

黄土丘陵区农村节能吊炕的环境经济效益分析

胡莉莉^{1,2}, 牛叔文^{3,4}

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 西安 710054; 2. 陕西省煤矿水害防治技术重点实验室, 西安 710077;
3. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000; 4. 兰州大学西部资源环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 节能吊炕在改善室内热舒适性的同时, 降低农户的经济支出和生态环境的破坏。通过在甘肃庄浪县 2 个村的 6 户农家建造新式节能吊炕, 与 4 户使用传统炕的农户一起进行燃料使用与温度观测记录; 并结合农户用能现状问卷调查, 获取数据, 建立经济计量模型, 对吊炕产生的环境经济效益进行分析与评价; 最后对其推广前景进行展望。结果表明, 高崖韩村吊炕户平均每户每年产生的总环境经济效益为 836.99 元, 下湾村吊炕户平均每户每年产生的总环境经济效益为 919.41 元。若对庄浪县所有农户都推广使用节能吊炕, 全县每年将会产生 7381.58~8108.46 万元/a 的环境经济总效益。节能吊炕具有显著的环境经济效益和良好的推广前景, 是现阶段提高农户冬季取暖用能水平、降低经济支出的有效途径, 对农村用能技术的改进、生态环境的改善、温室气体的减排、具有重要的理论和现实意义。

关键词: 农村; 经济分析; 排放控制; 节能吊炕; 取暖用能; 环境经济效益; 节能减排; 黄土丘陵地区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.029

中图分类号: F323

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0208-08

胡莉莉, 牛叔文. 黄土丘陵区农村节能吊炕的环境经济效益分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(15): 208—215.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.029 <http://www.tcsae.org>

Hu Lili, Niu Shuwen. Analysis on environmental and economic benefits of suspended kang of rural households in loess hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 208—215.

(in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.029 <http://www.tcsae.org>

0 引言

能源是人类生存和发展最基本的物质需求^[1], 而取暖用能在诸多能源需求中占有重要地位。在中国广大农村地区, 炕作为一种常用的取暖设施被农户所广泛使用。但传统落地炕燃料消耗多、热效率低下、炕面温度不均匀、供热能力有限, 不仅室内环境的热舒适性差, 室内空气污染引发的农户健康问题也比较显著。因此, 用支柱悬空的吊炕, 是对传统落地炕进行技术革新的产物。最早形式的吊炕(又称“高效预制组架架空炕”)起源于 20 世纪 70 年代末的中国东北地区, 是一种集炊事和取暖功能为一体的炕连灶技术。直到 20 世纪 90 年代初, 全国范围内才开始了吊炕技术的推广。据相关统计, 截止 2004 年底, 中国农村吊炕的使用数量大致有 19.56 百万铺, 占全国火炕总数的 30%^[2]。

陈荣耀较早就对中国民用炕连灶进行了热性能系统的评价及其测试方法的探讨^[3]。郭继业基于实践经验, 制定出了一套科学使用灶炕与节能的操作管理规范, 为中国吊炕技术的广泛应用提供了理论指导^[4]。张培红等模拟分析了 3 种有着不同烟道结构的火炕提升室内温度的效果, 研究发现室内温度值最高的是吊炕^[5]。端木琳等研究了火炕的热工性能, 并提出了具体的评价方法^[6]。庄智等

不仅对炕的基本传热和烟气流动原理进行了评述, 也对吊炕和传统落地炕进行了区别研究; 并且模拟分析了吊炕的建筑热过程, 研究结果可为相关理论研究和工程设计提供参考^[7]。韩毅和张雪研认为, 人们对房间室内热舒适性的需求可以通过联合采用火炕与火墙一起供暖的方式得到满足^[8]。高翔翔等通过现场实地研究认为, 火炕依然是农村地区解决取暖问题的首要选择; 推广高效节能灶炕是改善传统落地炕存在诸多不足的根本途径^[9]。随着现代科技的快速发展, 将太阳能与传统炕联合使用进行采暖亦成为提高中国农村地区冬季室内热舒适性的有效途径^[10-11], 但许多农户仍承担不了其较高的初期投资费用, 使太阳能技术的应用受到限制, 市场前景目前不是很广阔。此外, 还有大量国内外学者对冬季室内热环境和热舒适性^[12-15]、取暖用能影响因素^[16-19]、取暖设施的改进和节能技术的应用等多方面^[20-23]进行了研究, 但研究视角相对宏观, 区域的针对性不强。

中国黄土高原丘陵地区生活能源特别是取暖用能短缺、经济贫困、生态环境脆弱。驱动该地区生态环境退化的重要因素之一就是农户对生物质燃料的过度消费^[29]。因此, 基于控制或减少燃料使用、减轻农户经济负担、保护生态环境的目的, 对农村地区应用最广的传统用能设施——炕, 进行改进或创新^[24-28], 本文将定点试验选择在黄土高原西部的庄浪县, 建造节能吊炕, 试对农户使用节能吊炕的环境经济效益进行分析, 并对其推广前景进行展望, 提出提高农村农户生活质量水平、保护生态环境的能源战略取向, 以促进农村能源政策的调整、公共服务体系的完善, 从而弥补相关研究的不足。

收稿日期: 2015-03-27 修订日期: 2015-06-25

基金项目: 中国国际科技合作项目(项目编号: 2008DFA62040)。

作者简介: 胡莉莉, 女, 甘肃陇南人, 助理研究员, 博士生, 主要研究方向为环境经济与区域发展。西安 中煤科工集团西安研究院有限公司, 710054。

Email: hুলিলি@cctegxian.com

1 研究区域

位于甘肃省东部的庄浪县属于黄土丘陵沟壑区,其沟壑密布、地形破碎、植被稀疏,是中国黄土高原地区水土流失最严重的地区之一。该县属于大陆性季风气候,年平均气温 8℃,年均降雨量 468 mm。境内海拔在 1 405~2 857 m 之间。2010 年,庄浪县人口密度高达 286 人/km²,农民人均收入不足 3000 元。因其自然条件恶劣、经济基础薄弱、人民生活贫困,成为国家 43 个扶贫开发重点县和甘肃省 18 个干旱贫困县之一。

