

# 东北地区低能耗生态农宅集成优化采暖技术性能研究

张宝刚\*, 刘 鸣, 杜广文, 郝文刚, 袁鹏丽

(大连理工大学 建筑环境与新能源研究所, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**以阜新地区低能耗生态农宅和传统住宅为研究对象,运用现场实测的方法,从采暖源散热面温度分布、室内热湿环境、室内空气品质及经济性评价等方面对采暖效果进行对比分析,验证了集成优化采暖技术在冬季的采暖优势.生态农宅冬季室内环境要明显优于传统住宅,虽然生态农宅初投资增加了18%左右,但每个冬季大约可节省3 t的采暖用煤.生态农宅模式符合可持续建筑理念,为东北地区新农村建设提供了技术支撑.

**关键词:**生态农宅;传统住宅;采暖面温度;热湿环境;空气品质;经济性评价

**中图分类号:**TU832.1 **文献标识码:**A **doi:**10.7511/dllgxb201502002

## 0 引言

随着农村生活水平的不断提高,我国东北农村地区对冬季室内环境的舒适性也日益重视,随之带来的是农村能源大量消耗的问题.2010年我国农村住宅的商品能耗达到了 $3.16 \times 10^8$  tce(含生物质能),占全国建筑总能耗的38.6%<sup>[1]</sup>,因此如何充分利用农村地区可再生能源,逐渐成为促进农村可持续发展的关键所在.

我国东北农村地区冬季采暖能耗一直是农村住宅商品能耗的重要组成部分,广大农村能源科研人员早在20世纪50年代就对此开始了研究.但对于传统采暖方式的研究往往只注重于单一技术的提升<sup>[2-8]</sup>,各个技术的耦合互补并未得到有效的关注.

因此,本文以阜新地区生态农宅和传统住宅为研究对象,对各自模式形式、运行状况,冬季室内热湿环境及室内空气品质进行调查研究与对比分析,并对生态农宅做出经济性评价,以期对东北农村地区居住环境的改善和发展起到一定的推动作用.

## 1 实测背景

辽宁阜新地区属于严寒地区,冬季采暖期较长,考虑到冬季的防寒保暖,阜新农村传统民居多采用坐北朝南的松散布局形式,从而能够在漫长

的冬季获得较好的日照采光.丰富的土地资源使得阜新农村传统民居大多以单独院落的形式存在,庭院能有效地起到改善气候条件和拓宽人们活动空间的作用<sup>[9]</sup>.

本文的实测对象位于辽宁西部阜新县双城堡子村.该地区属于北温带大陆季风气候,冬季漫长干冷,采暖期长达6个月.其冬季采暖室外计算温度为 $-17$  °C,最低日平均温度可达 $-23.2$  °C;日照较为充足,日照率为71%;另外由于地处东亚季风的范围,常年多风,冬季室外最多风向平均风速达4 m/s.全年日平均风速高于12 m/s的天气有11.6 d之多.

## 2 实测调查

### 2.1 实测对象

考虑到阜新地区传统民居住宅的地域特点及实测的可比性,本文选取了阜新地区不同时期建造、不同采暖方式,具有代表性的4栋农宅为实测对象.农宅外观如图1所示,建筑基本信息见表1.其中1栋为低能耗生态农宅,另外3栋为对比房.生态农宅冬季主要采用改良半吊炕和燃池盘管系统采暖,辅助以被动式太阳能集热技术.对比房采用传统火炕和土暖气采暖.生态农宅二层为居民常居房间,其中一房间为改良半吊炕单独采

暖,另一房间为燃池盘管系统单独采暖.改良半吊炕改善了炕面的蓄热性能,并对炕内烟气流动进行了优化,避免了传统落地炕热效率低和高架炕热量散失大的问题.燃池热水盘管采暖系统能够很好地解决传统燃池热能利用不合理、热效率低等问题.

