

# 绥化地区地板辐射式采暖居住建筑冬季室内 热舒适调查分析

张 群<sup>1,2</sup>, 于卓玉<sup>1</sup>, 成 辉<sup>1</sup>, 梁 锐<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 2. 苏州市建筑科学研究院院士工作站, 江苏 苏州 215129;  
3. 西安美术学院 建筑环境艺术系, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了研究严寒地区冬季采暖期居住建筑室内的热环境状况, 以绥化地区地板热辐射式采暖住宅为例, 调查了其室内热舒适现状, 探讨了改善建筑室内热环境的方法, 采用测试、问卷调查等方式和以 ASHRAE 的 7 级热感觉标度, 对该类建筑冬季室内热舒适情况和热感觉主观反映进行统计分析。结果显示, 该地区冬季地板热辐射采暖居住建筑室内温度偏高、居民的热期望温度为 24.9℃、冬季 80% 可接受的舒适温度范围为 21.9~25.8℃。结合该地区特点, 提出适合绥化地区地板辐射式采暖居住建筑冬季室内舒适温度区间为 23~25℃, 为改善当地住宅建筑节能设计提供依据。

**关键词:** 绥化地区; 居住建筑; 地板辐射式采暖; 热舒适; 热感觉

中图分类号: TU45

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)03-0396-06

## Field study on occupant thermal comfort in radiant floor heating system residential buildings of Suihua city in winter

ZHANG Qun<sup>1,2</sup>, YU Zhuoyu<sup>1</sup>, CHENG Hui<sup>1</sup>, LIANG Rui<sup>3</sup>

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech. Xi'an 710055, China;

2. Academician Workstation of Suzhou Building Research Institute. Suzhou 215129, China;

3. Department of Architecture & Environment, Xi'an Fine Art Academy, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To reveal the indoor thermal environment in winter heating period in severe cold regions, taking the residential buildings with radiant floor heating system in Suihua as the research object, the indoor occupant thermal comfort conditions of residents are explored and ways to improve the indoor thermal environment in Suihua are probed. A subjective questionnaire and a seven-point thermal sensation scale are used to evaluate the thermal sensation, and the data were studied with the statistical method. The results show that the temperature of residential buildings with the radiant floor heating system is higher in Suihua. The preferred temperature is 24.9℃, and the accepted temperature scope for 80% of the occupants is between 21.9℃ and 25.8℃. Combined with the characteristics of urban residents living in Suihua, the indoor comfortable temperature of residential buildings with the radiant floor heating system in Suihua ranged between 23℃ and 25℃ so that the necessary theoretical basis for residential energy saving design is provided to the designers.

**Key words:** Suihua city; residential buildings; radiant floor heating system; thermal sensation; thermal comfort

在严寒地区, 冬季漫长寒冷, 室外温度较低, 居住建筑冬季室内热环境设计尤为重要。绥化地区位于我国黑龙江省中部偏西南部, 属于热工分区的严寒地区 A 类, 供暖期始于每年的 10 月 15 日, 止于下年 4 月 15 日, 历时长达 6 个月。冬季室内热环境质量是当地住宅建筑物理环境营造的重要内容之一。改善绥化地区住宅建筑居住环境质量、提高居住舒适度、提高建筑节能特性, 均需要准确掌握住宅冬季采暖实际状况和居民的热

舒适特征。

国内目前已经广泛开展了关于室内热环境与人体热舒适方面的研究, 其中大多数以住宅建筑为主。针对住宅建筑的室内热舒适研究中, 主要集中在无采暖, 空调采暖, 自家煤炉供暖或者使用供暖散热器采暖的住宅<sup>[1-5]</sup>。但是近年来, 严寒地区的居民越来越多采用地板热辐射式采暖, 采暖方式的改变会影响室内热环境和热舒适状况。因此, 有必要开展严寒地区采用地板热辐射式采

收稿日期: 2016-06-30

修改稿日期: 2017-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678466, 51408465, 51408474, 51278414); 吴中创新创业领军人才项目(WC201507)

