

北京市农业废弃物沼气工程跟踪调研的对比分析

吴树彪 刘莉莉 陈理* 董仁杰

(中国农业大学 工学院,北京 100083)

摘要 为了解北京农业废弃物沼气工程建设情况,于2009年和2015年对周边20座典型农业沼气工程进行了实地跟踪调研,同时对工程的运行管理和三沼(沼气、沼液和沼渣)的后续利用进行了全面的对比分析。结果表明:2次调研工程原料都以猪粪为主,与2009年相比,以猪粪为原料的工程持续增加(占调研沼气工程的55%),这主要受到京郊区县的农业养殖规划影响。同时,沼气冬季燃煤加温工程由2009年的16座降到了2015年的10座,其中由太阳能加温替代燃煤的工程由2009年的3座增至2015年的9座。沼渣沼液的固液分离技术使用由2009年的3座增至2015年的5座,多数沼气工程仍未进行固液分离,这主要与工程原料有关,故沼肥农用方式仍限制在简单的果蔬灌溉,高值利用途径缺乏。除此之外,经过政府和地方的不断努力,2015年工程持证上岗人员比2009年整体有所增加。

关键词 北京市;农业废弃物;沼气工程;调查研究;冬季加温方式

中图分类号 S 216.4

文章编号 1007-4333(2016)11-0102-07

文献标志码 A

Comparative analysis for tracing investigation of agricultural waste biogas projects in Beijing

WU Shu-biao, LIU Li-li, CHEN Li*, DONG Ren-jie

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract An investigation of 20 typical biogas plants located in Beijing rural areas was conducted by the research team of China Agricultural University in 2009 and 2015. The project investment, design and construction were investigated and comprehensive and comparative analysis was carried out on operation, utilization of biogas and by-products. The result showed that: Compared with 2009, the raw material was mainly the pig waste and continued increasing (55%) in 2015. It was mainly affected by local farming industry; The number of biogas plants used solar energy to replace coal for heating in winter increased to 5 in 2015 from 3 in 2009; The number of biogas engineering with winter coal-fired heating dropped from 16 in 2009 to 10 in 2015; The number of biogas plants among investigated adopted solid-liquid separation technique was 5 in 2015 and 3 in 2009. Due to the difference of raw materials, most of the biogas plants didn't use solid-liquid separation technique, and the utilization of biogas fertilizer was limited to fruit and vegetable irrigation and lack of efficiency utilization. In addition, the number of workers with certification increased with the efforts from state and local governments.

Keywords Beijing; agricultural waste; biogas projects; investigation; comparative analysis

2013年我国农作物秸秆总量7亿多t,粪便清运量1600多万t,废水排放总量695多亿t^[1],预计到2020年,我国农业废弃物产出总量将增至50亿

t^[2]。沼气工程作为一项处理农业废弃物和提供清洁能源的生态技术,近年来在我国得到了迅速发展^[3]。

收稿日期:2015-12-28

基金项目:北京市科技计划课题(Z151100001115010);科学技术部“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD14B03-6);北京市科技新星计划课题(2015B083)

第一作者:吴树彪,副教授,主要从事生物质能源工程与低碳技术研究,E-mail:wushubiao@cau.edu.cn

通讯作者:陈理,副教授,主要从事能源环境评价方面的研究,E-mail:chenli329@cau.edu.cn

自 2003 年,我国将农村沼气工程建设列入国债资金支持范围,国家每年投入资金由 2003 年的 10 亿元增加到 2013 年的 50 亿元左右^[4]。政府的大力支持,加快了我国沼气工程发展步伐,工程建设数量迅速上升,至 2013 年年底,我国处理农业废弃物沼气工程达到 99 625 座^[5]。另外,北京市因其独特的地理、经济优势,已有 157 座处理农业废弃物沼气工程,其中大型沼气工程 51 座,中型沼气工程 78 座,小型沼气工程 27 座^[5]。

