

集中式沼气能源站与农村粪污资源化利用设计方案研究

张伟捷¹, 王艳¹, 李芳德¹, 李争争²

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 华阳国际工程设计股份有限公司 上海分公司, 上海 201101)

摘要: 针对目前农村粪污在循环资源化利用方面的不足, 论述了在农村中建立集中式的粪污 (包括人、禽、畜) 收集与输送系统、建立村级集中式的沼气发生池以及集中式沼气能源站的重要性、必要性和可操作性, 就目前中国农村能源使用的种类和方式及粪污处理的现状进行了汇总性介绍, 尤其是针对其存在的问题进行了深入的分析, 并结合示例论证, 指出了其改进的方向。指出在农村振兴和美丽乡村建设中, 应结合自身的特点和优势, 大力对可再生能源 (尤其是沼气资源) 进行开发和利用, 这样既可以减轻全国对常规能源需求的压力, 也可以同时解决由于对粪污处理不当而造成的农村的环境负担。在农村建立集中式沼气能源站以实现粪污资源化利用, 对农村能源的合理利用、农村的厕所革命和美丽乡村的建设将起到重要的积极作用。

关键词: 农村; 集中式; 沼气能源站; 粪污; 资源化

中图分类号: X71; F323.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4407(2021)01-220-08

Schematic Research on Centralized Biogas Energy Station and Resource Utilization of Excrement in Rural Village

ZHANG Weijie¹, WANG Yan¹, LI Fangde¹, LI Zhengzheng²

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei 056038, China;

2. Shanghai Branch, CAPOL International & Associates Group, Shanghai 201101, China)

Abstract: In view of insufficient recycling resource reutilization of rural excrement, importance, necessity and practicality of building-up centralized collecting and transmission system of excrement (including human, poultry and livestock), building-up a centralized biogas generating tank and centralized biogas energy station in a rural village is expounded in this paper. Sorts of energy and means of utilization, status of excrement treatment in rural area nowadays have been introduced collectively. Especially, deep analysis on its existing problems have been carried out and improving direction has been pointed out with an example study. Making full use of characteristics and advantages of rural area, vigorous developing and utilizing renewable energy resources (especially biogas resource) are suggested in rural revitalization and beautiful countryside construction. In this way, not only the nationwide shortage of conventional energy resources is relieved, but also the environmental problems because of the improper treatment of excrement can be solved. Building-up a centralized biogas generating tank and centralized biogas energy station in a rural village has an important positive effect on utilization of excrement, reasonable utilization of energy, toilet revolution, and beautiful countryside construction in rural area.

Key words: rural village; centralized; biogas energy station; excrement; resource utilization

1 中国农村能源使用现状

1.1 中国农村状况简介

截至 2017 年年底, 中国共有行政村 53.3 万个, 村庄户籍人口 7.56 亿, 常住人口 6.75 亿^[1-2]。各地区村庄规模及人口信息详见《中国城乡建设统计年鉴 2017》^[2], 全国平均一个行政村包含 4.6 个自然村, 有些地区自然村规模较大, 也可能存在被分隔而分属于不同行政村的情况, 如天津地区平均一个行政村包含 0.997 个自

然村^[2]。自然村大多为 600 人以下的小村落 (占比 71%, 2016 年统计^[3]), 每村平均约 276 人, 以行政村计每村平均约 1 267 人^[2]。

1.2 农村能源使用现状

对于农村地区能源的使用, 国内缺乏较新且全面的统计信息, 但农村生活能源的格局除部分北方地区推行“煤改气”“煤改电”外, 总体变化不大, 农村地区能源应用近况见图 1。

第一作者简介: 张伟捷, 教授, 研究方向为建筑能量系统研究。E-mail: zhangweijie_5@sina.com

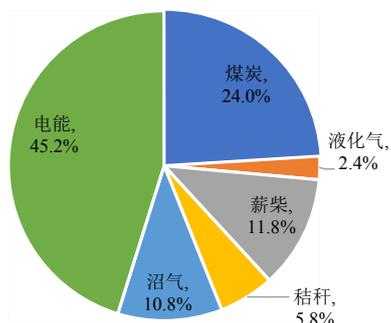


图1 农村用能结构分布^[4-5]

农村地区电能、煤炭、秸秆等能源消耗较多。其中北方地区煤炭与秸秆、薪柴的使用比例高于南方，是因为其冬季采暖主要使用这三种能源。以前对生物质能源的使用多为用自家炉灶进行秸秆的直接燃烧，近年来逐渐推行生物质能源高效利用，以原来农作物秸秆的直接燃烧逐渐转变为“一村一厂”生产秸秆生物质颗粒燃料并配以专用燃烧炉具(热效率可达 60% ~ 70%)来进行使用^[5]。中国农村地区沼气总量约为 123 亿 m³^[4]，折合标准煤 883.59 万吨。沼气的使用分户用小型沼气池与集中式沼气工程两种，户用沼气池常需要专业人员进行维护和清理，每年至少由专业人员清掏两次，通常使用两年以上就会变得效率低下。而废弃的沼气池还存在毒、臭、爆炸等安全隐患，因此各地区目前不再着力推行建设户用沼气池。

