

西南山区农村生物质能有效利用模式及其效益分析 ——以户用沼气生态庭院模式为例

Effective use of bio-energy and its benefits in mountainous rural areas in Southwestern China: the case of the Biogas Courtyard Model

郜慧^{1,2} 周传斌¹ 王如松¹ (1.城市与区域生态国家重点实验室/中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 2.信阳师范学院城市与环境科学学院, 信阳 464000)

摘要 农村生物质能比较分散、廉价和易得性等特点, 决定了其在广大农村地区发展的现实可能性。有效利用生物质能是提高农民收入、改善农村家庭生活条件的重要决策。武隆县生物质资源丰富, 以薪材、秸秆为辅以煤炭为主要生活能源, 能源利用效率仅为 8%。为了提高能源利用效率、改善农民生活条件, 武隆县启动了户用沼气“一池三改”生态庭院工程, 沼气池建设与改厨、改厕、改圈同步实施。本文通过对武隆县农户的调查和走访, 从经济、生态和社会三方面分析户用沼气生态庭院模式对有效利用生物质能的特点和功能。沼气厌氧发酵池作为整个模式中生物质回归补偿的重要环节, 实现了物质能量流从传统生物质利用模式单向线性向闭合循环的转变。研究结果显示, 户用沼气生态庭院模式的内部收益率为 24.8%, 大于基础利率 10%, 经济效益明显; 年平均产沼量可以替代 3.55t 薪材、4.07t 秸秆和 3.02t 煤炭, 由此可以分别消减 4.26t、4.21t、1.77t CO₂ 排放量, 对应分别减少 22.28kg、21.49kg、7.54kg 氮的损失。与传统生物质能利用模式相比, 户用沼气生态庭院模式降低了家庭妇女的劳动机会成本。因此, 可以得出结论, 武隆县户实现生物质能有效利用的户用沼气生态庭院模式, 调整了农村能源利用的形式, 缓解其对生物质资源的压力, 并且改善环境经济条件和健康水平。

关键词 有效利用; 生物质能; 效益; 户用沼气生态庭院模式

免责声明 本文仅代表作者个人观点, 与中国 21 世纪议程管理中心、中国可持续发展研究会及联合国均无关。

Disclaimer: This brief was submitted through the Administrative Centre for China's Agenda 21 (ACCA21), Ministry of Science and Technology, China, and the Chinese Society for Sustainable Development (CSSD). The views and opinions expressed are those of the author(s) and do not necessarily represent the views of, and should not be attributed to, the Secretariat of the United Nations, the ACCA21 or the CSSD. Online publication or dissemination does not imply endorsement by the United Nations. For further information, please contact Mr. Sun Xinzhang (sunxzh@acca21.org.cn)

1 前言

中国农村地区人口众多, 在经济持续发展过程中正面临着能源与环境问题的双重挑战, 再生能源的开发利用越来越受到人们的重视。生物质能作为唯一可以转化为气、液、固 3 种能源形态的可再生资源, 是绿色植物通过叶绿素将太阳能转化为化学能而贮存在生物质内的能量, 以其产量巨大、可储存、碳循环等优点已引起全球的广泛关注。生物质能源种类较多, 从原料来源的角度看, 生物质能源可分为农业生产废弃物和加工剩余物、薪柴和林业加工剩余物、人畜粪便和能源植物等几类[1, 2]。虽然目前我国生物质能源消耗较大, 约 15%

[3], 但主要集中在农村, 以直接燃烧为主, 利用水平低[1, 4]。国外学者对南非、埃塞俄比亚和印度等发展中国家农村开展的研究工作表明, 生物质能直接燃烧利用方式, 会对当地自然环境和社会发展带来较大的负面影响[5-7], 不仅造成生物质能源的浪费, 而且燃烧中释放的 CO 和颗粒物易导致妇女和婴幼儿患呼吸系统疾病[8, 9], 妇女和儿童需要花费大量的时间去捡拾薪材、农作物秸秆等生物质燃料, 从而被剥夺了上学和读书的权利[10]。沼气技术开发近年来在国内迅速发展起来, 以大中型沼气工程技术和小型能源—生态组合技术为代表[11], 沼气净化和提纯技术是未来沼气发展的至关重要