## 2.2 实测内容及方案

为了对比验证生态农宅冬季采暖效果,本文选取实测时间为2013年1月至4月.实测内容主要包括传统火炕、改良炕和燃池盘管系统采暖散热表面温度分布,生态农宅燃池房、改良炕房和对比房室内外热湿环境(室内温湿度)、室内外空气品质(CO和CO<sub>2</sub>浓度、可吸入颗粒物浓度).测试参数及所用的仪器如表2所示.采用数字式清华同方RHLOG-T-H型和德图testo 175-H2型温湿度记录仪每10 min记录一次室内外温湿度数

据,仪器探头放置在室内中心距地1.5 m处,室外距地1.5 m背阴处.室内外CO和CO<sub>2</sub>浓度的变化采用TSI7545型和MCH-383SD型空气品质测试仪进行记录.室内外可吸入颗粒物浓度的变化采用TSI AM510型粉尘检测仪进行记录,其室内测点均放置在房间中心,实测选择在饭前、饭中和饭后等典型时间,本文主要检测空气中粒径为10 μm的可吸入颗粒物浓度.建筑围护结构、传统火炕、改良炕和燃池采暖地板表面温度的分布情况运用FLIR B250红外热像仪进行记录.实测对象房间功能布局及测点布置如图2所示,图2(a)展示了生态农宅改良半吊炕房间和燃池热水盘管采暖房间(改良炕房和燃池房)位置分布,均处于生态农宅二层.一层为传统火炕采暖房间,由于该房间使用不连续,本文中并未对其进行实测,高架灶位于一层厨房中.



图1 实测农宅外观

Fig. 1 The external view of the experimental farm houses

表1 实测农宅基本建筑信息

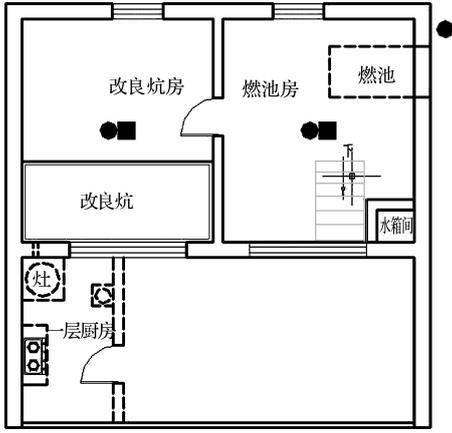
Tab. 1 Building information of the experimental farm houses

测试对象	地理位置	建造时间	家庭人数	围护结构			采暖方式
				墙体	外窗	屋顶	
生态农宅	阜新市	2012年	2	南墙 370 mm 北墙 500 mm	双层玻璃	一层平屋顶 二层坡屋顶	改良炕+燃池 太阳能集热墙
对比房 I	阜新市	20世纪70年代	2	砖墙 240 mm	单层玻璃	坡屋顶	传统火炕
对比房 II	阜新市	20世纪80年代	4	砖墙 240 mm	双层玻璃	坡屋顶	传统火炕
对比房 III	阜新市	2012年	4	砖墙 370 mm	双层玻璃	平屋顶+附加阳光间	传统火炕+土锅炉

