



# Research on Indoor Thermal Environment Testing of Farmers and Herdsmen's Dwellings in Tongliao, Inner Mongolia in Winter

Li Xueping, Li Jingjing\*, Qin Luo

College of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China

## Email address:

1142550891@qq.com (Li Xueping), 208805484@qq.com (Li Jingjing), 1095372896@qq.com (Qin Luo)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Li Xueping, Li Jingjing, Qin Luo. Research on Indoor Thermal Environment Testing of Farmers and Herdsmen's Dwellings in Tongliao, Inner Mongolia in Winter. *Science Discovery*. Vol. 10, No. 4, 2022, pp. 263-269. doi: 10.11648/j.sd.20221004.19

Received: July 26, 2022; Accepted: August 23, 2022; Published: August 29, 2022

**Abstract:** In order to grasp the current situation of the indoor thermal environment in winter in Tongliao, Inner Mongolia, a representative dwelling was selected to conduct indoor and outdoor air temperature and humidity, solar radiation intensity, inner surface temperature of outer wall, kang surface temperature, flue outlet temperature and other thermal environment Parameter test, analysis based on temperature accumulation evaluation and PMV-PPD thermal evaluation system. The result shows: The thermal insulation performance of the external walls of residential buildings is poor, and the average radiation temperature is about 5°C lower than the air temperature, which is easy to cause cold radiation effects on the human body, and the indoor thermal comfort is low; The average temperature of the heated kang surface can reach 41.6°C, which is less safe; The temperature of the smoke outlet can reach up to 166.5°C, the heat loss is serious, and it is not used well; The average value of PMV of residents' vote on the predicted thermal sensation is -0.99, the predicted dissatisfaction percentage PPD is as high as 50%, and the indoor thermal environment needs to be improved. The conclusion can provide a basis for the improvement and sustainable development of the indoor thermal environment of farmers and herdsmen.

**Keywords:** Farmer's and Herdsmen's Dwellings, Indoor Thermal Environment, Heating Energy Consumption

## 内蒙古通辽农牧民居冬季室内热环境测试研究

李雪平, 李京京\*, 秦洛

西安科技大学建筑与土木工程学院, 西安, 中国

## 邮箱

1142550891@qq.com (李雪平), 208805484@qq.com (李京京), 1095372896@qq.com (秦洛)

**摘要:** 为了掌握内蒙古通辽农牧民居的冬季室内热环境的现状, 选择一栋代表性民居进行室内外空气温湿度、太阳辐射强度、外墙内表面温度、火炕炕面温度、烟道出口温度等热环境参数测试, 依据温度累积评价和PMV-PPD热评价体系进行分析。结果表明: 民居外墙保温性能较差, 平均辐射温度低于空气温度约5°C, 对人体易造成冷辐射影响, 室内热舒适性较低; 火炕表面温度上升时的平均温度可达到41.6°C, 安全性较差; 出烟口温度最高可达166.5°C, 热量散失严重, 没有得到很好地利用; 居民对预测热感觉投票PMV的均值为-0.99, 预测不满意百分比PPD高达50%, 室内热环境需改善。结论可为农牧民居室内热环境改善及可持续发展提供依据。

**关键词：**农牧民居，室内热环境，采暖能耗

## 1. 引言

近些年来，国内研究学者对于各地区农村民居的冬季室内热环境进行了大量的研究，很多学者[1-6]通过对当地民居实测，掌握了民居现存室内热环境问题，并分析了相应的影响因素或提出相应的建议；金国辉等[7]以三种住宅为研究对象，对影响能耗的8个因素进行单因素优化和正交优化并选出优化方案；王芳等[8]通过实测与模拟，提出了阳光间的量化改善措施；周雪涵等[9]以大进深房间为研究对象，研究了室内的热量与室外空气温度对进深方向温度分布的影响；李金平[10]研究了架空炕与落地炕两种采暖方式对室内热环境影响。其中对内蒙古通辽民居冬季室内热环境的研究很少，还有待于研究。通辽位于内蒙古自治区的东部，属于严寒C区，冬季寒冷漫长、室内温差较大，采暖期为六个月。该地区民居为农牧民自主建设，并无集中采暖，常用火炕加土暖气联合供暖系统，利用效率低。