第一作者: 张 群(1973—), 男, 博士, 教授, 主要研究绿色建筑及地域建筑研究。E-mail: zhangqun029@126.com

暖方式住宅的室内热舒适研究。为此, 2016 年冬季, 在绥化地区望奎县选取了典型的地板热辐射采暖居住建筑, 开展了室内热环境状况测试和主观反映调查, 并对调查结果进行了统计分析, 初步得到了绥化地区地板辐射式采暖冬季住宅热环境以及居民热舒适的特征。

## 1 测试方案的确定

### 1.1 测试地区概况

绥化地区处于松嫩平原的呼兰河流域, 东经  $124^{\circ}50' \sim 128^{\circ}30'$ , 北纬  $45^{\circ}30' \sim 48^{\circ}05'$ , 平原区海拔高程为  $130 \sim 240$  m。气候为中温带大陆性季风气候, 四季分明, 雨热同期。冬季冰雪覆盖, 寒冷漫长。最冷月(1月)平均气温  $-23 \sim -19$   $^{\circ}\text{C}$ , 最热月(7月)平均气温  $21.4 \sim 23.6$   $^{\circ}\text{C}$ ; 年平均日照时数  $2\,588 \sim 2\,841$  h; 年平均年降水量  $524.7$  mm<sup>[6]</sup>。绥化地区住宅以多层住宅为主, 高层住宅不足 10%。其中地板辐射采暖方式在绥化地区住宅所占比例为 80% 以上。

### 1.2 被测对象的选择

本次调查的住宅建筑样本数量为 30 户, 采暖方式均是采用地板辐射式采暖。住宅层数大部分集中在 5~7 层。本次调查的对象包含了不同年龄, 不同收入, 不同职业等背景的人群。受试人数 117 人, 其中男性 65 人, 女性 52 人。

### 1.3 测试时间

2016 年 2 月 5 日在绥化地区望奎县进行室内环境参数测量和热舒适主观调查问卷的调查。测试当天天气晴朗, 室外最低气温  $-24$   $^{\circ}\text{C}$ , 最高气温为  $-10$   $^{\circ}\text{C}$ , 温度变化幅度  $14$   $^{\circ}\text{C}$ 。

### 1.4 测试过程及方法

#### 1.4.1 室内外物理环境参数的客观测量

测试的室内外环境参数包括: 室内外温度, 湿度, 其中环境参数和热舒适的主观问卷由测试者记录填写。研究采用的仪器为: 康威牌温度计, 康威牌湿度计, FLUKE 手持式红外温度计。测量取地面以上  $1.2$  m 为典型测量点。

#### 1.4.2 填写主观问卷调查表

为了保证受试者填写的问卷是对当时所处环境的真实反映, 充分考虑时间对测试的影响, 调查问卷和数据测量每隔 2 h 进行一次, 均匀分布在  $8:00 \sim 24:00$ 。要求测试者在填写问卷前将身体保持稳定状态的时间不少于 30 min。

问卷内容包括: ①居民的背景情况, 包括年龄, 性别, 在该地居住的时间; ②当前温度和湿度。③居民的衣着量和活动量; ④调查时刻居民

的热感觉, ⑤采用 ASHRAE 七点标度( $-3$  冷,  $-2$  凉,  $-1$  稍凉,  $0$  不冷不热,  $1$  稍暖,  $2$  暖,  $3$  很热)表示。⑥居民对测试时温度的接受度, 舒适度, 期望值。居民自发改善室内热环境的措施, 如开窗、电加热器、空调、窗帘等。

## 2 调查结果与分析

### 2.1 人员背景资料

对受试者的背景情况进行了统计, 其中: 男性占 56%, 女性占 44%, 受试者平均年龄是 42.1 岁, 年纪最大的 85 岁, 最小的 7 岁。平均身高为  $161.1$  cm, 身高在  $108 \sim 186$  cm 之间。平均体重为  $58.7$  kg, 最小体重值为  $22.0$  kg, 最大体重值为  $85.4$  kg。受试者在绥化地区居住的平均时间为 30.7 a, 基本适应当地的气候条件。其中最长期居住时间为 78 a, 最短为 0.5 a。另外, 受试者都能独立完成试卷。

