

畜禽粪便资源化利用的问题、制约及发展思路^{*}

刘长全 张鸣鸣 邓良伟

[摘要] 畜禽粪便资源化利用对我国生态环境保护、畜禽养殖业发展以及拓宽清洁能源供给渠道都有重要作用。本文指出,当前我国畜禽粪便资源化利用仍面临发展水平低、设施利用率低和产业化激励不足等问题,导致相关问题的制约因素有:生物能源支持政策难落实,个体收益与社会效益不一致的外部性导致产业体系的社会化、专业化和组织化发展滞后,种养分离制约还田利用并影响生产成本。因此,本文提出,要明晰能源化与资源化的关系,将有效的能源化利用模式嵌入最优的资源化利用系统;要完善政策支持,因地制宜促进能源化利用;要完善标准与监管,将生态价值内化为经济激励;要以完善产业体系为突破口推动产业化发展。

[关键词] 畜禽粪便 能源化利用 外部性 产业化 产业体系

[中图分类号] F316.3 [文献标识码] A [文章编号] 1003—7470(2020)—12—0113(07)

[作者] 刘长全 副研究员 中国社会科学院农村发展研究所 北京市 100732

张鸣鸣 研究员 农业农村部沼气科学研究所 四川成都 610041

邓良伟 研究员 农业农村部沼气科学研究所 四川成都 610041

畜禽粪便资源化利用就是通过热化学或生物化学转化技术将畜禽粪便中的有机质转化为气态或液态能源,在此过程中,畜禽粪便的化学需氧量及其向空气中释放的碳和氮都将被减少。^[1~3]当前,畜禽粪便是中国农业的主要污染源,^①但也有成为生物

能源重要供给的潜力。在此情况下,发展畜禽粪便资源化利用,对于环境保护和生态文明建设,对缓解畜禽养殖业面临的环保压力,以及对拓宽国家清洁能源供给渠道都有重要的作用和意义。

近年,国家对畜禽粪便资源化利用问题给予高度重视。2016年12月中央财经领导小组第十四次会议提出要加快推进畜禽养殖废弃物处理和资源化,

^{*} 本文系国家高端智库重点研究课题“国家奶牛产业技术体系项目”(编号:CARS-36)和“国家生猪产业技术体系项目”(编号:CARS-35)、成都农业科技中心地方财政专项资金项目(编号:NASC2020AR02)的阶段性研究成果。感谢中国社会科学院发展研究所孙若梅研究员、韩磊副研究、王术坤助理研究员及国家奶牛产业技术体系孙凤莉站长、瑞典利拉伐公司黄鸿威、宗杨对本文的支持。

^① 根据2010年《第一次全国污染源普查公报》,畜禽养殖污染源化学需氧量、总磷、总氮排放量分别占农业源污染物排放总量的96%、56%和38%;根据2020年《第二次全国污染源普查公报》,畜禽养殖污染源化学需氧量、总磷、总氮排放量分别占农业源污染物排放总量的94%、56%和42%。

习近平总书记强调,以沼气和生物天然气为主要处理方向,以就地就近用于农村能源和农用有机肥为主要使用方向,力争在“十三五”时期,基本解决大规模畜禽养殖场粪污处理和资源化问题。2017年中央一号文件提出,要大力推行高效生态循环的种养模式,加快畜禽粪便集中处理,推动规模化大型沼气健康发展。2017年5月,《国务院办公厅关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》提出创新种养循环机制、加大财税政策支持等,力推肥料化和能源化利用。

当前,以沼气工程为主的畜禽粪便能源化利用得到日益广泛的应用,但是仍面临设施利用率低、经济效益低和产业化激励不足等问题。因此,本研究试图从经济技术与产业政策等方面展开分析,探讨畜禽粪便能源化利用面临的制约,并提出相应的对策建议。本文包括四个部分:一是对畜禽粪便能源化利用的技术供给做简要梳理,并对沼气发酵能源化利用的主要模式进行概括。二是对畜禽粪便沼气发酵能源化利用的现状与问题进行梳理,尤其是其中面临的激励不足问题。三是从产业政策和外部性等角度分析以上问题产生的主要原因。四是提出相关对策建议。

一、畜禽粪便能源化利用的技术供给与应用模式

1. 畜禽粪便能源化利用的主要技术

畜禽粪便能源化利用主要通过热化学和生物化学转化技术将畜禽粪便中的有机质转化为气态和液态能源,各种技术都有其适用性和优缺点。^[4]