本文对代表性民居的冬季室内热环境进行分析研究，在冬季1月份进行空气温湿度、壁面温度、太阳辐射强度等热环境参数测试，依据PMV-PPD热评价体系进行分析，并提出相应优化策略，为当地农牧民居节能研究提供依据。

## 2. 测试方案

### 2.1. 测试对象

本文选择一栋代表性的内蒙古通辽农牧民居进行冬季室内热环境测试分析（如图1所示），该民居建于2010年，居住人口为四人；为南北朝向，单层独立式坡屋顶建筑，建筑平面形式为矩形。民居在功能布局上将客厅、东西卧室等房间设置在南向，厨房、储物间等房间设置在北向；民居长12m、宽8m，民居北侧有一个2m宽的后房厦。室内净高2.7m，东卧室设置“火炕+土暖气”联合采暖，西卧室设置火炕采暖，中间客厅采用土暖气采暖，其他房间均不供暖，火炉设置在厨房。



图1 民居实际图。

测试火炕的炕墙采用普通红色黏土砖砌筑；实际图如图2所示，炕面尺寸为3200mm×2000mm×600mm，火炕面板采用尺寸为400mm×900mm×60mm的预制钢筋混凝土板拼搭而成，上敷20mm黏土蓄热层（炕面泥）；炕板支柱布置在炕洞中间，由一排七组间距相同的240mm×240mm的红砖墩组成；炕内底层为300mm厚的垫土蓄热层；进烟口尺寸为200mm×150mm，距垫土蓄热层上边缘为100mm；出烟口尺寸为200mm×150mm，出烟口最低点要比进烟口最高点高200mm，距垫土蓄热层上边缘为200mm。烟囱尺寸为500mm×500mm，如图3所示。