在庄浪县,取暖期至少 5 个月,取暖用能占家庭生活用能的一半以上,炕和火炉是主要的取暖方式,燃料主要有煤、薪柴、秸秆、麦衣、畜粪、薪草、树枝、树叶等。长期以来,“三料(燃料、饲料和肥料)之争”愈演愈烈,农户生活用能匮乏,薪柴、薪草、秸秆和畜粪的燃烧是造成植被退化、水土流失、土壤贫瘠的重要因素。尽管有 30%以上的修成梯田用于退耕还林,但农户生活能源依然短缺,植被保护工作举步维艰^[29]。

近些年来,随着当地社会经济的发展,煤、电、液化气等商品能源的使用数量逐步增加,但农户为此承担的经济成本也逐渐增多。太阳能、沼气等新能源建设项目在国家政策的指引下得到推广,当地农户的生活能源结构发生逐步转变。但使用廉价、易于获得的生物质能进行炊事和取暖仍然是大多数农户的首要选择。粗放的利用方式、低燃料热效率、得不到保障的取暖用能需求,加之燃料燃烧释放的大量 CO₂、SO₂ 等气体引起的室内空

气污染,降低了农户生活质量水平和生态环境保护的成效。因此,进行节能技术的应用和用能设施的改善,显得十分必要。基于以上考虑,本文正是对节能吊炕这种农村节能设施的环境经济效益及其推广前景进行相关研究的。

2 研究方法

2.1 定点试验

选择庄浪县的高崖韩村和下湾村共 10 户农户作为试验观测点,2 个观测村相关情况见表 1。其中,高崖韩村属于庄浪县新农村建设示范点之一(吊炕户和传统户房屋建筑面积相同),下湾村属于庄浪县旧村改造试点之一(吊炕户和传统户房屋建筑面积略有差别)。在结合两村 100 户问卷调查进行实地调研的基础上,于两村各选择 3 家农户,在每户的居室建造一个新型节能吊炕(与传统的落地炕相比,其底部是用支柱悬空的,炕面和炕底都可散热,热效率比传统炕高出一倍以上^[27]);另外两村再各选择 2 户使用传统土炕的农户家庭作为对比户,即两村共有 10 户家庭作为试验户,其中 6 户为建有吊炕的农户家庭(文中简称“吊炕户”),4 户为依旧使用传统土炕的农户家庭(文中简称“传统户”)。两村各自的 5 家农户房屋朝向一致,房屋面积、炕的面积、建筑用材大致相同,且海拔高度一致,详见表 2。与中国东北、华北地区炕灶相连的系统不同,这里的炕灶是分离的。传统落地炕和吊炕的外观区别、以及吊炕的内部结构图详见图 1。

表 1 2 个观测村情况简介
Table 1 Situation of two villages

村名 Village	海拔 Elevation/m	经纬度 Longitude and latitude	年均气温 Annual average temperature/℃	降水量 Precipitation/m	农民人均纯收入 Farmer's annual net income/元	取暖设施 Heating facilities	燃料 Fuels
高崖韩村 Gaoyahan village	1754	N35°19'16.1" E106°6'30.7"	7	492	2 835	炕、火炉	畜粪、树叶、薪草、玉米梗、薪柴、煤
下湾村 Xiawan village	2021	N35°19'7.5" E106°10'28.1"	7	580	2 305	炕、火炉	麦衣、牛粪、驴粪、薪柴、煤

表 2 观测户对比条件表
Table 2 Contrast conditions of observations

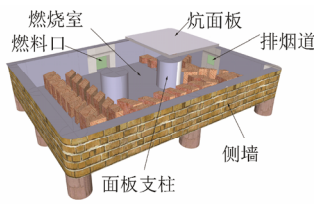
村名 Village	类别 Item	房屋朝向 House orientation	平均每户人口 Average persons per household	面积 Area/m ²						材料 Material					
				炕面 Kang surface	墙体 Wall	门 Door	窗户 Window	屋顶 Roof	地面 Floor	炕面 Kang surface	墙体 Wall	门 Door	窗户 Window	屋顶 Roof	地面 Floor
高崖韩村 Gaoyahan village	吊炕户	坐东朝西	5.3	4.20	51.8	5.7	6.5	36.5	32	草泥板+红砖+水泥	红砖+水泥砂浆	木材	玻璃	木板+草泥+红瓦	瓷砖+水泥砂浆+土
	传统户	坐东朝西	5.5	4.41	51.8	5.7	6.5	36.5	32						
下湾村 Xiawan village	吊炕户	坐北朝南	5.7	4.20	49.42	2.0	3.25	22.1	19.2						
	传统户	坐北朝南	4.5	4.18	47.42	1.76	3.16	22.3	19.4						



a. 传统炕示意图
a. Sketch of traditional kang



b. 吊统炕示意图
b. Sketch of suspended kang



c. 吊炕的内部结构图
c. Internal structure of suspended kang

图 1 传统炕、吊炕的示意图以及吊炕的内部结构图

Fig.1 Sketch of traditional and suspended kang and internal structure of suspended kang

2.2 调查与测量方法

于 2010 年 9 月在高崖韩村、下湾村随机选择 100 家农户进行入户调查, 农户的用能现状通过问卷调查的形式获得。问卷总数为 100 份, 剔除填写内容不全、数据不合理的问卷 18 份, 剩余有效问卷 82 份。问卷涉及内容较多, 例如家庭人口数量、经济收入、教育水平、薪柴和秸秆的收获量、家畜数量、购买商品能源的经济成本、燃料的使用量、不同的燃料种类及其用途、使用节能设施改善室内热舒适性的意愿等。我们一边观察农户用能的行为, 一边对农户所用的燃料进行现场称质量并记录, 获得了大量原始数据。此外, 在两村 10 户试验户的炕面、室内和室外分别安置 S100-ET 和 S100-T 温度智能数字记录仪 (精度为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$), 定点观测温度。温度数据通过感应仪器每隔 1h 自动记录 1 次。对整个取暖期 (自 2010 年 10 月初至 2011 年 3 月底) 进行连续观测, 每个温度智能数字记录仪均记录超过 4000 个的温度数据。在安置前, 在同一环境下对温度智能数字记录仪进行比对, 精度范围均在 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 之内, 仪器之间的记录误差很小。