### 2.2 室内温度与热感觉分析

受试者住宅的平均温度是  $27.1$   $^{\circ}\text{C}$ , 实测平均热感觉分布频率如图 1 所示: 63% 的人主观感觉热, 31% 主观感觉适中。

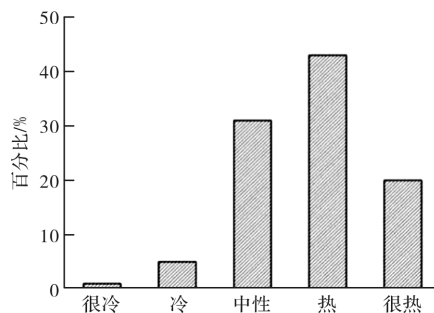


图 1 实测平均热感觉频率分布图

Fig. 1 Vote distribution map of average thermal sensation

居民采取了一些自主调节方式降温, 例如开窗开门, 减少衣物等。关于开窗降温的调查结果如图 2 显示, 以降温为目的开窗的比例占 67%, 以降温为目的开窗同时开门的比例占 12.7%。由

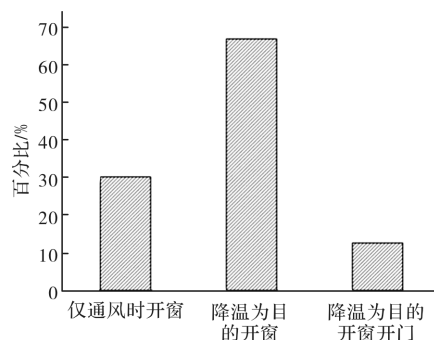


图 2 居民针对热环境的自主调节频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of self-regulation

以上调查发现, 绥化地区室内热环境并不令人满意, 大部分的居民觉得室内温度较高。

2.3 湿度

绥化地区地板热辐射采暖冬季室内平均湿度仅为 34.5%。对受试者所在住宅的相对湿度分析结果如图 2 所示: 82.5%的人主观感觉室内干燥, 只有 17.5%的人主观感觉适中, 此外大部分居民反映在冬季室内经常由于干燥产生静电。为了防止居室过于干燥, 居民采取加湿器、放置水盆或养殖植物等方式增加湿度。可知绥化地区地板热辐射采暖的住宅相对湿度很低, 已经严重影响居民舒适度。根据热舒适标准中推荐的最适合人体热舒适的相对湿度区间为 45%~70%, 低于 35% 的湿度会影响人的舒适度和健康, 当人体处于湿度较差的环境中, 除了自身的皮肤流失水分之外, 还容易受微生物和细菌的影响, 容易诱发感冒和流感<sup>[7]</sup>, 所以, 应该采取必要方式提高住宅室内湿度。

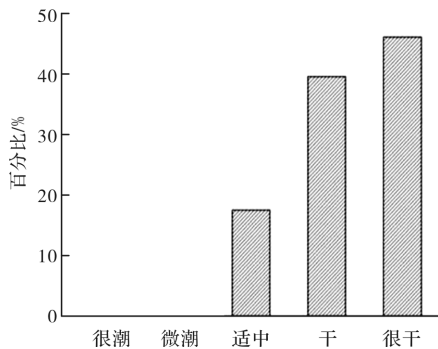


图 3 实测相对湿度感觉投票分布图  
Fig. 3 Vote distribution map of feeling of relative humidity

2.4 服装热阻

由于冬季天气寒冷, 除了上班时间, 绥化地区大部分活动都在室内完成。即便出门居民也会选择各种交通工具到达目的地, 居民在室外的时间非常短。从室外进入室内, 居民会脱掉厚重的外套换上轻薄的衣衫。调查过程中, 详细记录了受试者的衣着情况, 可知当地老人一般在室内穿薄衫和长薄裤子, 中年人一般穿薄睡衣, 小孩子穿单衣单裤。经调查, 以多数人穿衣习惯为依据, 参考典型着装的服装估算热阻值表格如表 1, 计算出受试者所穿服装的热阻值, 以单位 clo 表示( $1\text{ clo}=0.155\text{ m}^2\cdot\text{k/W}$ )并画出男女服装热阻值频率分布图如图 4 所示。计算求得其服装组合  $I_{\text{cle}}$  值为: 男子  $I_{\text{cle}}=0.485\text{ clo}$ , 女子  $I_{\text{cle}}=0.515\text{ clo}$ 。可知, 绥化地区城

