

# 哈尔滨地区人体热舒适与热适应现场研究

王昭俊, 李爱雪, 何亚男, 杨 威

(哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 150090 哈尔滨)

**摘 要:** 为了考察不同季节人体对室内热环境的适应性和冬季外窗冷辐射对人体局部热感觉的影响, 对哈尔滨市冬季、春季采暖期间教室内热环境与人体热感觉及热舒适进行现场调查. 在对环境参数进行测试的同时, 对受试者的热感觉进行主观调查. 结果表明: 冬季室内热中性温度与测试期间室内平均温度接近, 春季采暖末期热中性温度明显低于室内平均温度. 靠窗组受试者的局部冷感觉明显高于对照组受试者. 人体肩部和后背更易感到冷, 头部更适应冷环境. 在偏暖的环境中, 冬季比春季人们更容易感到热. 说明人们对哈尔滨漫长冬季的室内热环境和寒冷的室外气候已经充分适应, 冬季室内温度过高, 人们会感觉更加不适. 宜充分利用人对热环境的适应性适当降低冬季和春季采暖末期室内温度, 既舒适又节能.

**关键词:** 热舒适; 热适应; 热感觉; 冷辐射; 现场调查

中图分类号: TU831

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0048-05

## Human thermal comfort and thermal adaptability in Harbin

WANG Zhao-jun, LI Ai-xue, HE Ya-nan, YANG Wei

(School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

**Abstract:** To analyze the impact of season on human thermal adaptability and the influence of cold radiation from window in winter on human local thermal sensation, a field study on indoor thermal environment, thermal sensation and thermal comfort in classrooms at a university in Harbin during the heating period in winter and spring was conducted. The environment parameters were tested and at the same time the subjects' thermal sensation were undertaken. The results show that the neutral temperature is close to the indoor average temperature during winter. The neutral temperature is obviously lower than the indoor average temperatures during spring. In warmer climates, the subjects felt warmer in winter than that in spring. This shows that people in Harbin has fully adapted to the indoor and outdoor thermal environment in long-term cold winter. If the indoor air temperatures are kept too high in winter, people will feel more uncomfortable. The human adaptability to thermal environment should be made full use of by reducing the indoor temperature during winter and spring to improve comfort and save energy for heating. The subjects nearby the window feel colder than the control group subjects. The occupants often feel cold at their shoulder and back, and feel comfortable at their head. The adaptive measures taken by the subjects include opening doors or windows, increasing or decreasing clothes, etc.

**Key words:** thermal comfort; thermal adaptability; thermal sensation; cold radiation; field study

随着生活水平的提高, 人们对室内热环境的热舒适性要求越来越高, 暖通空调系统的运行能

耗也随之增加. 冬季降低室内采暖温度可以节约采暖运行费用, 但室内采暖温度的降低不应以牺牲人体热舒适性为代价. 研究表明, 室外温度越低, 人对于冷环境的适应性就越强, 对偏热环境的适应性就越差. 因此, 冬季不宜将室内温度维持过高, 这样既不舒适, 又浪费能量<sup>[1]</sup>. 冬季居民的热中性温度与室内平均室温接近, 说明人的热经历对热中性温度有显著影响<sup>[2-5]</sup>. 不同季节人的热

收稿日期: 2011-12-24.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(E201039); 沈阳建筑大学建筑节能与室内环境控制省级重点实验室开放基金资助项目(JN-200905).

作者简介: 王昭俊(1965—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 王昭俊, wzjw02@yahoo.com.cn.

中性温度不同<sup>[6-8]</sup>. 人体与热环境是交互作用的结果, 人的热经历会影响人体热反应, 而人体也会通过生理调节、行为调节和心理调节主动适应热环境的变化<sup>[9-10]</sup>. 因此, 如何充分利用人体对热环境的适应能力, 合理设定该地区不同采暖阶段适宜的采暖温度值得考究. 此外, 严寒地区冬季外窗冷辐射对人体热感觉影响较大, 但其对人体不同部位热感觉影响差别尚需系统研究.

## 1 研究方法

本研究的主要目的是考察哈尔滨市采暖期间冬季与春季教室的室内热环境与热适应性; 考察冬季冷辐射对人体局部热感觉的影响. 采用随机抽样调查的方法, 冬季与春季选择同一所教学楼. 在选择样本时, 考虑了受试者距外窗距离、教室朝向、楼层等因素. 本次调查于 2010 年 12 月到 2011 年 1 月冬季、2011 年 4 月春季两个阶段进行. 冬春季均处于采暖期. 冬季和春季测试期间的室外日平均气温分别为  $-24.3 \sim -15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $4.0 \sim 20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 现场调查包括对哈尔滨市某大学校园教室内热环境参数进行测量, 同时对学生进行热感觉与热舒适问卷调查. 冬季和春季各收集了 200 份调查表.