2.3 模型建立

$$E_x = \sum_{i=1}^n C_i e_{xi} \quad (x=1,2,\dots,m; i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中: 设有 n 种能源、 m 个调查样本 (用户), e_{xi} 表示第 x 个调查样本 (用户) 第 i 种能源用能数量, C_i 为第 i 种能源折标准煤的系数, 则第 x 个样本的用能总量折合标煤为 E_x (kgce) 为:

$$Tc = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n p_i x_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

式中: P_i 为第 i 种能源的市场单价, 即定义中的经济成本系数, x_{ij} 为某一观测户 (或某一地区) 能源消费的实物量, Tc 为该观测户 (或该地区) 取暖用能消费的总经济成本。

$$Ts = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ij} (s_{1i} + s_{2i}) \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m) \quad (3)$$

式中: S_{1i} 为取暖用能消费引起的 CO_2 、 SO_2 等气体排放引发的环境成本, S_{2i} 为采集荒山与荒坡上的薪柴、薪草引发的植被破坏和水土流失引发的生态成本。

3 结果与分析

3.1 能源消费现状分析

庄浪县农村生活能源资源的种类较多, 既包括传统生物质能源中的秸秆、薪柴、薪草与畜粪等, 也有商品能源中的煤炭和电能, 还有清洁能源中的沼气与太阳能。上述能源主要用来炊事、取暖、家电、照明、清洁等。详见图 2。

根据问卷调查数据, 整体来看, 庄浪县农村农户平均生活能源消费量折合标煤为 2 193.64 kg (为便于比较, 统一将实物量折算为标煤), 按问卷调查中两村平均每户常住人口为 5 人来计算, 则农村人口人均能源消费量折合标煤为 438.73 kg; 具体来看, 庄浪县农村农户生活能源消费量折合标煤在 4 531.73~644.36 kg/户之间, 最

高用能水平是最低用能水平的 7 倍多。可见, 不仅庄浪县农村农户的总体用能水平比较低, 而且农户间能源消费的差距也很大。

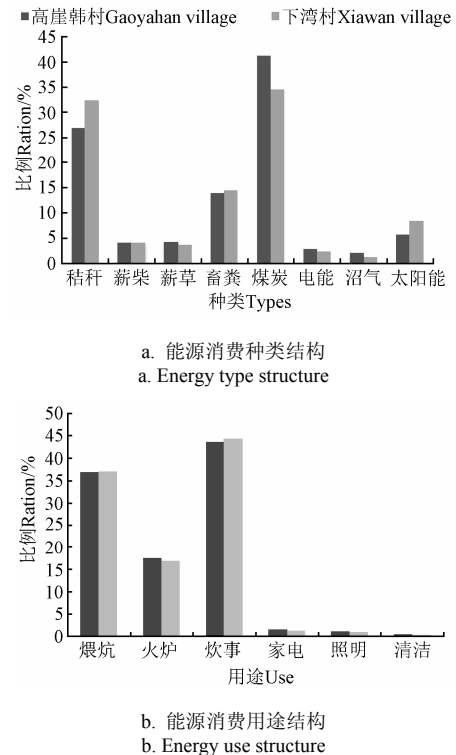


图 2 两村生活能源消费种类结构与消费用途结构
Fig.2 Energy type structure and energy using structure of two villages

从能源消费种类结构来看, 如图 2a 所示, 农户以秸秆、薪柴、薪草、畜粪等生物质能为主的使用比例为 48.52%~53.87%, 煤炭使用比例为 34.39%~41.12%, 而农户使用电能、沼气、太阳能等清洁能源的比例仅为 10.36%~11.74%。由此可见, 在能源消费结构中, 农村传统的生物质能仍占主导地位, 商品能源的使用量也初具规模, 但清洁能源的使用比例仍然很低。说明农村能源资源利用种类应该朝着均衡化、多元化的方向发展, 在减少生物质能使用且不增加农户经济负担的同时, 逐步增大商品能源和清洁能源的使用。

从能源消费用途来看, 炊事、取暖、照明、家电、清洁是庄浪县农村能源消费的 5 类主要用途。如图 2b 所示, 取暖用能 (煨炕和火炉) 所占比例用能比例为 53.6%~54.07%, 炊事用能所占比例用能比例为 43.37%~44.25%, 家电、照明、清洁所占比例用能比例分别为 1.12%~1.34%、0.82%~0.96%、0.21%~0.26%。可见, 主要以煨炕为主的取暖用能在农村能源资源利用方面占 50% 以上的比例, 用能结构不是很合理; 而且除了炊事、取暖这些用于维持农户基本生存需求的用能外, 用于改善农户生活质量和水平的家电、照明、清洁的能源很少。因此, 加快庄浪县农村能源资源用途结构的优化, 是一种必然选择。

因此, 在基于上述共同生活能源消费种类和用途结构的基础上, 我们选择 100 户中能基本代表当地能源消

费现状的 10 家农户作为试验户，重点对两村吊炕户和传统户的取暖期、燃料消耗种类进行更为详细的统计，对燃料消耗量进行了整个取暖期的实地称质量记录，对 10 户试验户的炕面、室内、室外温度进行了仪器自动记录和统计，得到了较为可靠的对比数据（见表 3 和表 4），为后文吊炕的环境经济效益分析提供了依据。

表 3 观测户取暖用能统计
Table 3 Statistics of energy consumption for heating of observations