农村地区生活能源消费量约占全国(2016 年生活能源消费量 5.4 亿吨标准煤)的 61% (由文献 [1] 和 [4] 的数据计算得出)。虽然近年来天然气基础设施持续建设，但在全国农村的普及率平均仅为 27.00%^[2]。在农村地区完全普及天然气，不但相关基础设施建设周期长、投资巨大，而且在能源应用的策略和思路上也不尽合理。

1.3 农村能源利用中存在的问题

农村地区生活用能中商品能(煤炭、液化气、电能)占比约 46%，这类能源属于常规能源，虽然使用起来方便，但在广泛使用中存在着总量不足、能源使用不尽合理、由于基础设施薄弱而导致输送受限等问题。在电力使用方面，2016 年全国电力生产 6.14 万亿千瓦时，其中火电占 72.24%^[1]，虽然燃煤发电目前能达到“清洁燃烧”，在末端的使用也属于清洁能源，但煤炭能源的清洁化不只在燃烧和末端使用，从开采、运输到堆放，还有煤矸石、煤渣等的处置，都存在需要解决的污染问题。近几年北方地区“煤改电”“煤改气”的推行效果不尽如人意，冬季取暖用户面临不同程度的气荒、电荒，商品能供应问题难以在短期内得到缓解。在农村地区如果实行散煤的直接燃烧，不仅能源利用效率低下，排放也不受约束，以至造成村落及周边空气环境的污染^[5]。

从统计数据^[1-2, 4-5]中可以看出，农村地区可再生能源利用率仍然很低。在东北三省、宁夏、青海、西藏的农村地区，薪柴和秸秆资源丰富，使用比例才 50% 左右，大多靠农作物秸秆、薪柴、家畜粪便的直接燃烧，热效率不足 15%^[5]。南方的上海、江苏、浙江的农村地区，商品能消耗均超过 70%^[5]，人们对于需要加工利用的生物质能的使用意愿不高。其他，如在太阳能的利用方面大多是以太阳能热水器的应用为主，但对冬季采暖来说，因北方冬季气温过低，且太阳高度角较低，辐射保障率不高，太阳能采暖整体利用效果较差。

农村地区有大量的生物质能源可以利用，但商品能(煤、天然气、液化石油气、电)的便捷性极大降低了农户使用生物质能的积极性，导致商品能整体负担加重。农村生物质资源主要有禽、畜、人的粪污以及秸秆、薪柴等，对这些资源的不当处置也形成了生物质垃圾或空气污染源，以致有关方面在“乡村振兴规划”中对此提出了约束性的指标，到 2022 年禽畜粪污综合利用率要比 2016 年提高 18%^[6]，用以指导农村地区加强对生物质能的应用。

2 中国农村粪污处理现状

农村地区秸秆、薪柴等固体生物质资源便于转运、加工和利用，而粪污资源的利用多以散户的形式制作肥料以还田或配合户用沼气池生产沼气作为生活、取暖用能源。由于农村劳动力人口外流，各分散农户用粪污制作肥料以还田，在操作上较为困难。户用小沼气池由于缺乏有效的维护和管理，大多处于闲置状态。这使得各农户的粪污不能得到有效地回收利用，还给农村地区生态环境造成负面影响。规模化养殖户的禽、畜粪污也需要大量的人力和物力对其进行收集、转运、分解(制沼气和肥料)的工作，在现实中也难以得到高效和持续的保证。

2.1 农村的粪污量

当前农村地区的厕所改革主要是将旱厕改为水厕，其各户产生的粪污由各户用储粪罐暂作收储，以待后续处理。成人每天粪污量约 1.5 千克，以农村地区常住人口 6.75 亿人估算，人员每天粪污量约 100.5 万吨。当前农户粪污处理方式有两种：一种是作为农家肥施用在自己田地里，另一种是作为污水排到村域附近河流中或污水处理设施处。

据全国畜牧总站调查，2017 年全国大约有 38 亿吨禽畜粪污排放量，其中大约 40% 的粪污没有得到有效处理和利用^[7]。粪污量与粪污排泄源直接相关，不同时期、不同统计口径的统计排泄量均有差异，一般可按照排泄源进行估算。表 1 为文献 [7] 给出的部分种类禽畜粪污的日排放量，折算出全国每日猪、牛、羊、禽类粪

污排泄量约为 742.9 万吨。

表1 畜禽的日排泄量[7]

畜禽类型	猪	牛	羊	禽类
日排泄量	5 kg/头	30 kg/头	3 kg/只	0.15 kg/羽

2.2 农村粪污处理现状

根据国家卫健委统计,在进行农村改厕项目的地区,其痢疾、伤寒和甲肝发病人数分别下降了 35.2%、25.1%、37.3%,粪一口类传播疾病的发病率由 37.5/10 万人下降到 22.2/10 万人^[8]。近些年全国各省农村地区卫生厕所的普及率从 1993 年的 7.5% 提升至 2017 年的 81.7%^[4,8]。总体上来看,南方地区农村卫生厕所的普及率远大于北方。吉林省农村地区的卫生厕所数量为 3 463 万户,普及率为 81.5%,为北方地区各省之最,南方大部分省份的农村地区均有 90% 以上的普及率^[4]。虽然各地农村的改厕取得一定成效,但由疾病防控局统计数据可看出,各农村地区粪便的后续无害化处理率仅为 60.5%^[8]。