### 1.1 环境参数测量

本次测试中使用的仪器主要有 Testo425 热线风速仪, TES1360 温湿度计和热电偶温度计. 其中, 热线风速仪用于测量空气温度和风速, 温度测量精度为  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 风速测量精度  $\pm 0.03\text{ m/s}$ . TES1360 温湿度计用于测试空气相对湿度, 测量精度为  $\pm 2\%$ ; 热电偶温度计用于测试围护结构表面温度, 测量精度为  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

根据房间或区域面积确定测点数. 测点布置距离外墙、外窗应大于或等于  $0.5\text{ m}$ . 本次测试测点布置是根据房间面积大小, 分别取 1~3 个测点. 测点均匀布置在教室内, 若取 3 个测点, 则分别布置在房间的前、中、后 3 处. 测试期间受试者皆处于坐姿, 每个测点的空气温度、空气流速分别在距离地面  $0.1$ 、 $0.6$ 、 $1.1\text{ m}$  处测量, 取平均值. 相对湿度在距离地面  $1.1\text{ m}$  处测量.

窗户、外墙的温度分别测试 5 个点, 取其平均值; 内墙和地面在其中心位置各测试 1 个点; 由于测试条件有限, 屋顶温度没有测试, 取地面温度值. 平均辐射温度是采用房间各个墙面、外窗、地面的温度平均值, 按其对应的面积加权计算.

### 1.2 主观调查

请受试者填写调查表并对教室热环境进行主

观评价, 内容包括: 1) 背景调查, 如性别、年龄、在哈尔滨市居住时间等; 2) 着衣量和活动量调查; 3) 总的热感觉, 采用 ASHRAE 7 点标度; 4) 后背、肩膀、头部、手、脚、腿局部冷感觉; 5) 湿感觉, 采用 7 点标度; 6) 改善室内热环境的措施调查, 如开门窗通风、增减衣服等.

## 2 客观调查结果与分析

### 2.1 人员背景

冬季男性为 146 名, 女性为 54 名, 受试者的平均年龄为 19.7 岁, 在哈尔滨市居住的平均时间为 3.3 a. 春季男性为 138 名, 女性为 62 名, 受试者的平均年龄为 19.8 岁, 在哈尔滨市居住的平均时间为 3.6 a.

### 2.2 新陈代谢率

因调查时受试者主要坐着看材料和回答问题, 故新陈代谢率定为  $64\text{ W/m}^2$ . 在调查过程中, 详细记录了受试者的衣着情况, 并按照文献[11-12], 计算受试者所穿服装的热阻值. 调查中受试者的座椅一般为木椅子, 其附加的热阻值为  $0.15\text{ clo}^{[13]}$ . 冬季和春季受试者服装热阻平均值分别为  $1.04\text{ clo}$  和  $0.77\text{ clo}$ .

### 2.3 室内环境参数

对室内环境参数的统计结果见表 1 和表 2. 其中:  $t_a$  为室内空气温度,  $t$  为外窗表面温度,  $t_r$  为平均辐射温度,  $t_o$  为操作温度,  $\phi$  为相对湿度,  $v$  为空气流速,  $I_{cl}$  为热中性服装及座椅的热阻.

表 1 冬季室内环境及服装热阻参数

| 量值   | $t_a/^{\circ}\text{C}$ | $t/^{\circ}\text{C}$ | $t_r/^{\circ}\text{C}$ | $t_o/^{\circ}\text{C}$ | $\phi/\%$ | $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------|----------------------------------|
| 平均值  | 22.80                  | 11.20                | 20.10                  | 21.50                  | 29.80     | 0.12                             |
| 标准偏差 | 1.32                   | 1.09                 | 2.09                   | 1.40                   | 8.47      | 0.02                             |
| 最大值  | 25.00                  | 13.50                | 23.00                  | 23.40                  | 43.20     | 0.19                             |
| 最小值  | 20.40                  | 8.60                 | 16.50                  | 18.60                  | 15.00     | 0.04                             |