热化学转化技术主要有三种:①将粪煤混合制作燃料棒、蜂窝煤,直接燃烧,该方法的问题是CO的排放量有所增加、燃烧温度降低和炉灰量大幅增加。②热化学气化生产燃气,通过加热在不完全燃烧状态下将畜禽粪便中的高分子量有机碳氢化合物裂解为COH₂、CH₄等可燃气体。该方法也面临两个问题:一是产生的气体中焦油含量过高,影

响气化系统运行的可靠性和安全性。二是气化前干燥处理需要消耗大量能量,影响技术应用的综合能耗和经济性。③热化学液化生产燃油,在隔绝空气或通入少量空气的条件下,利用热能将生物质大分子转变为低分子液体燃料。相对于燃气,液体燃料在储存、运输及利用方面更有优势。但是,该技术目前仍处于实验室研究阶段,还需要解决一系列技术问题。

生物化学法能源化也有多种技术:①微生物转化产电,通过以电化学技术为基础的微生物燃料电池技术,将畜禽粪便中的化学能直接转化为电能。该技术存在转化效率高和可以在常温下有效运行等技术优势,但也存在输出功率密度较低、电极组件价格昂贵等问题。②微生物发酵产氢,以畜禽粪便为制氢原料,利用微生物代谢活动释放氢气。该技术仍面临生产成本高、转化效率较低等问题,制约产业化应用。③厌氧消化产沼气,在无氧条件下利用厌氧微生物、兼性厌氧微生物将畜禽粪便中有机物转化成沼气(甲烷和二氧化碳)。这是目前最为成熟的畜禽粪便能源化利用技术,各种传统消化工艺和高效厌氧反应器都有应用。④发酵产乙醇,通过物理化学预处理和纤维素酶酶解,将畜禽粪便中的纤维素和半纤维素降解为糖后再转化为乙醇,研究中主要是将畜禽粪便发酵后的沼渣、沼液作为生产乙醇的原料。该技术仍需解决抑制问题,并且生产成本高制约产业化应用。⑤养藻产燃油,利用粪便或沼液以较低的成本培养微藻,后者的油脂合成效率大大高于油料作物。但是,该技术还不成熟,在商业化应用方面还受到很多限制。

从对技术供给的梳理可以看出,沼气发酵是目前比较成熟和应用最多的畜禽粪便能源化技术,其他不同类型可供选择的技术在产业化上普遍都面临阻碍,或者因为有突出的技术问题,仍处实验研究阶段,或者因为投入产出水平低,生产成本过高。未来,在加强新技术研发的同时,充分发挥沼气发酵技术优势,是促进畜禽粪便能源化利用的必然选择。

2. 沼气发酵技术的主要应用模式

从实际应用来看,沼气发酵是畜禽粪便处置及资源化利用的一个组成部分,并有不同的应用模式。从发酵环节来说,差别主要体现在两个方面。一是粪便是全量进入沼气发酵还是用固液分离后的液体部分进行发酵。二是对于全量进入沼气发酵来说,是采用水压式沼气池、覆膜氧化塘等传统消化技术,还是采用高效厌氧消化工艺技术,前者通常为中小养殖场、部分大型养殖场采用,后者则主要是由大型、特大型规模养殖场采用,或由在养殖密集区建立的以粪便资源化利用为主要业务的专业化处理企业(中心)采用。

在不同应用模式下技术选择有很大差异,除了受到处理规模 and 专业化水平的影响,另一重要决定因素是沼渣沼液的利用方式,尤其是要对沼液做进一步肥料化还田利用,还是做处理后的达标排放。在技术上,按照进料总固体含量的不同,沼气发酵可分为湿式发酵(总固体含量低于15%)、半干式发酵(总固体含量在15%~20%)和干式发酵(总固体含量在20%~40%)。湿式发酵的优点是底物能源转化率高、产气稳定和自动化程度高,突出缺点则是沼液量大。如果采用湿式发酵技术,并需要按达标排放要求对沼液做处理,那么运行成本将很高,影响技术应用的整体成本收益。因此,前端发酵技术选择必须考虑末端沼液处理需求。

三、畜禽粪便沼气发酵资源化利用现状与问题

总体来看,我国畜禽粪便资源化实际利用水平与潜力之间仍有很大差距。从典型地区和不同规模养殖场户数据资料看,小规模养殖(户)存在沼气设施利用率低、沼气替代性弱的问题,规模养殖场和专业化生物能源企业面临投资大、经济效益低的突出问题。