沼气工程得到飞速发展的同时,受到投资较大、工艺不规范、运行管理等方面制约,重建轻管、运行成本高、运行效率低、产业链短、综合效益不明显以及越冬困难等问题日益突出,对于此,王宇欣等^[6]、唐雪梦等^[7]分别对北京农村 18 座、38 座沼气工程进行调研并针对工程设计施工体系初具产业规模、工程原料、冬季燃煤加温、沼液沼渣利用率差等方面问题提出了相关建议,但对于问题的原因和工程近来运行发展变化,未做深入探究。在沼气工程快速发展的新背景下,以往北京市沼气工程运行状况研究已不能代表当下京郊沼气工程的实际发展状况。因此,本课题组在 2009 年对北京市周边沼气工程进行抽样调研基础上,于 2015 年又进行了回访调研,分析 2009 年和 2015 年,沼气工程在工程规模、原料、冬季加温方式、沼肥利用以及技术管理方面的发展变化和原因,进而反映工程在建设、管理、运行发展中存在的问题并提出相关建议,旨在为北京市沼气工程的进一步发展提供理论参考。

1 调研的实施方案

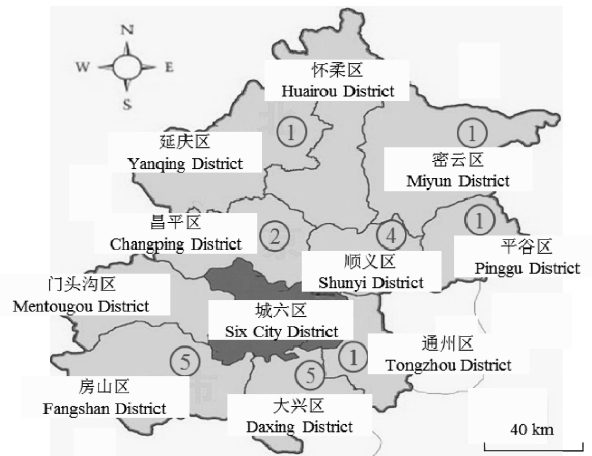
1.1 样本选取与问卷设计

调查总样本为北京市周边房山(5 座)、通州(1 座)、顺义(4 座)、延庆(1 座)、大兴(5 座)、密云(1 座)、平谷(1 座)、昌平(2 座)8 个区县的 20 座在运行沼气工程(其余城区由于沼气工程极少,故未纳入本次调查规划范围内)(图 1)。

考虑到沼气工程的持续发展与周边社会效应关系紧密,调查对象为沼气工程点以及周边燃气用户。为了解工程整个生命周期的状况,问卷结构主要包括:

1) 工程土建投资情况:为更好实行投资控制、财政预算,最大限度提高投资建设的投资效益,调查表涉及了工程土建投资情况。

2) 工程设计、施工:工程建设质量关系后期管



○表示该区县的总体调查工程数。

○ Overall investigation projects.

图 1 北京市沼气工程调查分布

Fig. 1 Distribution of the investigation biogas projects in Beijing

理,因此工程设计成为了此次调查的重要内容。

3) 工程技术工艺情况:为深入了解工程技术工艺和废弃物处理效果,进一步分析总结沼气工程技术、工艺配套设施中的问题,调查包含了工程技术工艺项目。

4) 项目运行管理:由于工程整体长期稳定运行的需要,调查涵盖了项目运行管理情况。

5) 沼气、沼渣、沼液的综合高值利用:能够了解和评价沼气工程的社会、经济效益,便于制定沼气工程优化配置方案。

6) 周边燃气用户:为沼气工程运行过程中产生的沼气、沼肥提供了市场,通过周边农户调查,能够了解沼气工程带来的社会效益。

1.2 跟踪调查的实施

此次调研由中国农业大学相关课题组完成,采用与工程点技术人员交谈的形式,记录工程实际运行情况并填写问卷,最终实现了 2009 年对北京市周边 20 座在运行沼气工程的调研和 2015 年的回访调研,并回收了 20 座沼气工程的有效数据。本研究针对这 20 座沼气工程进行数据分析。

2 调研结果与分析

2.1 工程规模

由 20 座沼气工程调研数据可知,2009 年均是大中型沼气工程,其中大型 6 座(30%)和中型 14 座

(70%)(表1)。然而,2015年的统计结果显示,大型1座(5%)、中型14座(70%)、小型5座(25%)(表2)。6年间,相同20座沼气的规模发生变

化,是因2009年的调研沼气工程分类依据是农业部颁布的2003年沼气工程规模分类标准,而2015年的分类依据是2011年沼气工程规模分类标准。

表1 2009年调研沼气工程规模分类标准及统计*

Table 1 Classification standard and statistics of biogas projects for investigation in 2009