镇地板辐射式采暖住宅的居民在室内时的服装热阻普遍较低。

表 1 典型着装的服装估算热阻值<sup>[8]</sup>

Tab. 1 Typical estimate of clothing insulation value

序号	服装形式	组合服装热阻	
		$\text{m}^2\cdot\text{K/M}$	clo
1	裸身	0	0
2	短裤	0.015	0.1
3	典型炎热夏季服装: 短裤, 长薄裤子, 短袖开领衫, 薄袜子和鞋子	0.050	0.3
4	一般的夏季服装: 短裤, 长薄裤子, 短袖开领衫, 薄短袜和鞋子	0.080	0.5
5	薄的工作服装: 薄内衣, 长袖棉工作衬衫, 工作裤, 羊毛袜和鞋子	0.110	0.7
6	厚的传统的欧洲服装: 长袖棉内衣, 衬衫, 长裤, 羊毛袜和厚鞋子	0.230	1.5

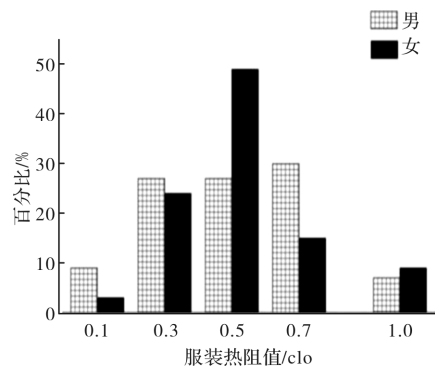


图 4 服装热阻分布频率

Fig. 4 Frequency distribution of clothing insulation value

2.5 新陈代谢率

新陈代谢按照国际热舒适标准 ISO7730 标准规定, 睡觉所具有新陈代谢水平为  $0.8\text{ W/m}^2$ , 坐着看书、看电视为  $1\text{ met}$ , 坐着活动和站着休息为  $1.2\text{ met}$ , 立姿、轻度活动(从事轻体力劳动)为  $1.6\text{ met}$ (注:  $1\text{ met}=58.2\text{ W/m}^2$ )。绥化地区居民白天以工作为主, 下班回家偶尔做一些杂务, 大部分时间看电视、上网或者休息闲聊, 新陈代谢率较小, 且男女活动方式和强度差别不大。调查过程中受试者基本为坐着或站着回答问卷, 故取值在  $1.2\sim1.4\text{ met}$  左右是合理的。由于男性的新陈代谢率高于女性的新陈代谢率, 所以新陈代谢水平按其平均劳动强度女性取值  $1.28\text{ met}$ (即  $M=75\text{ W/m}^2$ ), 男性取值  $1.37\text{ met}$ (即  $M=80\text{ W/m}^2$ )。

### 3 热舒适适应性分析

#### 3.1 主观温度的计算

目前,国际上应用比较广泛的室内环境舒适性评价指标是由 P. O. Fanger 提出的,但是其舒适方程和标准有效温度需要借助计算机才能完成求解,计算起来不方便,而且其包括的所有变量之间的关系十分复杂。所以,本次研究选择了由 D. A. McIntyre 提出的主观温度来进行热环境舒适性评价。

基于大量的科学研究, D. A. McIntyre 提出了衣服热阻值、人体新陈代谢率和主观温度之间的线性关系式。D. A. McIntyre 将这一指标称为主观温度,并将其定义为:“一个具有  $T_a = T_r$ ,  $v = 0.1 \text{ m/s}$  和相对湿度为 50% 的均匀封闭空间的温度,该环境将产生与实际环境相同的温暖感。”它意味着活动量和衣着条件之类的人体变量在实际的和假想的环境中都是一样的<sup>[9]</sup>。想要预测使人感觉舒适的主观温度,只需根据给定的新陈代谢率和服装热阻值就可以预测。经过大量的验证,该关系式与 Fanger 热舒适方程的计算结果十分近似,对于服装热阻值小于 1.50 clo 及活动量在 150 W/m<sup>2</sup> 以内的各种情况,其误差小于 0.50 °C<sup>[10]</sup>。该关系式提供了以人活动量以及衣着条件为函数而预测舒适所需要温度的准确方法:

$$T_{\text{sub}} = 33.50 - 3I_{\text{cle}} - (0.08 + 0.05I_{\text{cle}})H^{[10]}$$