1. 畜禽粪便资源化实际利用与潜力之间有很大差距

据测算,2015年我国畜禽粪便生产沼气的最大

潜力为963.77亿 m^3 ,考虑到收集难度做折算后,实际生产潜力也达到510.13亿 m^3 ,^[5]大约相当于3800万吨标准煤。但是,也有测算得出我国猪、牛、羊和家禽粪便的产沼气潜力高达1983.00亿 m^3 。从沼气生产实际情况看,我国沼气总产量远低于沼气生产潜力。根据中国农业统计资料数据,沼气发展在失去快速发展的动力后,2011~2013年我国沼气总产量出现徘徊,^[6]2013年以来则连续下降。从2013年最高时的157.77亿立方米降至2016年的144.86亿立方米。而且,在沼气总产量中,又以户用沼气为主,2016年占到81.4%;处理农业废弃物的沼气工程的沼气产量仅24.28亿立方米,仅占沼气总产量的16.8%。

2. 小规模养殖户沼气设施利用率低

小规模养殖户对畜禽粪便做沼气发酵利用,虽然投资相对较低,但是因为产气不稳定和产量少等因素,沼气使用成本较高,难以替代天然气或电力等传统能源,将沼气集中起来做提纯或发电等进一步开发的成本也过高,由此导致户用沼气设施的普及率和使用水平偏低。根据在四川成都某县的调研,全县存栏40多万头生猪,养殖主体以饲养8~10头的小规模家庭养殖户为主,因此沼气发酵技术方案也以户用或小型水压式沼气池为主。目前,全县共有2万多个沼气池,其中仅有一半左右在使用。并且,大多数养殖户没有收集和使用沼气,沼气发酵产生的沼气大多被排放到空气中,从碳减排的角度来说,这些沼气设施的功能没能得到发挥。这些养殖户建设和使用沼气设施的主要目的是配合经济作物种植及控制粪便气味,避免因粪便异味受到周边居民的排斥或投诉。沼气发酵后的沼渣沼液主要被养殖户施用于自有农地,实现肥料化利用。

3. 规模化养殖场粪便沼气发酵投资回报率低

规模化畜禽养殖场对畜禽粪便做沼气发酵(发电)资源化利用,由于达到规模经济的要求,沼气的利用价值大幅提高,沼气或沼气发的电也可以实现市场化销售。在此情况下,养殖场的成本收益变

化主要体现在沼气发酵与发电设备的投资、运行以及沼气和电力的销售等方面。有无沼气发酵的能源化利用,场舍内清粪、粪便(沼渣沼液)储存等投入和成本不会减少,最终需要还田或处理的固液总量也不会有很大变化。那么,养殖场的沼气发酵能源化实际是一种“增值性”的利用,在不需大幅增加投资成本的情况下,即使没有政府补贴,仍会有一定的盈利空间。

根据对河北某奶牛养殖场的调研,^②该牧场将粪便固液分离后的固体部分用于生产牛卧床垫料,液体部分用于沼气发酵,产生的沼气再用于发电。整个项目每年可处理奶牛粪便2万吨,生产20万立方米沼气,一部分沼气用于挤奶厅烧热水,大部分通过燃气发电机发电,年发电量28万千瓦时,发的电按0.52元/千瓦时的价格销售上网。沼气发酵后的沼渣沼液全部还到养殖场承包的农地上。该项目总投资80万元,其中工程投资60万元,设施设备投资20万元。经核算,不考虑碳减排等生态价值,能源化项目每年可以为该牧场带来1万元左右的净收益,投资回报率很低。

4. 专业化能源利用模式投资收益不平衡,难以发展

与养殖场不同,专业化沼气发酵能源企业需要考虑从粪便收集到沼渣沼液处置全过程的成本收益。专业化生物能源企业的主要成本仍是建设成本和运行成本等,收入除了沼气或沼气发电的销售收入,往往还包括用沼渣沼液生产的有机肥的销售收入。虽然专业化的能源化利用具有规模经济和技术优势,但是也面临投资强度大、经济效益低的困境。

以国内某生物能源公司为例,^③该企业的沼气发电项目处理本企业10万头生猪及全县32家养猪场、养猪合作社的粪便,年处理粪便29.2万立方米。整个项目包括日产2万立方米沼气的工程和2兆瓦的沼气发电机组,每年可产生沼气660万立方米,年发电量可以达到1518万千瓦时,项目总投资9633万元。沼气发酵后的沼渣沼液用于生产有机肥销售,