村名 Village	取暖期 Heating days	类别 Items	重量 Weight	煤 Coal	麦衣 Wheat clothes	牛粪 Cow dung	驴粪 Donkey dung	树叶 Leaves	干草皮 Dry grass	玉米梗 Corn straw	合计 Total
高崖韩村 Gaoyahan village	153	吊炕户	实物量/kg	438.187	—	299.88	644.13	146.88	—	—	868.425
			折标量/kgce	312.997	—	141.243	340.745	73.44	—	—	
		传统户	实物量/kg	452.310	—	477.36	—	—	644.742	920.448	1338.512
			折标量/kgce	323.085	—	224.837	—	—	303.673	486.917	
下湾村 Xiawan village	163	吊炕户	实物量/kg	625.693	500.41	405.341	129.123	—	—	—	956.36
			折标量/kgce	446.933	250.21	190.916	68.3061	—	—	—	
		传统户	实物量/kg	646.36	1219.2	—	968.22	—	—	—	1583.503
			折标量/kgce	461.695	609.62	—	512.188	—	—	—	

表 4 观测户取暖期温度统计
Table 4 Statistics of temperature during heating period of observations

村名 Village	类别 Items	分类 Classification	日均温 Daily average temperature/℃	最大值 Maximum/℃	最小值 Minimum/℃	极差 Range	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation
高崖韩村 Gaoyahan village	吊炕户	炕面	32.5	54.9	16.9	38	6.44	0.20
		室内	5.52	14.11	-3.29	17.4	4.48	0.81
	传统户	炕面	35.0	63.6	12.4	51.2	8.54	0.24
		室内	4.06	14.85	-2.74	17.59	3.89	0.96
	室外		0.17	10.92	-10.28	21.2	5.12	29.88
下湾村 Xiawan village	吊炕户	炕面	45.33	78.53	22.25	56.28	9.9	0.21
		室内	7.32	14.54	2.26	12.28	2.75	0.38
	传统户	炕面	32.29	48.45	19.3	29.15	4.98	0.15
		室内	5.26	14.38	-0.7	15.08	3.05	0.58
	室外		0.17	10.36	-10.17	20.53	4.81	28.94

3.2 经济效益分析

吊炕的经济效益分析，是基于对传统炕和吊炕的经济成本进行对比分析的计算结果上，来评价吊炕所产生的经济效益。在计算取暖用能所用燃料的经济成本时，需要确定各种燃料的经济成本系数。煤炭属于商品能源，根据当地当年的市场现价进行取值，在考虑 2 个观测村运费（高崖韩村：20 元/t、下湾村：30 元/t）的前提下，庄浪县 2010 年煤炭的市场现价为 900 元/t。秸秆、薪柴、薪草、畜粪等属于生物质能源，其经济成本系数根据相关文献[29]提出的能量替代法进行取值。取暖用能所用各种燃料的经济成本系数取值详见表 5。

因此，在获得取暖用能所用燃料的经济成本系数后，结合前文给出的公式（2）和 2 个观测村的实地调查问卷数据，就可以相应计算出 2 个观测村传统户、吊炕户取暖期所用燃料的经济成本，详见表 6。

由表 6 可见，高崖韩村吊炕户取暖期所用燃料的经济

成本是 1 094.8 元，传统户取暖期所用燃料的经济成本是 1 695.9 元，后者比前者高出 601.1 元的经济成本，即高崖韩村农户使用吊炕可以节省 601.1 元的经济支出，这也是吊炕在高崖韩村能产生的直接经济效益。下湾村吊炕户取暖期所用燃料的经济成本是 1 230.2 元，传统户取暖期所用燃料的经济成本是 1 996.7 元，后者比前者高出 766.5 元的经济成本，即下湾村农户使用吊炕可以节省 766.5 元的经济支出，这也是吊炕在下湾村能产生的直接经济效益。

表 5 取暖用能所用燃料的经济成本系数
Table 5 Economic cost coefficients of household energy consumption

项目 Items	煤炭 Coal/kg	秸秆 Straw/kg	畜粪 Livestock dung/kg	薪柴 Fire wood/kg	薪草 Fire grass/kg
实物单位 折价 Unit at a discount/元	0.90	0.66	0.63	0.72	0.59

表 6 2 个观测村取暖期所用燃料经济成本统计
Table 6 Economic cost of fuel during heating period of two villages

村名 Village	类别 Item	煤 Coal/元	麦衣 Wheat clothes/元	牛粪 Cow dung/元	驴粪 Donkey dung/元	树叶 Leaves/元	干草皮 Dry grass/元	玉米梗 Corn straw/元	合计 Total/元
高崖韩村 Gaoyahan village	吊炕户	394.4	—	188.9	405.8	105.7	—	—	1094.8
	传统户	407.1	—	300.7	—	—	380.4	607.7	1695.9
下湾村 Xiawan village	吊炕户	563.1	330.38	255.4	81.4	—	—	—	1230.2
	传统户	581.7	804.98	—	610.0	—	—	—	1996.7

3.3 环境效益分析

吊炕有着较为明显的节能减排效应，它在中国农村的广泛使用能够有效改善当地的生态环境和环境质量。从前文给出的公式（3）可以看出，环境效益的计算涉及两部分内容：一部分是需要考虑由于煤炭、生物质能等燃料的燃烧所产生的 CO₂、SO₂ 等温室气体对大气环境的影响；CO₂、SO₂ 等温室气体的排放因子以及各种燃料的环境成本系数的确定可以根据相关文献[29]给出的标准来确定：温室气体 CO₂ 和 SO₂ 的排放成本分别为 0.1 和 0.945 元/kg，相关计算详见表 7。另一部分是由于采集荒山、荒坡上的薪柴、薪草所引发的植被破坏与水土流失。根据相关学者的研究^[29-30]，草地生态系统在为人们提供重要的生态系统服务价值的同时，还起着维持生态平衡、水土保持，有助水源涵养、防风固沙和土壤改良等重要作用；在陇中黄土丘陵地区，农户每年由于薪草采集引发生态服务价值的损失量大约为 167.6 元/t^[29]。另外，本研究不考虑农户采集薪柴所引发的损失的生态服务价值，由于该研究区域没有成片的森林，农户对薪柴的使用量很少。

表 7 取暖用能所用燃料的环境成本系数

Table 7 Environmental cost coefficients of household energy consumption

类别 Item	煤炭 Coal	畜粪 Livestock dung	薪柴 Fire wood	秸秆 Straw	薪草 Fire grass
CO ₂ 排放因子 CO ₂ emission factor/(g·kg ⁻¹)	1487	1247	1436	1320	1436
SO ₂ 排放因子 SO ₂ emission factor/(g·kg ⁻¹)	13.4	0.67	0.63	0.53	0.52
S _{1i} /(元·kg ⁻¹)	0.161	0.125	0.144	0.133	0.125
S _{2i} /(元·kg ⁻¹)	0	0	0	0	0.168

注：S_{1i} 为取暖用能消费引起的 CO₂、SO₂ 等气体排放引发的环境成本，S_{2i} 为采集荒山与荒坡上的薪柴、薪草引发的植被破坏和水土流失引发的生态成本。
Note: S_{1i} is the environmental cost of household energy consumption by CO₂, SO₂ etc gas emission; S_{2i} is ecological cost by collecting fire wood and grass, and water and soil loss.

