

# 陕西关中农村冬季住宅室内热舒适调查研究

杨 柳<sup>1,2</sup>, 杨 茜<sup>1</sup>, 闫海燕<sup>1</sup>, 刘加平<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

**摘 要:**对 36 户关中地区农村住宅冬季室内物理环境参数进行测量, 以问卷方式对居民的基本情况和以 ASHRAE 的 7 级热感觉标度对居民的热感觉主观反应进行调查统计. 运用统计学分析方法对测试与调查结果进行回归分析, 得到该地区居民冬季的热中性温度为 11.7℃, 热期望温度为 12.7℃, 冬季 80% 居民可接受温度范围的下限为 8.0℃.

**关键词:**农村住宅; 热感觉; 适应性热舒适; 现场调查

中图分类号: TU119

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)04-0551-06

迄今为止国内外许多学者进行了大量的热舒适现场测试, 实验证明人们在室内热环境的实际热感觉与采用国际热舒适标准 ISO 7730<sup>[1]</sup> 和 ASHRAE55-1992<sup>[2]</sup> 的预测结果存在明显差异, 而引起差异的主要原因是人对气候的行为适应性及心理期望值<sup>[3]</sup>. 在热舒适的现场研究中, 我国学者主要的研究对象为城市建筑<sup>[4-8]</sup>, 对农村住宅的研究主要集中在室内热环境的测试和民居的演进等方面<sup>[9-10]</sup>, 但对农村住宅的热舒适很少涉足. 近年来, 随着经济的发展, 特别是新农村建设的提出与发展, 农村人居环境成为人们关注的焦点, 改善农村住宅的室内热环境, 提高舒适性的问题引起越来越多学者的注意. 为此, 本文以陕西关中农村住宅为研究对象, 对室内外的环境物理参数进行了现场测量, 以问卷的方式对居民热感觉主观反应进行了调查统计, 并以此为基础运用了统计学分析方法对测量及调查结果进行了统计回归分析, 以求得到最佳室内舒适温度, 为农村住宅室内设计提供依据.

通过调研我们了解到当地大多数农宅的基本情况为: 宅基地面积约 280 m<sup>2</sup>, 建筑面积 120~170 m<sup>2</sup>, 单层或两层的独院式住宅. 住宅底层层高一般为 3.8 m, 二层层高 2.2 m, 以砖木及砖混结构为主, 硬山屋顶, 屋面上铺红色或灰色机瓦, 窗户为木框单玻者居多, 外门为木门, 建筑外墙为 240 mm 厚粘土砖墙, 内隔墙为 120 mm 厚砖墙, 外墙饰面一般为清水砖墙, 底层窗下墙外抹水泥砂浆. 墙体与屋顶均无保温措施, 室内热环境状况较差.

## 1 调查方法

### 1.1 样本选择

本次调查的住宅建筑样本量为 36 户, 受试人数为 66 人, 其中男性 35 人, 女性 31 人, 共得到 198 套有效调查数据. 在所调查的 36 户住宅中, 有 29 户采用了自家间歇煤炉或偶尔使用电暖气采暖, 另外 7 户则无采暖措施. 本次调查的对象包含了不同性别、不同年龄、不同文化层次等背景的人群.

### 1.2 数据采集

关中地区在我国热工分区上属于寒冷地区, 本次调查时间从 2009 年 1 月 15 日到 1 月 19 日, 此时关中地区已经进入最冷月. 调查期间室外平均温度为 -0.4℃, 最高温度 1.5℃, 最低温度 -2.5℃. 在进行问卷调查的同时测试室内外物理环境参数.

#### 1.2.1 环境参数测试

室内外物理环境参数的测试, 包括室内空气温度、相对湿度、辐射温度、空气流速以及室外空气温

\*收稿日期: 2010-05-24 修改稿日期: 2011-06-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50978210, 50921005); 陕西省教育厅科学研究计划自然科学基金专项基金资助(09JK555)

作者简介: 杨 柳(1970-), 女, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 主要从事建筑热工与节能方面的研究.