表 2 春季室内环境及服装热阻参数

| 量值   | $t_a/^{\circ}\text{C}$ | $t/^{\circ}\text{C}$ | $t_r/^{\circ}\text{C}$ | $t_o/^{\circ}\text{C}$ | $\phi/\%$ | $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------|----------------------------------|
| 平均值  | 25.4                   | 21.9                 | 24.3                   | 24.9                   | 19.5      | 0.16                             |
| 标准偏差 | 0.70                   | 1.47                 | 0.65                   | 0.60                   | 2.76      | 0.06                             |
| 最大值  | 26.5                   | 24.1                 | 25.1                   | 25.8                   | 24.8      | 0.41                             |
| 最小值  | 23.5                   | 20.1                 | 22.7                   | 23.5                   | 12.2      | 0.10                             |

冬季与春季相比, 室内空气温度平均值分别为  $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 相对湿度分别为  $29.8\%$  和  $19.5\%$ ; 风速分别为  $0.12\text{ m/s}$  和  $0.16\text{ m/s}$ ; 操作温度分别为  $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $24.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 冬季外窗表面温度为  $8.6 \sim 13.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均值为  $11.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 而春季外窗表面温度为  $20.1 \sim 24.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 平均值为  $21.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 冬季外窗平均温度比春季的低  $10.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 且冬季外

窗表面温度显著低于其室内空气温度;而春季外窗表面温度与其室内空气温度差别不大.

### 3 主观调查结果与分析

#### 3.1 热感觉

以空气温度作为室内热环境评价指标,冬季对  $v \leq 0.15 \text{ m/s}$  的样本(占样本总数 97.5%)进行回归分析,以空气温度  $0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  为组距,统计在此区间的热感觉投票,并计算平均值<sup>[2]</sup>. 然后进行数据回归统计分析,得到冬季平均热感觉投票值和空气温度线性拟合的结果见图 1,线性回归方程为

$$V_{\text{MST}} = 0.240\,2t_{\text{a}} - 5.431\,5, R = 0.86. \quad (1)$$

式中:  $V_{\text{MST}}$  为平均热感觉度. 令  $V_{\text{MST}} = 0$ , 可得热中性温度为  $22.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

由于春季室内的温度较高,人们希望有点风,吹风感投票很低. 对 200 份样本进行回归分析,得到春季平均热感觉投票值和空气温度线性拟合关系为

$$V_{\text{MST}} = 0.152\,9t_{\text{a}} - 3.322\,9, R = 0.68. \quad (2)$$

计算可得热中性温度为  $21.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . 用  $F$  检验对回归方程(1)、(2)的显著性进行分析,可得冬季和春季的显著性水平分别为 0.005 和 0.1,说明线性回归方程是显著的. 用  $t$  检验对冬季和春季的热中性温度的差异性进行分析,可得  $t_0 = 8.37$ , 远远大于 2.58(显著性水平为 0.01 时对应值),说明冬季与春季的热中性温度有非常显著的差异.

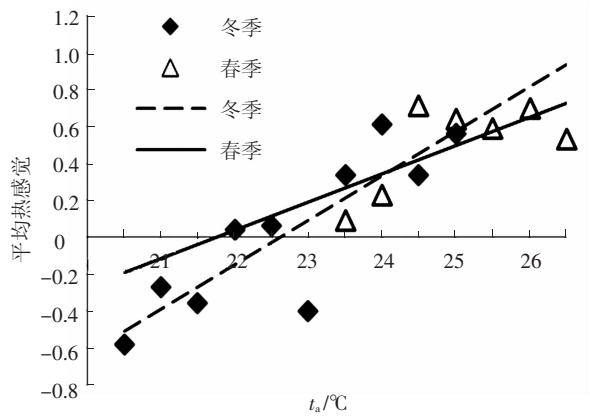


图 1 随季节变化热感觉与空气温度的关系

#### 3.2 热适应

人对热环境的适应性与季节性密切相关,图 1 为冬季和春季平均热感觉随室内空气温度变化. 可见,冬季的热中性温度为  $22.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 与冬季室内平均温度  $22.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$  相近. 而春季的热中性温度为  $21.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 与春季室内平均温度  $25.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$  相差较大. 冬季与春季相比,室内温度低  $2.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 但冬季热中性温度比春季的高  $0.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

由于哈尔滨冬季采暖期长达 6 个月,人们在

生理上和心理上已经逐渐适应了哈尔滨漫长冬季的室内热环境;而哈尔滨的春季短暂,春季由于天气渐渐变暖,而室内供热量未及时进行调整,导致室内温度过高,人们尚未适应偏热的环境. 人们期望室内温度低些,热中性温度相对较低.