的环节。国内关于发展生物质能源的效益研究主要集中在环境效益和经济效益两方面[12]，但定性阐述居多，定量分析嫌有。

中国西南喀斯特山区石漠化现象、水土流失问题等生态问题突出，人口增长和土地贫瘠使得当地农村地区能源供需矛盾突出，农民生活用能中人均商品能源的消费水平低，以就地获取生物质能直接燃烧为主，利用水平较低，造成对当地生物质资源的浪费，对环境构成直接威胁。本研究以重庆武隆县创建国家级生态县为契机，通过实地调研和农户问卷调查等方法，了解当地农村生活能源消费情况，分析户用沼气生态庭院模式对武隆县能源利用影响的特点和功能，并选取内部收益率、CO₂ 消减量、减少氮损失量和妇女投入的时间机会成本为指标，分析该生物质利用模式产生的经济、生态和社会效益，旨在分析沼气工程对传统生物质能源的替代程度以及其复合效益，从而促进武隆县农村能源发展和可再生能源开发利用。

2 研究区概况

武隆县位于重庆市东南部，处乌江下游，在武陵山与大娄山结合部，长江右岸支流乌江下游峡谷区境内有喀斯特世界自然遗产和仙女山、天生桥、芙蓉洞等国家5A级旅游景区。全县辖12个镇、14个乡，面积2901.3平方公里。武隆县山地多，平地少，农村人口居住分散。大部分农村地区现代化程度不高、交通不发达，而优质能源的供应需要建设大量的基础设施，成本很高。武隆县农村能源消费结构是以薪材+秸秆+煤的混合型结构，其中柴薪为79%，秸秆13%，煤5%，电及其他占3%。武隆县农村能源消费结构极不合理，农村能源的资源优势没有得到充分发挥。农村能源消费结构中直接燃烧薪柴、秸秆等一次性生物质能的比例过高。薪柴的大量砍伐严重破坏了森林生态环境，破坏了生物多样性生存的平衡条件，造成严重的水土流失，引起山体滑坡，造成地质灾害。薪材和秸秆等生物质能源的使用率极低，导致大量畜粪便资源和秸秆资源浪费的同时，大量畜粪便

随意堆放和田间秸秆废弃物的直接燃烧，造成农村的二次面源污染严重，导致生态和人居环境的进一步恶化，不利于当地农村能源和农业经济的可持续发展。

武隆县作为重庆市重要的生态涵养区和旅游景区，正在积极创建国家级生态县和绿色能源示范县，力图将境内丰富而独特的生态资产转化为经济生产力，促进城乡统筹发展。以户用沼气为纽带的“一池三改”生态庭院模式，为武隆县开发利用农村生物质能找到了出路。充分利用本地农村生物质资源，生产优质廉价的绿色能源，满足农村生活用能及偏远地区的用电，既节省了基础设施建设成本，又改善了农村生态环境，为农村经济社会环境和可持续发展提供了契机。

3 数据和方法

3.1 数据的获取

本文数据主要来源于实地调查以及相关资料的收集。实地调查采取以走访、问卷调查为主，典型调查与随机调查相结合的方式。本文所涉及的农户日常能源消耗（如生活能源类型与数量、做饭烧水时间、捡柴时间等）、工程成本收益以及农户生活水平等方面的数据，由向农户和相关政府管理负责人发放调查表来获取。调查工作于2012年9月至12月开展。全县能源、环境问题由武隆县农村能源办公室提供相关资料，并配合现场调查。武隆县气候、土壤、社会经济发展水平、土地利用等方面的数据由该县社会经济发展公报、年鉴和其他统计文件。

3.2 研究方法

3.2.1 经济效益计算

本文采用内部收益率（internal rate of return, IRR）计算沼气工程的投资效率来表征其经济效益。IRR表示资金流入现值总额与资金流出现值总额相等、经济净现值（Net Present Value, NPV）为0或者成本效益为1时的折现率；IRR也包括投入的机会成本。如果IRR值等于投资机会成本，该项目即被认为实现了利润，经

济可行可以实施。本文中，沼气工程主要是政府投入，根据社会资本折现率，基准收益率定为 10%，高于银行贷款利率，其计算公式如下：

$$IRR = i_1 + \frac{|NPV_1|}{|NPV_1| + |NPV_2|} \times (i_2 - i_1) \quad (1)$$

式(1)中 IRR 为财务内部收益率；NPV 是经济净现值，NPV 1 为与最低折现率 i_1 对应的接近于 0 的最小的正值；NPV 2 为与最高折现率对应的 i_2 接近于 0 的最大的负值。