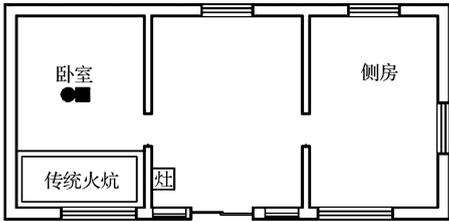
表2 测试参数及仪器

Tab. 2 Test parameters and instruments

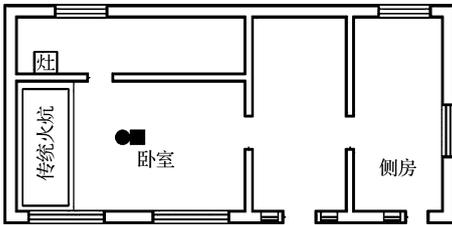
测试参数	测试仪器	仪器精度	采样	
			间隔/min	方式
室内外温湿环境	清华同方 RHLOG-T-H 型温湿度记录仪	±0.2 °C; ±5%	10	自动
	德图 testo 175-H2 型温湿度记录仪	±0.5 °C; ±3%	10	自动
室内外空气品质	CO <sub>2</sub> 浓度	MCH-383SD 型 CO <sub>2</sub> 、温湿度记录仪	±40 × 10 <sup>-6</sup>	5 自动
	CO 和 CO <sub>2</sub> 浓度	TSI7545 型空气品质测试仪	±3%	— 人工
	可吸入颗粒物浓度	TSI AM510 型粉尘检测仪	±0.001 mg/m <sup>3</sup>	— 人工
建筑围护结构、炕、改良炕、燃池采暖地板表面温度	FLIR B250 红外热像仪	±2%	—	人工



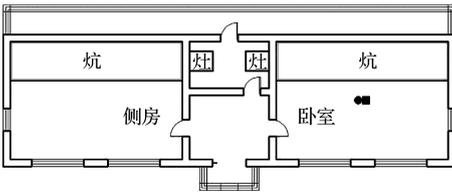
(a) 生态农宅改良炕房和燃池房



(b) 对比房 I



(c) 对比房 II



(d) 对比房 III

● 温湿度测点    ■ 空气品质测点

图 2 实测农宅建筑布局及测点布置

Fig. 2 The building layout and arrangement of measuring points of the experimental farm houses

### 3 生态农宅采暖方式的技术特点

#### 3.1 燃池热水盘管系统采暖技术

通过长期对燃池这一生态技术的研究发现：燃池采暖技术能够充分利用农作物废弃物，有效改善冬季民居室内环境<sup>[9]</sup>。但传统燃池亦存在设计技术需完善，热量分布不均，热能利用方式不合理等问题。针对这些问题课题组进行了燃池采暖技

术的提升，在生态农宅使用了燃池热水盘管耦合系统，该系统能够有效解决传统燃池出现的问题并能实现能量的梯级利用。其系统布置如图 3 所示。

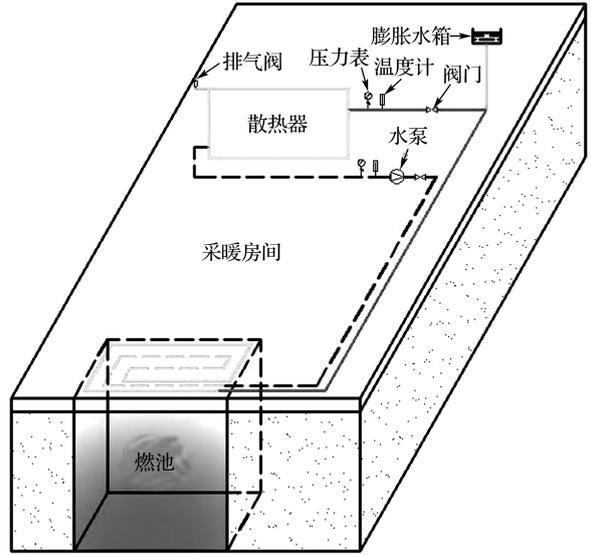


图 3 燃池热水盘管系统示意图

Fig. 3 Diagram of hot water coil system in fire pit

#### 3.2 优化炕灶采暖技术

传统炕连灶形式主要由旧式灶和落地炕组成，常会使得燃料燃烧不充分，产生大量烟气，易发生倒烟造成室内空气污染，影响居民的身体健康。课题组对生态农宅所使用的炕灶进行了优化改进，打破了“七层灶台、八层炕”的传统，建造了高效的高架节能灶和改良半吊炕；高架节能灶布置在一层厨房中，改良半吊炕布置在二层改良炕房中。相对于旧式灶，高架节能灶拥有一个更大的炉膛，使燃料燃烧时氧气的供给量增加，保证燃料的充分燃烧，从而提高了能量利用效率并减少了烟气产生量。新型炕连灶亦改进了灶炕间烟气流动路线，把烟道的角度从传统的 5° 倾角提升到了 45°，明显减小了烟气在烟道中流动的局部阻力，有效避免了倒烟、压烟等现象的产生。实现炕连灶综合热效率由原来的 40% 左右提升至 75% 以上。新型节能炕连灶结构如图 4 所示。