由图 1 可见,当空气温度低于  $24.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冬季热感觉低于春季热感觉;而当空气温度超过  $24.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冬季热感觉高于春季热感觉. 这说明在偏暖的环境中,冬季人们更容易感到热. 由于哈尔滨市冬季室外温度低,人们对哈尔滨市寒冷的室外气候形成一定的适应性,如果室内温度过高,人们会感觉更加不适. 本文研究结果在一定程度上提供了该地区冬季和春季热适应的证据. 开门窗、喝热水、活动是受试者首选的调节方式,冬季加衣服、春季减衣服也是选择频率较高的方式.

#### 3.3 冷辐射对人体热感觉的影响

由于冬季测试期间外窗表面的平均温度为  $11.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 明显低于春季外窗表面平均温度  $21.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而且冬季外窗表面温度显著低于其室内空气温度;而春季外窗表面温度与其室内空气温度差别不大. 因此,本文仅分析冬季外窗冷辐射对人体热感觉的影响. 按照冬季受试者与外窗的距离,对样本进行分组统计分析. 其中距外窗  $0.7 \sim 1.4 \text{ m}$  (距外窗的平均距离为  $1.2 \text{ m}$ ) 设为 1 组,样本数为 105 个,占样本总数的 52.5%. 其他样本作为对照组,样本数 95 个.

图 2 为局部冷感觉分布频率图. 可见靠窗组受试者的局部冷感觉明显高于对照组受试者的. 将两组数据相同部位冷感觉的频率相加,从高到低依次为:肩部( $12.88\%$ )、后背( $12.78\%$ )、脚( $11.53\%$ )、腿( $11.53\%$ )、手( $8.57\%$ )、头( $4.76\%$ ). 原因是肩部和后背对冷感觉比其他部位更加敏感,而头部更适应偏冷的环境.

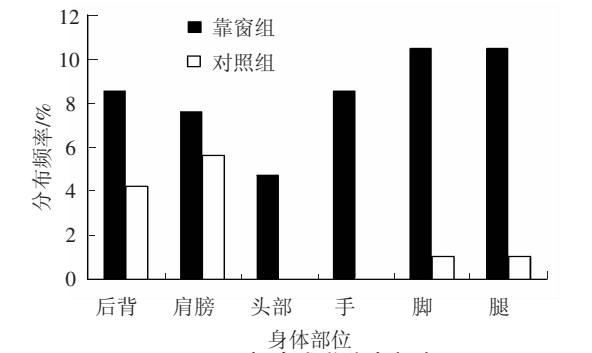


图 2 局部冷感觉分布频率

## 4 讨 论

#### 4.1 室内热环境指标的选取

哈尔滨市冬季室外气温低,外窗、外墙冷辐射

对人体热感觉影响较显著. 而操作温度反映了人体与空气对流换热以及人体与围护结构辐射换热的综合作用,宜采用操作温度作为室内热环境指标,综合评价室内空气温度和辐射温度对人体热感觉的影响. 哈尔滨市春季和秋季室外气温逐渐升高,外窗、外墙冷辐射对人体热感觉影响不明显,采用空气温度作为室内热环境指标,简单、便于操作. 以操作温度作为室内热环境评价指标,对冬季  $v \leq 0.15 \text{ m/s}$  的样本重新进行回归分析,冬季操作温度和平均热感觉线性拟合方程为

$$V_{\text{MST}} = 0.1053t_o - 2.1535. \tag{3}$$

热中性温度为  $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  (以操作温度表示). 热中性温度体现了人体对热环境的适应性,故热中性操作温度应与室内操作温度的平均值相近. 在哈尔滨地区,由于冬季外窗、外墙冷辐射的影响,操作温度一般比室内空气温度低. 因此,计算得到的热中性操作温度  $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  比热中性空气温度  $22.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  低.