度、相对湿度. 测量时间在每天的早(起床~11 点)、中(11 点~17 点)、晚(17 点~就寝)三个时段,连续测试 3d. 所用的测量仪器是自记式干湿球温度计、热线风速仪、室内气候分析仪等.

1.2.2 主观调查

主观问卷调查,内容包括:(1)受试者基本的背景情况,如年龄、性别、衣着情况等;(2)受试者改善室内热环境的适应性措施,如取暖炉、电暖气等,以及居民增加着衣量、增加活动量等自身的适应性行为;(3)人体热感觉及舒适度调查,调查期间居民的热感觉以及对室内环境的满意度、风速、潮湿状况等的主观评价,热感觉的投票值采用 ASHRAE 的 7 级指标表示.

在调查过程中,详细记录受试者的衣着情况,并按照 ASHRAE 55-1992 标准,计算出受试者所穿服装的热阻值,以单位 clo 表示( $1\text{ clo} = 0.155\text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ ). 考虑到椅子对坐姿受试者的服装热阻的作用<sup>[2]</sup>,对热阻值进行了修正,修正值为 0.15 clo. 在调查过程中受试者基本为坐着看问卷或回答问题,整个过程历时至少 20 min,所以把新陈代谢率定为 1.2 met( $1\text{ met} = 58.2\text{ W/m}^2$ ),这是坐姿轻微活动者所具有的新陈代谢水平.

以操作温度(operative temperature) $t_o$  作为热舒适评价标准,来描述该地区人体热感觉. 操作温度  $t_o$  为空气温度  $t_a$  与平均辐射温度  $t_r$  的平均值. 以操作温度  $t_o$  为自变量,通过线性回归分析得到相应的关系式,令平均热感觉投票值等于 0,即计算出热中性温度. 利用概率统计的方法计算期望温度.

2 调查结果与分析

2.1 人员背景资料

本次调查的受试人员共 66 人,其中:男性 35 名(53%),女性 31 名(47%),年龄在 10~77 岁之间,平均年龄为 42.3 岁,见表 1. 受试者在该地区均居住 10a 以上,基本上适应了当地的室内外气候环境条件. 另外,受试者基本上都能独立的完成问卷.

2.2 服装热阻与室内热环境参数

表 2 中,  $I_{cl}$  服装热阻值(不含附加热阻),  $t_a$  为空气温度,  $t_o$  为操作温度,  $\varphi$  为相对湿度. 可以看出,受试人员的平均服装热阻为 1.98 clo,最小服装热阻为 1.37 clo,最大则达到 2.74 clo. 有采暖房间的平均服装热阻为 1.95 clo,无采暖房间的平均服装热阻高达 2.11 clo. 如图 1 所示,采暖房间服装热阻主要分布在 1.5~2.3 clo 之间,无采暖房间服装热阻主要分布在 1.7~2.5 clo 之间,但无论采暖还是无采暖房间的服装热阻值都较大.

对实测所得的室内物理参数及服装热阻值进行统计整理,有采暖房间室内的平均温度为 5.6℃,平均相对湿度 62.8%,而无采暖房间的室内平均温度仅达到 3.9℃,平均相对湿度 65.3%,采暖房间的热环境较无供暖房间稳定.

由图 2-a,2-b 可以看出,有无采暖房间室内温湿度

表 1 受试对象背景资料统计表  
Tab.1 Anthropometric data of the subjects

Sample sizes 66 (male 35,female31)	Mean	S. D.	Min	Max
Age	43.3	16.2	10	77
Height/cm	161.6	15.6	63	183
Weight/kg	58.2	11.7	15	85

表 2 服装热阻及环境物理参数统计表  
Tab.2 Summary of clothing insulation value and  
measured data distribution

