我国秸秆沼气工艺特点、存在问题与对策建议

石祖梁[1, 2]，王久臣[1, 2]，李想[1]，宋成军[1]，孙仁华[1]，王飞[1, 2]

(1. 农业农村部农业生态与资源保护总站，北京100125；2. 农业农村部资源循环利用技术与模式重点实验室，北京100024)

摘要：[目的]为进一步提高农村清洁能源供应水平，改善农村用能结构，减少秸秆废弃和露天焚烧，推动农业绿色发展。[方法]在系统梳理我国秸秆沼气相关文献的基础上，全面分析了我国秸秆沼气面临的形势、主要技术工艺特点和存在的主要问题。[结果]我国秸秆沼气主要可分为8种工艺，包括竖向推流式厌氧消化工艺、全混式秸秆发酵技术、自载体生物膜秸秆沼气工艺、覆膜槽秸秆沼气技术、车库式秸秆干发酵工艺、一体化两相厌氧消化工艺、红泥塑料厌氧消化技术、分离式两相厌氧消化工艺等。目前发展秸秆沼气存在5个主要问题，包括秸秆收储运困难、预处理技术有待改进、进出料不便、高值化利用程度低、政策和服务体系不完善。[结论]提出了推进秸秆沼气发展的4个对策建议：推动秸秆收储运体系建设、强化秸秆沼气后续产品的开发利用、控制秸秆沼气工程对环境的污染、完善配套政策机制和服务体系。

0引言

中国是农业大国，是世界上秸秆资源最为丰富的国家。前人研究显示，我国秸秆总体资源量近10亿t，其中可以收集利用的秸秆量为9亿t左右[1]。但是由于农业生产方式和农村生活方式的变革，秸秆传统利用方式难以为继，约有20%的秸秆被废弃或露天直接焚烧，不仅污染了大气和水体等生态环境，导致安全隐患，更造成了资源的极大浪费[2-3]。因此，如何合理有效地处置秸秆已成为政府和社会关注的焦点问题。大量研究与实践表明，秸秆作为优质的生物质能，2t秸秆的热值相当于1t标准煤[4-5]，推动秸秆能源化利用，可以有效改善农村清洁用能水平，减少化石能源消耗和二氧化碳排放[6]。而利用农作物秸秆进行厌氧发酵产沼气，则是秸秆能源利用中极其重要的一种途径。前人研究显示，相对秸秆直接燃烧而言，秸秆沼气能量利用效率可以提高1.2～1.9倍[7]。秸秆沼气发酵产生的副产物沼渣沼液，因其富含氮、磷等营养元素，是良好的肥料，已经在生态循环农业中被广泛应用[7-8]，秸秆沼气工程越来越受到社会的关注和重视。因此，文章在前人研究的基础上，系统分析了我国秸秆沼气面临的形势、技术工艺特点、存在问题，并提出下一步的发展建议，以期为推动秸秆沼气的快速发展提供理论支撑。

1发展秸秆沼气的必要性

1.1能源短缺的必然发展趋势

化石能源的枯竭趋势是不可逆转的，能源紧张问题对世界的影响将日益明显。近年来，各国不断重视加强太阳能、核能、生物质能等新能源的开发利用，在新兴起来的诸多新能源当中，生物质能源因其安全、稳定、可再生的特点，是国家鼓励发展的重点领域之一。特别是农作物秸秆，不但产生量大、分布广散、种类多样，而且富含80%～90%的有机质，通过厌氧发酵能够产生化石能源的替代品——沼气[9]。

长期以来，沼气作为一种农民家庭户用的高品质清洁能源，一直是我国农村能源建设的重要内容，对推动农村生活方式的改善起到了极大的促进作用[10]。同时对沼气进行脱碳净化提纯，能够提升甲烷含量达到95%～97%，从而提高燃气的热值达到天然气标准，可进入天然气管网替代石化天然气，也可用作车用燃气，是能源产业发展的重要方式。因此，发展秸秆沼气将成为有效缓解我国能源供应压力的一个重要途径，并在农村节能减排和农业生态环境保护中发挥积极作用。