剩下的沼液全部还田利用。基于其投入产出及相关测算数据来看,该公司粪便能源化利用年总收入约2210万元,在未包括管理成本等间接成本的情况下总成本约2282万元,每年净亏损72万元。

四、促进畜禽粪便能源化利用面临的制约

1. 生物能源支持和鼓励政策难以落实

为鼓励农业废弃物能源化利用,国家为生物能源开发出台了系列支持和鼓励政策,但是,这些政策在落实方面仍面临困难。其中,虽然《可再生能源法》、《节约能源法》等都有支持生物质燃气进入城镇管网的条款,但缺少操作层面的具体规定,利用沼气进一步提纯生产生物天然气仍面临入网困难。《畜禽规模养殖污染防治条例》规定“利用畜禽养殖废弃物进行沼气发电的,依法享受国家规定的上网电价优惠政策。利用畜禽养殖废弃物制取沼气或进而制取天然气的,依法享受新能源优惠政策”。但是,养殖场和专业化生物能源企业仍难以获得补贴。财政部、国家税务总局《关于印发〈资源综合利用产品和劳务增值税优惠目录〉的通知》明确,利用“农林剩余物及其他”通过资源化利用生产的“生物质压块、沼气等燃料,电力、热力”可享受即征即退的税收优惠政策,但由于具体税目中并没有包括天然气产品,生物天然气企业无法享受优惠。^④

2. 个体收益与社会效益不一致,外部性导致产业化激励不足

畜禽粪便能源化利用的一个重要价值是在生态上。大量研究表明,通过沼气发酵可以降低畜禽粪便化学需氧量(COD)、减少畜禽粪便向空气中释放的碳和氮。正是因此,促进沼气发酵技术发展和应用,将畜禽粪便从废弃物转变为生产资源,对于减少碳排放、破解粪便环境污染问题、增加绿色能源供给都具有重要的作用和意义。但是,对于采用沼气发酵的养殖户或生物能源企业来说,这些生态

^②本案例数据由国家奶牛产业技术体系保定试验站孙凤莉站长收集。

价值往往不能在其经济利益上得到体现，由此出现了个体收益与社会效益的不一致，个体收益显著小于社会效益。外部性的存在必然导致市场配置机制失灵，具体表现就是相关投资不足，低于实现社会效益最大化所需的投资水平。此外，由于环境规制与排污监管不到位，排污成本偏低，使得资源化利用的生态价值在经济上更难体现，资源化利用作为一个生产活动能获得的市场价格也更低。这些都进一步抑制了粪便资源化利用的投资行为，这也是生物能源企业长期依赖政府补贴、市场化的第三方治理机制难以形成的根本原因。

3. 产业体系不健全，社会化、专业化和组织化发展滞后

目前，国内生物能源产业仍处于发展的起步阶段，产业体系不健全是制约畜禽粪便资源化利用水平提升及产业化发展的重要因素。首先，是社会化服务滞后于产业发展需求。与养殖场自建资源化利用设施不同，专业化生物能源企业需要应对产业链上从粪便收集到沼渣沼液还田的所有活动。粪便收储运与沼渣沼液还田作业的社会化服务与市场化主体的缺失将导致更高的作业成本，也将制约生物能源企业的效率提升和规模增长。其次，是专业化分工不充分。生物能源生产与有机肥生产通常是畜禽粪便资源化利用不可分割的组成部分，但两者实际又分属不同产业、不同市场，都有对专业化和规模经济的要求。目前的专业化生物能源企业并不专业，需要解决粪便资源化利用各个阶段的产业化和增值问题。大而全的生物能源企业必然是一个个分散的个体，虽然具有技术层面的规模经济，但在生物能源和有机肥的市场上都缺乏专业化优势，尤其是制约了对分散的市场的整合能力。正是因此，生物能源企业往往是本地化的，在定位上仅仅是本地畜禽产业发展的配套系统，而不是一个独立的、市场化的产业部门，也因此无法充分利用国内庞大市场的优势条件。再次，是组织化载体缺乏。这一方面导致社会化服务与专业化分工的滞后，另一方面制约

从资源化到还田利用肥料化的产业链、物质链和能量链的整合，降低沼渣沼液肥料化利用水平、提高最终的处理成本。更重要的是，由于组织载体缺乏，集中养殖地区的分散的小规模养殖户也不能被纳入粪便资源资源化利用的产业体系。

