

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.008



农村住宅夜间 3 种床/炕加热方式 对比实验研究

刘嘉楠, 刘艳峰, 李涛, 王登甲, 陈耀文
(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055)

摘要:提出一种新型热盘管炕作为夜间采暖方式,与村镇普遍使用的火炕、电热毯在被褥热环境和室内环境方面的差异进行对比实验。分析发现,电热毯采暖响应速度快,但被褥热均匀性差,供热能力有限,无法保障室内温度;火炕采暖响应速度较快,但被褥温度保障时间短、可调节性差,室内存在烟气,CO₂浓度超标;热盘管炕采暖响应速度一般,但被褥温度分布均匀,温度稳定后人体热舒适区占比可达 80% 以上,且室内环境良好。

关键词:农村地区;热盘管炕;被褥温度;室内热环境;热舒适性

中图分类号:TU832.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0048-07

Experimental analysis on three kinds of bed / kang heating method in rural houses at night

Liu Jianan, Liu Yanfeng, Li Tao, Wang Dengjia, Chen Yaowen

(School of Environmental and Municipal Engineering,
Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: A new type of night heating method, known as Hot Tube Chinese Kang, is compared with widespread conventional heated kang as well as electric blankets in villages and towns, through contrast experiment which provides exactly same control variables in terms of building dimensions. After a comparative analysis regarding bedding temperature, indoor environment, and other aspects, the results illustrate: the electric blanket has a rapid response of heating, however, due to the poor thermal uniformity of bedding and limited heating capacity, the indoor temperature cannot be guaranteed. The response speed of heating of heated kang is faster, but the time for temperature protection of bedding is short, the adjustability is poor and the concentration of carbon dioxide exceed hot tube Chinese kang promise the bedding thermal homogeneity that comfort zone accounted for more than 80%, also generate moderate indoor environment.

Keywords: rural areas; hot tube Chinese kang; bedding temperature; indoor thermal environment; thermal

收稿日期:2017-09-06

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0700400);国家自然科学基金(515909911、51678468)

作者简介:刘嘉楠(1994-),男,主要从事太阳能空调采暖研究,E-mail: stayrealstrongliu@163.com.

刘艳峰(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail: lyfxjd@163.com.

Received:2017-09-06

Foundation item: National Key R & D Plan (No. 2016YFC0700400); National Natural Science Foundation of China (No. 515909911, 51678468)

Author brief: Liu Jianan(1994-), main research interests: solar and air conditioning heating, E-mail: stayrealstrongliu@163.com.

Liu Yanfeng(corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: liuyanfeng@xauat.edu.cn.

comfort

中国西北地区冬季寒冷漫长,绝大多数农村住宅热工条件差,冷风渗透严重,室内热环境恶劣^[1-3],村镇居民的冬季采暖仍处于较落后状态,尤其是夜间,室内空气温度和被褥温度更低,使居住者在漫长的冬季长期处于不舒适的状态^[4-5]。因此,村镇居民冬季睡眠的热舒适度有待提高。

夜间睡眠的热舒适度不能完全由室内温度的高低来评价,除室内操作温度外,床上被褥的微气候热环境对人体睡眠热舒适度也有较大影响^[6]。夜间覆盖被子睡觉时,被褥将人体与室内热环境隔绝,与室内热环境相比,睡眠质量和睡眠热舒适度更受被褥微气候的影响^[7-9]。村镇居民现行的夜间采暖方式主要有火炕、电热毯、火炉、电暖气等。火炕是村镇最为普遍的采暖方式,在中国西北地区有高达85%的居民使用^[10-11]。但火炕污染严重,并影响室内空气质量,在夜间使用不具有可调性。端木琳等^[12]也指出,火炕虽使用历史悠久,但仍存在温度不均匀、不好烧、凉得快、热效率低等问题。电热毯升温快、操作方便简单、能耗低,近些年被广大村镇居民普遍使用,但其被褥环境有“背烫肚凉”的特点,舒适度较差,安全性方面,易引发火灾,发生热阻丝断裂等情况^[13],限制了其进一步应用。