其中:  $T_a$  为空气温度, °C;  $T_r$  为平均辐射温度, °C;  $v$  为相对空气流速, m/s;  $T_{\text{sub}}$  为主观温度, °C;  $I_{\text{cle}}$  为衣服有效热阻, clo, 1 clo 定义为 0.155 m<sup>2</sup> · k/W;  $H$  为新陈代谢产热量, W/m<sup>2</sup>。

现根据绥化地区村镇居民的居住行为方式、生活习惯以及衣着等状况,作如下取值:

(1)参考上述新陈代谢分析:女性取值  $M = 75 \text{ W/m}^2$ , 男性取值  $M = 80 \text{ W/m}^2$ ;

(2)参照上述服装热阻分析:服装组合  $I_{\text{cle}}$  值为:男子  $I_{\text{cle}} = 0.485 \text{ clo}$ , 女子  $I_{\text{cle}} = 0.515 \text{ clo}$ ;

(3)绥化地区地板辐射式采暖的居民在冬季开窗少,故室内空气流速取值为  $v = 0.100 \text{ m/s}$ 。

由此,可以计算出男子主观温度:

$$\begin{aligned} T_{\text{sub}} &= 33.50 - 3I_{\text{cle}} - (0.08 + 0.05I_{\text{cle}})H \quad (1) \\ &= 33.5 - 3 \times 0.485 - (0.08 + 0.05 \times 0.485) \times 80 \\ &= 23.7 \text{ °C} \end{aligned}$$

女子主观温度:

$$\begin{aligned} T_{\text{sub}} &= 33.50 - 3I_{\text{cle}} - (0.08 + 0.05I_{\text{cle}})H \quad (2) \\ &= 33.5 - 3 \times 0.515 - (0.08 + 0.05 \times 0.515) \times 75 \\ &= 24.0 \text{ °C} \end{aligned}$$

计算得出的男女主观温度分别为 23.7 °C 和 24.0 °C。但是考虑到室内温度普遍很高,人们着装很薄的范围下服装热阻值取值误差会比较大,实际的平均辐射温度并不等于空气温度。

#### 3.2 热接受能力分析

人体热感觉可能受各人的偏爱,也可能受情绪,进食等因素影响。但 D. A. McIntyre 建立的主观温度标准只能控制受试者的活动量和着装,无法控制受试者的实际新陈代谢率,即使在完全一致的热环境中,也不可能有 100% 一致的热感觉投票,预测不满意百分数模型(PPD 模型),就是为了研究究竟有多少人对环境不满意而建立的<sup>[11]</sup>。如果投票结果是“-2, -3, +2, +3”就代表他对环境是不满意的。投票是“-1, 0, +1”就代表他对环境是“满意”的,表明在这个范围内受试者没有真正感受到不适。为了调查居民对室内热环境的接受能力,按照调查表中居民填写的热感觉投票值进行统计分析,计算在某一温度下投票值为不接受的人数占总投票人数的百分数,即是该温度下的不可接受率<sup>[12]</sup>。以概率单位和空气温度分别为横纵坐标,画出实测的热不接受投票与室内空气温度的拟合图如图 5 所示。