3.2.2 生态效益计算

户用沼气生态庭院模式的生态效益用 CO2 减排量和氮磷钾营养物质保存量来衡量。沼气 CO2 减排量通过沼气利用和传统生物能源直接燃烧所释放不同的 CO2 量来计算。根据 3 种不同能源替代模式沼气-薪材、沼气-秸秆、沼气-煤炭，利用公式计算，相关参数参考 wang[13] 的研究成果。

$$\delta C_i = C_{BM,i} - C_{BG} \quad (2)$$

式(2)中 δC_i 表示用沼气替代 i 种传统生物能源的 CO2 消减量 (t)； $C_{BM,i}$ 是燃烧 i 种传统生物能源 CO2 释放量 (t)； C_{BG} 表示沼气燃烧 CO2 释放量 (t)； i 表示传统生物能源种类：薪材、作物秸秆、煤炭。

$$C_{BM,i} = B_{M,i} \times C_{cont,i} \times O_{frac,i} \times \frac{44}{12} \quad (3)$$

式(3)中 $C_{BM,i}$ 是燃烧传统生物质能 CO2 释放量 (t)； $B_{M,i}$ 表示生物质能使用量 (t)； $C_{cont,i}$ 是生物质能碳百分含量 (%)； $O_{frac,i}$ 表示生物质能燃烧时的氧化率 (%)，其值可参见表 1。

$$C_{BG} = B_G \times R \times \mu \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

式(4)中 C_{BG} 为沼气燃烧中 CO2 释放量 (t)； B_G 是沼气使用量 (104m³)； R 表示单位沼气的热量值 (0.209TJ/104m³)； μ 为沼气燃烧中单位热量 CO2 排放量 (15.3t/TJ)。

氮保存量利用公式(5)计算

$$N_{BG,i} = M_{BG,i} \times \lambda \quad (5)$$

式(5)中 $N_{BG,i}$ 表示 i 种生物能源被沼气替代后的氮保存量 (t)； $M_{BG,i}$ 为能被沼气替代的生物质能的量 (t)； λ 是传统生物能源氮含量 (见表 1)。

表 1 传统生物质能源特征参数 (%)

生物质能源类型	碳含量	氧化率	含氮率
薪材	45	87	0.63
农作物秸秆	40	85	0.53
煤炭	90	89	0.85

表中数据来源于文献[14]

3.2.3 社会效益计算

本文采用妇女在使用生物质能过程中耗用的机会成本来表征其社会效益，其计算方法参考 Kangawa 和 Nakata[15] 的研究成果。

$$S_B = M \times W_{BOP} \quad (6)$$

式(6)中 S_B 为户用沼气生态庭院模式社会效益 (元)； M 是沼空气能替代的传统生物质能源量 (kgce)； W_{BOP} 表示妇女使用传统生物质能源的时间成本 (元/kgce)。

$$W_{BOP} = \frac{W_{OP}}{E} \times T_B \quad (7)$$

式(7)中 W_{OP} 是妇女时间成本 (元/小时)； E 为单户平均每天能源消耗量 (kgce/day)； T_B 为使用传统生物质能源需要额外支出的时间 (h/day)，包括薪材、农作物秸秆等传统生物质能源的收集和做饭中延长的时间。

4 生物质能不同利用模式物质和能量流特点分析

武隆县传统生物质能(薪材、秸秆、人畜粪尿、厨余垃圾等)直接燃烧或未处理直接排放，其物质和能量流动见图 1，农田生态系统固定的物质和能量通过生物质传递到饲料、农田残余、粮食后，被人类、牲畜以薪材、秸秆燃烧、人畜粪尿无序排放、厨余垃圾乱堆等低水平形

式消耗后，直接或间接地对周边生态环境带来负面影响。此种从资源到废物的单向线性物质和能量流，缺失和忽视了对生态系统（如田地）的反馈，从而带来一系列的能源环境问题。

传统生物质能利用方式影响农户家庭生活环境，如图2所示，捡拾大量薪材和作物秸秆不仅造成生态系统恶化，如土壤荒漠化和耕地退化，而且需要耗费诸多劳动力，主要是家庭妇女和儿童来完成。生物质以薪材和作物秸秆的形式直接燃烧，热效率只有8%[16]。燃烧中释放的CO₂和其他室内空气污染物，容易使农户诱发眼睛和呼吸道系统疾病。人畜粪便和厨余垃圾中氮含量相对较高，其氮含量是作物秸秆的10倍左右，是上佳的有机肥料。传统生物质能利用模式中，人畜粪便、厨余垃圾尚未纳入农村生活能源利用体系，随意排放污染周边水体环境，加剧水体氮累积而导致富营养化，而长期“入不敷出”的土地，因缺乏有机质和营养元素的补偿，面临土壤贫瘠、生产力下降的窘境。