当前农村厕所革命的出发点和着力点多在厕所的改造上,农村“厕所革命”常见改造形式如图 2 所示,而对于排泄物后续的处置关注较少。目前农村地区有六种卫生厕所类型:三格式、双瓮式、沼气池式、粪尿分集式、完整水冲式及卫生公厕。这六种厕所的用、集、处置均在用户侧,粪污为用户自行消解,通过氧化塘、地下土壤渗滤、高效藻类塘法、生物滤池法、无动力地理式生活污水处理装置等处理至排放标准,向环境倾泻或取出粪渣回田^[9]。不同的厕所类型,无论是双瓮式还是三格式以及其他的收集方式,都是对排泄物进行发酵分解。三格式粪污处置方式由于其技术要求低、适用范围广、应用成本低的特点而被广泛应用于中国农村各地的改厕行动中。

农村地区粪污资源的后续处理包括直接还田、腐熟堆肥、制取沼气等方法,原则是对粪污进行减量化、无害化及资源化处理。上述各种处理方法中能同时最大限

度实现“三化”的就是收集粪污进而制备沼气资源的方式。最具代表性的是采用“生活污水净化沼气池”的技术,该技术将污水中有机物进行厌氧发酵制备沼气,实现废弃资源的资源化,净化后的中性(pH 值=7)水可用于灌溉,各地区净化池的数量详见文献 [4]。

要在农村地区实现美丽乡村,必须推行厕所革命,并实现粪污资源化的综合利用,解决农户实施改厕的后顾之忧,提高村落粪污的综合处理能力。因此建议设置村内集中的无动力式排污的管道系统,减少各农户在粪污收集及后续处理上投入的时间和精力,形成统一的集中式的人、禽、畜的粪污收集与输送系统,建立村级集中式的沼气发生池以及集中式沼气能源站,将粪污转化为村内可利用的能源和肥料,经过一系列处理环节后,实现生活污水(工业污水要求自行独立处理,严禁与生活污水混流)达标排放或进行农田灌溉,使村落内粪污资源再利用体系更加合理、便捷、高效和可靠。

2.3 农村粪污资源化

在自然村中建立统一的集中式的人、禽、畜粪污收集与输送系统,建立村级集中式的沼气发生池以及集中式沼气能源站,是目前在农村实现粪污无害化、资源化和资源化利用的最佳方式。该方式可结合集中式沼气工程将人禽畜粪污变废为能,规模化的沼气工程经过对粪污进行提纯、压缩可制取甲烷含量大于 90% 的生物质可燃气。不同粪污资源所能产生沼气的的能力不同,表 2 为通过行业专家反复试验测定,得出在不同温度条件下不同种类粪污经过 60 天发酵后的产气量^[10]。小规模村镇生产沼气主要用于本村的能源使用,大型养殖场或农场生产生物质天然气还能以此盈利。

由文献 [4] 可知,农村各地区沼气生产中,集中式沼气工程占总沼气池产气量(123.75 亿立方米)的 21.15%。而农村地区粪污资源(仅计算表 2 中第 2~6



a. 户用双瓮式处理粪污

b. 户用三格式处理粪污

c. 改造后的户用厕所

注: 图片 a、b、c 分别来源于新浪网、健康无忧网、四川新闻网, 网址分别为 <http://news.sina.com.cn/c/2018-03-01/doc-ifyrzinh0771485.shtml>、<https://mts.jk51.com/tushuo/8776855.html>、<http://local.newssc.org/system/20180509/002417339.htm>。

图2 农村“厕所革命”常见改造形式

表2 不同种类粪污的沼气产量

单位： m^3/kg 干物质含量

温度	人	猪	牛	羊	鸡	马、驴、骡
20℃	0.26	0.25	0.18	0.18	0.29	0.2
35℃	0.49	0.42	0.3	0.3	0.49	0.34

列排泄源的粪污)可制取的沼气的量约为 1 684 亿立方米,约为当前沼气利用量的 13.7 倍,可以替代 1.21 亿吨标准煤的热量,占农村地区生活总用能的 36%。

2.4 农村粪污资源化中的问题

目前仅北京、上海、新疆生产建设兵团三个地区的农村广泛采用集中式大型沼气池生产沼气,其他地区则大多使用户用沼气池,通过分散的户用形式制取沼气,通过几十年沼气池推广的经验和教训证明:分散、小型、户用的沼气生产利用模式不适于中国的农村地区^[4, 10-11]。解决农村地区有机废物最好的途径就是实现其资源化和能源化,应该以村为单位建设集中式的沼气工程,实现便捷、高效和可靠地收集、处理人、禽、畜的排泄物,提高粪污综合利用率和运行管理水平,降低农户学习、使用和维护的成本。