工程规模类型 Project scale type	厌氧消化装置单体 容积 V_1/m^3 Volume of individual digester	日产沼气的量 $V/(\text{m}^3/\text{d})$ Daily biogas production	厌氧消化装置 总体容积 V_2/m^3 Total volume of digesters	工程规模统计/% (占工程总数比) Statistics of project scale
大型 Large scale	$V_1 \geq 300$	$V \geq 300$	$V_2 \geq 1\ 000$	6(30)
中型 Medium scale	$300 > V_1 \geq 50$	$V \geq 50$	$1\ 000 > V_2 \geq 100$	14(70)
小型 Small scale	$50 > V_1 \geq 20$	$V \geq 20$	$100 > V_2 \geq 50$	0

注:分类时,同时采用两项必要指标和两项选用指标中的任何一项指标加以界定,其中一项指标超过上一规模的指标时,取其中的低值作为依据。下表同。*按照2003年沼气工程主要分类标准。

Note: When classifying, two necessary indicators and one of the two optional indicators at the same time are used at the same time. If the value of one of the indicators is higher than the previous indicators, then the lower value is taken as the basis. The same as below. * According to the main classification standard of biogas engineering in 2003.

表2 2015年调研沼气工程规模分类标准及统计*

Table 2 Classification standard and statistics of biogas projects for investigation in 2015

工程规模类型 Project scaletype	厌氧消化装置单体 容积 V_1/m^3 Volume of individual digester	日产沼气的量 $V/(\text{m}^3/\text{d})$ Daily biogas production	厌氧消化装置 总体容积 V_2/m^3 Total volume of digesters	工程规模统计/% (占工程总数比) Statistics of project scale (of total projects)
特大型 Super scale	$V_1 \geq 2\ 500$	$V \geq 5\ 000$	$V_2 \geq 5\ 000$	0
大型 Large scale	$2\ 500 > V_1 \geq 500$	$5\ 000 > V \geq 500$	$5\ 000 > V_2 \geq 500$	1(5)
中型 Medium scale	$500 > V_1 \geq 300$	$500 > V \geq 150$	$1\ 000 > V_2 \geq 300$	14(70)
小型 Small scale	$300 > V_1 \geq 20$	$150 > V \geq 5$	$600 > V_2 \geq 20$	5(25)

注: *按照2011年沼气工程主要分类标准。

Note: *, according to main classification standard of biogas engineering in 2011.

如表1、表2所示,2003年和2011年沼气工程规模分类标准中,都是以2项必要指标和2项选用指标进行判定工程规模^[8-9]。2003年必要指标主要是单体装置容积,选用指标为日产沼气的量和装置总体容积。沼气工程快速发展的同时,养殖场规模化发展日益显著,工程建设趋于规模化,厌氧消化装置单体容积不断扩大、装置数量不断增加,运行效率的提高和混合发酵原料的利用都有效提升了工程产气量,2009年分类标准已不能有效体现我国沼气工程规模发展现状。2011年分类标准中日产沼气的量和厌氧消化装置总体容积成为必要指标,装置单体

容积为选用指标,各项指标与2003年分类指标相比都有更高要求,其中大型沼气的单体装置容积范围由 $V_1 \geq 300 \text{ m}^3$ 修订为 $2\ 500 \text{ m}^3 > V_1 \geq 500 \text{ m}^3$,日产沼气的量范围由 $V \geq 300 \text{ m}^3/\text{d}$ 修订为 $5\ 000 \text{ m}^3/\text{d} > V \geq 500 \text{ m}^3/\text{d}$,厌氧消化装置总体容积范围由 $V_2 \geq 1\ 000 \text{ m}^3$ 修订为 $5\ 000 \text{ m}^3 > V_2 \geq 500 \text{ m}^3$ 。因此此次调研的北京市周边20座工程由2009年的大中型为主变为2015年的中小型为主。说明沼气工程规模现状分析时,不仅要根据工程运行参数判断工程规模,更要与工程规模分类标准相适应。