4. 种养分离制约还田利用，缺少土地消纳影响生产成本

欧美畜牧业发达国家普遍采用种养一体的生产模式。以法国为例，奶牛养殖和肉牛养殖平均每头牛配套有 1.5 公顷和 11.5 公顷农地。种养一体下畜禽粪便通常都可以就地就近全量还田，大大降低了处理成本，也避免了环境影响。中国畜牧业则普遍是种养分离的，尤其是近年随着公司化规模经营的发展，畜禽粪便无田可还的问题更加突出。规模化养殖场即使对畜禽粪便做沼气发酵资源化利用，仍面临沼渣沼液，尤其是沼液还田利用难的问题。对专业化生物能源企业来说，沼液还田问题也更加突出。如果没有可以用于沼液还田的农地，所有沼液都需要按照排放标准做深度处理，那么资源化利用的综合成本将显著上升。在以上案例 2 中，该企业平均每日需处理的沼液约 570 立方米，如果按 0.6 万~1 万元/吨/天的投资强度，沼液净化处理设施投资需求约 450 万元。净化设施也按 10 年折旧和 5% 残值率，那么每吨的折旧成本约 2 元。如果净化设施运行成本按 15 元/吨计算，每吨沼液净化处理的总成本就将达到 17 元。那么，该企业全年沼液达标排放的净化处理总成本将达到 350 万元，比还田情况下的总成本增加 220 多万元。

同时，沼液还田利用受到运输成本的制约，包括管网建设与运输车辆的投资成本及运输的作业成本。如果使用撒粪车施撒粪肥，根据调查数据测算，在运输距离为 1 公里时，设备均摊成本和运行成本分别为 1.8 元/立方和 3.6 元/立方，当运输距离增至 7 公里时，设备均摊成本和运行成本分别增至 6.3 元/立方和 12.3 元/立方。对于特大型规模牧场或专业化沼气发酵生物能源企业来说，如果就近没

有足够土地,沼液完全还田利用的运输半径超出经济上有效的运输距离,那么也只能选择高成本的处理后达标排放的处理方式。

表 1 粪肥施撒的成本测算

施撒半径 (公里)	施撒车次 次/小时	设备均摊成本 元/立方	运行成本 元/立方	日施撒量 立方/15 小时
1	4.3	1.8	3.6	1600
2	3	2.5	4.9	1100
3	2.3	3.2	6.4	850
4	1.9	4	7.9	700
5	1.6	4.8	9.4	600
6	1.4	5.5	10.8	500
7	1.2	6.3	12.3	400

数据来源:按照采用 24 立方车型进行计算,并包含 1 台氧化塘涡轮泵和 2 台配套拖拉机;设备投资成本按 10 年分摊;运行成本包含人工、燃油、车辆保养等相关支出。

五、促进畜禽粪便资源化利用的相关建议

畜禽粪便资源化利用在破解环境因素对畜禽产业发展的制约的同时,也可以增加国家绿色能源供给、优化能源供给结构。虽然潜力巨大,但是当前畜禽粪便资源化利用依然很不充分。在遵循市场化机制,实现产业化经营这个总体思路下,要着力从以下几个方面入手促进畜禽粪便资源化利用的发展。

1. 明晰畜禽粪便资源化与资源化的关系

畜禽粪便资源化利用的价值很大程度上在于其改善畜禽养殖环境效应、提高资源利用效率的作用。从这个作用来说,资源化利用只是资源化利用的一种形式;从资源化的实际应用方案来看,其通常只是资源化利用的一个环节。例如,沼气发酵后的沼渣沼液仍需要通过生产有机肥、还田等形式做进一步的资源化利用,否则仍会面临环境污染和资源浪费。在成本

效益方面,在畜禽粪便资源化利用的众多途径中,资源化利用并不一定是最优的选择,甚至更多时候是次优选择。因此,进一步推动畜禽粪便资源化利用,首先要明晰畜禽粪便资源化利用与资源化利用的关系,关键就是要遵循技术规律和经济规律,在兼顾生态效益与经济效益两方面标准的基础上选择最优的资源化利用路径,进而将有效的资源化利用模式嵌入到资源化利用系统中。关键是,实现资源化利用与其他资源化利用方式的有效配合。