#### 3.3 被动式集热墙采暖技术

被动式太阳能集热墙技术作为一种经济、有效的冬季辅助采暖技术，在我国太阳能资源丰富的东北农村地区被广泛应用。本生态农宅中保留了原有集热墙采暖技术，该技术对改良炕和新型燃池采暖方式起到了有效的补充，很好地弥补了室内温湿度波动大、采暖不均匀等问题，提高了室内环境舒适度。

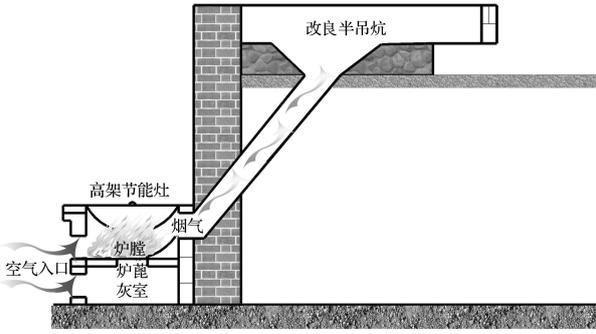


图4 新型节能炕连灶结构

Fig. 4 Structure of the new energy-saving kang-oven coupling

## 4 实验结果分析

### 4.1 采暖源散热面温度

从炕及燃池的传热机理可知,其采暖表面温度越高,热源向室内传递的能量也就越多.从人体生理和舒适性的角度出发,并参见地板辐射供暖技术规程,炕面温度应在 $24\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而燃池采暖地板在 $24\sim 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜.本文采用红外热像仪对传统采暖火炕、改良炕及燃池采暖地板温度分布状况进行了直观的分析,拍摄时间均为炊事刚结束,也即炕刚受过做饭烧灶的影响,炕表面温度分布具有代表性,拍摄位置为整个炕表面,从炕图左手边起依次为炕头、炕中和炕梢.燃池采暖地板拍摄位置为整个燃池采暖顶板.图5为红外热像仪拍摄的不同实验房间采暖设备供热面的温度分布图,由于所拍摄的炕表面温度不一致导致红外热像图片的标尺不统一,但为准确表达炕表面温度,在这5幅红外热像图片中均标记相应的温度.图5(a)与(b)中采暖火炕为我国东北常见的落地火炕.图5(a)中炕表面温度分布极不均匀,并且表面整体温度过低.从图5(b)中发现,其表面温度分布亦不均匀,适温炕表面区域占整个炕表面的比例(约42%)与图5(a)(约18%)相比有很大的提高,但由于炕道中烟气的流动不畅,易造成热量大量聚集在一处,使得局部炕表面温度过高.而对于新建对比房Ⅲ的采暖火炕而言,其炕体整体温度及表面温度分布均匀性相对对比房Ⅰ、Ⅱ均有较大的改进,适温炕表面区域占整个炕表面的比例约为45%,但如图5(c)所示,其炕表面最高温度可达 $46.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,高于炕表面参考的最高温度,容易造成烫伤.生态农宅中的改良炕是在原有落地炕基础上改造而得的,其散热性能与烟气流动都得到了很好的改进,从图5(d)可知,炕表面温度

能够在参考的范围内均匀分布,满足人们在冬季对采暖火炕的要求,适温炕表面区域所占比例约为62%.如图5(e)所示,燃池房间采暖地板温度分布基本上在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,其均匀性也能得到保证(适温区域所占比例在78%左右).这些数据有效验证了燃池热水盘管采暖系统针对传统燃池采暖出现的采暖地板局部过热及热量分布不均等问题所做的改进效果.