2.2 工程原料

无论 2009 年还是 2015 年的调研结果均显示 20 座工程都以畜禽粪便为原料,包括猪粪、鸡粪、牛粪及其混合粪(图 2)。2 次调研中原料都以猪粪为主,牛粪其次,鸡粪最少。与牛粪、鸡粪相比,猪肉作为城市居民肉类消费中的主体部分,生猪养殖业发展迅速,伴随的是大量的猪粪和相关废弃物,且价格便宜,因此猪粪成为京郊沼气工程原料的主要来源。以猪粪为原料的沼气工程多集中于顺义、房山、大兴三区,崔小年^[10]在进行研究时表明这些区域生猪存栏量占北京市总生猪产量的 72.8%。

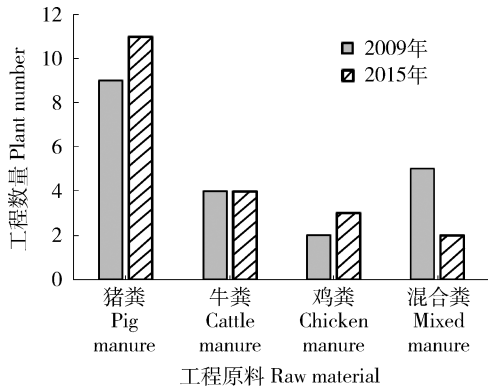


图 2 2009 和 2015 年沼气工程原料统计

Fig. 2 Material statistics of biogas projects in 2009 and 2015

2009 年以猪粪为原料的沼气工程为 9 座(45%),2015 年增至 11 座(55%)。以猪粪为原料的工程增加了 2 座,原因是 3 座工程的原料由混合粪改为猪粪,1 座工程的原料由猪粪改为混合粪。位于房山区的 2 座沼气站因村中散养户因遭遇禽流感风波,肉鸡滞销严重,村里养鸡户多改为养猪或放弃养殖,致使工程原料由猪、鸡混合粪改为仅为猪粪;房山区的后石羊村因增建了养鸡场,并与企业达成协议,养殖场免费供应鸡粪,因此工程原料增添了鸡粪,现为猪、鸡混合粪;大兴区小谷店村增设养猪场,同时沼气站考虑其本身规模较小、原料需求较少、原料运输便利因素,由猪、鸡、牛粪统一使用养猪场的猪粪。

2009 年以鸡粪为原料的沼气工程为 2 座(10%),2015 年增至 3 座(15%)。以鸡粪为原料的工程增加了 1 座,是因昌平区燕岭生态园周边养猪场基建规模盲目扩大,基建投入的资金比例过高,致使猪场倒闭,迫使工程原料由猪、鸡混合粪改为鸡粪。

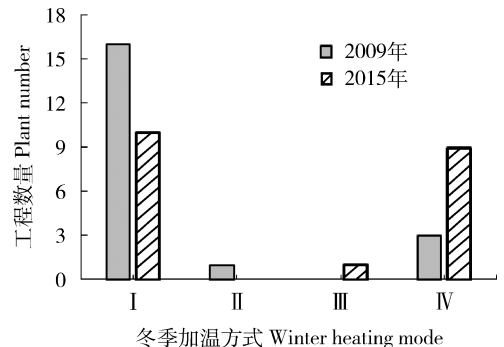
2009 年以混合粪为原料工程有 5 座(25%),其中 4 座是猪、鸡混合粪,1 座猪、鸡、牛混合粪,2015 年却降为 2 座(10%),以猪粪和鸡粪混合。以混合粪为原料的沼气工程减少了 3 座,主要原因是:当地散养户因管理困难、防疫水平低、效益少而停养,考虑原料运输便利、成本因素,工程选择当地养殖场畜禽粪便作为发酵原料;另外某些养殖场业主为牟取私利,趁时提高畜禽粪便价格,工程根据畜禽粪便市场价格选择发酵原料,适时更换原料种类。

根据以上分析知,沼气工程原料类型与当地畜禽养殖关系紧密,只有结合地区养殖产业优势适时选择或更换原料,才能保证原料充足稳定,另外拓展原料来源,需充分利用当地农业畜禽养殖废弃物。