针对已有村镇夜间采暖方式的不足,提出一种新型低温热水盘管炕。在现有火炕主体的基面上布置热水盘管,通低温热水即可达到供热效果。为了对比3种夜间采暖方式,采用实验方法分析其供热特性及规律,基于被褥热环境、室内热环境、空气质量等参数,综合评价3种夜间采暖方式。

1 实验概况

1.1 基本情况

实验地点位于陕西省宝鸡市某村,气候属寒冷(A)区,冬季室外昼间平均温度为8℃,夜间平均温度为-1℃。2017年2月5日—6日对一户单层住宅进行夜间采暖方式的性能测试,建筑平面图及外景图如图1、图2所示。建筑坐北朝南,选择构造相同的3间卧室作为实验房间,高为2500mm,均设有相同尺寸的火炕。建筑外墙为350mm土坯墙,内墙为120mm红砖墙,内外均涂20mm腻子层;屋面为20mm木质吊顶与50mm顶瓦层;房间门为30mm单层木门,尺寸为900mm×2000mm;外窗为4mm单层玻璃木窗,尺寸为1200mm×1200mm。

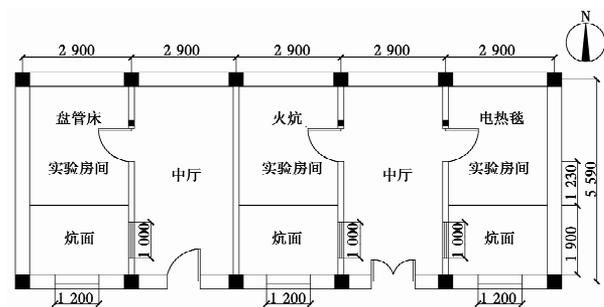


图1 实验建筑平面图

Fig. 1 Experimental building plan



图2 实验建筑外景

Fig. 2 Experimental building exterior

1.2 实验目的、流程及工况

1.2.1 实验目的 为了对3种村镇采暖方式进行数值分析,考察炕面盘管床的可行性,并为村镇夜间采暖方式的改进与优化提供可靠依据,实验采用对比分析的方法,从被褥温度分布、室内热环境、室内空气质量等方面对常见的火炕、电热毯及新型炕面盘管这3种适用于村镇的夜间采暖方式进行综合性能分析。

1.2.2 实验流程 根据西北居民行为轨迹规律^[14],结合当地居民作息进行综合考虑,实验时间选为18:00至次日8:00。实验前期,在炕面上分别铺设一张与炕面尺寸相同的棉质褥面,并在褥面中央铺设2000mm×1500mm的棉质被面,以模拟夜间睡眠情况。将各仪器编号后进行布置,温度测点置于被褥之间,温湿度及CO₂记录仪置于房间中央,高出地面1.2m。测试参数及对应仪器见表1,温度测点具体布置见图3,仪器实物布置见图4。

表1 测试参数及相应仪器

Table 1 Test parameters and instruments

测量参数	仪器名称	规格	测量间隔/min
室内外交气温度	Thermo Recorder TR-72ui	温度精度:±0.3℃, 量程:0~50℃;	10
	被褥温度	组扣式温度记录仪 DS1921G	