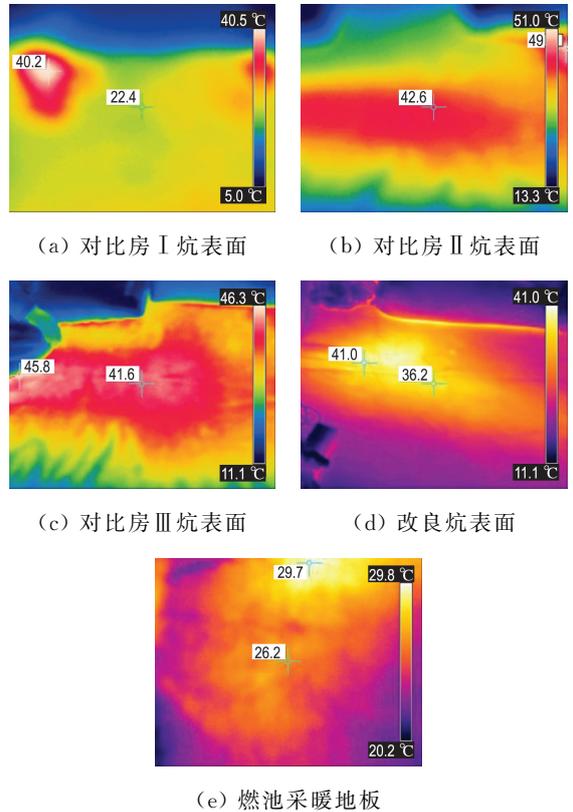


图5 不同供暖面温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of different heating surface

### 4.2 室内热湿环境

在我国北方农村地区,人们冬季生活方式受到具体环境的影响,一天之中大部分时间生活在火炕上并大量活动于室内外环境中,这就使得相对城镇居民其着衣量一般较大,因此人们对农村住宅中室内空气温度要求并不是很高.

图6为不同房间室内温度及室外温度随时间的变化情况,实测时间为2013-01-18~2013-01-22,从而避免了建筑物自身热惰性对室内温度的影响.如图6所示,不同房间室内温度随着室外温度的强烈波动都有一定的波动,但燃池房间的温度波动振幅明显较小,并且整体温度要高于其他各房间,改良炕房紧随其后,显示了生态农宅采暖

优势. 为了更详细地分析不同房间随时间的温度变化情况, 取其中 1 d 来进行研究.

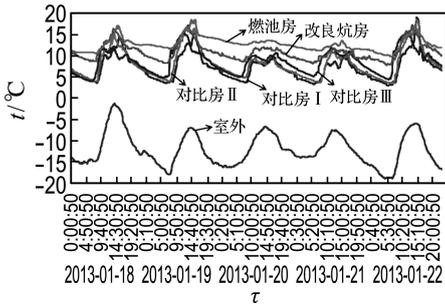


图 6 室内温度随室外温度逐时变化

Fig. 6 Indoor temperature hourly variation with outdoor temperature

图 7 显示了 2013-01-20 全天不同房间室内外温度随时间变化的实测结果. 为了保证测试数据的代表性与可比性, 本次实测时间选择在阜新地区冬季最冷月份. 由图可知, 对比房室内温度在实测期间有两次突变的情况, 这主要是由于阜新地区人们冬季活动量较小, 1 d 之中两次做饭加热火炕进而提高了室内温度. 与对比房相比改良炕房在实测期间有较好的热环境, 能够使其温度保持在 8.6~11.2 °C, 温度变化平稳, 同时也能保证夜晚房间温度稳定, 有利于居民身体健康. 燃池房的室内空气温度逐时变化要明显优于其他房间, 1 d 之中最低温度为 12.2 °C, 与最高温度仅差 1.7 °C, 从而避免了大温差引起的不舒适, 起到了很好的采暖效果.