3 农村粪污集中化利用

近年来,随着“乡村振兴”和“美丽乡村”建设的不断深入开展,农村居民的生活水平不断提高,生活环境不断得到改善。一些地区强力推行村村通电、村村通(天然)气,有相当一部分农村已经实施了“厕所革命”(旱厕改水厕),并在一部分农村地区仿照大中城市的做法,建立了污水处理设施。

这些做法初衷都是好的,但由于缺少更深一层的全盘考虑,在实施的过程中也遇到了一些问题和困难。譬如,由于农村村中用户密度低、村村间隔较大,村村通(天然)气的经济性相当突出,加之全国本就气源紧张,所以村村通(天然)气的目标最终很难实现。虽然很多村中已经实施了“厕所革命”,但大都是采取一家一户分散收集和暂时储存粪污的方式。在农村地区建立集中污水处理设施的合理性有待商榷,更合理的途径应该是在村中设立集中的粪污收集、输送、汇集的管路系统,设立村级集中的粪污储存和沼气发生的设施,在各村中建设独立、集中的沼气入户的输配管路系统,以实现粪污可持续的能源化利用。

在中国北方法定冬季集中民用供热的农村地区,各村的沼气和农作物秸秆资源主要用于冬季民用采暖(设立集中的能源站和集中供热管路系统);而在非法定冬季集中民用供热的农村地区,各村的沼气和农作物秸秆资源可用于该村居民常年炊事等所需的燃料。这样做既极大缓解了全国(常规)能源供应紧张的问题,又极大地

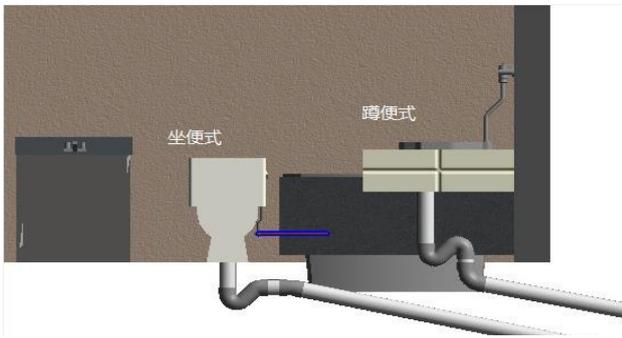
解决了农村污染废弃物的处理问题。

3.1 集中收集与输送系统

农村中的粪污资源可分两大类:一类是禽畜粪污,另一类则是村中的人员粪污。关于禽畜粪污,由于当前农村地区人口流失,种植业逐渐以机械化为主,每户单独圈养牲畜的情况逐渐减少,多以村内养殖场的形式统一饲养猪、羊、鸡等。自 2018 年起实施的《环境保护税法》开始对这些养殖场的粪污征收税费,多数养殖场开始将粪污收集系统作为其配套设施进行建设,大大方便了粪污资源的汇集利用。关于人员排泄的粪污,该类粪污多存在于村中各户或公共厕所,呈点状分散式分布,不易收集,需要另行设计集中式收集系统。两类粪污应设置集中式收集系统,方便粪污的收集、处理、再利用以实现其资源化。

图 3a 为居民可按自家的需求选择的两种类型的卫生器具(图中左边为坐便式,右侧为蹲便式),卫生器具排污(水)管道的坡度设计为 0.02 (最小 0.012),蹲便器加“S”型存水弯,部分坐便器内部自带“S”弯,在排污(水)管加“P”型存水弯,两者均是为了防止排污(水)管内异味传至室内。每户排污(水)管末端连接一个瓷体,容量为 5—10 天的人员粪污排泄量(南方 $3 \text{升} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$;北方 $2 \text{升} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{日}^{-1}$),并通过隔油池与污水干管连接,这样做是为了防止村内干管管路出现故障,或系统抽取不及时造成的粪污堵塞或污水倒流^[12]。接户管最小设计管径为 150 毫米,设计坡度为 0.007。对管径与坡度的要求是为了保证排污管道具有足够的过流断面,因为随着气温降低,管道内油脂会凝结、附着在管内壁,长期黏着会缩小过水断面而影响排水管道稳定运行。图 3b 表示户外干管的敷设要求,户外干管须埋在最大冻土深度(通常北方较深,如南京 9 cm、北京 66 cm、沈阳 148 cm)以下,且与建筑、树木间隔 1.5 m 以上,具体可参考城镇排水管网设计施工标准进行建设。

村中生活污水管网的建设,首要的是管网设计与管材的选定,其次是准确按照设计进行规范施工。为了便于雨水处理及粪污收集利用,建议采用雨、污分流制,即生活污水通过一套封闭式系统进行收集,雨水通过明渠或暗渠(暗渠相对于明渠,水质不易受外界影响,蒸发损失量小,运行维护工作量少,但投资通常会比明渠高出 10% ~ 30% 不等)排走。图 3b 为明渠示意图,一般采取路边沟的形式。污水管路采用无动力收集,即以管网系统中管道的坡度降形成污水重力流(管道坡度应大于 0.3%)。个别地势不满足要求的村落,收集点可设置排污泵抽取管道的生活污水。管网的设计、方案论证、