4.2 与哈尔滨市其他现场研究比较

近 20 a 哈尔滨市冬季热舒适现场研究统计结果见表 3,其中  $t_w$  为室外空气平均温度. 可见 2000 年冬季是近 40 a 最寒冷的冬季,测试期间室外气温为  $-29.5 \sim -15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;2010 年冬季测试期间室外气温为  $-24.3 \sim 15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较冷;2009 年冬季测试期间室外气温为  $-16.8 \sim 10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较暖. 室内空气温度平均值由 1990 年的  $17.47\text{ }^{\circ}\text{C}$  提高到了 2010 年的  $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,提高了约  $5.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 1990 年热中性温度为  $17.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;2000 年热中性操作温度为  $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;2010 年热中性操作温度为  $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,热中性空气温度为  $22.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

表 3 哈尔滨市冬季热舒适现场研究结果

| 调查时间                      | $t_a/^{\circ}\text{C}$ | $t_n/^{\circ}\text{C}$ | $t_w/^{\circ}\text{C}$ | $I_{cl}/\text{clo}$ |
|---------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|---------------------|
| 1990 年冬季 <sup>[14]</sup>  | 17.47                  | 17.69                  | -9.9                   | 1.74                |
| 2000 年冬季 <sup>[2-5]</sup> | 20.1                   | —                      | —                      | 1.37                |
| 2009 年秋季 <sup>[6-8]</sup> | 20.6                   | 25.1                   | 15.9                   | 0.77                |
| 2009 年冬季 <sup>[6-8]</sup> | 21.6                   | 20.4                   | -3.6                   | 0.88                |
| 2010 年冬季                  | 22.8                   | 22.6                   | -21.1                  | 1.04                |
| 2011 年春季                  | 25.4                   | 21.7                   | 12.0                   | 0.77                |

由于 20 a 前冬季采暖期间室内空气温度普遍较低,为  $17.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,人们期望提高冬季的室内空气温度. 随着生活水平的提高,2000 年冬季采暖期间平均室内空气温度提高到  $20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,由于人的热适应性,此时的热中性温度也比 10 a 前提高了约  $3.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 到 2010 年,冬季采暖期间平均室内空气温度提高到  $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,热中性空气温度又上升了

$1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 近 20 a 随着室内空气温度的升高,服装热阻由  $1.74\text{ clo}$  下降到了  $1.04\text{ clo}$ .

4.3 冬季热适应模型

将 1990 年、2000 年、2009 年和 2010 年冬季测试的室内平均温度和计算得到的热中性温度进行回归分析,得到冬季热适应模型见图 3. 拟合方程如下为

$$t_n = 0.8934t_a + 1.8872, R = 0.8376. \tag{4}$$

由表 3 和图 3 可见,在热舒适温度范围内,冬季的热中性温度与测试期间室内平均温度呈线性关系,即随室内平均温度升高而增加. 说明人们以往的热经历和热暴露对人体热感觉有很大影响. 由于哈尔滨冬季漫长,人们已经从生理上和心理上充分适应其所处的热环境了. 但当春季室内温度明显超出热舒适范围时,热中性温度与室内平均温度便不成正相关的关系.

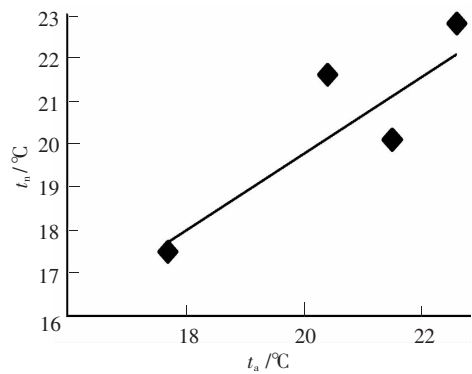


图 3 热中性温度与室内平均温度的关系

图 4 为服装热阻与室内平均温度的关系图. 图中的 4 个点分别表示 1990 年、2000 年、2009 年和 2010 年冬季的测试结果. 拟合方程为

$$I_{cl} = -0.1514t_a + 4.387, R = 0.8932. \tag{5}$$

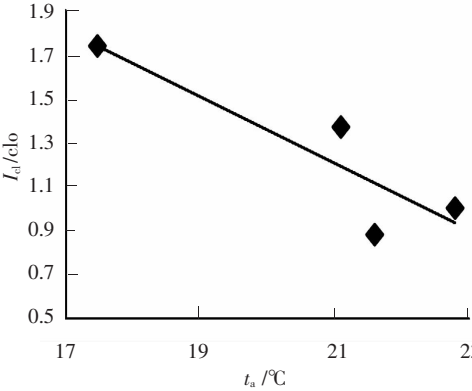


图 4 服装热阻与室内空气温度的关系

可见,冬季的服装热阻与测试期间室内平均温度呈线性关系,即随室内平均温度升高而减少. 这说明人们可采取增减衣物的措施主动适应室内热环境的变化,这是行为调节的直接形式.