1.2农作物秸秆处理的有效途径

农作物秸秆露天焚烧和随意丢弃引发了一系列的环境问题，已经得到政府和人们的广泛关注。2018年“中央一号”文件明确提出，要加强农村突出环境问题综合治理，推进农作物秸秆综合利用。国家有关部门更提出了至2020年全国秸秆综合利用率要达到85%以上的目标任务[11]，并鼓励开展秸秆气化清洁能源利用工程建设，拓展农村清洁能源供给渠道，推动秸秆综合利用高值化、产业化发展[12]。中国每年农作物秸秆可收集量超过8亿t，其中作为秸秆沼气良好原料的水稻、小麦和玉米3种秸秆占到80%左右[1]，可见我国农作物秸秆产沼气潜力巨大。在坚持农用优先的基础上，大力推动秸秆沼气发展，有利于进一步拓展利用渠道，切实提高秸秆综合利用率，减少资源浪费，改善农村生态环境。

1.3发展生态循环农业的重要手段

在现代农业生产过程中，由于化肥、农药等农业投入品大量使用，不但对农产品质量安全提出了挑战，也造成了一系列的农业生态问题。农业农村部将2018年确定为“农业质量年”，提出要坚持绿色导向，大力推行农业绿色生产方式，实现投入品减量化、生产清洁化、废弃物资源化、产业模式生态化。沼气不但有利于快速处理农业废弃物，其副产物沼渣沼液又是良好的有机肥料，对于提高农作物产量并改善品质有重要作用，已经成为发展生态循环农业的关键纽带。同时随着城镇化和农业供给侧结构性改革的快速推进，人畜分离的趋势越来越明显，以前被广泛用作沼气原料的畜禽粪便逐渐供应不足，极大限制了农村沼气的发展壮大[9]。前人研究表明，全国约有20%的户用沼气池因原料供应不足造成闲置，甚至报废[13]。同时由于粪便投料麻烦、脏臭等问题难以解决，农户对使用粪便作沼气原料的积极性逐渐降低。因此推动秸秆沼气工程建设，不但有利于缓解沼气池原料不足的矛盾，也有利于发展生态循环经济，推动沼气产业健康持续发展。

2秸秆沼气的工艺技术特点分析

当前我国秸秆沼气工程建设处于较快的发展阶段，截止2017年，全国建成处理农业废弃物的沼气工程约11万处，其中特大型、大型、中型沼气工程共1.8万处，约处理畜禽粪便5.2亿t、农作物秸秆960.6万t[14]。根据反应器的类型以及进出料方式，秸秆沼气主要可分为以下8种工艺：竖向推流式厌氧消化工艺、全混式秸秆发酵技术、自载体生物膜秸秆沼气工艺、覆膜槽秸秆沼气技术、车库式秸秆干发酵工艺、一体化两相厌氧消化工艺、红泥塑料厌氧消化技术、分离式两相厌氧消化工艺。

2.1竖向推流式厌氧消化工艺

该工艺技术特点是液态发酵，秸秆经粉碎至2～3mm，加水调节固体含量至8%左右，每天定时、定量通过泵提升至发酵罐顶部均匀布料，进料时按照顺序成层状向下推压，出料时则依靠自压力从发酵罐底部排出，每天定期对沼液进行循环喷淋[15]。其优点：一是实现了连续进料，使发酵达到连续稳定的状态，解决了沼气稳定生产的问题；二是利用系统内部沼液进行循环喷淋，不但有利于维持发酵罐上部秸秆料的湿度，而且实现了新入秸秆原料的快速接种，显著提高了消化和产气速率。其缺点是秸秆原料粉碎粒度小，能耗和运行成本较高。

2.2全混式秸秆发酵技术

该工艺技术特点是采用液态发酵，立式反应器。在消化器内安装有搅拌装置，使发酵原料和微生物实现完全混合，有利于改善传质传热效果等[16]。优点是由于采用了搅拌装置，容器内的厌氧微生物能够与物料更充分、更均匀地接触，极大提高了物料产气率；同时秸秆粉碎较细，发酵浓度较低，物料流动性好，也有利于进出料。缺点是秸秆粉碎过细，能耗高，预处理成本大；发酵物料浓度较低，所需厌氧发酵罐体积较大，加热和搅拌能耗高，单位产气量所耗的投资成本也较高。