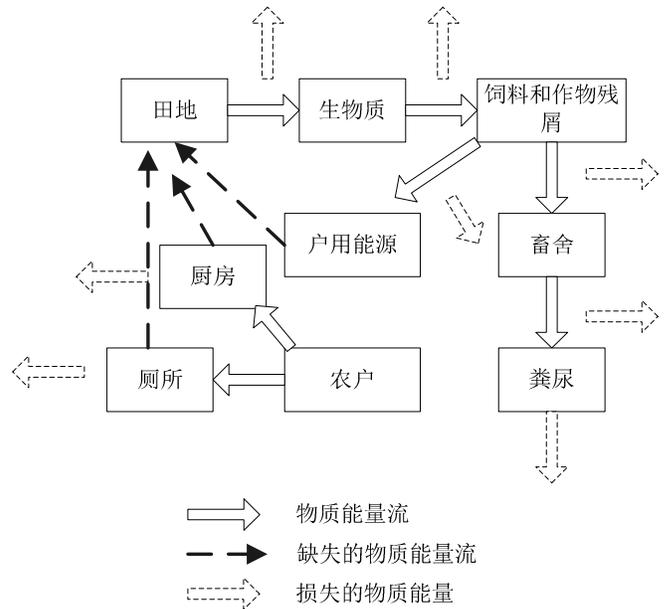


图1 传统生物质能利用中的物质和能量流

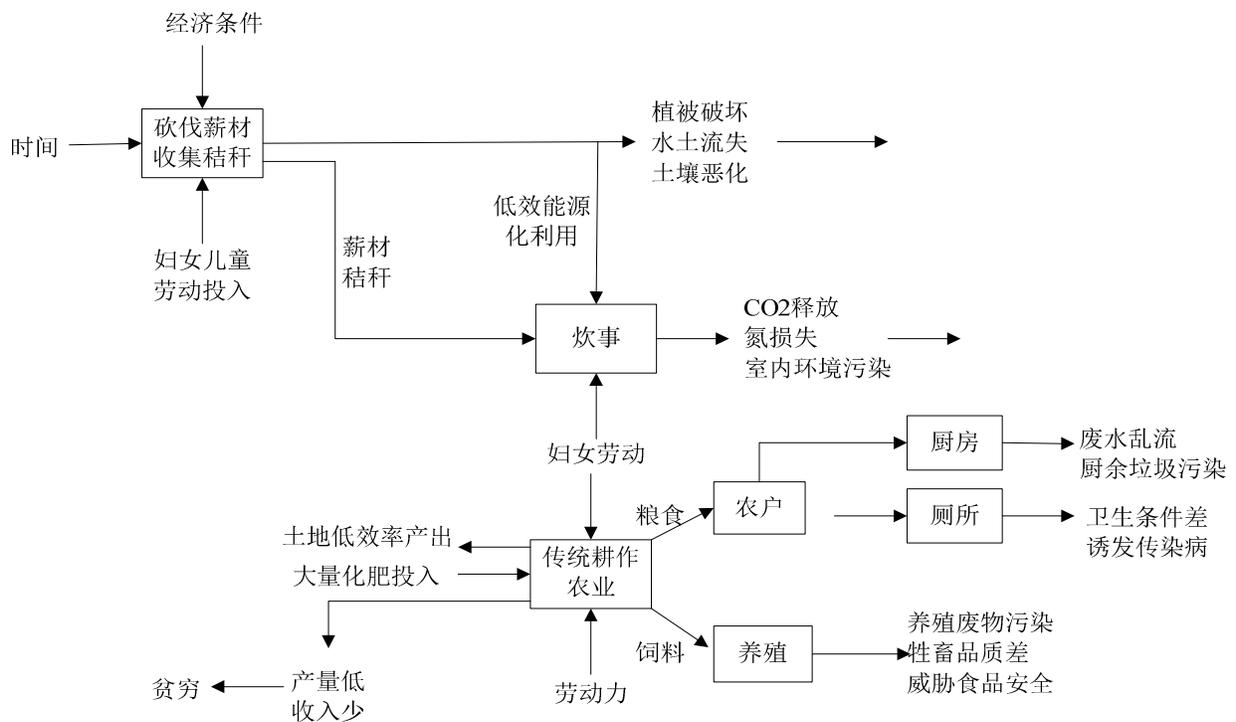


图2 传统生物质能利用方式的生态、社会-经济效益

农村户用沼气生态庭院模式是以项目户为建设单元，把再生能源和有机农业相结合的生态农业模式。它是以生态学、经济学、系统工程学为原理，以农业生产中产生的废弃有机物即人畜粪便和生活污水为原料；以沼气池为纽带，把种植业和养殖业有机结合，在农家庭院通过生物质能转换技术，将沼气池，畜禽卫生圈、卫生厕所和粮、经、果、蔬种植紧密结合在一起。户用沼气“一池三改”生态庭院模式补充了传统生物质能利用模式缺失的物质能量流，生物质能实现了从单向线性到闭合循环的转变（图3），使农业系统内物质多层次利用，能量多级循环。物质能量以沼渣沼液为载体，重新返回产出生物质的土地。这些增补的物质能量流环节，一方面促进了生态系统不同阶段物质利用的联系，保障生态系统的物质-能源效率和经济产出；另一方面，沼气池的建设调节和控制了整个能源系统物质和能量流的平衡。从物理化学角度分析，沼渣沼液作为生态系统物质平衡的负反馈，是维持土地肥力的重要因素。