#### 4.4 不同采暖阶段适宜的采暖温度

基于以上调查,2000 年冬季的热中性操作温度为  $21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。本次调查冬季的热中性操作温度为  $20.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,下降了  $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;热中性空气温度为  $22.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,上升了  $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由于我国采暖通风与空气调节设计规范中仅对冬季采暖房间的空气温度有要求,而对平均辐射温度没有要求,且实际应用中也不能控制辐射温度,故本文重点分析以空气温度作为热环境评价指标。冬季热中性温度的提高,主要由于近年来冬季室内温度提高了。在热舒适温度范围内,由于人的热适应性,冬季热中性温度与平均室内空气温度很接近。由于哈尔滨冬季漫长,人们已经从生理上和心理上充分适应其所处的热环境了。由前面分析可知,当空气温度超过  $24.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冬季热感觉高于春季热感觉。这说明在偏暖的环境中,冬季人们更容易感到热。由于冬季室外温度低,人们对哈尔滨市寒冷的室外气候形成一定的适应性,如果室内温度过高,人们会感觉更加不适。这与文献[1]的结论一致。

而在春季,由于室外温度提高,而供热量不变,故室内空气温度较高,人们普遍感觉偏热,因此人们期望室内温度降低,热中性温度偏低。此外,由于春季室内空气温度比冬季的高,春季平均相对湿度比冬季低  $10.3\%$ ,从而也引发了人们的不适感。另一方面,冬季和春季由于室内过热,人们主要通过开窗降温,既不舒适,又浪费能源。为了节能降耗,同时也可充分发挥人的适应性,可适当降低冬季和春季采暖末期室内温度。

由于秋季采暖前,人们心理期望室内温度高些<sup>[6,8]</sup>,因此热中性温度偏高,建议采暖初期适当提高室内温度。

## 5 结 论

1) 冬季热中性温度为  $22.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与冬季室内平均温度  $22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  很接近。春季热中性温度为  $21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而春季室内平均温度为  $25.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 当空气温度超过  $24.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,冬季热感觉高于春季热感觉。在偏暖的环境中,冬季人们更容易感到热。

3) 靠窗组受试者的局部冷感觉明显高于对照组受试者。人体局部冷感觉出现的频率从高到低依次为:肩部、后背、脚、腿、手、头。

4) 因冬季采暖中期和春季采暖末期室温过高,既不舒适,又浪费能源。宜充分利用人对热环境的适应性,适当降低冬季和春季采暖末期室内

温度。秋季人们心理期望室内温度高些,建议采暖初期适当提高室内温度。

## 参考文献:

- [1] 曹彬,朱颖心,欧阳沁,等. 北京地区冬季室内人体热舒适性及热适应性调查[J]. 暖通空调,2010,40(5): 98-101.
- [2] 王昭俊. 严寒地区居室热环境与热舒适性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2002.
- [3] WANG Z J, WANG G, LIAN L M. A field study of the thermal environment in residential buildings in Harbin [J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109(2): 350-355.
- [4] WANG Z J. A field study of the thermal comfort in residential buildings in Harbin [J]. Building and Environment, 2006, 41(8): 1034-1039.
- [5] 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.
- [6] 张琳. 哈尔滨市住宅人体热适应性及热舒适性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [7] WANG Z J, ZHANG L, ZHAO J N, *et al.* Thermal comfort for naturally ventilated residential buildings in Harbin [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(12): 2406-2415.
- [8] WANG Z J, ZHANG L, ZHAO J N, *et al.* Thermal responses to different residential environments in Harbin [J]. Building and Environment, 2011, 46(11): 2170-2178.
- [9] 张宇峰,王进勇,陈慧梅. 我国湿热地区自然通风建筑热舒适与热适应现场研究[J]. 暖通空调,2011,41(9): 91-99.
- [10] DEDEAR R J, BRAGER G S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference[J]. ASHRAE Trans, 2004, 104(1): 145-167.
- [11] ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy[S]. Atlanta, GA: ASHRAE, 2004.
- [12] ISO 7730. 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[S]. Geneva: International Standard Organization, 2005.
- [13] MCCULLOUGH E A, OLESEN B W, HONG S. Thermal insulation provided by chairs [J]. ASHRAE Trans, 1994, 100(1): 795-802.
- [14] 谭福君. 办公建筑冬季室内热环境和舒适性调查及研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨建筑大学,1993.

(编辑 魏希柱)