2.3自载体生物膜秸秆沼气工艺

该工艺技术特点是湿式发酵，针对秸秆吸湿膨胀从而产生的飘浮、分层现象，通过强化反应器(卧式反应器)与搅拌方式(斜搅拌与侧搅拌组合)等工艺方法的集成创新，不断增加物料的混合程度[17]。秸秆先经搓揉处理后，再使用固态化学预处理剂进行预处理，时间为3d，然后送入半地下的卧式厌氧发酵池。此时，发酵池中的秸秆同时就具备了食料和载体的双重功能。该工艺的优点：一是秸秆经短时间的专门预处理后，产气率可提高50%～120%，且操作简单快捷；二是通过卧式反应器设备和搅拌方法的集成组合，可使秸秆物料与厌氧微生物充分接触，显著提高消化效率。缺点是采用的秸秆预处理剂是化学试剂，存在二次污染的风险；同时秸秆原料通过物理化学方法预处理后再转移至发酵罐，存在二次搬运问题。

2.4覆膜槽秸秆沼气技术

该工艺技术特点是干式发酵(固态发酵)，整个过程分为好氧升温—沼气发酵—脱水制有机肥等3个阶段[5]。首先以好氧堆肥方法对物料进行好氧升温；其次将好氧升温后的物料与接种物进行混匀，然后在发酵槽上使用柔性密封膜进行密封，开始厌氧发酵；最后发酵结束时需将膜内沼气抽空，收起密封膜，对反应器内物料进行翻搅，以好氧发酵方式脱水生产有机肥。优点：一是前期利用好氧发酵使物料升温，中期再做好反应器保温措施，可以不加热源，能够保持物料在中温条件下进行发酵产沼气，有利于降低系统能耗和运行成本，并提高产气率；二是解决了常规干法发酵方式中的进出料难题，该工艺采用软管充气压力密封方式，使发酵槽体能够实现快速的密封或解封，有利于装载机等进出料设备的使用，大大提高了进出料效率；三是模块化、单元化设计，可以增加或减少发酵反应器的启动数量，来满

足不同用气规模的需求；四是适应性广，对原料要求限制低，有利于畜禽粪污、农作物秸秆、生活垃圾等多种废弃物的转化利用。缺点是初始投资较大，对运行管理人员要求高；顶部和侧面均依靠弹性膜密封，对膜密封性要求高，存在安全隐患。

2.5车库式秸秆干发酵工艺

该工艺技术特点是干式发酵(固态发酵)，采用序批式进料的方式。前期将秸秆进行粉碎，并用富含菌种的沼渣进行接种，而后可用铲车等设备直接送入车库式反应器中，通过渗滤液回流喷淋达到连续接种和缓解过度酸化的目的[18]。优点：一是方便快捷，系统解决了干发酵进出料难的问题；二是车库式反应器内设计沼液回流喷淋系统，实现了沼液循环利用，无排放污染的问题；三是水密封、机械密封和气密封多项技术耦合使用，解决了发酵库难密封的问题；四是适应性广，对原料要求限制低，有利于多种农业废弃物的转化利用。缺点：一是容积利用率低，工程建设初始投资大；二是对密封性、物料的导气性、渗滤液的喷淋传质要求均较高，换料前需进行气体置换。

2.6一体化两相厌氧消化工艺

该工艺技术特点是干式发酵。秸秆经粉碎、青贮等预处理后，装入厌氧反应器内，从反应器顶部均匀喷洒沼液，秸秆在顶部呈现出相对静止的“填料”状态，而沼液则部分向下流动，从而形成两相反应区[19]。该技术优点：一是在同一反应器中实现了两相分区，即固相滤池产酸和液相全混产甲烷，保证了两种菌类(产酸菌、产甲烷菌)在各自反应区内的适宜环境，从而有利于提高产气率；二是实现连续进料和沼液回流循环接种，有效解决了秸秆发酵易酸化的难题。缺点是工程建设初始投资大，对运行管理人员素质要求高；同时两相反应处于同一反应器中，难以得到优化调控，池容产气率不高。