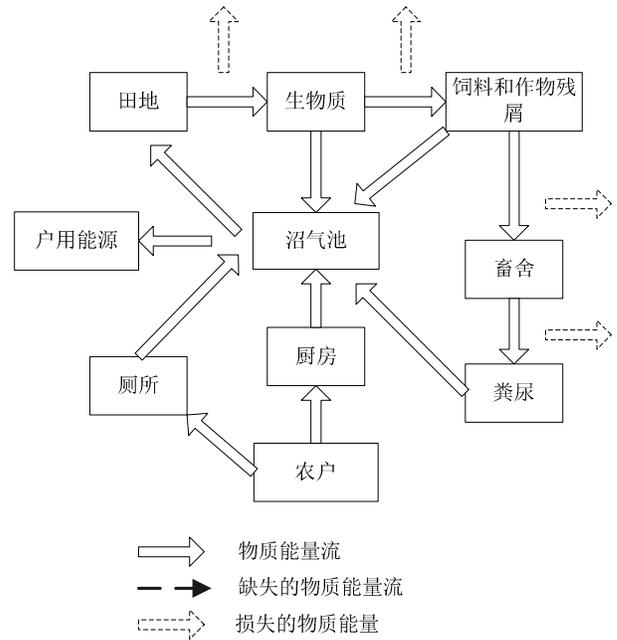


图3 户用沼气生态庭院模式的物质能量流

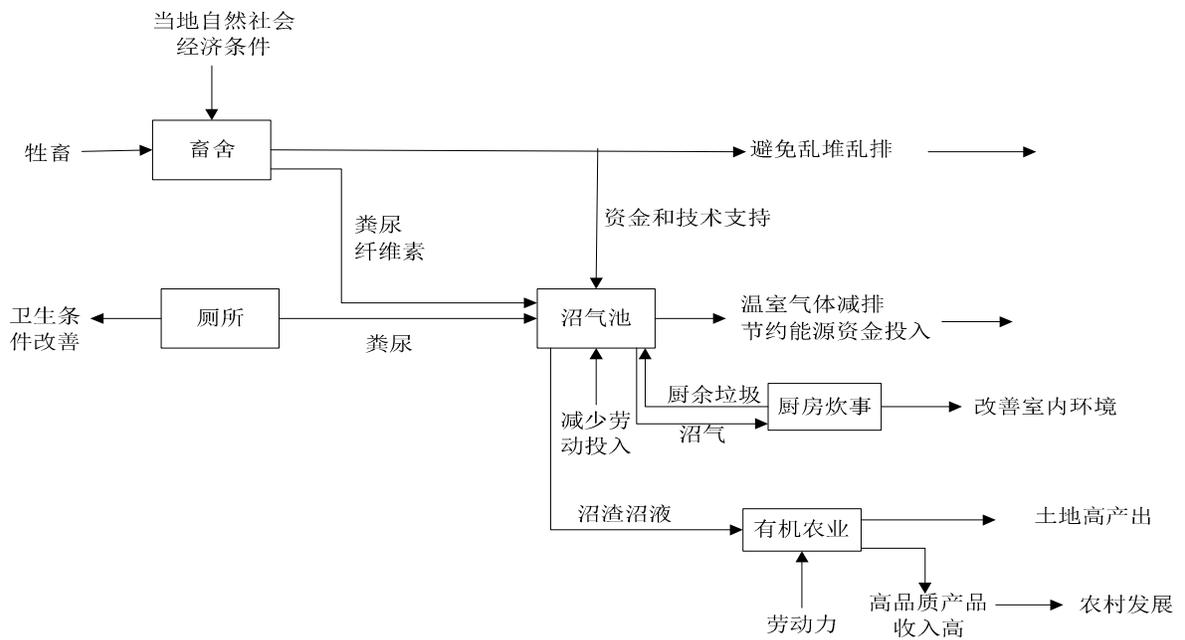


图4 户用沼气生态庭院模式的生态、社会经济效益

户用沼气生态庭院模式的生态和社会-经济效益见图4，该模式畜舍、沼气、厕所、灶灶4配套，将厕所、禽

畜舍建于沼气池上，产生的粪便进入沼气池发酵产沼气用于炊事、照明，沼液和沼渣进入果园、农田，提高农

产品产量和质量。这一模式有效地改善了农村庭院环境卫生,提高厕所、厨房卫生条件,控制疾病传播;所产生的清洁能源沼气,解决农户炊事照明等生活用能问题;减少薪材消耗,保护了森林资源,减少水土流失;人畜粪便经沼气池厌氧发酵无害化处理后,以沼肥的形式回归农田,减少化肥的使用和投入;长期施用沼肥改良土壤、培肥地力,促进了无公害农产品生产;此外,以沼气作为炊事用能,农村妇女从“烟熏火燎”的环境中解放出来,也降低了室内空气污染,提高了空气质量,保障农民身体健康。该模式既解决了农民生活燃料和农村能源问题,而且有助于有限处理农业生产和农村生活废弃物,避免农村环境污染,促进废弃物的无害化处理、资源化利用,改善了农村卫生状况,实现农村地区改善生活和保护生态环境的双重目标。

5 户用沼气生态庭院模式的效益分析

5.1 经济效益分析