2.3 冬季加温方式

北京为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,周边地区年均气温较低,夏季为 5—9 月份,平均 24.22℃,冬季为 10 月—来年 4 月份,平均 4.67℃^[1]。2009 和 2015 年沼气工程调研中,采取中温 35℃发酵的工程均为 17 座(85%),为保障良好持续产气,工程必须采取保温措施。

2009 年调研知,使用燃煤加温的工程有 16 座(80%),燃气锅炉加温的工程有 1 座(5%),利用太阳能或与其他方式相结合的工程有 3 座(15%) (图 3)。燃煤作为传统的加热方式,占据市场能源主力,在我国一次能源消费中煤炭比重较大,截至 2014 年,仍超 60%,而其作为不可再生能源,存储量却日益枯竭。一座中型沼气工程,年均需燃煤 60 t



I. 燃煤热水锅炉 II. 燃气锅炉 III. 燃煤+燃气锅炉 IV. 太阳能为主(结合燃气锅炉、热水锅炉、地源热泵)。

I, Coal fired hot water boiler; II, Gas boiler; III, Coal + gas boiler; IV, mainly solar energy, combined with the gas boiler, hot water boiler, ground source heat pump.

图 3 2009 和 2015 年北京沼气工程冬季加温方式统计

Fig. 3 Winter heating modes statistics of Beijing biogas plants in 2009 and 2015

(800~1 000 元/t),直接影响工程的经济效益,同时,排放的大量有机颗粒物、硫酸盐、黑炭等物质,污染大气环境。在此情况下太阳能技术应用得到不断推广。

太阳能与地源热泵、沼气发电余热增温等新型清洁增温技术结合,替代燃煤冬季加温,不仅满足生态环保的要求,更具有高加热效率、低运行成本和避免天气干扰的优势,具有较强的综合利用潜力^[11-14]。2014年我国开展中欧国际合作项目,与英国、德国等超过9个清洁新型技术先进的国家进行合作,项目支持重点就包括太阳能热利用、地热等新型能源技术利用^①。沼气工程积极响应国家倡议,利用政府资金补助和项目支持,进行工程改造,增添太阳能、地源热泵等新型清洁技术利用,并积极参加新技术培训工作,保障沼气工程运行良好。经过政府和地方的不断努力,2015年利用太阳能或以其他方式相结合的工程极大提高,达到了9座(45%)(图4)。以中型规模的沼气工程为例,太阳能增温技术的使用,每年可减少燃煤费用约5.4万元,占工程运行管理年均投入(20万~30万元/年)的18%~27%,太阳能设备年均投入约3万元(折旧年限为10年),工程具有明显的经济效益。调研发现,2015年仍有11座工程未使用太阳能加温技术,设备一次性资金投入大、政府补贴有限、多数工程难以支撑是限制工程使用太阳能技术的关键因素。因此,地方政府和沼气工程在利用中央相关鼓励政策和政府补助的情况下,仍应充分利用太阳能节能环保的优势,引进企业投资,不断发展太阳能和其他清洁加温技术的应用。

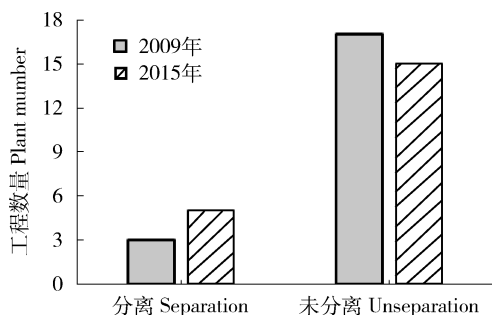


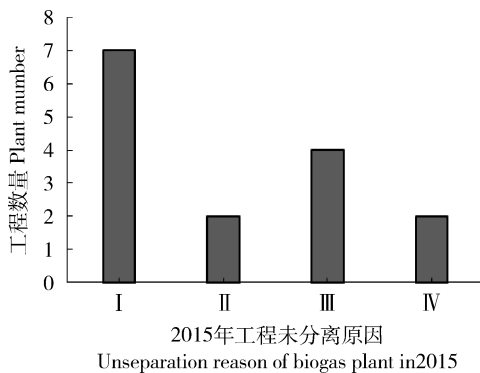
图4 2009和2015年北京沼气工程固液分离统计

Fig. 4 Separated and unseparated statistics of digestate of Beijing biogas projects in 2009 and 2015