a. 厕所排水管示意图



b. 村路边雨污分离沟渠示意图

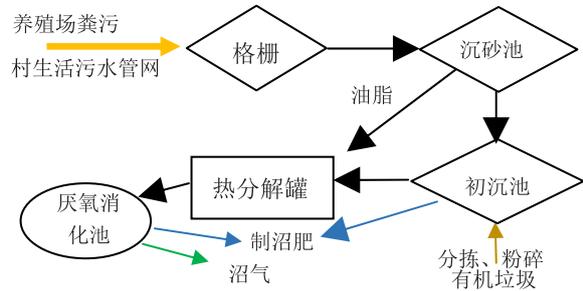
图3 村内粪污排水系统

管材选择、施工工艺等可参照相关技术规范和已有城镇小区工程实例,在此不一一列举。

3.2 村级沼气池工艺与主要设备

以自然村落内粪污为资源的集中式沼气(池)工程在中国已有实施的案例,其主要处理流程见图4,村中建立生活污水管网,专门收集村内人员粪污资源,养殖场粪污设立单独管道直通集中式沼气池,两者均经格栅以过滤可能包含的杂质,以保护后续处理设备的正常运行。沉砂池相当于二次过滤,将过滤出的油脂送入热分解罐内参与酸化反应,并起到储存缓冲的作用。将村中以厨余垃圾为主的有机垃圾通过日产日清的形式收集至村沼气站,经过分拣、粉碎送入初沉池中,在初沉池与前述粪污过滤物混合并做一次分离,将不易发酵的污泥静置出来,制作有机肥。在热分解罐中调节各配料比例并进行预热,再送入厌氧消化池中进行发酵以制取沼气,制取沼气后残留的沼液和沼渣可以通过回收处理来制沼肥^[9,13]。

所制取的沼气可供应厂内部分工艺过程的耗能,其余经过干燥、脱硫进入储气罐进行中转,通过户用储气罐或村中供气管网输送至用气终端,在北方地区还可考虑设立燃气锅炉房或热电联产设备生产电能与热能供生活和冬季采暖使用。



注:黑色箭头为厌氧工艺环节;彩色箭头为沼气工程物料的输入与输出。

图4 村集中式沼气工程工艺流程图

图4所示的沼气工程既可消解村中粪污(可同时考虑村户的厨余垃圾,将其收集并运至沼气站,经粉碎工艺将其注入沼气生产系统)的污染,使其实现资源化和能源化利用,同时承担起村级能源站的角色,生产和分配沼气资源。集中式沼气(池)工程的关键在于厌氧消化工艺,需要根据具体村落原料特性设计进料方式,选择合适的厌氧消化器,主要设备形式有完全混合式厌氧反应器(CSTR)、升流式固体反应器(USR)、升流式厌氧污泥床(UASB)、颗粒污泥膨胀床(EGSB)等。虽然可选择的形式不同,但工艺过程基本相同,即从图4的热分解阶段开始,通过复杂有机物(经过滤沉淀后的粪污污泥)的水解与酸化,转化成挥发性脂肪酸和醇类为主的中间产物,进而完成产氢和乙酸化的过程,最后阶段则是甲烷菌群利用前述过程生成的乙酸、氢气和二氧化碳以生成甲烷。另外需要注意过程中温度的控制(高温 $50 \sim 55^{\circ}\text{C}$ 、中温 $35 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 为宜、低温 $18 \sim 25^{\circ}\text{C}$)、碳氮比的控制(C/N 适宜厌氧阶段 $10 \sim 20$ 、产气阶段 27)、酸碱度(pH 值 $6.5 \sim 7.5$ 为宜)以及干物质浓度的控制等^[9,13],在此不做详述。

4 村级集中式沼气能源站

在农村地区持续产生且存量巨大而又难以有效处置的就是农作物秸秆和人禽畜粪污(还有村户的厨余垃圾),将其作为可再生资源 and 能源而加以充分循环利用,并克服我国农村沼气发展存在重建建设轻管理的局面,是农村地区乃至我们整个国家的必由之路。农作物秸秆可通过设立“一村一厂”的方式生产生物质颗粒燃料,以供农户生活与取暖之用;粪污的分散化处理,在其收集、运输、净化、达标排放等环节均存在一定的困难和问题。所以农村粪污资源的处理和利用应结合当前美丽乡村建设所提倡的“厕所革命”,建立起自然村域范围的集中生活污水排污管路系统,集中引入村级集中沼气池。村级集中沼气池同时吸纳村中养殖场的粪污资源以及全村的

有机垃圾(多为厨余垃圾,集中收集,经粉碎后注入沼气池),并建立集中式能源站利用所生产的沼气和农作物生物质颗粒燃料,产生电能和热能以作为村内居民生活及冬季采暖的能源使用。