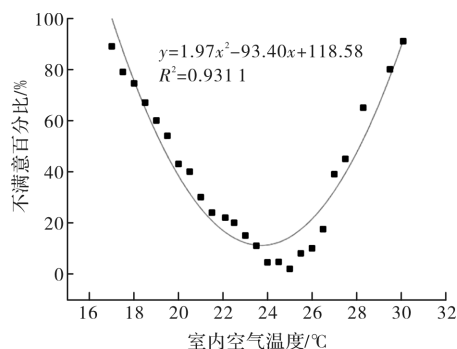


图5 热不接受投票与空气温度的关系

Fig. 5 Relationship between PPD and air temperature

实测的 PPD 与室内空气温度的回归方程为

$$\text{PPD} = 1.97x^2 - 93.4x + 118.6 (R^2 = 0.931) \quad (3)$$

采用 ASHRAE 热舒适区的确定原则,即满足 80% 人群满意度的要求,对室内热环境的不接受投票百分率不超过 20% 作为确定热中性温度上、下界的依据<sup>[13]</sup>。由式(2)可知,在不接受投票百分率不超过 20% 的条件下,该地区的居民可接受

的范围即热中性温度范围应控制在  $21.6 \sim 25.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 因冬季所测数据大多为热不满意率, 所以该地区 80% 居民可接受温度的上限为  $25.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该地区的居民可接受范围与香港地区的研究结果( $19.1 \sim 24.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ )相比, 绥化地区居民的热舒适区域较小, 说明该地区居民的冬季热舒适适应性较差<sup>[14]</sup>。

### 3.3 期望温度

期望温度的计算采用了概率法, 它的数据支撑是实际热感觉投票, 即在某一温度区间内以  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  为组距, 统计此刻较暖或较冷的人数占总人数的百分数<sup>[11]</sup>, 分析结果如图 6 所示, 两条线性回归线的交点所对应的空气温度即为期望温度。

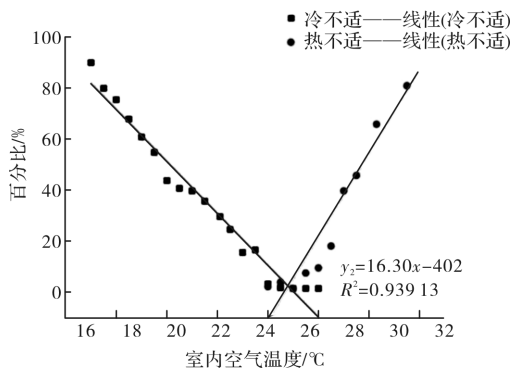


图 6 冬季热期望温度的求解

Fig. 6 Determining the preferred temperature

不满意投票百分比与空气温度的回归方程为下式:

$$\text{冷不适 PPD } y^1 = -10.13x + 253.25 \quad R^2 = 0.969$$

$$\text{热不适 PPD } y^2 = 16.30x - 402.73 \quad R^2 = 0.939$$

在两条直线相交处  $x = 24.90\text{ }^{\circ}\text{C}$

那么投票表示冷不适和热不适的概率单位与气温呈现出线性关系: 随着气温上升, 冷不适投票线性下降而热不适投票线性上升<sup>[15]</sup>。两条直线在  $t = 24.90\text{ }^{\circ}\text{C}$  处相交, 该温度就是绥化地区地板辐射式采暖住宅的期望温度。而实测室内平均温度  $27.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见实际平均温度高于期望温度。

### 3.4 舒适区间的确定

D. A. McIntyre 主观温度公式计算结果为  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $23.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。基于实际热感觉投票而得出的热期望温度为  $24.80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。20% 不满意率的温度区间为  $21.90 \sim 25.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可以看出理论计算值基本处于实际调查的温度区间内, 与实际调查情况基本吻合。居民能接受的温度上限是  $25.70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。而实际平均温度为  $27.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在围护结构和室外计算参数一定的条件下, 室内温度降低  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 耗煤量可减

少  $5 \sim 10\%$ <sup>[16]</sup>。综合考虑调查结果、主观温度计算、期望温度、居民可接受率以及节约能源等要求, 建议绥化地区地板热辐射采暖住宅冬季室内舒适温度取值区间为  $23 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 4 结论

通过对绥化地区地板辐射式采暖居住建筑冬季室内热舒适的调查与分析, 得出以下结论:

(1) 该地区室内平均温度为  $27.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 主观反应温度偏高; 室内平均湿度仅为  $34.5\%$ , 未达到人体舒适湿度的标准范围( $45\% \sim 70\%$ )。

