO}_x$ 和 $\text{SO}_x$ 的排放、减少酸雨、缓解臭氧破坏等。但随着近年来国际原油价格的不断攀升和原油供应不稳定因素的加剧，沼气作为生产和消费的可再生清洁能源，展现出独特的区域性优势。

近年来随着沼气加气站的大规模建设，从瑞典南部城市马尔默到首都斯德哥尔摩，甚至北部的许多大中型的城镇都设有加气站。也就是说，现在驾驶沼气燃料汽车在瑞典南部、中部、西部、甚至部分北部偏远地区都没有问题。最近Lund大学的B.rjesson和Mattiasson 6从能源效率和环境角度比较了沼气与其它生物燃料(如燃料乙醇、生物柴油等)作为车用燃料的优劣性。他们通过资源效率、能源衡算、环境影响和生化过程等方面综合分析，并结合土地的利用和有机副产物和废物的有效利用等因素的考虑，得出沼气在资源效率和生命周期分析等方面具有突出的优势，沼气在不远的未来将会是最具有可持续性和广泛推广的车用燃料之一。

(2)并入天然气管网(Natural gas grid)：提纯后的沼气并入天然气管网就可利用现有的天然气输送网络和设备，极大的节约了沼气运输成本，有利于沼气利用的推广，是一种非常有前景的沼气输送方式。

根据瑞典气体中心(SGC)提供的报告分析，提纯后的沼气并入天然气管网除了节约成本外还有很多其它优势，如沼气代替的那部分天然气实现了绿色化，这样沼气从生产到利用实现了绿色市场化；可以避免天然气的供需高峰，调节用气市场；而且管道输送的沼气也可以直接作为车用燃料，使用方式灵活。

1992年建立的瑞典Laholm沼气厂是瑞典首例将生物甲烷并入天然气管网的工厂。该厂采用私营公司、当地农民协会和Laholm联合经营的模式，处理当地畜禽粪便和其它有机废物，年处理有机废物3.5万吨。鉴于瑞典本国的天然气使用不多，天然气输送网络建设也不发达，所以在具有完善的天然气网管地区和国家推广该模式，其市场效应、环境效益以及社会效应会更加显著。

### 3结论和建议

瑞典沼气产业的现状是由多方面原因引导的，既有废物治理和减排的目标影响，也有能源安全的考虑。政府的一系列激励措施、环境目标以及市民对环境质量的要求都促使瑞典的沼气行业走在世界的前列。从瑞典的沼气经验可以看出，把注重自然环境和能源需求有机结合在一切，加以适当的政策引导，不仅人类良好的生存环境可以得到维护，而且社会经济也可以健康持续的向前发展。

中国作为发展中国家，在寻求社会和经济高速发展的同时，面临着经济发展带来的能源需求和环境恶化方面的空前压力。然而，中国城乡巨大的有机废物废水其实蕴藏着可观的资源，废物消化得到的一系列产物即沼气、沼渣和沼液均有可能产生巨大的经济效益，实现废物的生物冶炼和完全资源化。

我们可以借鉴瑞典模式，结合中国国情，从国家和地区政府层面制定一系列配套的产业及税收优惠政策，引导相关企业、能源公司、投资公司参与工业化沼气生产，利用和推广，并因地制宜的从科技层次上鼓励和引导沼气能源化发展。可喜的是2008年大中型沼气工程已被列为“十一五”国家科技支撑计划重大项目之一，为进一步推动中国社会的可持续发展，应从政府、企业、科研院所和民众等层面加强合作，各司其职。

政府可通过结合各地区生物质资源分布特点，借鉴国外先进的沼气技术及生产和使用商业化经验，结合中国在沼气工程建设方面的技术及工程经验，建立自己的沼气生态示范工程，为大规模推广工业沼气技术积累经验；科研院所则应该进行相关的人才培养，提倡科研合作和技术积累；而民众不断增强的环保和能源忧患意识，支持绿色经济发展也可以间接推动像沼气等绿色能源技术的推广和利用。只有通过社会各阶层的共同努力，才有可能充分利用和发挥现代沼气新技术所带给我们的益处，使之成为构建中国可持续发展经济及和谐社会的重要组成部分。

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/90041.html>