因此，在获得取暖用能所用燃料的环境成本系数后，结合前文给出的公式（3）和 2 个观测村的实地调查问卷数据，就可以相应计算出 2 个观测村传统户、吊炕户取暖期所用燃料的环境成本，详见表 8。

表 8 两观测村取暖期所用燃料环境成本统计

Table 8 Environmental cost of household energy consumption in two villages

村名 Village	类别 Item	分类 Category	煤 Coal	驴粪 Donkey dung	牛粪 Cow dung	麦衣 Wheat clothes	玉米梗 Corn straw	干草皮 Dry grass	树叶 Leaves	合计 Total
高崖韩村 Gaoyahan village	吊炕户	CO ₂ 排放量/kg	651.58	803.23	373.95	—	—	—	193.88	2022.64
		CO ₂ 排放成本/元	65.16	80.32	37.4	—	—	—	19.39	202.27
		SO ₂ 排放量/kg	5.87	0.43	0.20	—	—	—	0.08	6.58
		SO ₂ 排放成本/元	5.55	0.41	0.19	—	—	—	0.07	6.22
		总计排放量/kg	657.45	803.66	374.15	—	—	—	193.96	2029.22
		总计成本/元	70.71	80.73	37.59	—	—	—	19.46	208.49
	传统户	CO ₂ 排放量/kg	672.58	—	595.27	—	1214.99	803.99	—	3286.83
		CO ₂ 排放成本/元	67.26	—	59.53	—	121.5	80.4	—	328.68
		SO ₂ 排放量/kg	6.06	—	0.32	—	0.49	0.34	—	7.21
		SO ₂ 排放成本/元	5.73	—	0.30	—	0.46	0.32	—	6.81
		生态服务价值/元	—	—	—	—	—	108.32	—	108.32
		总计排放量/kg	678.64	—	595.59	—	1215.48	804.33	—	3294.04
		总计成本/元	72.99	—	59.83	—	121.96	189.04	—	443.82
下湾村 Xiawan village	吊炕户	CO ₂ 排放量/kg	930.41	161.02	505.46	660.54	—	—	—	2257.43
		CO ₂ 排放成本/元	93.04	16.10	50.55	66.05	—	—	—	225.74
		SO ₂ 排放量/kg	8.38	0.09	0.27	0.27	—	—	—	9.01
		SO ₂ 排放成本/元	7.92	0.08	0.26	0.25	—	—	—	8.51
		总计排放量/kg	938.79	161.11	505.73	660.81	—	—	—	2266.44
		总计成本/元	100.96	16.18	50.81	66.30	—	—	—	234.25
	传统户	CO ₂ 排放量/kg	961.14	1207.37	—	1609.40	—	—	—	3777.91
		CO ₂ 排放成本/元	96.11	120.74	—	160.94	—	—	—	377.79
		SO ₂ 排放量/kg	8.66	0.65	—	0.65	—	—	—	9.96
		SO ₂ 排放成本/元	8.19	0.61	—	0.61	—	—	—	9.41
		总计排放量/kg	969.8	1208.02	—	1610.05	—	—	—	3787.87
		总计成本/元	104.30	121.35	—	161.55	—	—	—	387.20

由表 8 可见，高崖韩村吊炕户排放 CO₂ 和 SO₂ 的量分别为 2022.64 和 6.58 kg/a，两者的排放成本分别为 202.27 和 6.22 元/a，分别占其总环境成本的 97%和 3%。而高崖韩村传统户排放 CO₂ 和 SO₂ 的量分别为 3286.83 和 7.21 kg/a，两者的排放成本分别为 328.68 和 6.81 元/a，分别占其总环境成本的 74.1%和 1.5%。另外，高崖韩村传统户由于铲取薪草所造成的生态成本也较高，为 108.32

元/a，占其总环境成本的 24.4%。由此可见，高崖韩村吊炕户每年要比传统户少排放 CO₂ 1 264.19 kg、SO₂ 0.63 kg；高崖韩村传统户每年由于取暖用能燃烧燃料所造成的环境成本要比吊炕户高出 235.33 元，对环境的影响是比较大的；这也意味着农户若选择使用吊炕，环境效益是明显的。

在下湾村，吊炕户排放 CO₂ 和 SO₂ 的量分别为

2257.43 和 9.01 kg/a, 两者的排放成本分别为 225.74 和 8.51 元/a, 分别占其总环境成本的 96.4%和 3.6%。而下湾村传统户排放 CO_2 和 SO_2 的量分别为 3 777.91 和 9.96 kg/a, 两者的排放成本分别为 377.79 和 9.41 元/a, 分别占其总环境成本的 97.6%和 2.4%。由此可见, 下湾村吊炕户每年要比传统户少排放 CO_2 1520.48 kg、 SO_2 0.95 kg; 下湾村传统户每年由于取暖用能燃烧燃料所造成的环境成本要比吊炕户高出 152.95 元, 对环境的影响亦较大; 这也意味着农户若选择使用吊炕, 环境效益亦较为显著。