图2 火炕实际图。

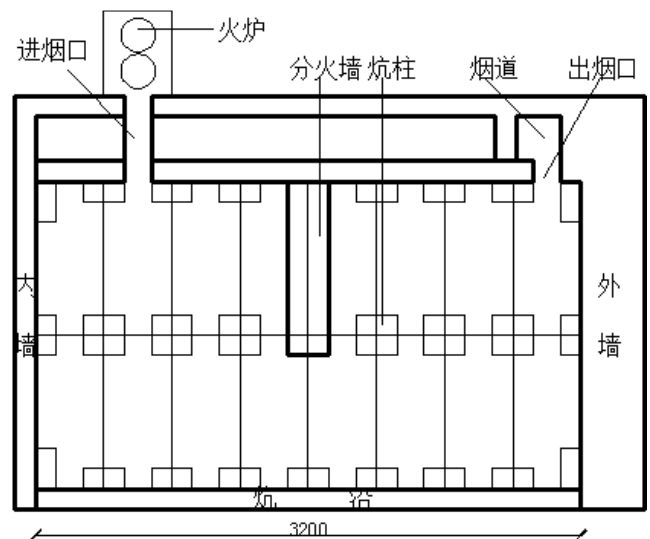


图3 火炕结构平面图。

### 2.2. 测试参数及仪器

测试参数包括：太阳辐射强度、室内外的空气温度、相对湿度、外墙内表面温度、火炕平均温度，烟道出口温度等参数；各项参数的测试均为同时进行。具体的测试仪器如表1所示。

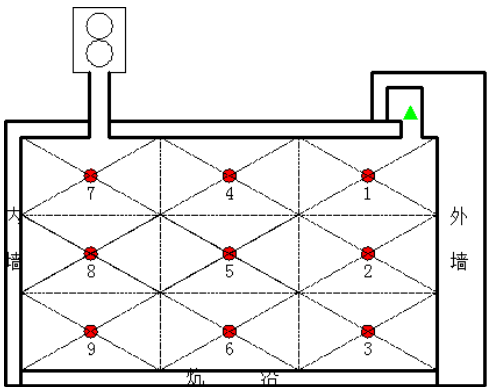
表1 测量仪器基本汇总表。

仪器名称	仪器型号	测量参数	测试范围	测试精度
温湿度记录仪	Testo175H1	室内外空气温度	-20~+55℃	±0.4℃ (-20~+55℃)
K热电偶测温线		相对湿度	0~100%RH	±2%RH (2~+98%RH)
K热电偶测温线		炕面表面温度、外墙内表面温度	-50~260℃	读数值x0.5%+1℃
太阳能辐射测试仪	SM206	烟气出口温度	-50~400℃	读数值x0.5%+1℃
多路温度记录仪	JK4024		0.1~1999.9W/m²	±5%、±10W/m²
				读数值x0.5%+1℃ (-200~1800℃)

2.3. 测试时间及测试点布置

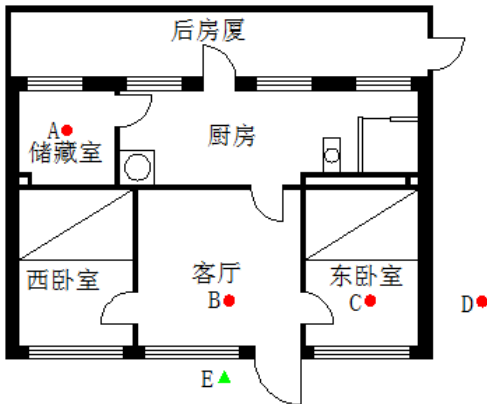
测试地区的采暖期为6个月，通常为每年10月中旬至下一年4月中旬。具体测试时间为：2022年1月28日~1月29日。

对民居的室内外及各功能房间进行24小时不间断连续测试。（1）为避免太阳辐射影响，温湿度自动记录仪放置在背阴且通风良好处，室内布置在距离室内地面1.5m处，距离门窗和壁面0.6m以上的距离处；（2）太阳能辐射测试仪避免放置在遮挡处；（3）多路温度记录仪同时自动记录炕表面温度、外墙内表面温度、烟气出口温度等数据；（4）火炕平均分成九等份，每一等份中心处为测试点，热电偶探头需紧贴炕表面。



● 炕面测温点 ▲ 出烟温度

(a) 炕面测试点



● 温湿度测试点 ▲ 太阳辐射强度测试点

(b) 民居测试点

图4 民居测点布置图。

3. 测试结果分析

3.1. 冬季室外热环境分析

室外温湿度测试数据如图5所示，空气温度曲线与相对湿度曲线变化趋势相反，相对湿度随着空气温度的升高而降低。测试期间，室外空气温度的最高温度为-6.1℃，出现时刻为13:30；最低温度为-17.9℃。出现时刻为06:30；室外最高相对湿度为79.8%。最低相对湿度为41.9%，平均值为61.2%。

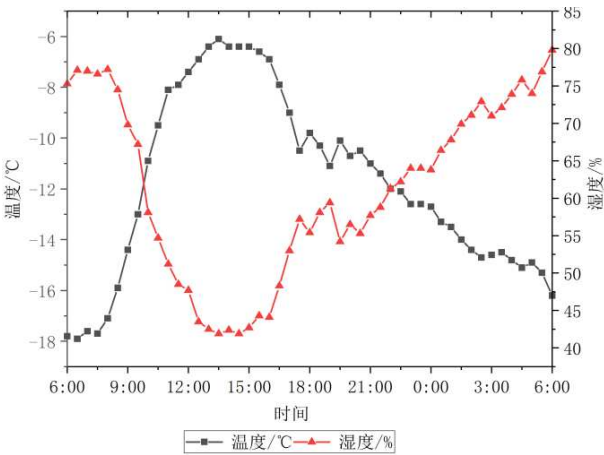


图5 室外温湿度变化图。

2022年1月28日太阳辐射强度变化如图6所示，当日日照时间长度约10h，辐射强度峰值为460.37W/m²，出现在当地时间下午13:00左右，总辐射强度平均为279.91W/m²，通过测试数据可以得出，太阳总辐射强度较高，可有效利用太阳能。