2.4 沼肥利用方式

沼气发酵产生的沼渣沼液可作为优质肥料,改善作物营养品质,增加土壤肥力,如果实现商品化,每年又可获得可观的内部收益^[15-17]。研究发现固液分离是一种更易实现沼气工程产品商业化的沼肥利用方式。将沼渣液固液分离后晾干,用作制取固体、液体有机复合肥料(二维)或生物有机复合肥料(三维),以高科技含量,高效、高附加值商品肥进入市场销售^[16]。沼渣、沼液若不分离,发酵液浓度较大,无法实现沼液滴灌、沼液喷施果树和蔬菜等高值利用,另外沼液运输不便,影响周边环境,居民使用意愿降低。因此,沼渣、沼液分离利用,更有助于提高沼气工程整体经济效益,改善发展结构^[18-19]。科技部和财政部,2014年度中小企业发展专项资金中欧国际合作项目。

沼渣沼液分离的工程由2009年的3座增至2015年的5座,固液分离情况有所改善,但是并未形成良好的固液分离后的沼肥高值利用(图4)。国家为了促进固液分离制作商品肥的标准化实施,鼓励工程配备固液分离机设备并给予补贴,2015年18座(90%)沼气工程都已配有固液分离机,但工程只是盲目跟随配备分离机,并没有考虑固液分离的真正目的和是否有完整的后期商品肥制作产业链。如图5所示,2015年就有15座(75%)沼气工程因分



I表示沼渣少,分离不出来,II表示沼渣沼液分离无人使用,III表示分离机电量大,IV表示其他。

I means low content digestate, and cannot be effectively separated. II means nobody uses separated biogas manure. III means large electricity consumption. IV means others.

图5 2015年15座未分离沼气工程未分离原因统计

Fig. 5 Unseparation reason statistics of 15 biogas projects in 2015

① 科技部和财政部,2014年度中小企业发展专项资金中欧国际合作项目。

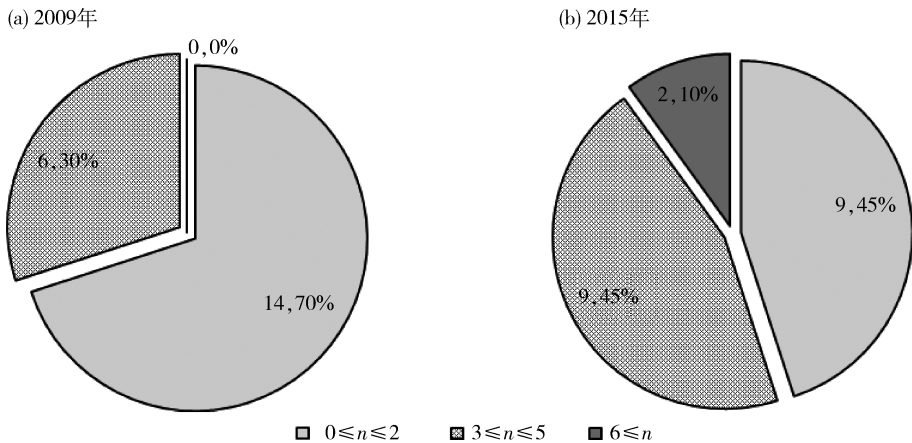
离机用电量、沼肥无人使用等原因导致固液未分离(包括 2 座未配置固液分离机的工程),未分离沼渣沼液的农用方式只是简单的果蔬灌溉,其中有 7 座(35%)工程是由于发酵液浓度太低,分离不出来。对此 7 座工程进一步分析发现,6 座工程的原料是猪粪,1 座工程原料是猪、鸡混合粪,由于猪、鸡的饲料喂养代替了以前的稻糠喂养,粪便杂物较少,以猪、鸡粪为原料的工程沼渣、沼液可分离性较低,例如若以牛粪为原料的工程实施固液分离,牛粪较干、杂物较多,固液分离必能发挥其价值。可知,工程固液分离的可行性首先应考虑是否具有完整的商品肥制作产业链,并与工程原料类型和当地养殖结合,从而才能实现沼肥高值利用。