2. 完善政策支持,因地制宜促进畜禽粪便资源化利用

首先是加快完善与农业废弃物相关的生物能源鼓励和支持政策的实施办法,促进生物天然气、沼气发电的入网销售、价格补贴和税收优惠等政策落实。其次,创新市场化支持工具,重点发展绿色债券等金融工具,加强对畜禽粪便生物能源的融资支持。再次是提高政策瞄准性,将畜禽粪便资源化利用的支持政策与畜牧业结构调整、转型升级统筹协调。综合考虑资源条件与养殖模式等不同因素,因地制宜地推动畜禽粪便资源化利用的发展。具体来说,在技术方面,要加强研发、创新和供给,发展与不同养殖类型、不同养殖规模、不同资源条件相适应的资源化利用方式,重点促进更加节水、节能的、资源集约的资源化利用技术的应用。在区域方面,重点在大城市周边、环境脆弱区以及中小规模畜禽养殖集中的地区加大政策支持力度。在主体方面,一是重点鼓励适度规模养殖场发展资源化利用,实现养殖结构与生态效应的双重优化。二是重点支持在中小规模畜禽养殖集中地区发展以畜禽粪便为主要原料的专业化生物资源化企业,既发挥资源化利用的规模效应,也缓解密集养殖的环境影响。

3. 完善环境标准与排污监管,将生态价值内化为资源化利用的经济激励

畜禽粪便资源化利用缺乏经济性和投资不足的一个重要原因是外部性,即项目的生态价值外在于企业的经济利益,个体收益小于社会效益。要将生

态价值内部化为企业经济利益，关键是完善环境标准和强化排污监管，将碳、氮、磷等不同污染物的排放成本显性化，资源化利用的经济价值也将随着排污成本的增长而上升。为此，一要根据各地区资源条件、环境承载力，从水、土、气不同维度对碳、氮、磷等的排放制定严格标准和限量，提高排污成本。二要完善污染排放的评估和监测体系，提高违规排放的惩罚标准。三要引入交易机制，允许减排的生态价值通过市场途径转变为经济价值。同时，排污标准与排污成本的提高也可以促进畜禽养殖场加强养殖环节养分管理，从源头减少污染物的产生，并加强粪便存储与施用等的过程管理，实现畜禽养殖业生产方式的绿色转型。

4. 以完善产业体系为突破口推动畜禽粪便资源化利用的产业化

除了加快技术进步和完善产业政策，促进畜禽粪便资源化利用还要加快产业体系构建，这也是在市场机制下实现产业化发展的必然要求。为此，一要鼓励以畜禽粪便收储运和还田利用为主要业务的社会化服务主体发展，重点解决社会化服务主体在用地等方面的困难，加强技术指导和融资支持。二要培育专业化生物能源企业与专业化有机肥企业，促进各类专业化经营主体协同发展，同时发挥专业化、技术规模经济和经营规模经济三个方面优势，实现效率和竞争力的提升。三要加强合作社等组织载体建设，一方面在企业与周边农户之间构建稳定的合作关系和利益联结机制，保障沼渣沼液等资源化利用的残余物顺利、安全还田消纳，实现物质、能量的充分循环，另一方面，在组织载体与社会化服务的共同支撑下，通过服务共享、设施设备共享和基础设施共享等，将小规模养殖户纳入产业化的畜禽粪便资源化利用中。通过产业体系建设，最终形成政策引导、市场驱动、专业化企业带动、社会化服务组织协调、大中小农户共同参与的协同发展

格局。

参考文献：

- 〔1〕朱志平，董红敏等. 中国畜禽粪便管理变化对温室气体排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, (04).
- 〔2〕刘芳，雍会. 畜禽粪便管理中的温室气体减排潜力研究——以牛养殖为例 [J]. 生态经济, 2019, (05).
- 〔3〕杨璐，李夏菲等. 湖北省猪粪管理温室气体减排潜力分析 [J]. 资源科学, 2016, (03).
- 〔4〕邓良伟，吴有林等. 畜禽粪污资源化利用研究进展 [J]. 中国沼气, 2019, (04).
- 〔5〕陈利洪，舒帮荣，李鑫. 基于排泄系数区域差异的中国畜禽粪便沼气潜力及其影响因素评价 [J]. 中国沼气, 2019, (02).
- 〔6〕陈利洪，闫云，李莹. 我国农业废弃物沼气生产现状、模式、主要问题分析 [J]. 安徽农业科学, 2017, (11).
- 〔7〕曹凯云. 河北京安：生态循环农业的践行者 [J]. 北方牧业, 2016, (12).
- 〔8〕郑微微，沈贵银，李冉. 畜禽粪便资源化利用现状、问题及对策——基于江苏省的调研 [J]. 现代经济探讨, 2017, (02).

责任编辑：付 娆
校 对：