续表 1

测量参数	仪器名称	规格	测量间隔/min
二氧化 碳浓度	CO ₂ 分析仪	量程:0~5 000×10 ⁻⁶	10
	EZY-1S	精确度:±75×10 ⁻⁶	

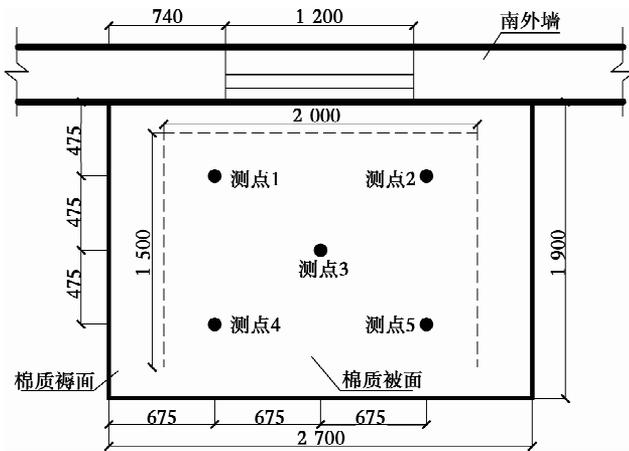


图 3 房间平面及测点布置

Fig. 3 Room plan and measurement points layout

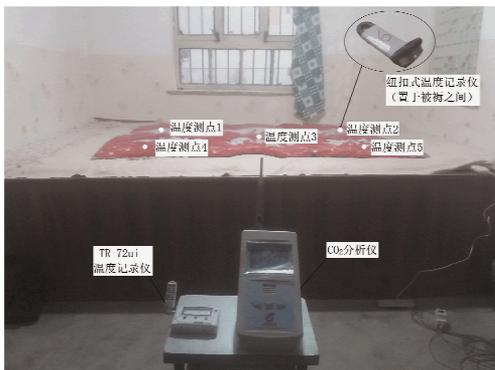


图 4 仪器布置实物图

Fig. 4 Picture of the instrument layout

实验期间同时开启电热毯、炕面盘管的电热锅炉并进行火炕点火。测量参数包括被褥温度、室内温度、室内 CO₂ 浓度。测量结束,分析比较被褥温度变化规律,进行方差计算与舒适温度占比计算,以便综合评价 3 种夜间采暖方式的热舒适性,并对比 3 个房间的室内热环境与空气质量。

1.2.3 实验工况 电热毯实验房间在床铺中央布置一张 TT150×120-4XA 型双人电热毯,尺寸为 1 500 mm×1 200 mm,额定功率 100 W;火炕房间火炕为一普通式落地炕,燃料为秸秆,填料口设于南外墙上,位于外窗之下;盘管炕房间在普通火炕基础上进行改造,将 200 mm 间距的 PE-X 热水盘管回折布置于炕面之上,从炕面向上依次为:5 mm 防潮层、30 mm 聚苯乙烯泡沫塑料板绝热层、1 mm 铝箔保护层、低碳钢丝网固定层、30 mm 热惰性较低的砂石

混凝土填充层及 5 mm 水泥砂浆找平层,四周采用抹灰与密封膏密封,热水由电热锅炉提供。实验工况见表 2。

表 2 实验工况表

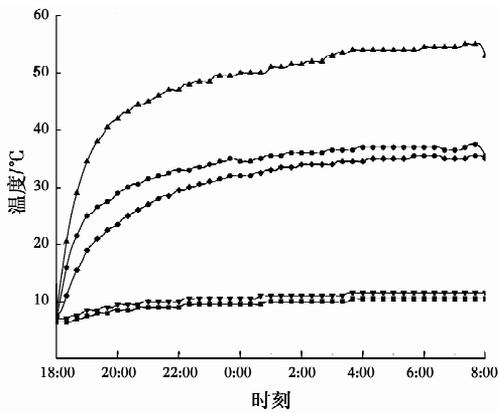
Table 2 Test conditions

实验对象	设备器材	实验工况	工况说明
电热毯	TT150 × 120-4XA 型电热毯; DDS2015 型单相电测量模块	额定功率 100 W	电热毯功率共 3 挡: 76~100 W, 测试选择最高档位, 连续运行。
火炕	普通落地式火炕	一次填料时间: 18:00, 质量: 7.5 kg 二次填料时间: 02:00, 质量: 7.5 kg	火炕以秸秆为燃料, 点火一段时间后用挡板将填料口封住以减小热量损失, 并防止使秸秆燃烧过快造成短时间过热。
热盘管床	PE-X 热盘管床; CL1 型电热水锅炉;	供水温度 50 ℃ 回水温度 46 ℃ 流量: 490 kg/h	实验无预热过程, 热水锅炉从未运行状态开始间歇运行, 供水水温大于 52 ℃时停止加热, 低于 48 ℃时再次开启。