2.5 工程技术人员持证上岗情况

工程技术人员持证上岗是安全标准化建设的进一步深化,也是安全生产工作的必然要求,能够有效进行事故处理、应急救援等,出现可维修状况时,持证人员凭其技术知识和经验,能够进行简单处理,甚至接待维修工作,持证人员也更加了解工程运行概

况,在遇到突发事情时,可根据工程情况作出适当决策。因此,政府积极开展培训活动来提升工程持证上岗状况。北京市 2011 和 2012 年相继举办 4 期大中型沼气工程技术与管理培训班,并组织活动考察工程、与专家进行交流研讨等。截止 2012 年底,北京市沼气生产工累计培训 17 648 人,持证 816 人,与 2009 年相比,沼气生产工培训人数增加了 42%,持证人数增加了 80%^[5]。

与 2009 年(图 6(a))持证上岗人员相比,2015 年(图 6(b))实际调研中整体都有所增加,多数工程不存在技术人员缺乏或无证上岗的情况。拥有 6 人持证上岗人员的工程由 2009 年的 0 座上升至 2015 年的 2 座(10%),具有 3~5 人持证上岗人员的工程由 2009 年的 6 座(30%)增至 2015 年的 9 座(45%)。另外,工程技术人员与持证人数相同的工程也由 2009 年的 8 座增至 2015 年的 13 座,工程技术人员达到完全上岗状态。但目前的技术人员还仅限于初级证书,如若使沼气工程较高要求的产业化发展,还需进一步加强技术人员等级培训,提升技术人员的工程工艺知识、管理能力。



n 为工程持证上岗人数。数字中逗号前后为表示方式的不同。

n is the number of certified workers. Number the comma means different styles of the number.

图 6 2009 年(a)和 2015 年(b)沼气工程持证上岗情况统计

Fig. 6 Statistics of certified workers of biogas plant in 2009 (a) and 2015 (b)

3 结论与建议

6 年期间,“首都蓝天科技”、“生物燃气关键技术研究”与“科技示范”等工程项目,农村沼气培训活动以及农村能源、沼气建设等各项经费支持,北京市农村沼气各方面发展成效显著。2009 和 2015 年分别对北京市周边农村沼气工程的实时调研,对比分析所调查的 20 座沼气工程:由于 2003 和 2011 年沼气

工程规模分类的变化致使所调查工程由大中型为主降为中小型为主。工程原料以猪粪为主,其类型与地区养殖产业关系紧密。太阳能等新型技术发展迅速,但仍需不断拓展应用。工程沼渣沼液分离配套设施完善,但因原料种类,无法达到有效分离。工程技术人员持证上岗情况不断改善,多数工程不存在技术人员缺乏状况,但还仅限于初级证书。

结合以上分析和结论,提出以下建议:

1)分析沼气工程规模现状,应多注意工程规模分类的不同,不能盲目根据工程规模判断工程发展状况。

2)沼气工程建设要尽量以规模化养殖场为基准,充分结合地区养殖产业优势,选择原料以及保证原料充足稳定,另外拓展原料来源,充分利用废弃物,包括畜禽粪便、生活垃圾、秸秆、工业有机废水等。

3)加大新型增温技术使用。进一步推广使用太阳能冬季保温,并鼓励引导使用地源热泵或其他加热方式与太阳能相结合,促进沼气工程生态可持续发展。

4)因此,沼肥利用方式在不断促进沼渣沼液分离利用的同时,应考虑后期商品肥产业链的完整性;根据工程原料类型以及当地养殖实际情况,考虑固液分离利用的可行性,合理实现沼肥高值利用。