综上所述, 在高崖韩村, 选择使用吊炕的农户每年将产生 601.66 元的经济效益, 235.33 元的环境效益, 总共产生 836.99 元的环境经济效益; 在下湾村, 选择使用吊炕的农户每年将产生 766.46 元的经济效益, 152.95 元的环境效益, 总共产生 919.41 元的环境经济效益。截至 2012 年, 庄浪县拥有 8.8192 万户的农业户数, 是一个农业人口众多的农业大县。因此, 若对该县这么多的农业户全部都推广使用节能吊炕的话, 且在现有能源消费结构和燃料价格保持不变的情况下, 庄浪县预计每年将会有 7 381.58~8 108.46 万元的环境经济效益产生, 其中包括每年产生的经济效益为 5 306.16~6 759.56 万元, 环境效益为 1 348.9~2 075.42 万元。以此类推, 若对西北广大农村乃至全国类似区域的农村推广使用节能吊炕, 节能吊炕将会产生巨大的环境经济效益, 不仅对农村生态环境的改善、各种燃料的节省、温室气体的减排有积极促进作用, 也对农村农户经济支出的减少、生活质量水平的提高和身体健康的维护有着切实的保障作用。

4 讨 论

1) 东北地区集炊事和取暖为一体的炕连灶技术并不符合西北当地农村炊事和取暖分开的生活习惯, 因而现有的炕连灶技术并不适宜于在西北农村地区的应用与推广。因此, 针对西北地区炕灶分开的特点, 我们选择庄浪县进行节能吊炕的试验, 节能吊炕是本着遵从农户意愿、经济适用、节能环保、安全可靠、因地制宜、就地取材的原则而搭建, 因其成效显著, 获得当地相关部门和农户的一致认可, 并提出了适合西北农村地区建设炕灶分离型节能吊炕的技术规范, 以便后期推广。

2) 本文重点对节能吊炕的环境经济效益进行计算和评价, 是基于农户角度和社会角度来综合考虑的。在进行经济效益评价时, 主要是基于农户角度来考虑的, 因为节能吊炕的使用可以节省煤炭以及秸秆、薪柴、薪草、畜粪等生物质能源的经济成本, 直接节省农户的经济支出; 且减少生物质能源的采集数量, 不但能减少对生态环境的破坏, 也可以使农户少损失一些机会成本^[29]。在进行环境效益评价时, 从社会角度出发, 节能吊炕有着较为明显的节能减排效应, 它在中国农村的广泛使用能够有效改善当地的生态环境和环境质量; 从农户角度来说, 煤和生物质燃料的燃烧排放的 CO_2 和 SO_2 还会引起严重的室内空气污染, 危害居民特别是妇女和儿童的健康, 节能吊炕产生的环境效益可以有效减缓此现象的发

生, 从而减少了农户用于保持身体健康的成本, 对农户生活质量水平提高意义重大。

3) 节能吊炕的使用产生的环境经济效益必须结合当地农户的用能现状进行分析, 才更具有实际意义和推广价值。由于人力、物力、财力的限制, 仅选择 10 家农户进行节能吊炕与传统炕的对比试验研究, 并及时记录了每户使用燃料的详细状况。为避免这 10 家农户使用燃料的特殊性, 我们之前是对两村农户的燃料使用现状进行随机 100 户的问卷调查基础上选择出的 10 户试验户; 通过对当地的能源消费种类结构和能源消费用途进行的问卷调查, 发现 10 家试验户的能源消费行为是符合当地农村能源消费现状的。因此, 在基于共同的能源消费现状基础上, 节能吊炕具有良好的环境经济效益, 不仅调动了当地农户选择使用节能吊炕的积极性, 也为当地政府拓展其他农村地区节能吊炕的市场应用前景提供了理论和现实依据。

4) 从保护人体生理健康与满足热舒适性要求出发, 人体不能忍受过高的炕面温度, 炕面温度宜在 24~40℃ 之间波动^[31]。本文的温度观测记录表明, 10 户试验户炕面温度大多处于该舒适温度范围之内, 尤以吊炕的炕面舒适性温度较好。且在提高室内温度方面, 吊炕由于是两面散热, 有吊炕的室内温度是优于传统炕的, 这也为分析吊炕的环境经济效益提供了理论支撑。

5) 然而, 节能吊炕改善室内热舒适性的能力毕竟有限, 有必要结合其他能源利用、节能技术(窗体节能技术、墙体节能技术、节能材料、太阳能集热墙、太阳能暖房等太阳能技术)。由于其他节能技术初期投资较高, 建议将节能吊炕节省下来的经济成本用于房屋朝向朝阳改造、住房结构优化、节能建筑材料应用等途径来改善农户室内的热舒适性。此外, 对于使用节能吊炕的农村农户, 国家和地方政府应当给予一定的政策扶持和资金补助, 使节能吊炕与沼气、太阳能建设一起列入农村能源建设的重点。

6) 节能吊炕建造技术简单、建设费用低廉、环境经济效益明显、热舒适度高, 农户接受意愿强烈、推广普及容易。各级相关政府部门应当积极制定各项政策、措施, 进一步宣传和推广节能吊炕的市场应用价值与范围, 使更多的农户受惠于该项技术, 解决农户的取暖需求、改善冬季室内的热舒适性。

5 结 论

1) 在黄土丘陵地区, 农村生活能源消费仍是以传统的生物质能源为主。庄浪县的农村农户间不仅有着较大差距的用能数量, 其能源消费水平也不高, 农户平均生活能源消费量折合标煤为 2 193.64 kg, 人均消费折合标煤为 438.73 kg。能源消费种类结构中, 秸秆、薪柴、薪草、畜粪等生物质能为主的使用比例为 48.52%~53.87%, 煤炭使用比例为 34.39%~41.12%, 电能、沼气、太阳能等清洁能源的比例仅为 10.36%~11.74%。能源消费用途中, 取暖用能(煨炕和火炉)所占比例用能比例为 53.6%~54.07%, 炊事用能所占比例用能比例为 43.37%~44.25%, 家

电、照明、清洁所占比例分别为 1.12%~1.34%、0.82%~0.96%、0.21%~0.26%。

2) 吊炕产生的直接经济效益显著。高崖韩村吊炕户取暖期所用燃料的经济成本是 1 094.8 元, 传统户取暖期所用燃料的经济成本是 1 695.9 元, 即高崖韩村农户使用吊炕可以节省 601.1 元的经济支出。下湾村吊炕户取暖期所用燃料的经济成本是 1 230.2 元, 传统户取暖期所用燃料的经济成本是 1 996.7 元, 即下湾村农户使用吊炕可以节省 766.5 元的经济支出。