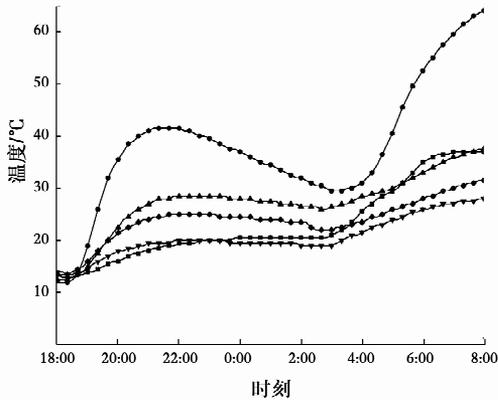
2 结果与讨论

2.1 被褥热环境对比分析

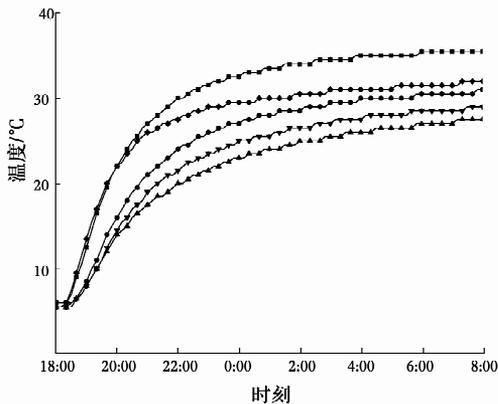
2.1.1 被褥温度分布特征 3 种夜间采暖方式被褥各测点温度分布如图 5 所示。图 5(a)表明,电热丝升温快的特点使电热毯响应速度较快,但表面温度根据电热丝密集程度不同存在较大差异,各测点温度曲线分布松散,温度区间较大,由于电热毯横向导热能力较差,各部分温度达到稳定的过程中并未趋于一致。图 5(b)表明,火炕直接由烟气加热但热惯性较小,使得温度上升与下降的速度都较快,温度分布随着烟气进入的方向递减,温度曲线比较松散,各处表面温度随着燃烧的进行与退火过程逐渐趋于一致。同时,火炕具有持续供热能力不足的特点,存在温度波动,点火 4 h 后温度开始下降,一次填料无法满足整晚的夜间采暖需求。图 5(c)表明,由于需要对水进行预热升温,热盘管炕的响应速度一般,需 4 h 加热温度才能基本稳定,但其供热能力平稳,升温过程平缓,不存在温度波动,温度曲线密集,各处温度基本一致。



(a) 电热毯测点温度分布



(b) 火炕测点温度分布



(c) 热盘管炕测点温度分布

注: —测点1 —测点2 —测点3 —测点4 —测点5

图 5 测点温度分布

Fig. 5 Temperatures of measuring points

2.1.2 被褥温度均匀性对比分析 利用标准差值 σ 进一步评价 3 种夜间采暖方式炕面温度的均匀程度, σ 为各测点温度与炕面均温差值的平均数, 计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (t_i - t_c)^2} \quad (1)$$

式中: N 为测点个数; t_i 为测点温度, $^{\circ}\text{C}$; t_c 为测点平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

用式(1)可计算得到 3 种夜间采暖标准差 σ 值

的变化曲线, 如图 6 所示。电热毯在各时刻的 σ 值始终最大且曲线陡直, 可见电热毯在空间及时间上, 热均匀性始终较差, 且随着电热毯各处温度趋于稳定, 均匀性会更差; 火炕 σ 值总体较大, 热均匀性一般, 不均匀阶段主要集中于加热过程, σ 值随退火降温而减小, 炕面温度会逐渐趋于一致; 热盘管炕的热均匀性优于其他两种采暖方式, σ 值始终处于较低水平, 曲线平缓。