5)全面开展面向技术人员的高层次培训。开展实用技术培训,推进岗位素质培训,造就工程高等级的产业培训骨干。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,2014
National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing:China Statistics Press 2014
- [2] 张野,何铁光,何永群,李婷婷,秦芳,苏利荣,李忠义,胡钧铭,韦彩会. 农业废弃物资源化利用现状概述[J]. 农业研究与应用,2014(3):64-67
Zhang Y, He T G, He Y Q, Li T T, Qin F, Su L R, Li Z Y, Hu J M, Wei C H. Overview of agricultural waste resource utilization[J]. *Agricultural Research and Application*, 2014 (3):64-67 (in Chinese)
- [3] 顾树华. 沼气工程产业化发展的正确途径[J]. 中国建设信息, 2007(2):59-61
Gu S H. The correct road map for industrialization of biogas development under the policy support [J]. *Information of China Construction*, 2007(2):59-61 (in Chinese)
- [4] 李颖,孙永明,李东,袁振宏,孙晓英,许洁,董仁杰. 中外沼气产业政策浅析[J]. 新能源进展,2014,2(6):413-422
Li Y, Sun Y M, Li D, Yuan Z H, Sun X Y, Xu J, Dong R J. Analysis of biogas industrial policy in China and foreign countries[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2014, 2(6):413-422 (in Chinese)
- [5] 中华人民共和国农业部. 中国农村能源年鉴(2009—2013) [M]. 北京:中国农业出版社,2013
Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *China Rural Energy Yearbook (2009—2013)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013
- [6] 王宇欣,苏星,唐艳芬,邹永杰. 京郊农村大中型沼气工程发展现状分析与对策研究[J]. 农业工程学报,2008,24(10):291-295
Wang Y X, Su X, Tang Y F, Zou Y J. Status analysis and countermeasures of large and medium scale biogas plants in Beijing rural areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(10):291-295 (in Chinese)
- [7] 唐雪梦,陈理,董仁杰,庞昌乐. 北京市大中型沼气工程调研分析与建议[J]. 农机化研究,2012,12(3):206-211
Tang X M, Chen L, Dong R J, Pang C L. Survey analysis and advice on large and medium size biogas plants in Beijing[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012, 12 (3):206-211 (in Chinese)
- [8] NY/667-2003 沼气工程规模分类[S]. 北京:中国农业出版社,2003
NY/667-2003 Classification of scale for biogas engineering[S]. Beijing:China Agriculture Press,2003
- [9] NY/667-2011 沼气工程规模分类[S]. 北京:中国农业出版社,2011
NY/667-2011 Classification of scale for biogas engineering[S]. Beijing:China Agriculture Press,2011
- [10] 崔小年. 城郊生猪养殖业发展研究:以北京市为例[D]. 北京:中国农业大学,2014
Cui X N. Study on suburban pig industry development: A case study of Beijing[D]. Beijing:China Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [11] Su Y, Tian R, Yang X H. Research and analysis of solar heating biogas fermentation system [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 11:1386-1391
- [12] Akbulut A. Experimental investigation of a farm scale biogas reactor aided ground source heat pump system[J]. *Energy Education Science and Technology*, 2012, 29:353-366
- [13] Hassanein A M, Qiu L, Juntong P. Simulation and validation of a model for heating underground biogas digesters by solar energy[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82:336-344
- [14] Wang X L, Chen Y Q, Sui P. Efficiency and sustainability analysis of biogas and electricity production from a large-scale biogas project in China: An emergy evaluation based on LCA [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 65:234-245
- [15] Vázquez-Rowe I, Golkowska K, Lebuf V, Vaneekhaute C, Michels E, Meers E, Benetto E, Koster D. Environmental assessment of digestate treatment technologies using LCA methodology[J]. *Waste Management*, 2015, 43:442-459
- [16] Møller, Henrik B, Hansen J D, Sørensen, C A G. Nutrient recovery by solid-liquid separation and methane productivity of solids[J]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007, 50(1):193-200
- [17] Ford M, Fleming R. *Mechanical Solid-liquid Separation of Livestock Manure Literature Review* [M]. Ontario: University of Guelph, 2002
- [18] Sutaryo S, Alastair J W, Henrik B M. Anaerobic digestion of acidified slurry fractions derived from different solid-liquid separation methods [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 130:495-501
- [19] Bauer A, M H, Hopfner-Six K, Amon T. Detailed monitoring of two biogas plants and mechanical solid-liquid separation of fermenting residues[J]. *Journal of Biotechnology*, 2009, 142:56-63