

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.012



# 冬季室内热环境与被褥微气候的匹配

王兴卫, 刘艳峰, 宋聪, 李净

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710055)

**摘要:**冬季睡眠状态下,室内热环境与被褥微气候分别对人体头部和被覆躯体的热感觉造成直接影响。为了分析两个热环境的匹配关系以满足睡眠人体的热舒适水平,实验在不同的室内温度下,调节被褥微气候温度,测试了受试者的皮肤温度,并记录了热感觉和热可接受水平。研究结果表明:睡眠状态下,相比于室内热环境,人体热感觉对被褥微气候更敏感;此外,通过分析室内热环境和被褥微气候分别与整体热感觉和整体不满意率的关系,得到了睡眠热环境舒适区间。

**关键词:**热环境;微气候;热舒适;匹配

**中图分类号:**TU241.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)02-0091-06

## Matching of indoor thermal environment and bed climate in Winter

Wang Xingwei, Liu Yanfeng, Song Cong, Li Jing

(Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

**Abstract:** The indoor thermal environment and bed climate directly affect the sleeping thermal comfort of human head and the covered body, respectively. In order to analyze the matching relationship between the two thermal environment so as to meet the body's sleep thermal comfort level, the skin temperature of the subjects and the thermal sensation and thermal acceptability level of the subjects were recorded with various temperatures of bed climate and indoor temperatures. The results show that the thermal sensation is more sensitive to bed climate than to the indoor thermal environment during sleep. In addition, the comfortable range of thermal sleep environment is obtained through analyzing the relationship between the sleeping thermal environment and the subjective evaluations for partial and overall human body.

**Keywords:** thermal environment; bed climate; thermal comfort; matching

睡眠是人类生活中不可或缺的一部分,良好的睡眠热环境与人体健康息息相关<sup>[1-2]</sup>。在睡眠热环境研究领域,大多数学者采用实验等方法研究特定床褥系统热阻下室内热环境对于睡眠热舒适及睡眠质量的影响<sup>[3-7]</sup>,然而,当床褥系统热阻变化时是否

适用未作说明;常方圆<sup>[8]</sup>通过分析睡眠环境人体热舒适方程,得出了室内温度、床褥系统总热阻、人体热舒适度三者之间的定量关系,但是该研究并未对人体生理参数进行测量;文献[9-10]采用客观生理参数测量结合主观问卷调查的方法对睡眠热环境进

**收稿日期:**2015-08-01

**基金项目:**国家自然科学基金(51378411);陕西省重点科技创新团队项目(2014KCT-01)

**作者简介:**王兴卫(1989-),男,主要从事建筑热环境调节与节能研究,(E-mail)547989250@qq.com。

刘艳峰(通信作者),男,教授,博士生导师,(E-mail)liuyanfeng@xauat.edu.cn。

**Received:**2015-08-01

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51378411); The Key Scientific and Technological Innovation Team Project of Shaanxi Province(No. 2014KCT-01)

**Author brief:** Wang Xingwei (1989-), main research interest: building thermal environment and energy saving, (E-mail) 547989250@qq.com.

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

行了研究,指出冬季睡眠时舒适的室内温度为 23℃,并且指出对受试者采用主观调查的方式比热感觉预测模型得到的结果更具有实际价值,但上述研究均未涉及被褥微气候对人体睡眠热舒适的影响。当人体覆盖被褥时,被褥将室内热环境与被褥微气候隔绝开来,使被褥微气候温度高于室内环境温度,睡眠热舒适首先受到被褥微气候的影响,其次是室内热环境<sup>[11-14]</sup>。基于人体局部热需求差异对室内热环境与被褥微气候进行匹配研究,不仅可以更精确地评价睡眠热环境,同时也为夜间采暖室内设计温度的确定提供了理论依据。

笔者通过实验研究的方法,在不同工况下测试受试者皮肤温度,同时,以问卷的形式调查受试者对热环境的主观评价,针对头部和被覆躯体对睡眠热环境的不同需求,研究室内热环境和被褥微气候的匹配关系。

## 1 实验设计

### 1.1 实验室布置

实验在一套西安地区非供暖民居中进行,该场地为实验提供了典型且真实的冬季住宅室内热环境工况。其中主卧室平面尺寸为 4.3 m×2.8 m;客厅平面尺寸为 5.6 m×3.0 m,如图 1 所示。

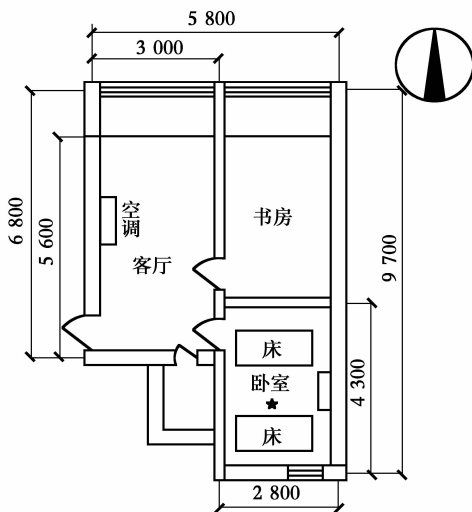


图 1 实验场地平面图

Fig. 1 Laboratory plan

### 1.2 受试者

受试者为 12 名健康男性,均为在校学生(年龄 24.5±0.6 岁,身高 171.4±2.5 cm,体重 63.9±2.8 kg),睡眠习惯良好,饮食和作息时间较为规律;此外,实验开始前,对受试者进行了相关培训;实验