3) 吊炕的节能减排效应明显。吊炕有着显著的节能减排效应。在高崖韩村, 吊炕户每年要比传统户少排放 CO_2 1 264.19 kg、 SO_2 0.63 kg, 农户选择使用吊炕每年产生的环境效益为 235.33 元。在下湾村, 吊炕户每年要比传统户少排放 CO_2 1 520.48 kg、 SO_2 0.95 kg, 农户选择使用吊炕每年产生的环境效益为 152.95 元。

4) 吊炕的推广前景广阔。若对庄浪县全县的农户都推广使用节能吊炕的话, 且在现有能源消费结构和燃料价格保持不变的情况下, 庄浪县预计每年将会有 7 381.58~8 108.46 万元的环境经济效益产生, 其中包括每年产生的经济效益为 5 306.16~6 759.56 万元, 环境效益为 1 348.9~2 075.42 万元。

黄土丘陵地区生态环境脆弱、经济贫困, 农户在冬季的取暖需求得不到保障。节能吊炕在有效改善农户室内热舒适性的同时, 还能产生巨大的环境经济效益, 有必要在西北农村地区加以推广应用。

[参 考 文 献]

- [1] Sayin C, Mencet M N, Ozkan B. Assessing of energy policies based on Turkish agriculture: Current status and some implications[J]. *Energy Policy*, 2005; 33(18): 2361—2373.
- [2] 庄智. 中国炕的烟气流动与传热性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
Zhuang Zhi. Smoke Flow and Thermal Performance of Chinese Kangs[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [3] 陈荣耀, 吕良. 关于民用炕灶热性能测试方法浅探[J]. *应用能源技术*, 1985(1): 36—40.
- [4] 郭继业. 省柴节煤灶炕[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [5] 张培红, 夏福龙, 符靖宇. 火炕采暖效果影响因素的数值模拟和分析[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2009, 25(2): 342—346.
Zhang Peihong, Xia Fulong, Fu jingyu. The analysis and numerical simulation of the factors of the influence on heating Kang[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science*, 2009, 25(2): 342—346. (in Chinese with English abstract)
- [6] 端木琳, 赵洋, 王宗山, 等. 火炕热工性能的研究及其评价方法[J]. *建筑科学*, 2009, 25(12): 30—38.
Duan Mulin, Zhao Yang, Wang Zongshan, et al. Research and assessment method of thermal performance of Chinese Kang[J]. *Building Science*, 2009, 25(12): 30—38. (in Chinese with English abstract)
- [7] 庄智, 李玉国, 陈滨. 架空炕采暖作用下建筑热过程的模拟与分析[J]. *暖通空调*, 2009, 39(1): 9—14.
Zhuang Zhi, Li Yuguo, Chen Bin. Simulation and analysis of the thermal process in a house with an elevated Chinese kang heating system[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2009, 39(1): 9—14. (in Chinese with English abstract)
- [8] 韩毅, 张雪研. 农村住宅不同采暖方式的模拟对比分析[J]. *建筑节能*, 2010, 38(5): 67—69.
Han Yi, Zhang Xueyan. Simulated and comparative analysis on different heating methods in rural residents[J]. *Building Energy Efficiency*, 2010, 38(5): 67—69. (in Chinese with English abstract)
- [9] 高翔翔, 胡元元, 刘加平, 等. 北方炕民居冬季室内热环境研究[J]. *建筑科学*, 2010, 26(2): 37—40.
Gao Xiangxiang, Hu Rongrong, Liu Jiaping, et al. Research on winter indoor thermal environment of courtyard house with Chinese kang in North China[J]. *Building Science*, 2010, 26(2): 37—40. (in Chinese with English abstract)
- [10] 竟峰, 王婧, 张旭. 寒冷地区太阳能炕采暖系统[J]. *低温建筑技术*, 2006, 111(3): 113—115.
Jing Feng, Wang Jing, Zhang Xu. Solar kang heating system for cold areas[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2006, 111(3): 113—115. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈滨, 庄智, 杨文秀. 被动式太阳能集热墙和新型节能灶炕耦合运行模式下农村住宅室内热环境的研究[J]. *暖通空调*, 2006, 36(2): 20—24.
Chen Bin, Zhuang Zhi, Yang Wenxiu. Indoor thermal environment of rural residences in a coupled heating pattern of passive solar-collected wall and oven-kang combination[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2006, 36(2): 20—24. (in Chinese with English abstract)
- [12] Yoshino H, Guan S, Lun Y F, et al. Indoor thermal environment of urban residential buildings in China: Winter investigation in five major cities[J]. *Energy and Buildings*, 2004, 36: 1227—1233.
- [13] Stefano P C, Enrico F, Marco F. The impact of indoor thermal conditions, system controls and building types on the building energy demand[J]. *Energy and Buildings*, 2008, 40(4): 627—636.
- [14] Wang Zhaojun. A field study of the thermal comfort in residential buildings in Harbin[J]. *Building and Environment*, 2006, 41(8): 1034—1039.
- [15] Han Jie, Yang Wei, Zhou Jin, et al. A comparative analysis of urban and rural residential thermal comfort under natural ventilation environment[J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(2): 139—145.
- [16] Andreas S, Christoph W, Ulrich F. Energy consumption for space heating of West-German households: Empirical evidence, scenario projections and policy implications[J]. *Energy Policy*, 2000, 28: 877—894.
- [17] Helena M, Katrin R. Determinants of residential space heating expenditures in Great Britain[J]. *Energy Economics*, 2010, 32(5): 949—959.
- [18] Wei Yiming, Liu Lancui, Fan Ying, et al. The impact of lifestyle on energy use and CO_2 emission: An empirical analysis of China's residents[J]. *Energy Policy*, 2007, 35: 247—257.
- [19] 张海东. 气候变化对我国取暖和降温耗能的影响及优化研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
Zhang Haidong. Influence of Climate Change on Warming/Cooling Energy Consumption and Optimization[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [20] Srdjan B, Milijana P, Mirko K et al. Experimental and numerical investigation of heat exchanger built in solid fuel household furnace of an original concept[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(4): 325—331.
- [21] Anders Q N, Anders R, Jon B S. Residential bioenergy heating: A study of consumer perceptions of improved woodstoves[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(8): 3169—3176.
- [22] Zhu L, Hurt R, Correa D, et al. Comprehensive energy and economic analyses on a zero energy house versus a conventional house[J]. *Energy*, 2009, 34(9): 1043—1053.