2.7红泥塑料厌氧消化技术

该工艺条件下，厌氧反应器为敞口式的钢筋混凝土结构，反应器上使用红泥塑料进行覆盖产气[20]。秸秆可进行粉碎处理，也可不进行粉碎，直接在消化器内堆制5～10d。秸秆堆制时，需要分层添加畜禽粪便作为接种物和营养调节剂。堆制结束，往敞口式反应器内注入可淹没物料的水量后覆上红泥塑料，并进行水密封，进行厌氧消化。该技术优点：一是红泥塑料吸热性能好，能够有效维持反应器内的发酵温度，利于提高产气效率；二是可采用机械进出料，能耗低、操作简单、换料方便；三是反应器顶部和四周设置循环喷淋系统，能够定期实现沼液回流，防止结壳现象。缺点是秸秆容易飘浮，物料传质不均；反应器上层1/3左右的秸秆无法降解，气体逸出困难，原料产气率低。

2.8分离式两相厌氧消化工艺

该工艺技术特点是干湿两相发酵，固相和液相分别在产酸反应器和产甲烷反应器进行。秸秆首先在产酸反应器中转化为有机酸进入水解液，然后在产甲烷反应器中进行消化产沼气，而沼液则作为接种物再回流至产酸反应器中应用[21]。优点：一是工艺可以灵活组合，产酸相既可湿式发酵也可干式发酵，对产甲烷发应器要求低，常规的CSTR、AF、UASB等均可用；二是原料适应性广泛，管理方便，可实现连续进出料，不影响产气的连续性；三是可控性强，产酸菌和产甲烷菌均能保持适宜的生长环境，同时通过调节沼液循环回流，能够控制产气数量；四是提高了沼气产量和品质，采用两相发酵，可通过产酸相与产甲烷相分别进行优化，获得最大水解率与甲烷产率。缺点是相分离工艺控制条件尚未完善，水解产酸相也会产生一部分甲烷。

3秸秆沼气存在问题

3.1秸秆收集困难

农作物秸秆是伴随着农业生产而产生的，因此秸秆的来源受季节、气候、地形、收获条件等因素的影响较大。在中国，作物收获和种植之间的时间短，季节紧凑，不容许秸秆在田间有过多的存放时间[2]。同时分散性农户种植规模小、田块分散，机械化操作不便等原因，也使秸秆难以实现快速、集中的收集运输；加之我国秸秆收储运体系建设尚不完善，导致秸秆收储市场化、专业化水平较低，原料来源成本较高，对秸秆沼气工程的正常运行提出严峻挑战。因此，如何保证秸秆沼气工程原料的持续供给将是产业发展需要重点解决的难题。

3.2秸秆预处理技术有待改进

秸秆虽然富含有机质，产甲烷潜力较高，但其也富含40%～55%的纤维素、10%～25%的半纤维素和20%～30%的木质素[22]，这3者在秸秆中相互缠绕，空间结构致密坚固，不易被厌氧微生物降解，导致秸秆中水溶性物质析出较慢

，容易造成厌氧发酵周期长、秸秆降解程度不充分等一系列问题[23]。同时农作物秸秆的C/N一般高于正常发酵所需的20～30：1，启动发酵时需要添加氮素原料进行调节，以减少发酵启动时间，提高沼气产量[24]。因此一般在沼气发酵前需对秸秆进行预处理[25-26]。目前的预处理技术有物理法、化学法、热处理法、生物法、青贮预处理法、超声波与稀碱法联合法等，但无论何种预处理技术均会增加运行成本，影响了规模化秸秆沼气工程运行主体采用预处理技术的积极性；同时现有的单项处理技术虽然在一定程度上提高了秸秆厌氧消化率和产气率，但是在能耗、环境污染、处理周期等方面还有待进一步提升和改进，对适宜高效的预处理技术方法还需要进行深入研究。

3.3秸秆沼气工程的进出料问题

秸秆产沼气后，一些较难分解的物质以沼渣形式残留于沼气池内，会显著影响沼气池有效容积，减少产气量。因此需要定期对沼气池进行清池，以保证正常产气功效[27]。而在生产实际中，采用常规的抽吸式出料车进行作业时，极易出现秸秆物料的堵塞现象，尤其是沉淀的纤维沼渣在放料时难以放出。目前，户用秸秆沼气一般采取袋装式整进整出的方法，但大型秸秆沼气工程的出料主要使用挖掘机来完成，不仅费用和能耗较高，而且在作业过程中极易损坏沼气池池壁[28]。因此，针对大中型秸秆沼气池快速出料的高效设备和方法还有待进一步研发。