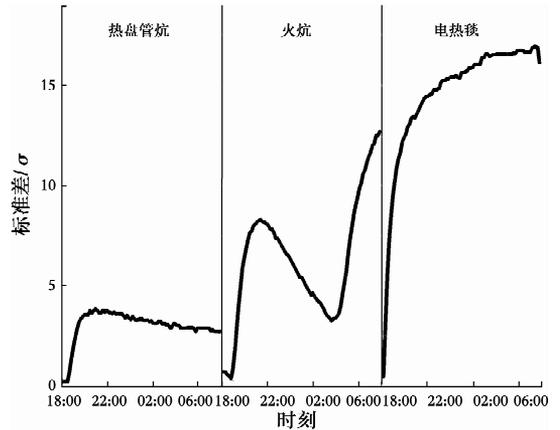


图 6 被褥温度标准差

Fig. 6 Standard deviation of bedding temperature

2.1.3 舒适度分析 被褥有取暖的情况下, 人体认为舒适的被褥温度为 $27.0 \sim 32.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [15-17]。为了分析各采暖方式温度分布的舒适状况, 以 2 h 为一个时间区间, 计算 3 种采暖方式分别在 $\leq 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20 \sim 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $27 \sim 32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (舒适区)、 $32 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $\geq 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 各温度区间的占比, 如图 7 所示。

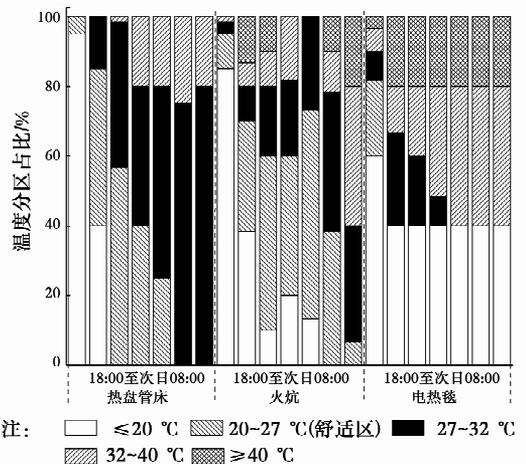


图 7 舒适温度时间占比柱状图

Fig. 7 Histogram of the proportion of comfortable temperature duration

由图 7 可见, 电热毯温升较快, 但舒适区温度占比较低, 横向导热能力差, 使得温度平稳后温度基本

处于非舒适区,出现高温、低温的两级分区,热舒适性差;火炕温升较平缓,但存在温度波动,温度平稳后为 50%左右的舒适温度区与大部分的高温不舒适区,温度整体偏高,舒适度较好;热盘管炕温升速度一般,但温升平缓,且几乎没有温度波动,开启 2 h 后出现舒适温度区,之后热舒适度优于其他两种采暖方式,可迅速地大范围进入舒适温度区,温度平稳后舒适区占比可达 80%。

热盘管床温度平稳后,除大部分舒适区外,始终存在 20%左右占比高于舒适区,出现局部过热情况。因此,存在降低热盘管床进口水温,改进工况以使舒适区范围扩大的可能。对热源水温要求降低的同时,存在利用可再生能源提供低温热水达到节能的可能。

2.2 室内环境对比分析

2.2.1 温度对比 图 8 为测试期间的室内、外温度变化情况。由图 8 可知,3 个房间室内空气平均温度均高于室外约 5℃以上,但 3 个房间的室内温度之间存在明显差异。电热毯供热能力有限,热传递过程局限于被褥范围内,对室内空气温度几乎无温升作用,始终处于 6℃以下。火炕直接由烟气加热、热惯性较小,可通过炕面及侧面炕体直接向室内散热,使室内温度提升作用较明显,且反应迅速,室内温度基本满足人体夜间被褥有加热时最低 7℃的舒适室温要求^[13]。热盘管炕通过热水盘管炕面向室内散热,由于存在预热过程,温度呈逐渐上升的趋势,但热盘管炕对室内热环境的温升作用明显,室内温度可达到 9℃左右。