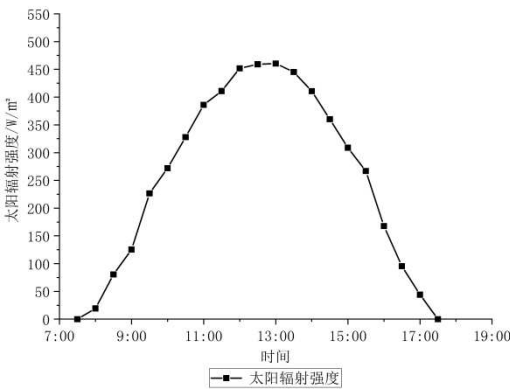


图6 太阳辐射强度图。

### 3.2. 室内温湿度分析

室内温湿度变化曲线如图7所示,该民居的卧室主要以火炕+土暖气联合供暖,平均温度14.8℃,最高温度19.3℃,最低温度9.4℃,波幅9.9℃,温度波动较大,仅在部分时段能够满足居民的热舒适需求;客厅用土暖气供暖,平均温度12.7℃,最高温度17.5℃,最低温度8℃;储物间无任何供暖设施,位于民居的北侧,北靠后房厦,常年无阳光照射,储物间的平均温度分别为4.9℃,最高温度为6.9℃,最低温度为3℃。由此可知,室内的供暖设施对室内温度有着很大的影响。

冬季民居门窗紧闭,室内外换气次数较少,经测试得出,卧室相对湿度最高为52.2%,最低33.2%,平均41.6%,波幅为19%;客厅相对湿度最高为47.5%,最低25.4%,平均38.4%,波幅为21.2%;储物间相对湿度最高为78.3%,最低42.3%,平均52.6%,波幅为36%。波动幅度主要围绕在15%~40%之间。储物间朝北,且不供暖,平时也很少有人进入,同一时间储物间的相对湿度总体要高于卧室和客厅的相对湿度。

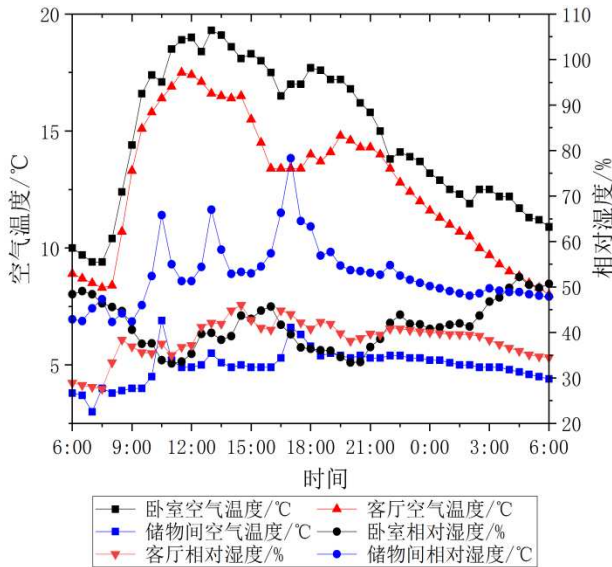


图7 室内温湿度变化图。

### 3.3. 平均辐射温度

平均辐射温度[11]是室内热环境重要的一项指标,在取暖季,如果外围护结构内表面温度低于室内温度,将会对人产生“冷辐射”。根据平均辐射温度MRT公式对数据进行处理:

$$MRT = \frac{\sum_{i=1}^n S_i t_i}{\sum_{i=1}^n S_i} \quad (1)$$

式中,  $t_i$  为卧室墙壁内表面温度,℃,  $S_i$  为卧室墙壁内表面面积,  $m^2$ 。

通过对数据的处理,我们可以得到该民居卧室平均辐射温度图,如图8所示,平均辐射温度在8.6℃~15.2℃之间,室内空气温度比平均辐射温度高,最高温度差5℃,

室内将产生较高的冷辐射,将会影响农牧民在室内的舒适感。

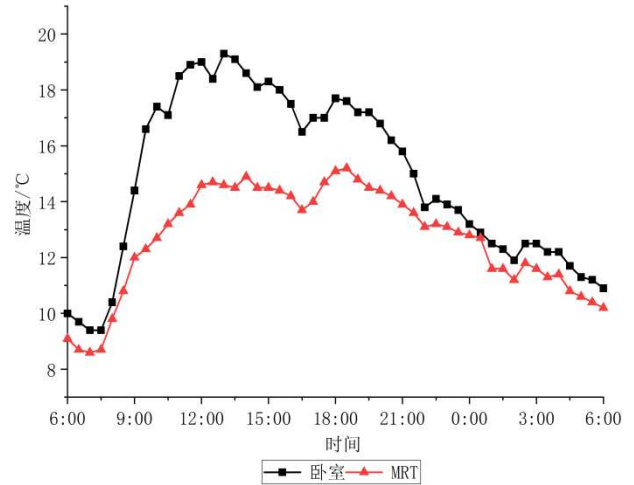


图8 平均辐射温度图。

### 3.4. 水蒸气分压力

水蒸气分压力也是评价室内热环境的一项重要参数,水蒸气分压力和饱和水蒸气分压力可以由(2)(3)公式计算得出:

Tetens公式

$$E_s = 611.2 e^{\frac{17.67t}{t+243.5}} \quad (2)$$

$E_s$  为饱和水蒸气分压力, KPa;  $t$  为温度,℃。

$$E = E_s \times H \quad (3)$$

$E$  为水蒸气分压力, KPa;  $H$  为相对湿度, %。

通过计算可以得到,民居卧室24小时内的时间与饱和水蒸气分压力关系曲线图,如图9所示,饱和水蒸气分压力主要在1.2KPa~2.2KPa之间,水蒸气分压力主要在0.5KPa~1KPa之间。

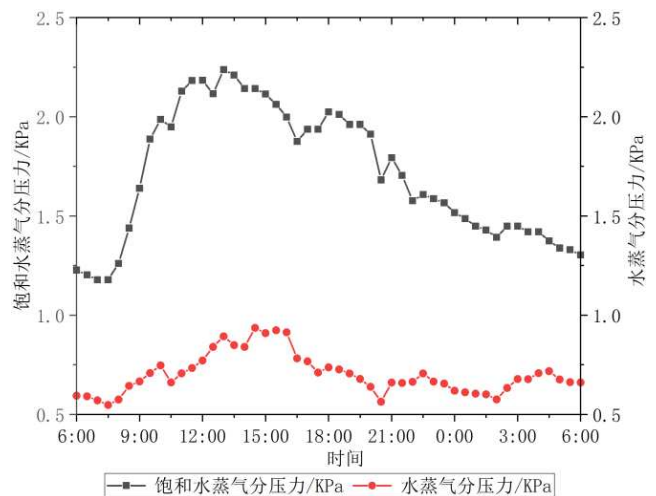


图9 水蒸气分压力图。



3.5. 火炕及出烟口热工性能分析

3.5.1. 火炕热工性能分析

火炉，是通辽农牧民居的主要供暖设施，该民居为灶连炕形式，每天烧两次炕，主要使用玉米芯、煤炭等燃料，测试得当日炕面温度变化如图10所示。

第一次生火在早上7:00左右，到10:00左右炕面温度达到顶峰；第二次生火在下午16:30左右，到19:00左右炕面温度达到顶峰；由绘制的曲线可知，炕面温度曲线在晚上21:00开始有了上升的变化，而测试当天，在21:00左右，居民开始在测试的火炕上面铺设被褥准备就寝，说明人们的日常活动对炕面温度也有一定的影响。

因结合一天烧两次的火炕运行特点，火炕的热工性能指标分两个阶段进行研究，根据火炕热工性能公式[12]对数据作出处理，处理结果如下：

火炕是农牧民冬季主要的休息地和休闲娱乐地，大多数时候，居民都是与火炕直接接触，为了火炕的安全性及满足居民的热舒适性，火炕温度要低于40℃，经过统计计算，升温阶段的炕面平均温度为41.6℃、37.4℃，如图9所示，有近一半的测温点均大于40℃，最高已达到50℃，说明炕面平均温度偏高，其热舒适性较差，安全性也较差；炕面平均升温速度2.5℃/h、2.3℃/h；炕面温度不均匀度为11.1℃、11.5℃，炕头与炕梢的温度不均匀；炕面降温速度1.8℃/h、1.9℃/h。