据现场走访和问卷调查,武隆县农户建 8m³ 沼气池,年平均产沼气 710m³。依据沼气和薪材的热值、不同灶具的热效率以及薪材的价格,户用沼气生态庭院模式产出的价值以与它等量用能的研究区燃料薪柴的费用替代,参考王家录等[17]研究结果来计算使用沼气的经济效益。计算结果表明,农户每年可以节省 781 元的购薪材的支出,户用沼气生态庭院模式的经济效益见表 2。由于生态庭院模式将常规的畜圈改建成为卫生圈后,畜圈通风透光好,疾病少,养的猪比普通方法喂养周期短,每年可得养殖净收益 900 元。沼渣沼液还田后,每户每年可节约 450.6 元的化肥支出费用。以户用沼气生态庭院模式的使用周期为 15 年,利用公式(1)可以计算出该模式下的 IRR 值为 24.8%,大于基准收益率 10%,说明该模式具有良好的经济效益。

表 2 户用沼气生态庭院模式的费用和效益

成本效益	数值
成本投入	
沼气池、畜禽卫生圈、卫生厕所与厨房改造	4898
综合费用 ^a (yuan/unit) a	
沼气灶具、灶台及管道安装费用 (yuan/unit) ^b	340
沼气池发酵进出料和日常管理人工工资 (yuan/unit) ^c	684
每年灶具维修、配件更换 (yuan/unit) ^d	100
经济收益	
每年沼气产生量 ^e (m ³ /unit)	710
每年沼气替代薪材产生的经济效益 ^f (yuan/unit)	781
每年养猪纯收入 ^g (yuan/unit)	900
每年节约化肥支出 ^h (yuan/unit)	450.6
内部收益率 (%)	24.8