Sample sizes (66)		Mean	S. D.	Min	Max
$I_{cl}$ /clo	Heating	1.95	0.30	1.37	2.58
	No heating	2.11	0.32	1.54	2.74
	total	1.98	0.31	1.37	2.74
$t_a$ /℃	Heating	5.6	2.04	1.2	13.1
	No heating	3.9	1.85	1.0	9.4
	total	5.2	2.78	1.0	13.1
$t_o$ /℃	Heating	4.9	2.10	1.2	9.2
	No heating	62.8	8.24	43.5	86.3
	total	65.3	3.91	60.7	72.6
$\varphi$ /%	Heating	63.3	9.76	43.5	86.3
	No heating				
	total				

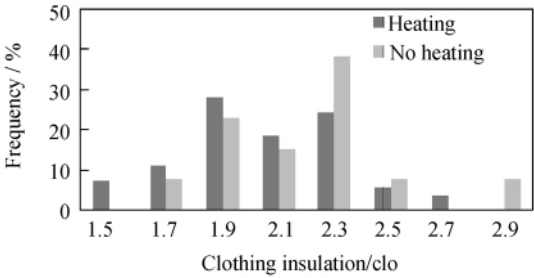


图 1 服装热阻频率分布

Fig.1 Frequency distribution of clothing insulation value

的差别.有采暖室内温度普遍分布在 $4\sim 8^{\circ}\text{C}$ ,湿度分布在 $50\sim 60\%$ ;无采暖室内温度分布在 $1\sim 6^{\circ}\text{C}$ ,湿度分布在 $60\sim 70\%$ .

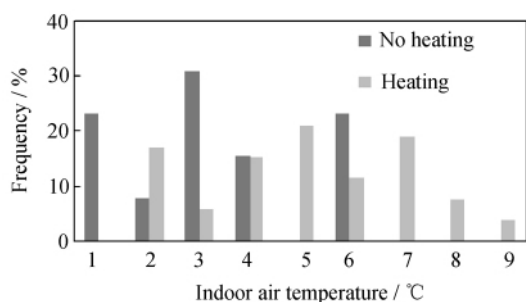


图 2-a 室内空气温度频率分布

Fig. 2-a Frequency distribution of indoor temperature

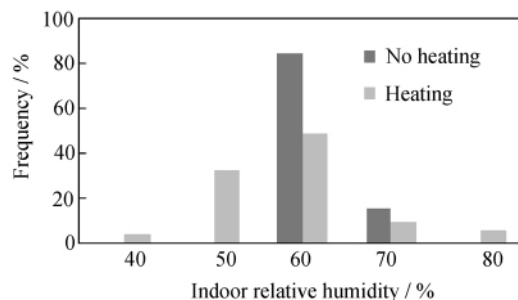


图 2-b 室内相对湿度频率分布

Fig. 2-b Frequency distribution of indoor relative humidity

该地区建筑外围护结构没有采取任何保温措施,外墙基本为清水砖墙,无饰面材料保护增加了冬季墙体冷风渗透以及墙体传热量,同时由于受经济条件的制约,该地区居民冬季主要的采暖设备为蜂窝煤炉和灶连炕,而且仅为个别空间加热方式,无法满足室内热环境的要求,造成较差的室内热环境,因此居民在冬季必须穿着大量的衣物来御寒.

### 2.3 冬季居民对室内热环境的适应性热舒适分析

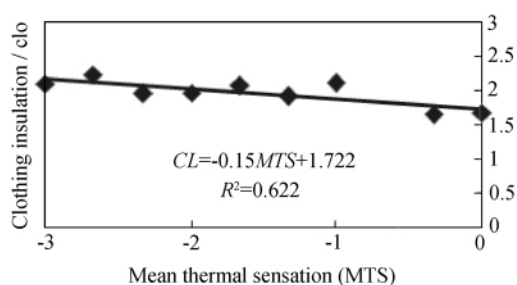
#### 2.3.1 着衣量的相关性分析

人体对冬季过冷反应进行行为调节的主要方式体现在通过穿衣物来增加服装热阻、关闭门窗来调节室内空气流速和增强活动强度来改变新陈代谢量等.对现场调查问卷进行统计分析得到,该地区居民冬季所采取的主动的行为调节措施为增加着衣量(86%)、关闭门窗(47%)、增加活动量(50%)以及在冬季多喝热开水(52%)等.其中,增加着衣量所占比例高达86%,因此着重分析着衣量与人的热感觉以及室内操作温度的相关关系.