3.4秸秆沼气尚未实现高值利用

发达国家的沼气主要用于发电和提纯并入天然气管网，且政府对于可再生能源的政策支持力度较大，能够保障沼气工程在经济上持续运行[29]。而我国生产沼气主要以户用和集中供气为主，主要是用作农村的炊事用能，高质量的利用比例还较低。其后续产品——沼液、沼渣，养分含量极其丰富，是良好的有机肥，但目前对沼渣、沼液的综合利用还未达到产业化发展，加上清洁发展机制暂未引入，沼渣、沼液安全利用规范和沼肥的深加工技术还有待进一步完善和提升，沼气工程的整体收益不高，造成秸秆沼气工程自负盈亏能力较差。

3.5相关政策和服务体系尚不完善

为鼓励发展沼气，我国政府出台了一系列激励政策。但中央财政资金重点支持的是土建、设备等方面的投资，很少有针对工程运行服务和终端产品利用方面的政策补贴机制；部分法规和部门规章规定对可再生能源发电实行价格补贴，但未实行强制性的可再生能源发电收购策略，导致沼气工程发电上网困难[30]。期以来，我国农村沼气发展存在重建设轻管理的局面，一缺沼气运行维护服务网络，二缺专业性的技术人员，三缺专门的设备、配件，导致大量沼气池寿命短，运行率不高，有些还存在一定的安全隐患，严重挫伤了企业、农户建设使用秸秆沼气的积极性[31]。

4对策建议

4.1加强秸秆原料的快速收储研究与体系建设

加强农机农艺的有效融合，加快研制改进作物收获——秸秆收集打捆一体化装备，实现秸秆的快速收储；研究完善配套农艺措施，引进作物新品种、改进种植方式，在保证作物产量的基础上，延长茬口的收种时间，为秸秆的收集提供时间保障；明确不同作物地上部木质素、纤维素含量空间分布特征，研究制定留茬高度，积极探索只收集秸秆木质纤维素含量较低部分的可能性；加快秸秆收储运体系建设，为秸秆沼气工程提供充足、稳定的原料供给。

4.2加快秸秆沼气后续产品的开发利用

面对能源紧张越来越重的趋势，沼气高附加值产品的开发利用将是整个社会的发展趋势。应进一步加强沼气提纯后作为车用燃料、民用燃料的关键技术和模式研究。针对目前沼渣沼液受农作物不同生长周期对水肥需要的季节性限制等问题，配套建设相应规模的储存装置来缓解农业生产与沼肥生产不同步的矛盾，并大力研发沼渣沼液快速出料和有效储存技术或减容处理技术，以促进秸秆沼气工程产业化程度的提高和完整产业链的形成，实现秸秆资源化高效利用和秸秆沼气工程的可持续发展。

4.3加强控制秸秆沼气工程对环境的污染

明确不同作物秸秆厌氧发酵时沼液、沼渣的理论产生量，对沼液储存池的结构进行改进设计，并研究从农艺技术上减少挥发性气体的排放，如制定沼渣、沼液的施用的具体技术规程等(明确温度、风速、湿度等环境条件)、添加适量酸以降低溶液pH值减少氨的挥发等。科学施用沼肥，研究单位土地面积对沼渣、沼液的容纳能力，针对不同土壤、不同作物制定配方施肥、按需施肥、按季节施肥的技术标准，发挥沼肥在种植业和养殖业中综合利用的生态作用。

4.4加强政策机制研究，完善服务体系建设

加大政策工具的创设研究，建立从工程建设、到沼气生产、到市场运营的配套激励机制，加大对相关环节的财政专项扶持和补贴力度。同时按照《中办国办关于创新体制机制推进农业色发展的意见》要求，积极探索沼气发电并网、提纯灌装、热能回收、沼肥综合利用的政策工具，推动“秸—沼—肥”循环农业产业模式发展。探索建立秸秆沼气工程后续服务管理模式和机制，建立完善的秸秆沼气物业管理服务网点，提供燃气用具安装、零配件更换、故障排除、计费缴费等全方位服务，确保秸秆沼气工程建设取得实效并实现产业化运营。

参考文献

[1]石祖梁，贾涛，王亚静，等．我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算．中国农业资源与区划，2017，39(9)：32－37