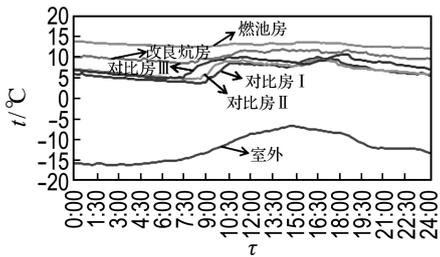


图 7 不同采暖房间温度逐时变化

Fig. 7 Temperature hourly variation of different heating rooms

图 8 所示是实测期间不同采暖房间室内温度全天变化的频率分布图. 从图中可知, 在传统火炕作用下, 室内温度绝大部分时间 (90% 以上) 维持在 4~10 °C, 而改良炕房室内温度出现明显的提升, 全天高于 8 °C, 在 10~12 °C 温度段内出现的频率为 57%, 展示了有效的改良效果. 图中显示,

燃池房全天温度分布在 12~14 °C 的频率达到了 100%, 充分展现了其采暖效果的稳定性与优越性, 即使是在恶劣的室外环境下, 仍能维持良好的室内热环境.

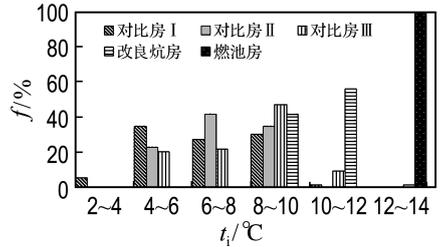


图 8 不同采暖房间室内温度频率分布

Fig. 8 Indoor temperature frequency distribution of different heating rooms

2013-01-20 室内相对湿度随时间的变化如图 9 所示. 由图可知, 室外空气相对湿度分布不稳定, 在 54.3%~84.1% 的范围内波动, 3 个对比房的相对湿度相差不大, 主要分布在 60.0%~69.5%, 而改良炕房的相对湿度要整体低于对比房, 日平均相对湿度为 55.7%, 燃池房的相对湿度逐时变化平稳, 仅在 47.7%~53.0% 波动, 满足冬季室内相对湿度 40%~60% 适宜范围的要求. 分析产生上述情况的原因主要是由于实测期间阜新地区下了一场大雪, 从而增加了室外空气的相对湿度, 因此在天气晴朗的日子中, 燃池采暖房间的室内相对湿度基本上在 40% 以下, 需要必要的加湿处理.

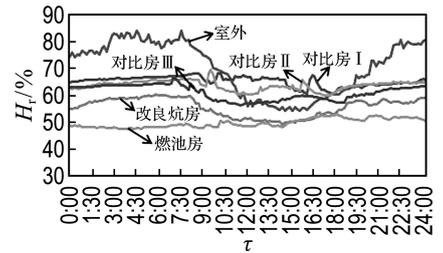


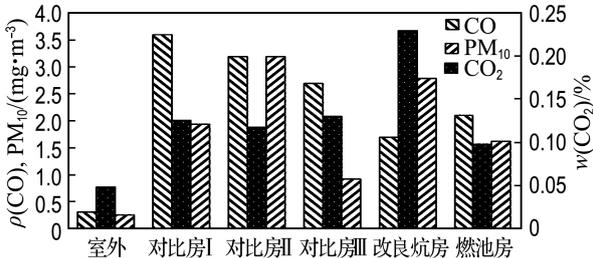
图 9 不同采暖房间相对湿度逐时变化

Fig. 9 Relative humidity hourly variation of different heating rooms

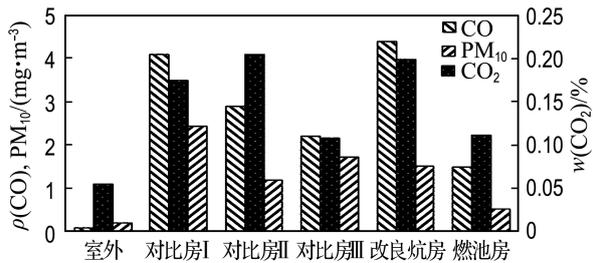
### 4.3 室内空气品质

东北农村地区大部分使用火炕进行冬季采暖, 炕中烟气容易泄漏到室内造成室内空气的污染. 另外由于燃池中燃料是阴燃提供热量的, 如果采暖顶板封闭不严, 也会使得有害气体逸入室内, 危害人体健康, 因此, 有必要实测生态农宅及对比房空气品质, 从而验证生态建筑推广的可行性.