4.1 能源站主要设施

农村地区以农业生产为主,必然会产生大量的农作物秸秆、棉籽壳、稻壳等农作物废弃物,这些农作物废弃物绝不是“废物”,而是资源,均可对其实行资源化再利用。切实可行的途径是配备生物质燃料颗粒机,集中处理村中农作物废弃物,生产成生物质颗粒燃料,实现能源站的能源补给(与沼气能源并行利用),增强村中能源的自给保障率。村能源站的沼气工程承担村中生活粪污、养殖场禽畜粪污及村中厨余垃圾的处理,以制备沼气,沼气可输送至各农户以供村中农户生活炊事用能,沼气资源富裕的地区还可以配备沼气发电机组生产电力。在中国北方地区因气候原因,冬季气温较低,而温度又是沼气生产过程中需要控制的因素,温度过低,会使沼气池产气效率大为降低,但这都是可以克服解决的技术问题,如可以通过沼气或生物质颗粒燃料热水锅炉、太阳能光热(西北地区农村尤其适合)、沼气发电余热等,以外部热源的形式实现对沼气池的增温;可在沼气池设施外部施加保温材料(研究指出如果使用聚氨酯发泡材料作为保温层,200毫米是沼气工程配置保温层的最佳厚度^[14])、挖防寒沟、将发酵系统埋于地下(利用土壤的热惰性保温)等措施来实现对沼气池的隔热保温^[15]。

4.2 能源分配与使用

目前农村的实际情况和存在着的几个突出问题严重阻碍着“乡村振兴”和“美丽乡村”的建设:一是农村厕所需要改革,粪污需要妥善处理;二是农村的秸秆需要妥善处理;三是农村的垃圾(特别是厨余垃圾)需要妥善处理。但这些急需得到妥善处理的问题,到目前均未得到很好的解决。此外,如果按照现有的模式,以提供常规能源(煤、电、天然气)来实现农村居民生活水平的不断提高,将使中国的全民常规能源总能耗急剧上升而达到难以为继的程度。我们不能对农村中存在着的大量的得天独厚的可再生资源 and 能源(不对其进行再生利用就是废物和负担)视而不见,不能将对农村的废物处理与对农村的能源供给分割开来考虑,应该将其合二为一进行综合考虑和集成考虑,用一套集中系统同时解决两大问题,获得一举两得或一举三得的效果。即便粪污等能源总量不足,也先把村中的废弃物基本处理掉了,也算是一得,况且我们提供了多少可再生能源,就相当我们节约了多少常规能源,又算一得。我们文中提出的思

路和方案正是出于这一目的,在一整套集成的系统(包括几个分系统)中同时解决了三大问题:厕所改革和粪污的有效处理与可再生能源利用的问题;农村中农作物秸秆的有效处理与可再生能源利用的问题;农村不与城市争抢常规能源的问题。这一思路只有在自然村中,实行村级集中的系统形式,才能做到安全、高效、可靠地运行。因为南北方地区的差异,能源制备与生产后分配和使用上有所不同,此处提出一种能源利用的建议。

南方地区的自然村可配备上述沼气工程(包括处理村中的粪污和厨余垃圾)、生物质颗粒燃料加工厂及村级集中能源站以处理生物质废物并生产能源,通过建立村级沼气输配管网系统送至每家每户,和生物质颗粒燃料一同供居民生活用能使用,村民家中可配备“气固两用灶”(已有相关专利产品问世),对于距离村落较远的居民点或其他不便铺设管道的地区,可优先使用生物质颗粒燃料,或使用罐装沼气(经提纯压缩后与天然气成分相近)供生活使用。在北方地区因冬季天气寒冷有采暖需求,在非供暖季时,可如南方一样分配使用,并将多余沼气存储在储气罐中,当供暖季时,在村中能源站统一使用沼气锅炉和生物质燃料锅炉制备采暖用热水(集中式锅炉热效率为80%~90%,而户用灶具、热水锅炉的热效率仅为10%~30%^[5])。当能源供应不足时,可考虑太阳能辅助,或者用常规清洁能源加以补充。

5 示例分析与论证

现以河北某村落为例,论述村中集中式沼气能源站实施的具体措施。简述拟在村中设置的生活污、废水(包括粪污、洗涤、餐厨污水)无动力收集系统的形式,管道系统后端连接村级集中式沼气工程以生产沼气,将所生产的沼气与村中农作物秸秆制成的生物质燃料一起提供给村级集中能源站进行能源的生产和分配,供村民生活与冬季取暖所用。其他村落的建设可参照此例的方法进行具体的分析和确定,有条件的地区可以实现污、废分流以提高能源转化利用效率。

5.1 村落概括

图5为根据村落布局建模的简图,该村落共有332户,1486名村民。2016年,村内各养殖场养猪共计883头,禽类年存栏量为7.062万羽,年产各类农作物(玉米、小麦、棉花)约1200吨。据测算,村内人与禽畜年产粪污总量分别约为800吨和5500吨。该村距离石家庄市约35km,属华北平原分区、冀中地层最南部地质,主导风向为西北风,地势自西北向东南倾斜,海拔55~58m,坡度为千分之二,地势较为平坦。