为了适应该地区较差的室内热环境,居民长期以来形成了一定的冬季穿衣习惯,利用统计学的方法对冬季该地区居民的着装情况与有关参数进行统计分析,得到冬季居民的着装热阻与平均热感觉有一定的线性关系见图 3a.这说明,居民可以根据自身热感觉的变化来调整着衣量,适应室内热环境.图 3b 是服装热阻与操作温度的相关性分析,其回归方程为:

$$CL = -0.045t_o + 2.285 \quad (R^2 = 0.640) \quad (1)$$

式中:CL 为服装水平(clo), $t_o$  为操作温度( $^{\circ}\text{C}$ ),R 为相关系数.



a The relation between clothing insulation and MTS

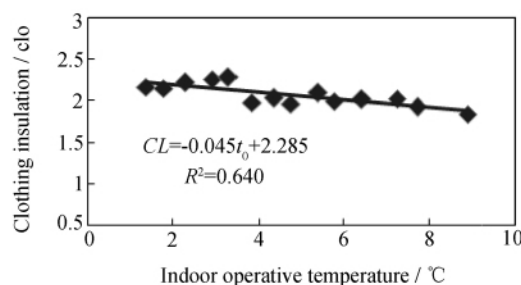
b The relation between clothing insulation and  $t_o$ 

图 3 服装热阻与室内操作温度的线性拟合图

Fig. 3 The relation between clothing insulation and MTS

由此可知,居民可以根据室内温度及热感觉的变化相应地增减着衣量与环境相适应,从而达到一种新的热舒适状态.在冬季,由于室内温度较低,增大着装量是居民采用的最主要的主动适应环境的调

节方式之一。

### 2.3.2 冬季热中性温度、热期望温度及热接受能力分析

#### (1) 热感觉

在对室内风速进行测试时发现,室内风速值普遍很低,平均风速值不到 0.1 m/s。将平均热感觉投票值 MTS(Mean Thermal Sensation)和  $t_o$  进行回归分析,线性拟合的结果见图 4。线性回归方程为:

$$\text{MTS} = 0.184t_o - 2.156 \quad (R^2 = 0.720)$$

式中:MTS 为平均热感觉投票值; $t_o$  为操作温度( $^{\circ}\text{C}$ )。

由于冬季人们的衣着量普遍较大等缘故,热感觉随室内温度的变化不太敏感,当室内温度每改变  $1^{\circ}\text{C}$ ,其热感觉相应仅改变 0.23 个标度。

#### (2) 热中性温度与期望温度

由于样本容量的限制,在求解中性温度与期望温度时,综合了采暖与无采暖两种状态的总样本。由图 4 平均热感觉 MTS 与操作温度  $t_o$  的回归曲线方程可求得该地区冬季室内的热中性温度,当  $\text{MTS} = 0$  时,热中性温度(neutral temperature)为  $11.7^{\circ}\text{C}$ (以  $t_o$  表示)。冬季室内的平均操作温度( $4.9^{\circ}\text{C}$ ),远小于热中性温度。