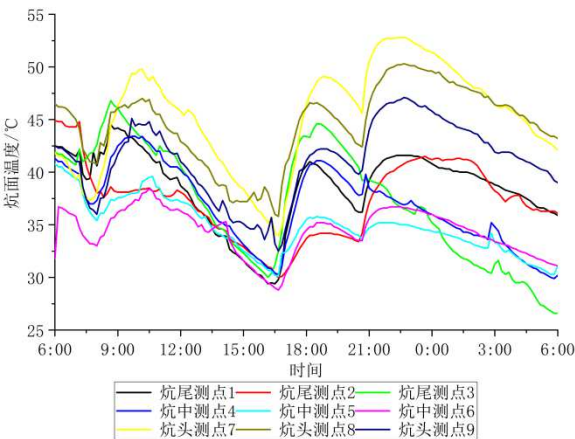


图10 炕面温度。

3.5.2. 出烟口热工性能分析

在给火炉生火时，高温烟气就会进入火炕洞内，热量一部分通过炕面板散至室内，一部分通过烟道排到室外，如果出烟口的烟气的温度过高，说明烟气的热量并没有得到很好地利用；如果出烟口的烟气温度过低，说明炕体内烟气流动不好，可能会出现倒烟的现象，导致室内空气变差；为了探究出烟口的温度分布情况，对出烟口连续24小时测温，测试情况如图11所示：

曲线有两次骤然的突变，第一次在早上8:00左右，第二次在下午16:30左右，符合该民居对火炕进行两次生火这一事实情况，火炕烟道出烟口最高温度166.8℃，排出的烟气热量较高，没有得到较好的利用。每次生火持续两

个小时左右，生火完毕，用插烟板把烟道堵住，有效减缓了火炕洞内温度的散失，符合曲线后半段平稳下降的状态

针对出烟口温度过高现象，可以考虑在出烟口前设置阻烟墙，增加烟气停留炕内的时间。

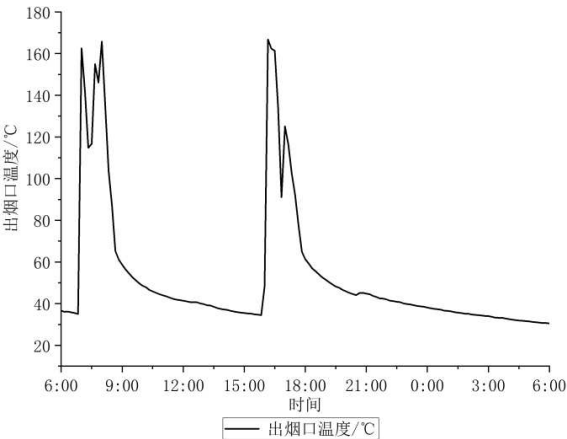


图11 出烟口温度变化图。

4. 室内热舒适评价

4.1. 累积频率评价

把所有的数据按某种特征分组，每组中的数据个数称为频数，每组频数占全部频数的百分比称为频率，而某一数值以下或以上的频率之和，叫做累积频率，频率的最终累积值为100%。

采用温度累积频率[13]指标对室内热舒适评价，即是对卧室、客厅、储物间的统计温度大于等于设定温度的时间占总时间的百分比。设定温度14℃，此数据来源于《农村居住建筑节能设计标准》GB/T 50824中规定的室内计算温度值。该民居的功能房间的温度累积频率如图12所示。

卧室是居民的主要的功能房间，在冬季，居民大约有80%的时间处于卧室之中。经统计分析，该卧室大约有49%的时间低于14℃；客厅有76%的时间低于14℃；储藏室由于不供暖且朝北，全天温度均低于14℃。