(2) 由于采暖温度过高, 居民多采用开窗通风散热降温等行为调节方式, 造成了不必要的热量流失。

(3) 该地区该类型建筑采暖主观温度计算结果为: 男子  $23.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 女子  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 80% 居民可接受的温度为  $21.9 \sim 25.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(4) 该地区该类型建筑热中性温度上限为  $25.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 期望温度为  $24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。综合考虑, 建议冬季室内舒适温度取值区间为  $23 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

## 参考文献 References

- [1] 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 Junge, YANG Liu, LIU Jiaping. Athermal comfort field survey in residential buildings in hot-summer and cold-winter area[J]. Building Science Research of Sichuan, 2008, 34(4): 200-205.
- [2] 简毅文, 江亿. 现代居住建筑的夏季热状况研究——北京市住宅夏季室温调查分析[J]. 暖通空调, 2002, 32(3): 7-10.  
JIAN Yiwen JIANG Yi. Evaluation of thermal performance of existing residential buildings in Beijing[J]. HVAC, 2002, 32(3): 7-10.
- [3] 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 Dalong, LIU Jiaping, HE Quan, et al. Investigation of thermal environment for Yinchuan traditional dwelling building in winter [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech(Natural Science Edition), 2010, 42(1): 83-86.
- [4] 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 Zhaojun, FANG Xiumu, LIAN Leming. Field experiments on occupant thermal comfort in Harbin [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(4):500-504.
- [5] 张旭, 薛卫华, 王宝凯, 等. 供暖房间热舒适模糊分析及最优室内计算温度的研究[J]. 暖通空调, 1999, 29(2):66-68.
- ZHANG Xu, XUE Weihua, WANG Baokai, et al. Fuzzy analysis of thermal comfort and optimum indoor temperature in heated rooms [J]. HVAC, 1999, 29(2):66-68.
- [6] 赵会民, 赵晓丽, 宋清彦. 绥化市水文特征分析[J]. 黑龙江水专学报, 2004, (12).
- ZHAO Huimin, ZHAO Xiaoli, SONG Qingyan. Analysis on hydrology characteristic of Suihua City [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2004, 12.
- [7] International Organization for Standardization. Ergonomics of the thermal environment—analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria; SO. ISO7730—2005[S]. Switzerland: Geneva, 2005.
- [8] 黄晨, 龙惟定. 建筑环境学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- HUANG Chen, LONG Weiding. Built environment [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [9] 金虹, 赵华, 王秀萍. 严寒地区村镇住宅冬季室内热舒适环境研究[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2006, 38(12): 2108-2111.
- JIN Hong, ZHAO Hua, WANG Xiuping. Research on the indoor thermal comfort environment of rural housing in winter in super-cold region[J]. Journal of Harbin Institute of Technology. 2006, 38(12): 2108-2111.
- [10] MCINTYRE D A. Indoor Climate [M]. London: Applied Science Published LTD, 1980.
- [11] 李百战, 郑洁, 姚润明, 等. 室内热环境与人体热舒适 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2012.
- LI Baizhan, ZHENG Jie, YAO Runming, et al. Indoor thermal environment and thermal comfort of human body [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2012.
- [12] 杨茜. 寒冷地区室内热舒适研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010.
- YANG Qian. Study on the indoor thermal comfort in the cold zone [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2010.
- [13] 李俊鸽. 夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2006.
- LI Junge. An adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter context [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech, 2006.
- [14] 李俊鸽, 杨柳, 刘加平. 夏热冬冷地区人体热舒适气候适应模型研究[J]. 暖通空调, 2008, 38(7):20-24.
- LI Junge, YANG Liu, LIU Jiaping. Adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter zone [J]. HVAC, 2008, 38(7):20-24.
- [15] 景胜蓝. 自由运行建筑人体热适应性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- JING Shenglan. Human adaptation to thermal environment in free running building [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [16] 胡璘, 杨善勤. 新编《民用建筑节能设计标准》内容介绍[J]. 建筑技术通讯(暖通空调), 1987(5):3-6.
- HU Lin, YANG Shanqin. New "Energy conservation design standard" Introduction [J]. HVAC, 1987(5): 3-6.

(编辑 吴海西)