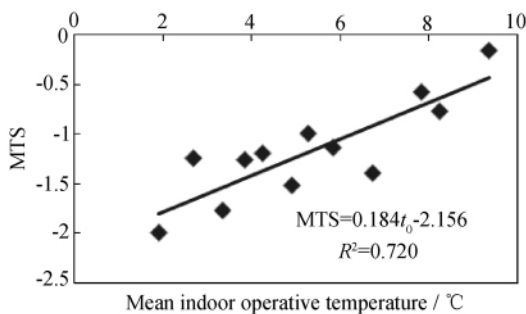


图 4 平均热感觉 MTS 与操作温度  $t_o$  的拟合曲线

Fig. 4 The relation between MTS and indoor operative temperature

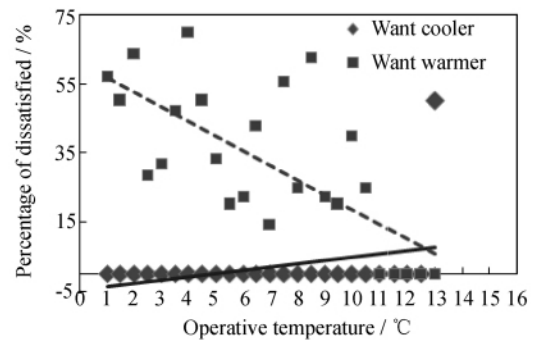


图 5 冬季期望温度的求解

Fig. 5 Calculation of preferred temperature in winter

期望温度(preferred temperature)的计算采用概率统计的方法,在某一温度区间内以  $0.5^{\circ}\text{C}$  为组距,统计所期望的热环境比此刻较暖和较凉的人数占总人数的百分数,如图 5 所示,图中两条拟合的概率曲线的交点所对应的温度即为所期望的温度。该地区居民冬季的期望温度为  $12.7^{\circ}\text{C}$ (以  $t_o$  表示),高于热中性温度。可见,在寒冷地区的农村冬季人们所期望的温度要高于热中性温度。

将热中性温度( $t_n$ )与室内操作温度( $t_o$ )进行回归分析,如图 6 所示,其回归方程为:

$$t_n = 2.0407t_o - 1.6495 \quad (R^2 = 0.627) \quad (3)$$

由图 6 可以看出:冬季人们的热中性温度与室内操作温度之间存在着较强的相互依赖关系,即冬季热中性温度紧随室内温度的变化而变化。说明人们总是会随着室内温度的变化,采取一定的主动调节措施来调节自身的热平衡与环境相适应,有一定的环境适应性。

#### (3) 主观热可接受能力

居民对于室内热环境的接受能力,可采用直接和间接两种方法进行研究。直接方法是让居民直接判断热环境是否可以接受。统计分析得到:48.5%的居民不能够接受其所处的热环境,经调查发现热不接受原因中 80.7%认为冬季室内太冷,这再次说明了当地住宅室内热环境普遍较差。间接方法是按调查表中居民填写的热感觉投票值进行统计分析,计算在某一操作温度下投票值为不接受的人数占总投票人数的百分数,即为该温度下的不可接受率,见图 7。实测的热不可接受投票百分比(PPD\*)与操作温度( $t_o$ )的回归方程为:

$$\text{PPD}^* = 0.0034t_o^2 - 0.0833t_o + 0.6484 \quad (R^2 = 0.5221) \quad (3)$$

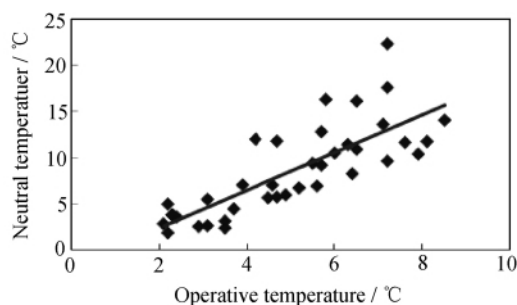


图6 冬季中性温度与室内操作温度的相关性

Fig. 6 The relation between the neutral temperature and the operative temperature