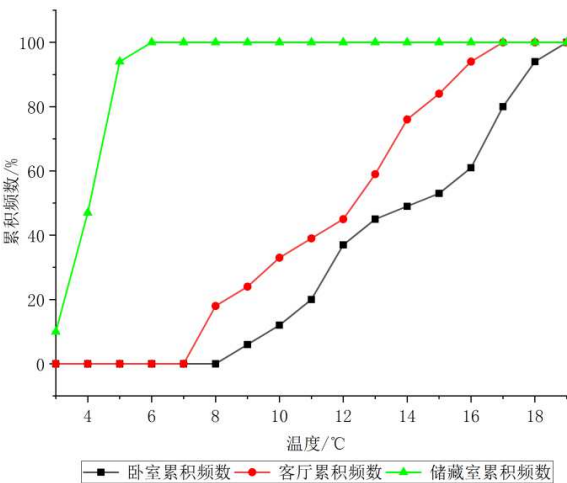


图12 温度累积频数。

## 4.2. 热环境PMV-PPD评价

用PMV-PPD热评价体系[14, 15]对通辽农牧民居室内热环境进行分析, 新陈代谢率、服装热阻、风速等参数进行以下设定: 在冬季, 该地区民居室内门窗紧闭, 偶有居民进出, 此处室内风速设定为0.04m/s; 居民在冬季室内活动主要以餐饮、休憩、做家务为主, 此处新陈代谢率设定为1.4met; 农牧民在室内着装主要以毛衣、棉裤为主, 此处服装热阻1.5clo; 空气温度、相对湿度、平均辐射温度、水蒸气分压力等参数以实测数据为主。

根据相关参数的设定, 使用ASHRAE Standard 55热舒适计算程序计算同一时刻的热舒适值。计算结果如图13所示。通辽农牧民居预测热感觉投票PMV的范围为-1.5~-0.5之间, 均值为-0.99; 预测不满意百分比PPD范围在10%~55%之间, 均值为27%。而评价的依据选择选择ISO7730标准推荐的PMV值在-0.5~+0.5的范围内, PPD≤10%之内。结果表明, 通辽农牧民居室内热环境未达到标准, 室内热舒适度较差, 处于微凉的状态, 需要改善。

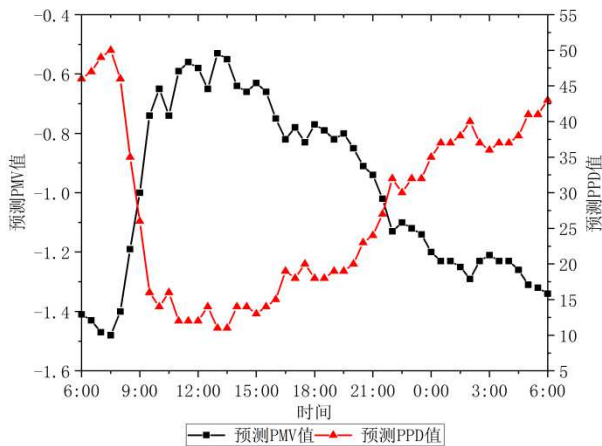


图13 PMV-PPD曲线图。

## 5. 优化方案

依据上文分析, 可以提出以下几种优化方案, 示意图如14所示, 具体如下:

- (1) 由测试分析可知, 民居冬季室内温度变化较大, 外墙散热量较高, 有较高的冷辐射, 可通过对围护结构增加隔热保温材料, 以减少热量的散失。
- (2) 依据上文中对太阳辐射强度的分析, 民居南面增加附加阳光间, 以增加对太阳辐射的利用, 在白天时, 太阳的热辐射照射附加阳光间, 其中一部分太阳能会被反射到大气中, 另一部分太阳能会被阳光间储存下来; 在夜间时, 无太阳辐射, 室外温度逐渐降低, 阳光间内储存的热量将会向室内传递热量, 减少室内的热量通过围护结构向室外散失。
- (3) 炕面温度较高, 烟道出口温度较高, 热量散失较多, 可以针对火炕系统做如下措施: ①通过把落地炕更改为吊炕, 增加火炕的散热面积, 增加了烟气热量的利用; ②在出烟口前设置阻烟墙, 以

减少出烟口的热量散失; ③火炕改造成水暖炕, 传统落地炕使用的煤等燃料数量较多, 且火炕热量利用率较小, 不利于节能环保, 改成水暖炕, 运行成本较低, 安全干净, 节能环保。