根据阜新冬季农村地区实际情况,室内空气污染源主要是生物质燃料燃烧产生烟气造成的,因此本次主要对环境影响较大的  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  浓度和可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )浓度进行实测.图 10 和 11 分别为 2013-01-20 和 2013-03-10 典型时间不同房间室内与室外三者的浓度分布图.炊事刚



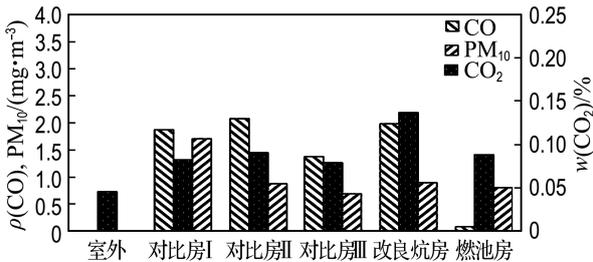
(a) 早饭烧灶后



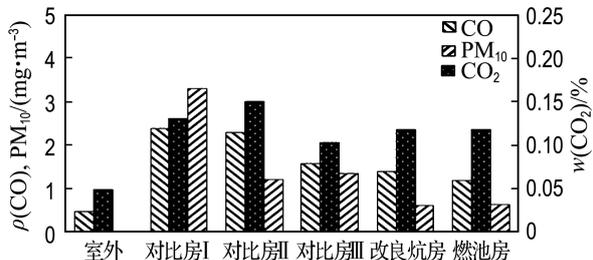
(b) 午饭烧灶后

图 10 2013-01-20 室内外污染物浓度分布

Fig. 10 Indoor and outdoor pollutant concentration distribution on 2013-01-20



(a) 早饭烧灶后



(b) 午饭烧灶后

图 11 2013-03-10 室内外污染物浓度分布

Fig. 11 Indoor and outdoor pollutant concentration distribution on 2013-03-10

过时,由于烧炕原因室内三者浓度会达到一天之中的最大值,本次实测选择的典型时间即为两次饭后,也就是说此时如满足标准中的规定,其他时间也能满足要求.从图中可知:阜新农村地区冬季室外  $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$  浓度低于国家标准(最高容许浓度分别为时平均  $10 \text{ mg/m}^3$  和日平均  $0.1\%$ ),而室内  $\text{CO}$  浓度满足国家标准的要求,室内  $\text{CO}_2$  浓度要稍高于国家标准,不同房间并未出现明显性差异,在可接受的范围之内.但  $\text{PM}_{10}$  浓度却普遍出现远远高出国家标准(最高容许浓度为日平均  $0.15 \text{ mg/m}^3$ )的情况,只是在室外的个别时间符合标准规定.从而可知阜新农村地区室内空气品质与城镇相比总体稍差,其中  $\text{PM}_{10}$  浓度状况相比较更差些,这主要与冬季阜新农村采暖方式关系较大,农作物燃烧产生的污染物容易进入室内.

#### 4.4 经济性分析

根据调查发现,当地普通农户住宅的造价为  $700 \text{ 元/m}^2$ ,而生态农宅增强了围护结构保温并使用了新型的采暖技术,其初投资增加到  $800 \text{ 元/m}^2$ (不计燃池),燃池单独造价为  $110 \text{ 元/m}^2$ ,盘管与散热器花费  $2000 \text{ 元}$ .以本文生态农宅居住面积  $100 \text{ m}^2$  为例,生态农宅初投资要高出普通住宅约  $12594 \text{ 元}$ ,而阜新农村地区未采用燃池采暖的农户冬季采暖用煤约需要  $2500 \text{ 元}$ ,因此生态农宅仅需 5 年即可回收成本.另外与传统采暖技术相比,生态农宅集成优化采暖技术具有效果均匀舒适、环境安全卫生、用能清洁环保等优点.