注: a. b. d 数据由武隆县农村能源办公室提供; e. h 数据来源于调查问卷; c. 包括沼气池发酵出料和人场管理人工工资: 一口沼气池按每年进行一次大换料需用工 6 个, 日常生产维护管理平均每月用工 1 个, 每个工日单价按当地每年农民人均纯收入 7633 元, 年平均劳动 200 个工日核算, 每日工资为 38 元, 共 18 个工日, 684 元/年. 口. 户; f 薪材价格 0.34 元/kg; g 当地年人均出栏 1.5 头商品猪, 平均每户 4 人, 每出栏一头商品猪, 平均可以获净收益 150 元, 养殖年增收效益 900 元。

5.2 生态效益分析

单户沼气平均产量为 710m³/year, 可以替代传统生物质能薪材、秸秆和煤炭分别为 3.55t、4.07t、3.02t, 占农户日常能源消耗的 79%、13%和 5%。替代 3 种传统生物质能可以分别消减 CO₂ 排放 4.26t、4.21t、1.77t。相应地, 减少氮损失 22.28kg、21.49kg、7.54kg(见表 3)。

表 3 户用沼气生态庭院模式不同生物质能替换方式下的生态效益

	替代量 (t)			CO ₂ 消减量 (t)			氮保存量 (kg)		
	薪材	秸秆	煤炭	薪材	秸秆	煤炭	薪材	秸秆	煤炭
替代薪材	3.55	-	-	4.26	-	-	22.38	-	-
替代秸秆	-	4.07	-	-	4.21	-	-	21.49	-
替代煤炭	-	-	3.02	-	-	1.77	-	-	7.54

注：表中数据以 710m³ 沼气量为基础计算整理得来。

5.3 社会效益分析

本文通过家庭妇女机会成本的计算来表征户用沼气生态庭院模式的社会效益。农村家庭主妇不仅要从事家庭经济活动（如田间劳作），还要操持家务（做饭、室内保洁、拾捡作物秸秆烧柴等）。根据采访调查结果显示，妇女每天平均花费 0.8 个小时来收集做饭柴草，用传统生物质能柴草烧火做饭要花费 1.5 个小时。调查还发现，妇女每天劳作的时间约为 8 个小时。由此可估算，妇女对家庭收入的贡献率为 30.5% [18]，与传统生物质能相比，表 4 显示了妇女的机会成本。

妇女每年用于传统生物质能的机会成本约占其所创造的家庭经济收入的 41.53%。随着家庭经济收入的升高，妇女消耗的机会成本也会提高 [15]，社会效益会更明显。此外，沼气替代传统生物质能，妇女儿童从繁重的劳动中解放出来用于休息。沼气的利用会减少室内有害气体的产生，利用妇女儿童身体健康 [20]。

表 4 户用沼气生态庭院模式的社会效益

类别	数值
妇女对家庭经济收入的贡献 (yuan/year)	6451.36
妇女的机会成本 (yuan/h)	2.21
妇女使用薪材的机会成本 (yuan/kgce)	1.42
全年妇女使用薪材的机会成本 (yuan/year)	2679.25

6 结论与讨论

随着世界各国化石能源使用的日益减少和对环境问题的日渐重视，开发利用可再生能源已经成为各国能源战略的重要组成部分。我国西南地区喀斯特地貌发育，面临农村能源开发利用与脆弱生态环境保护的双重压力，如生活燃料、动物饲料与耕地有机肥料之间的矛盾。武隆属于丘陵山地，农户大多分散居住，天然气等能源集中供给形式较难实现。而沼气作为清洁可再生能源对农村能源消费结构的改善方面具有举足轻重的作用。本文通过对农户的走访调查和地方政府管理部门人员的访谈，了解武隆县目前农村能源消费组成，基于示范户年产沼气的平均水平，比较分析传统生物质能源利用模式与户用沼气“一池三改”生态庭院模式物质能量流和效益。从经济、生态和社会三方面选择指标来分析该生物质能源有效利用模式的效益，研究结果证明，户用沼气生态庭院模式的内部收益率为 24.8%，大于基础利率 10%，经济效益明显；年平均产沼量可以替代 3.55t 薪材、4.07t 秸秆和 3.02t 煤炭，由此可以分别消减 4.26t、4.21t、1.77t CO₂ 排放量，对应分别减少 22.28kg、21.49kg、7.54kg 氮的损失。与传统生物质能利用模式相比，户用沼气生态庭院模式降低了家庭妇女的劳动机会成本。