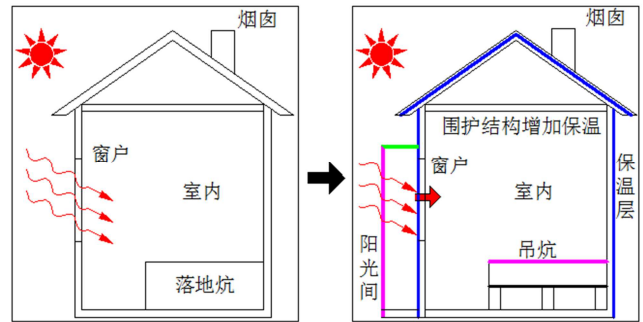


图14 优化方案。

## 6. 结论

- (1) 内蒙古通辽农牧民居的冬季防寒效果较差, 室内温度较低, 室内温度比平均辐射温度高, 最高的温差可达到5°C, 易对人体造成冷辐射, 对居民的身体健康有不利的影响。
- (2) 依据对火炕的热工性能的分析可以得出, 炕面平均温度较高, 热舒适度和安全性较差; 烟气出口温度较高, 烟气热量没有得到有效利用。
- (3) 依据PMV-PPD热评价体系进行分析, 民居室内预测热感觉投票PMV均值为-0.99, 预测不满意率PPD最高可达50%, 室内热环境问题仍需改善。
- (4) 依据实测数据以及民居建筑特点, 对内蒙古通辽农牧民居室内热环境的改善提出三点优化方案, 分别为围护结构增加隔热保温材料、增加附加阳光间、改进火炕系统。

## 致谢

本文为陕西省教育厅科学研究计划项目 (编号: 20JK0237)。

## 参考文献

- [1] 聂倩, 张群, 桑国臣, 等. 拉萨乡村碉房民居冬季室内热环境测试研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(10): 21-25+44.
- [2] 刘虹伶, 杨真静, 唐鸣放. 桂西北地区壮族传统民居冬季室内热环境实测研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(06): 113-121.
- [3] 邵腾, 金虹. 严寒地区乡村民居冬季室内热环境测试分析[J]. 建筑技术, 2016, 47(10): 883-886.
- [4] 闫海燕, 李道一, 李洪瑞, 等. 焦作民居建筑冬季室内热环境测试研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(10): 21-28+72.

- [5] 方巾中,唐鸣放,王东.重庆地区夯土民居春夏两季室内热环境测试分析[J].建筑科学,2016,32(08):106-110。
- [6] 刘艳峰,胡筱雪,周勇,等.拉萨新民居建筑冬季室内热环境影响因素分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(01):109-115。
- [7] 金国辉,张东杰,李雨泽,等.内蒙古西部农牧区住宅冬季室内热环境优化研究[J].太阳能学报,2020,41(01):154-160。
- [8] 王芳,张宏焯.迪庆藏区阳光间型民居冬季室内热环境分析研究[J].工业建筑,2020,50(07):107-112。
- [9] 周雪涵,卞维军,夏利梅,杨秀峰.大进深房间冬季室内热环境分析[J].扬州大学学报(自然科学版),2018,21(04):66-71。
- [10] 李金平,郭精韬,王春龙,李红博.架空炕与落地炕采暖对室内环境影响的对比试验[J].兰州理工大学学报,2020,46(02):69-74。
- [11] 刘加平,建筑物理[M].4版,北京;中国建筑工业出版社,2010。
- [12] 方修睦,王芳,李桂文.火炕热工性能评价指标及检测方法研究[J].建筑科学,2014,30(06):118-123。
- [13] 宋平,唐鸣放,郑开丽.重庆农村住宅热环境实测与评价[J].建筑科学,2015,31(06):118-123。
- [14] 李雪平,崔羽.关中地区下沉式窑洞冬季室内热环境测试研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(04):591-596。
- [15] 李雪平,刘姣.苏州水乡传统民居冬季室内热环境研究[C]//2021第五届土木工程国际会议论文集,2022:66-71。