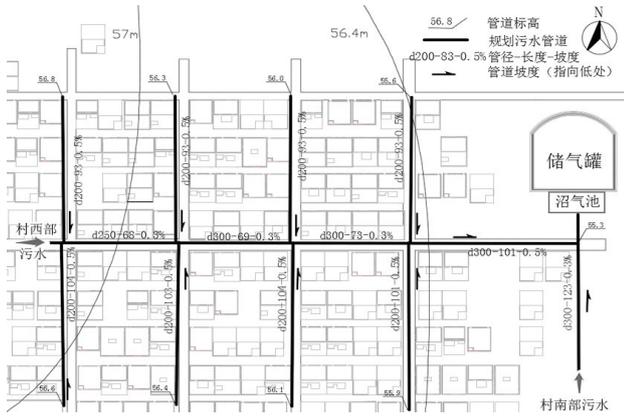


图5 该村东北部污水管网规划局部示意图

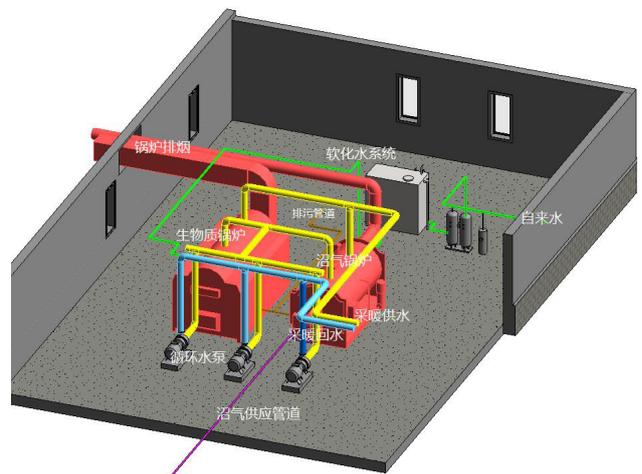
5.2 村排污系统布置

村落东侧为村落地势较低处, 当地冻土层深度为 56 cm, 整个管道系统布置在地下 0.5 ~ 1.5 m 左右, 可防止管道冬季冻结而影响污物排泄顺畅。粪污收集依靠重力自流的无动力排污系统, 村沼气站前为系统最低位置管段, 各横向管段为排污系统主干管, 每条主干管承接管路附近民居粪污, 各户通过户内排污管道排向室外排污支管(坡度 0.02), 通过支管就近排入干管(坡度 0.005), 干管之间汇流后送至村中汇集点, 通过图 4 工艺流程(可根据实际情况进行调整)制取沼气并送入储气罐进行贮存。具体各管段位置、坡度即粪污流动方向示意如图 5 所示, 村中养殖场在东北侧, 禽畜粪便可通过专设的管道直接输送至沼气池。另外村中各户的厨余垃圾经过分拣、运送至村沼气池前经预处理后注入。

5.3 粪污资源沼气利用

影响集中式沼气工程的因素很多, 建设集中式沼气工程实现专业化运营可以将影响沼气反应过程的温度、pH、TS(干物质含量)等各项反应的指标控制在较优水平, 而且集中化工程可以实现多种原料配比使用。该村日收集粪污量约 8.3 吨, 可配备中型沼气池(即日产沼气 500 m³ 的厌氧消化装置及相关工艺设备)。该村冬季平均气温为 -6.2℃, 会影响厌氧发酵过程, 建议配备一套太阳能增温系统, 沼气工程的制气、储气设施距离村民居住区边缘约 70 m, 可直接铺设集中沼气管网给村民供气, 按户均生活用沼气 1 m³/天来计算, 并考虑能源站本身的消耗, 每日仍能累积约 100 ~ 250 m³ (视工艺、资源、环境不同而波动)的沼气经提纯后压缩进入储气罐。

该村南侧有闲置厂房可在秋收后加工生物质颗粒燃料, 图 6 为该村能源站中冬季集中供热热水锅炉的配置及该村东南部集中供热系统的局部示意图。站内配备沼气热水锅炉与生物质热水锅炉各一台, 两套锅炉分别燃烧沼气和生物质颗粒燃料; 生活用气可使用用户储气罐



a. 村能源站供热锅炉房配置



b. 村东南部供热管网平面局部示意图

图6 村冬季供热系统热源及热网的示意图

的形式, 或配建供气管道等设施(约 50 万元左右), 供气管路可参照图 5 明装或地埋敷设。该村每年可制备沼气体积约 22.96 万 m³ (其中有机垃圾年转化沼气体积为 2.15 万 m³), 可替代 14.91 万立方米天然气; 村秸秆收集量约 1 143.8 吨, 经加工折耗可替代 636.9 吨散煤, 两者合计可减少使用常规能源约 618.3 吨标准煤。

6 结语

中国农村地区生活能源消费量约占全国的 61.96%, 农村能源使用中商品能占 46%, 部分南方地区占比已超过 70%, 且在全国范围呈增长势头, 使全国的商品能供应紧张, 加剧了中国的能源安全隐患。传统生物质能源在农村地区虽然也有使用, 但缺乏统一的认识和统筹的规划, 缺少能源策略的优化、方案的优化、系统的优化。为了大力节省常规能源和进一步改善环境, 农村地区应该改变思路, 优先重视当地的生物质能源, 提高其可再生能源的使用比例, 将商品能作为补充或应急之用。