尽管武隆县具备自然条件、原料资源和技术支撑等发展户用沼气的优势，但研究调研中发现，当地农民建设户用沼气池的积极性并不高，主要原因有：武隆县地形地势条件复杂，农村户用沼气池建设能力受到交通运输条件限制，造成劳动强度较大和建池成本较高，沼气

池受滑坡等地质灾害破坏后,修复困难;工资性收入仍然是当地农民增收的主要渠道,贡献率达到44%[20],沼气建设带来的经济效益已无明显优势。今后,开辟融资新途径,因此制宜建立合理的中央、地方政府、农户及社会等多元投入机制,将是保障武隆县农村生物质能发展建设的必由之路。此外,沼气后续服务的管理、产业链的衔接、原料的可持续稳定供应都是需要重视的问题,都需要在今后工作中继续研究。

参考文献:

- [1]刘刚,沈镭.中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J].自然资源学报,2007,(1):9-19.
- [2]徐超.江苏省农业生物质能源分布与利用的环境效益研究[D].南京农业大学,2010.
- [3]孙永明,袁振宏,孙振钧.中国生物质能源与生物质利用现状与展望[J].可再生能源,2006,(2):78-82.
- [4]骆仲泐,周劲松,王树荣,等.中国生物质能利用技术评价[J].中国能源,2004,(9):39-42.
- [5]Madubansi M, Shackleton C M. Changes in fuelwood use and selection following electrification in the Bushbuckridge lowveld, South Africa[J]. Environ Manage 2007, 83(4):416 - 26.
- [6] Wolde-Ghiorgis W. Renewable energy for rural development in Ethiopia: the case for new energy policies and institutional reform[J]. Energy Policy, 2002, 30(11 - 12):1095 - 1105.
- [7] Ramachandra T V, Subramanian D K, et al. Domestic energy consumption patterns in Uttara Kannada District, Karnataka State, India[J]. Energy Convers Manage 2000, 41(8):775 - 831.
- [8] Bhattacharya SC, Abdul SP. Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries[J]. Biomass Bioenerg 2002;22(4):305 - 17.
- [9] Jin YL, Ma X, Chen XN, et al. Exposure to indoor air pollution from household energy use in rural China: the interactions of technology, behavior, and knowledge in health risk management[J]. Soc SciMed , 2006;62(12):3161 - 76.
- [10] Kanagawa M, Nakata T. Analysis of the energy access improvement and its socio-economic impacts in rural areas of developing countries[J]. Ecol Econ, 2007, 62(2):319 - 29.
- [11]傅志华,王向阳,王桂娟.构建支持农村生物质能源发展的政策体系[J].经济研究参考,2008,(7):9-24.
- [12]秦涛.中国农村生物质能源发展现状与展望[J].防护林科技,2014,(6):65-66.
- [13]Wang G H. Analysis method on reducing emission of SO₂ and CO₂ by rural energy construction[J]. Trans CSAE, 1999, 15(1):169 - 72.
- [14]Srinivasan S. Positive externalities of domestic biogas initiatives: implications for financing[J]. Renew Sustain Energy Rev , 2008, 12(5):1476 - 84.
- [15]Kanagawa M, Nakata T. Analysis of the energy access improvement and its socio-economic impacts in rural areas of developing countries[J]. Ecol Econ, 2007, 62(2):319 - 29.
- [16]刘建禹,翟国勋,陈荣耀.生物质燃料直接燃烧过程特性的分析[J].东北农业大学学报,2001,32(3):290-294.
- [17]王家录,李明军.花江示范区“一池三改”沼气生态庭院模式经济效益分析[J].贵州教育学院学报:自然科学,2006,17(2):77-81.
- [18] UNDP. Human Development Report 1995[M]. New York: Oxford University Press, 1995.
- [19] Qi XS, Zhang SP, Wang YZ. Advantages of the integrated pig-biogas-vegetable greenhouse system in North China[J]. Ecol Eng , 2005;24(3):175 - 83.

[20]重庆市统计局. 国家统计局重庆调查总队 2010 年重庆市国民经济和社会发展统计公报[R]. 2011.

作者简介:郜慧, 在读博士, 讲师, 主要从事农村人居生态与生态工程研究。联系地址: 北京市海淀区双清路 18 号中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态重点实验室, 邮箱:gaohui8010@163.com