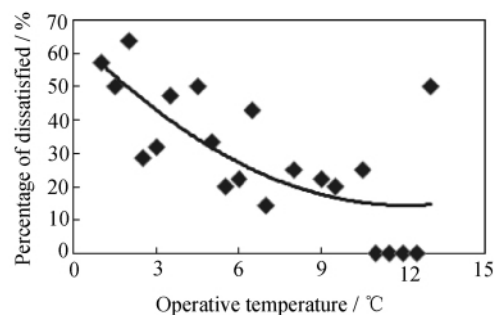


图7 不可接受投票百分比与室内操作温度的回归分析

Fig. 7 Regress analysis of percentage of dissatisfied and operative temperature

该区属寒冷地区,应进行冬季采暖,但受经济条件的制约,部分居民家冬季无采暖设备或有采暖设备但不使用,而有采暖的房间采暖设备相当简陋如煤炉,多数有采暖居民家仅在冬季最冷几日使用煤炉采暖,因此有、无采暖房间平均温度仅差  $1.7^{\circ}\text{C}$ ,室内热环境普遍较差。当地居民冬季采取多穿衣服、关闭门窗、多喝热水等主动调节措施来调节自身的热平衡。因此,长期居住此地的居民对热环境的行为、生理、心理适应能力较强。对 ASHRAE 标准和 ISO 7730 标准中规定的 80% 的居民接受的热舒适环境,也即预测不满意百分比  $\text{PPD} \leq 20\%$  的可接受温度范围,因冬季所测数据大多为冷不满意率,故可得出 80% 居民可接受温度的下限为  $8.0^{\circ}\text{C}$  (以  $t_o$  表示)。

## 2.4 实测平均热感觉 MTS 与预测平均热感觉 PMV 的比较

将测试得到的空气温度、相对湿度、风速等热环境参数以及服装热阻、新陈代谢率等,代入编制好的程序,计算得到预测平均热感觉 PMV 值。把计算得到的 PMV 值与实际测得的热感觉值作比较,见图 8。从图中可以看出,预测平均热感觉值低于实测的热感觉 MTS,当  $\text{PMV}=0$  时,得到预测热中性温度  $t_o$  为  $12.1^{\circ}\text{C}$ ,高于冬季实测的热中性温度 ( $11.7^{\circ}\text{C}$ ),这说明该地区冬季居民对冷的承受能力要比预测值高。由图 8 可以看出,PMV 值的分布比实测的 MTS 向较冷侧偏移。这表明,由于人的各种适应性,使得冬季人们实际的舒适温度低于理论上的舒适温度,实际环境中的舒适范围也比较宽。

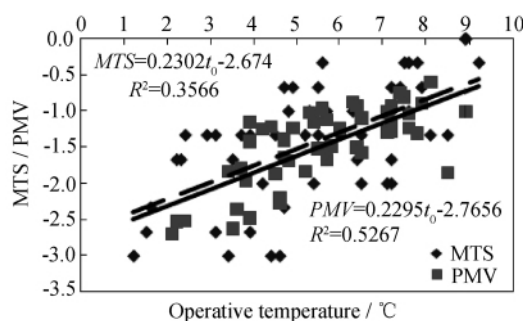


图8 冬季 PMV、MTS 与室内操作温度的关系对比

Fig. 8 Comparison with the relationship between operative temperature and PMV, MTS

## 3 结 论

通过对关中地区民居室内热环境的现场测试及对居民热感觉的问卷调查,可知该地区民居的室内热环境质量较差,分析其原因:受经济条件制约,居民生活水平普遍不高,冬季采暖条件简陋甚至无采暖;该地区建筑外围护结构没有采取任何保温措施,外墙基本为清水砖墙,无饰面材料保护增加了冬季墙体冷风渗透以及墙体传热量,从而造成室内热环境较差,因此,居民在冬季必须穿着大量的衣物来御寒。

对实测数据及调查问卷分析,总结了关中地区农村住宅冬季室内热舒适的适应性特点:(1)冬季人体的热中性温度为  $11.7^{\circ}\text{C}$ ,期望温度为  $12.7^{\circ}\text{C}$ ,高于热中性温度;(2)冬季 80% 居民可接受温度的下限为  $8.0^{\circ}\text{C}$ 。由于长期生活在该地区的居民对室内环境的适应,使得其具有一定的耐寒能力,心理上对室内热环境的期望值较低;(3)冬季人们的平均着衣量为 1.98 clo,而无采暖房间人们的平均着衣量为 2.11 clo,较大的着衣量是冬季居民对热环境采取的主要且有效的适应性调节措施;(4)冬季实测热感觉 MTS 比预测 PMV 值偏高,说明在实际环境中冬季人们的舒适区域较宽,舒适温度较低。