- [23] 芦潮, 唐汝宁. 高寒地区附加阳光间式太阳房的节能分析[J]. 节能, 2005, 276(7): 28—30.
Lu Chao, Tang Runing. Analyzing energy efficiency of solar-house attached sunspaces in the cold region[J]. Energy Conservation, 2005, 276(7): 28—30. (in Chinese with English abstract)
- [24] Chen B, Zhuang Z, Chen X, Jia X. Field survey on indoor thermal environment of rural residences with coupled Chinese kang and passive solar collecting wall heating in Northeast China[J]. Solar Energy, 2007; 81(8): 781—790.
- [25] Zhuang Z, Li Y, Chen B. Thermal storage performance analysis on Chinese kang[J]. Energy and Buildings 2009; 41: 452—459.
- [26] Cao G, Jokisalo J, Feng G, et al. Simulation of the heating performance of the Kang system in one Chinese detached house using biomass[J]. Energy and Buildings, 2011; 43(1): 189—199.
- [27] 牛叔文, 钱玉杰, 胡莉莉, 等. 甘肃庄浪县农户吊炕的热效率模拟分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 193—201.
Niu Shuwen, Qian Yujie, Hu Lili, et al. Model analysis on thermal efficiency of suspended Kang of rural households in Zhuanglang county, Gansu province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(6): 193—201. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张文基, 刘荣厚, 朴在林. 用于房屋取暖的太阳能热转换系统卵石层热特性的实验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(12): 121—126.
Moonki Jang, Liu Ronghou, Piao Zailin. Experimental study on the thermal characteristics of gravel layer in a solar thermal energy conversion system for house heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(12): 121—126. (in Chinese with English abstract)
- [29] Li Guozhu, Niu Shuwen, Ma Libang, et al. Assessment of environmental and economic costs of rural household energy consumption in Loess Hilly Region, Gansu Province, China[J]. Renewable Energy, 2009, 34(6): 1438—1444.
- [30] 谢高地, 张钰铨, 鲁春霞, 等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 137—143.
Xie Gaodi, Zhang Yili, Lu Chunxia, et al. Study on valuation of rangeland ecosystem services of China[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 137—143. (in Chinese with English abstract)
- [31] 赵洋. 北方村镇火墙式火炕采暖系统热性能研究[D]. 大连理工大学, 2009.
Zhao Yang. Thermal Performance of Heating System of Hot-wall Kang in Northern Rural Area[D]. Dalian: Dalian University of technology, 2009. (in Chinese with English abstract)

Analysis on environmental and economic benefits of suspended kang of rural households in loess hilly region

Hu Lili^{1,2}, Niu Shuwen^{3,4}

(1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Coal Mine Water Hazard Control in Shaanxi Province, Xi'an 710077, China; 3. College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 4. MOE Key Laboratory of Western China's Environmental System, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The heating appliances in rural areas of China are mainly kangs and stoves for a long time. The appliances can produce indoor thermal environment but has poor efficiency during winter. At the present, farmers in relatively underdeveloped western rural areas of China cannot afford household heating in economy. Therefore, how to use appropriate technology to improve the thermal comfort in bedroom without increasing fuel use and economic burden becomes an urgent problem to be solved. As the weather is cold in the winter in the loess hilly region of western China, space heating becomes a necessary demand for rural households. Kang is the main method of heating in rural households of this region. Suspended kang (a new type of kang) can not only improve indoor thermal comfort, but also reduce the consumption and the ecological environment destruction. Suspended kangs were constructed in 6 rural houses and traditional kangs (a heatable brick bed) were constructed in 4 rural houses respectively in 2 villages in Zhuanglang County. The suspended kang was raised above the floor on columns, which was different from traditional kang on the ground. The daily amounts of fuel used for the suspended kang and traditional kang were recorded respectively, and the data on rural household energy use were obtained by questionnaires, in which the quality of fuel was weighted, and the behavior and the way of energy use of farmers were observed. Besides, the continuous time series temperature data from kang's surface, indoor and outdoor in the bedrooms of suspended kangs and traditional kangs were obtained by instrumental recording. And based on improving indoor thermal comfort, reducing farmers' economic expenditure and influence on ecological environment, the environment-economic benefit of suspended kang was analyzed, which was prerequisite for popularizing suspended kang in large scale. Hence, a mathematical model was designed utilizing the energy use data to estimate environmental and economic costs for suspended kang and traditional kang respectively. The application of suspended kang was also reviewed. The results showed that the energy type structure of 2 villages was crop straw, fire grass, firewood, animal dung, coal, electricity, biogas and solar energy. Energy use structure of 2 villages included cooking, heating kang, furnace, lighting, household appliances and cleaning. Heating kang could account for the largest proportion in the total energy consumption of 2 villages. However, energy use amount for lighting, household appliances and cleaning for improving life quality was relatively small. Obviously, the low level of energy consumption in the loess hilly region of western China needed to be optimized in the future. In addition, an annual environmental and economic benefit per household for suspended kang was from 821.5 to 836.99 yuan in Gaoyahan Village, and was from 897.47 to 919.41 yuan in Xiawan Village. About annual 72.4497-81.0846 million yuan environmental and economic benefit would be generated from suspended kangs used by all the rural households in Zhuanglang County. Therefore, it is promising to improve the utilizing rate of suspended kang for its significant environmental and economic benefit. In addition, it can promote the advances of rural energy technology, protect the ecological environment, and reduce energy consumption and waste gas emission.

Key words: rural area; economic analysis; emission control; suspended kang; energy consumption for heating; environmental and economic benefits; energy saving and emission reduction; loess hilly region