[2]石祖梁，杨四军，常志州，等．秸秆产生利用现状调查与禁烧面临难点分析——以江苏省某乡镇为例．农业资源与环境学报，2014，31(2)：103－109

[3]徐秀娟，吴文革．安徽省农作物秸秆资源及其综合利用．中国农业科技导报，2009，11(2)：43－47

[4]吴楠，孔垂雪，刘景涛，等．农作物秸秆产沼气技术研究进展．中国沼气，2012，30(4)：14－20

[5]崔文文，梁军锋，杜连柱，等．中国规模化秸秆沼气工程现状及存在问题．中国农学通报，2013，29(11)：121－125

[6]高利伟，马林，张卫峰，等．中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况．农业工程学报，2009，25(7)：173－179

[7]张莉娟，尹芳，赵兴玲，等．秸秆沼气在我国生态农业中的应用．现代农业科技，2013(16)：263－264

[8]邱凌，王兰英，王晓超，等．论秸秆沼气发酵在循环农业中的作用．干旱地区农业研究，2007，25(增刊)：222－226

[9]陈小华，朱洪光．农作物秸秆产沼气研究进展与展望．农业工程学报，2007，23(3)：279－283

[10]邱凌，刘芳，毕于运，等．户用秸秆沼气技术现状与关键技术优化．中国沼气，2012，30(6)：52－55，58

[11]国家发改委，财政部，农业部，环境保护部．关于进一步加快推进农作物秸秆综合利用和禁烧工作的通知．2015

[12]国家发改委办公厅，农业部办公厅，国家能源局综合司．关于开展秸秆气化清洁能源利用工程建设的指导意见．2017

[13]刘德江，饶晓娟，刘永刚，等．浅析我国发展秸秆沼气的必要性与可行性．云南师范大学学报，2011，31(增刊)：29－31

[14]农业农村部科教司．2017年度全国农村可再生能源统计汇总表．北京，2018

[15]梅自力．竖向推流式秸秆沼气发酵方法．201110156756.1

[16]张一维．秸秆沼气工程中厌氧与贮气CSTR工艺研究．现代农业科技，2011(1)：261－262

[17]李秀金．山东省德州市秸秆沼气集中供气示范工程运行模式与管理经验．农业工程技术，2010(4)：6－9

[18]曲浩丽，朱德文，杜静，等．生物预处理对规模化车库式干发酵的影响．中国沼气，2013，31(6)：13－16

[19]董保成，陈羚，张玉华，等．猪粪对秸秆一体化两相厌氧产气的影响．农业工程学报，2011，27(增刊1)：48－

52

[20]张宏旺，黄万能，曾清华．红泥塑料在沼气装置中的应用．中国沼气，2010，28(5)：24－26

[21]高新星，赵立欣，董保成，等．分离式两相厌氧发酵渗滤液回流对发酵过程影响．农业工程学报，2011，27(10)：266－269

[22]赵蒙蒙，姜曼，周祚万．几种农作物秸秆的成分分析．材料导报，2011，25(16)：122－125

[23] Yang，S．G．，Li，J．H．，Zheng，Z．，Meng，Z．Lignocellulosic structural changes of Spartina alterniflora after anaerobic mono-and co-di-gestion．International Biodeterioration and Biodegradation，2009，63 (5): 569 －575

[24]刘德江，邱桃玉，刘歆，等．秸秆与粪便不同配比发酵产沼气试验研究．中国沼气，2011，29(4)：13－15

[25]Teghammar，A．，Karimi，K．，Horvath，I．，S．，，Taherzadeh，M．J．Enhanced biogas production from rice straw，triticale straw and soft-wood spruce by NMMO pretreatment．Biomass and Bioenergy，2012，36: 116 －120

[26] Taherzadeh，M．J．，Karimi，K．Pretreatment of lignocellulosic wastes to improve in ethanol and biogas production: a review．International Journal of Molecular Sciences，2008，9 (9): 1621 －1651

[27]焦瑞莲．秸秆沼气生产关键技术．科学种养，2010(7)：52

[28]吕建强，张满，王连，等．农作物秸秆沼气池出料及其机械的研发．农机化研究，2012(4)：210－212，231

[29]陈晓夫，钱名宇．持续高速发展的德国沼气产业．可再生能源，2012，30(6)：111－112

[30]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．农业工程学报，2012，28(1)：184－189

[31]马树梅，李布青，朱丽君，等．农村沼气发展的障碍分析及对策．中国沼气，2010，28(4)：49－52．

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/169915.html