随着乡村振兴政策的推进, 农村地区水资源、卫生

情况、人居环境等方面的改善已成为现今阶段农村发展的要务。农村各地区卫生情况差异较大，粪便无害化处理率仅为60.5%。2016年实施生活污水处理的行政村仅占全国的20%，2017年乡、镇实施生活污水处理的比例分别增长19.04%、16.09%，农村各地区粪便处理率为60.5%。较低的处理率难以保障农村地区的卫生健康。

本研究创新性地提出：农村与城市相比，具有不同的特征（资源特征、人口特征、经济特征、地域分布特征等），农村不应仿照城市建立大型污水处理厂的做法，应当有大局观和整体感，并本着因地制宜的理念，实事求是地做出综合、集成、合理、注重长远的规划，一般以自然村为单位，通过无动力收集系统集中收集粪污，免除各农户独自处理的麻烦，使“厕所革命”更加顺畅地进行，实施集中式沼气工程（原料为村中粪污和厨余垃圾）配以村中农作物秸秆加工而成的生物质燃料，可以有效地将难以处理的生物质垃圾转化为生物质能源，较之前分散的、非集成化的应用，可以做到更加便捷、安全、高效地为农户的生活及取暖提供清洁、可再生的能源，为在全国范围内更好地实施节能（常规能源）、减排（碳排放），打下了坚实的基础。☒

参考文献：

- [1]国家统计局. 中国统计年鉴2018[M]. 北京：中国统计出版社，2018.
[2]中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴

- 2017[M]. 北京：中国计划出版社，2019.
[3]中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴2016[M]. 北京：中国计划出版社，2018.
[4]国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴2018[M]. 北京：中国统计出版社，2019.
[5]清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2016[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2016：7-99.
[6]中共中央 国务院印发《乡村振兴战略规划（2018—2022年）》[N]. 人民日报，2018-09-27（1）.
[7]尹芳，杨智明，张无敌，等. 畜禽粪污综合利用对土壤肥力和持续农业的影响分析[J]. 中国沼气，2019（3）：75-79.
[8]我国积极推进“厕所革命”农村改厕工作取得显著成效[EB/OL].（2017-11-28）. <http://www.nhc.gov.cn/jkj/ss5899/201711/fd1aef3ede64420ba88e495d5deec3b.shtml>.
[9]祝祥. 农村污水低成本生态处理系统试验研究[D]. 泰安：山东农业大学，2016.
[10]张无敌，刘士清，周斌，等. 我国农村有机废弃物资源及沼气潜力[J]. 自然资源，1997（1）：67-71.
[11]徐慧，韩智勇，吴进，等. 中德沼气工程发展过程比较分析[J]. 中国沼气，2018（4）：101-108.
[12]DB22/T5001-2017. 农村户厕改造技术标准[S].
[13]张辰. 城镇污水处理厂污泥厌氧消化工程设计与建设[M]. 北京：化学工业出版社，2015：6-57.
[14]熊昌国，谢祖琪，刘建辉，等. 沼气工程高效升温保温影响因素的试验研究[J]. 西南大学学报（自然科学版），2012（11）：117-124.
[15]王亚静，张弛，高春雨，等. 我国北方地区沼气工程冬季增温保温技术研究进展与展望[J]. 中国沼气，2017（3）：93-99.

（责任编辑：保文秀）

（上接205页）

度建设，如设置监督网站和主动接受媒体舆论监督等。

5 结语

综上所述，现阶段我国农村环境污染形势严峻，网络化治理既是治理体系现代化的应有之义，也是环境利益相关者多元化的必然选择。农村环境保护和治理需要多主体、多层次、多方面的合作。基于此，本文运用网络治理理论，解构我国农村环境污染的治理困境，从治理理念、多元主体、网络治理结构以及运行机制等方面分别提出完善对策。总而言之，文章强调要在政府主导下协调各治理主体共同绘制农村环境网络治理的蓝图，期待农村环境在多元主体通力合作下能够得到有效改善。☒

参考文献：

- [1]李建琴. 农村环境治理中的体制创新——以浙江省长兴县为

- 例[J]. 中国农村经济，2006（9）：63-71.
[2]陈振明. 公共管理学：一种不同于传统行政学的研究途径[M]. 北京：中国人民大学出版社，2003.
[3]刘波，王力立，姚引良. 整体性治理与网络治理的比较研究[J]. 经济社会体制比较，2011（5）：134-140.
[4]张康之，程倩. 网络治理理论及其实践[J]. 新视野，2010（6）：36-39.
[5]范云海. 流域水环境网络治理模式研究[M]. 北京：科学出版社，2017.
[6]李咏梅. 农村生态环境治理中的公众参与度探析[J]. 农村经济，2015（12）：94-99.
[7]周永坤. 权力结构模式与宪政[J]. 中国法学，2005（6）：3-15.
[8]陈秋红，黄鑫. 农村环境管理中的政府角色——基于政策文本的分析[J]. 河海大学学报（哲学社会科学版），2018（1）：54-61.
[9]黄森慰，唐丹，郑逸芳. 农村环境污染治理中的公众参与研究[J]. 中国行政管理，2017（3）：55-60.

（责任编辑：张海艳）