## 5 结论

(1)低能耗生态农宅建筑模式改进了传统农村住宅的居住形式,符合可持续发展建筑理念,为东北地区新农村的建设提供了技术支撑.

(2)生态农宅中改良炕相对于传统住宅火炕采暖表面温度分布不均和局部过热情况均有了较大的改进,满足火炕采暖表面热工性能要求.燃池热水盘管采暖地板温度分布基本上在  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  以下,采暖期间其温度变化平稳,并无局部过热情况出现.

(3)在室外空气温度低至  $-16.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,上下波动达  $9.7 \text{ }^\circ\text{C}$  的情况下,生态农宅改良炕房仍能保证室内气温在  $8.6 \sim 11.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ,燃池房室内气温在  $12.2 \text{ }^\circ\text{C}$  以上平稳变化,而传统火炕房 90% 以上的时间室内气温只能维持在  $4 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

(4)室内相对湿度传统住宅要稍优于生态农宅,燃池房室内相对湿度平均低于室外约  $20.6\%$ .

(5)实测房间室内空气品质情况有相似规律,

CO 浓度满足国家标准的要求,而 CO<sub>2</sub> 浓度要稍高于国家标准,PM<sub>10</sub> 浓度远远高出国家标准,燃池房并未因为燃料阴燃出现室内空气品质恶劣的情况。

(6)生态农宅冬季采暖模式明显优于传统住宅,虽然前者初投资增加了 18%左右,但每个冬季每户可节约 2 500 元左右的采暖用煤。

## 参考文献:

- [1] 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 2012[R]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012. Building Energy Conservation Research Center of Tsinghua University. **China Building Energy Efficiency Annual Development Report 2012** [R]. Beijing: Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 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 Wen-xiu. 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)
- [3] LI Yu-guo, ZHUANG Zhi, LIU Jia-ping. Chinese kang and building energy consumption [J]. **Chinese Science Bulletin**, 2009, 54(6):992-1002.
- [4] 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 Yu-guo, 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)
- [5] 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 kang [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] 赵洋. 北方村镇火墙式火炕采暖系统热性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009. ZHAO Yang. Thermal performance of heating system of hot-wall kang in northern rural areas [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [7] 朱俊亮. 基于火墙式火炕农村采暖系统的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010. ZHU Jun-liang. Study on rural heating systems which based on hot-wall kang [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 周立军,于立波. 东北传统民居应对严寒气候技术措施的探讨[J]. 南方建筑, 2010(6):12-15. ZHOU Li-jun, YU Li-bo. Technical measures used in traditional residences to battle the cold climate in the northeast [J]. **South Architecture**, 2010(6):12-15. (in Chinese)
- [9] 田维治,陈滨,张雪研,等. 燃池采暖技术在中国北方农村的应用[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2012, 43(增刊1):180-186. TIAN Wei-zhi, CHEN Bin, ZHANG Xue-yan, *et al.* Utilization of technology of burning cave for heating in rural house in northern China [J]. **Journal of Central South University: Science and Technology**, 2012, 43(S1):180-186. (in Chinese)

## Study on properties of low energy consumption eco-rural residence integrated optimized heating technology in northeast China

ZHANG Bao-gang\*, LIU Ming, DU Guang-wen, HAO Wen-gang, YUAN Peng-li

(Laboratory of Building Environment and New Energy Resources, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** For Fuxin low energy consumption eco-rural residence and traditional residence as the research objects, based on field measure, comparative analysis of heating effects is carried out from the heating surface temperature distribution, the indoor thermal and humid environment, the indoor air quality and economic evaluation. The heating advantage of integrated optimized heating technology in winter is verified. Indoor environment of eco-rural residence is much better than that of traditional residence in winter. Although the initial investment of eco-rural residence increases by about 18%, each winter it can save about 3 tons of coal for heating. Eco-rural residence model is in accordance with the concept of sustainable architecture, and it can provide technical support for new countryside construction in northeast China.

**Key words:** eco-rural residence; traditional residence; heating surface temperature; thermal and humid environment; air quality; economic evaluation