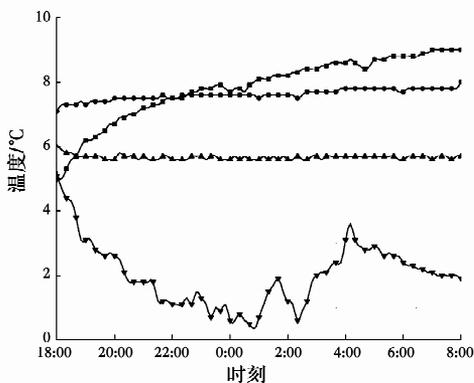


图 8 室内、外温度变化

Fig. 8 Change of indoor and outdoor temperature

2.2.2 室内空气品质分析 图 9 为测试期间室内 CO₂ 浓度变化情况。结合图 9,以 CO₂、烟气浓度为标准对室内空气品质进行分析。电热毯房间与热盘

管炕房间无 CO₂ 排放,室内空气质量良好。火炕房间的 CO₂ 浓度明显高于其他两种采暖方式,且室内 CO₂ 浓度出现了超出国家卫生标准^[18] 规定的 $1\,000 \times 10^{-6}$ 的情况。由于火炕密封不严,未设烟囱及填料口位于外窗之下等原因,测试过程中房间里存在烟气严重,卫生条件差的情况。可见,使用火炕存在 CO₂ 浓度超标的可能性。

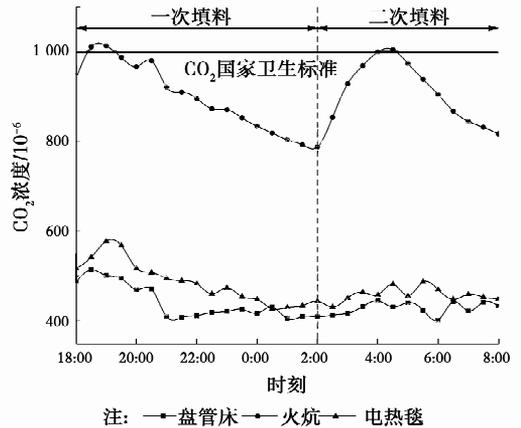


图 9 CO₂ 浓度变化

Fig. 9 Change of carbon dioxide concentration

2.3 3 种方式综合对比讨论

由表 3 可知,电热毯与火炕两种采暖方式在被褥温度方面基本可满足冬季睡眠采暖要求,但其舒适性不高,其中电热毯无法达到室内热环境最低要求;火炕室内 CO₂ 浓度超标。热盘管炕的被褥热舒适性及室内热环境显著优于其他两种传统采暖方式,有利于改善村镇夜间采暖状况。

表 3 3 种夜间采暖方式综合分析表

Table 3 Comparison of three types of night heating

对比参数	热盘管炕	火炕	电热毯
安全性	安全	安全隐患	安全隐患
初投资	较高	一般	低
环保性	环保	污染	环保
响应性	一般	较快	快
被褥热环境	稳定性	稳定	不稳定
舒适性	均匀性	高	一般
室内环境	温度	高	较低
CO ₂ 浓度	低	高	低

3 结论

通过 3 种夜间采暖方式对比实验分析得到以下

结论:

1)热盘管炕温升平缓,温度分布均匀稳定,热舒适区占比高于其他两种传统采暖方式,热舒适度占优。相比于热盘管炕,火炕热惯性较小,供热时间不足;电热毯温度均匀性差,使用中存在“背热肚凉”的情况。

2)热盘管炕温度平稳时的温度分布为80%舒适区及20%高温不舒适区,可见在供回水温度为50℃/46℃,流量为490 kg/h的工况下运行时,炕面有局部过热情况,对热源水温要求降低的同时,存在进一步扩大舒适区和节能的可能。根据到达舒适温度的时间,推荐火炕在睡眠前2.5 h点火,热盘管炕在睡眠前3.5 h开启为最佳。

3)3个房间室内空气平均温度均高于室外约5℃以上,热盘管炕对室内温度的影响最为明显,使室温由5℃上升至9℃。火炕对室内温度也有一定影响,但火炕房间的室内空气质量与卫生条件较差,存在CO₂浓度超标的情况。

4)结合热盘管炕的高舒适性,及易于安装,只需在普通火炕基面上进行简单施工即可实现,热盘管炕在村镇地区存在推广的可行性。为了进一步推广,可采用更加合理的运行方式以达到节能的目的,并克服其响应速度不足的缺点。

参考文献:

- [1] YANG X D, JIANG Y, YANG M, et al. Energy and environment in Chinese rural housing: Current status and future perspective [J]. *Frontiers in Energy*, 2010, 1(4): 35-46.
- [2] ZHU Y Y, BAI L, SANG G C, et al. Improvement and analysis of the winter thermal environment of rural civilian dwellings in northwestern area of China [C] // *International Conference on Sustainable Energy and Environmental Engineering*, 2015, Zurich, Switzerland.
- [3] 朱轶韵,刘加平. 西北农村建筑冬季室内热环境研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(Sup2): 400-403.
ZHU Y Y, LIU J P. Research on the indoor thermal environment of rural architecture in winter in northwestern areas [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(Sup2): 400-403. (in Chinese)
- [4] 赵云兵. 寒冷地区农村住宅冬季室内热环境研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2013.
ZHAO Y B. Study on rural residential winter indoor heat environment in cold area [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] LIU P C, SANG G C, ZHAO Q, et al. Measurement and study on winter indoor thermal environment of civilian dwelling in south rural areas of Shaanxi Province [J]. *Waste & Biomass Valorization*, 2016, 6(6): 1077-1084.
- [6] LIU Y F, SONG C, WANG Y Y, et al. Experimental study and evaluation of the thermal environment for sleeping [J]. *Building and Environment*, 2014, 82: 546-555.
- [7] OKAMOTO-MIZUNO K, TSUZUKI K. Effects of season on sleep and skin temperature in the elderly [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54: 401-409.
- [8] LI L, LI P, LIAN Z W. Experimental study on thermal comfort of sleeping people at different air temperatures [J]. *Building and Environment*, 2014, 73(1): 24-31.
- [9] LI P, LIAN Z W, LI L. Investigation of gender differences in sleeping comfort at different environmental temperatures [J]. *Indoor & Built Environment*, 2012, 21(6): 811-820.
- [10] ZHUANG Z, LI Y G, CHEN B. Chinese kang as a domestic heating system in rural northern China: A review [J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41: 111-119.
- [11] ZHANG X Y, CHEN B, ZHAO J R. Optimization of thermal performance in a Chinese traditional heating system: Burning cave [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 68(1): 423-431.
- [12] 赵洋,端木琳,王宗山,等. 火墙式火炕热工性能的实验研究[J]. *建筑科学*, 2010, 26(2): 29-36.
ZHAO Y, DUAN M L, WANG Z S, et al. Experimental study on the thermal performance of hot-wall type kang [J]. *Building Science*, 2010, 26(2): 29-36. (in Chinese)
- [13] 许建平,罗忠宝. 智能安全电热毯技术初探[J]. *吉林工程技术师范学院学报*, 2012, 28(5): 70-72.
XU J P, LUO Z B. Technology of intelligent security electric blankets [J]. *Journal of Jilin Teachers Institute of Engineering and Technology*, 2012, 28(5): 70-72. (in Chinese)
- [14] 王世栋. 西北乡村居民冬季行为模式与室内热环境关系研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2014.
WANG S D. The research of the relationship between northwest rural residents' behavior patterns and indoor thermal environment in winter [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese)
- [15] WANG Y Y, LIU Y F, SONG C, et al. Appropriate

- indoor operative temperature and bedding micro climate temperature that satisfies the requirements of sleep thermal comfort [J]. *Building and Environment*, 2015, 92: 20-29.
- [16] 李净, 刘艳峰, 宋聪, 等. 西北民居冬季睡眠被褥微气候研究[J]. *建筑科学*, 2016, 32(2): 65-69.
LI J, LIU Y F, SONG C, et al. Winter bedding microclimate in rural houses in northwest China [J]. *Building Science*, 2016, 32(2): 65-69. (in Chinese)
- [17] 王兴卫, 刘艳峰, 宋聪, 等. 冬季室内热环境与被褥微气候的匹配[J]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(2): 91-96.
WANG X W, LIU Y F, SONG C, et al. Matching of indoor thermal environment and bed climate in winter [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2016, 38(2): 91-96. (in Chinese)
- [18] 室内空气质量标准: GB/T 18883—2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Indoor air quality standards: GB/T 18883-2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)