## 参考文献 References

- [1] ISO. International Standard 7730 Moderate thermal environments: Determination of PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1994.
- [2] ANSI/ASHRAE. Standard 55-2004: Thermal environmental conditions for human occupancy [S]. American Society of Heating, Atlanta, Georgia: Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 2004.
- [3] HUMPHREYS M A. Outdoor temperatures and comfort indoors [J]. Building Research and Practice, Journal of CIB, 1978(2):92-105.
- [4] 茅 艳. 人体热舒适的气候适应性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2007.  
MAO Yan. Study on Climate Adaptability of Human Beings to Thermal Comfort in China [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2007.
- [5] 李俊鸽, 杨柳, 刘加平. 夏热冬冷地区人体热舒适气候适应性模型研究[J]. 暖通空调, 2008, 38(7):20-25.  
LI Jun-ge, YANG Liu, LIU Jia-ping. Adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter zone [J]. Heating Ventilation & Air Conditioning, 2008, 38(7):20-25.
- [6] 李俊鸽, 杨柳, 刘加平. 夏热冬冷地区夏季住宅室内适应性热舒适调查研究[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4):200-205.  
LI Jun-ge, YANG Liu, LIU Jia-ping. A thermal comfort field survey in residential buildings in hot-summer and cold-winter area [J]. Sichuan Building Science, 2008, 34(4):200-205.
- [7] MAO Y, YANG L, LIU J P. Research on indoor thermal environment of residential buildings in summer in Jiaozuo [J]. Journal of Harbin Institute of Technology [J], 2007, 14(7):206-208.
- [8] 王昭俊, 方修睦, 廉乐明. 哈尔滨市冬季居民热舒适现场研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(4):500-504.  
WANG Zhao-jun, FANG Xiu-mu, LING Le-ming. Field experiments on occupant thermal comfort in Harbin [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(4):500-504.
- [9] 刘大龙, 刘加平, 何 泉, 等. 银川典型季节传统民居热环境测试研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010, 42(1):83-86.  
LIU Da-long, LIU Jia-ping, HE Quan, et al. Investigation of thermal environment for Yinchuan traditional dwelling building in winter [J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(1):83-86.
- [10] 胡冗冗, 石 峰, 何文芳, 等. 陕南山地民居的演变与发展[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2009, 41(6):841-845.  
HU Rong-rong, SHI Feng, HE weng-fang, et al. The changing course and development of the rural houses in mountain area in southern Shaanxi [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2009, 41(6):841-845.

## Field study on thermal comfort of rural houses in winter in a the Guanzhong region, Shaanxi Province

YANG Liu<sup>1,2</sup>, YANG Qian<sup>1</sup>, YAN Hai-yan<sup>1</sup>, LIU Jia-ping<sup>1,2</sup>

(1. School of Architecture, Xi'an univ. of Arch. And Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China (XAUAT), Xi'an 710055, China)

**Abstract:** A thermal comfort field study was investigated in 36 rural houses in Guanzhong region of Shaanxi Province in winter during which the indoor thermal environment conditions are measured, the thermal sensation value of the occupants questioned and recorded. A seven-point thermal sensation scale was used to evaluate the thermal sensation. The statistical method was used to analyze the data and the conclusions are as follows: the neutral temperature is 11.7℃, the preferred temperature is 12.7℃ and the lower limit of acceptable temperature range of 80% occupants is 8.0℃.

**Key words:** rural houses; thermal sensation; adaptive thermal comfort; field experiments

---

\*Biography: YANG Liu, Ph. D., Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-29-82205390, E-mail: yangliu@xauat.edu.cn