前无刺激性饮食和剧烈运动等可能引起代谢发生剧烈变化的活动。正式实验前,让受试者熟悉实验流程、调查问卷内容、实验注意事项等。

### 1.3 床褥系统及实验仪器

实验选用木板床与棉垫组合及居民冬季常用的被褥系统,热阻约为 3.73 clo<sup>[15]</sup>;电热毯为可调温电热毯。睡眠期间受试者着同一服装,热阻为 0.61 clo。实验采用 TR-72ui 自计式温度块测得室内、外空气温度和相对湿度,温度测量精度为±0.3℃、量程为 0~50℃,湿度测量精度为±5%,量程为 10%~95%;Pt1000 热电偶测试建筑围护结构内墙面温度,精度为±0.1℃,量程为-100.00~+100.00℃;ZRQF-F30 风速仪测得室内风速,精度为±0.03 m/s,量程为 0~+20 m/s;ibutton(型号 DS1922L)测量人体皮肤温度,ibutton(型号 DS1923)测量被褥微气候温度,精度均为±0.5℃,量程均为-40~85℃;除风速采用不定时测量外,其余参数记录时间间隔均为 5 min,且所有仪器使用前均进行了精确度校准。

### 1.4 皮肤温度及被褥微气候温度的测量方法

采用 10 点法测定人体皮肤温度,各个部位的权重系数为其表面积占全身表面积的百分比<sup>[16]</sup>。基于上述皮肤温度测点及权重系数确定方法,分别讨论被覆躯体和头部皮肤温度测定。在测量被覆躯体皮肤温度时,将每个部位表面积占被覆躯体总面积的百分比作为各自的权重系数,被覆躯体测点为:左胸、左背、腹部、右上臂、左前臂、右手手背、右大腿上、右小腿上、右脚脚面,各部分对应权重系数分别为:0.128、0.128、0.128、0.085、0.064、0.053、0.202、0.138、0.074。头部皮肤温度以脸颊部皮肤温度表示。

人体与被褥之间的微气候物理模型作如下简化:被褥将人体包裹,所形成的被褥微气候视为人体等比例放大的空气夹层。由于该空气夹层厚度较小,其空气温度视为与被褥内表面温度相等。因此,被褥微气候温度的计算可类比于人体平均皮肤温度,在被覆躯体皮肤温度各测点对应的被褥内表面位置布置相应测点,采用面积加权平均的计算方法。

被褥微气候温度的具体测试方法如下:在胸上侧、背下侧、腹上侧、肩侧、腹侧、大腿侧、大腿上侧、小腿上侧、脚侧对应的被褥内表面布置测点。基于以上分析,被褥微气候温度的加权系数与被覆躯体皮肤温度计算加权相同,各部分对应权重系数分别

为:0.128、0.128、0.128、0.085、0.064、0.053、0.202、0.138、0.074。

### 1.5 调查问卷设计

调查问卷主要内容是受试者对热环境的评价,采用ASHRAE<sup>[17]</sup>7级热感觉投票进行评价,热可接受度采用断裂标尺法<sup>[18]</sup>,分4个等级(+1明显可接受、+0.01刚好可接受、-0.01刚好不可接受、-1明显不可接受)进行评价。

### 1.6 实验流程

实验要求受试者22:00到达实验室,安静休息30 min,适应实验场地热环境;22:30将ibutton(型号DS1922L)粘贴于人体皮肤表面相应部位,室内空气温湿度及被褥微气候温度等测试仪器按时开启;23:00受试者处于平躺状态,开始进入睡眠状态;次日早晨7:00受试者被实验组织者叫醒,在其起床前,实验组织者记录其对热环境的主观评价。之后两晚,保持室内空气温度不变,在实验开始前用电热毯对被褥微气候进行低档和偏高档加热,其余步骤不变。

## 2 实验结果及分析

对不同工况下受试者热环境评价采用均值与标准偏差进行分析,受试者整晚的皮肤温度和被褥微气候温度取平均值<sup>[19]</sup>;对实验数据进行 $t$ 检验,数据分析的检验水准为0.05;局部热感觉对整体热感觉的影响权重根据影响因子法<sup>[20]</sup>进行推导。

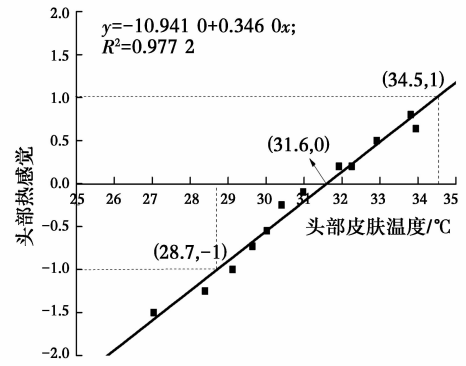
### 2.1 实验环境工况

实验设定室内空气温度为3、6、9、12、15、18℃,实际工况下室内操作温度分别为3.6、5.8、9.2、11.5、15.0、19.7℃,相对湿度的变化范围为30%~60%,风速在0.15 m/s以下。其中在9.2、11.5、15.0℃工况下,被褥微气候温度均有3个调节水平。

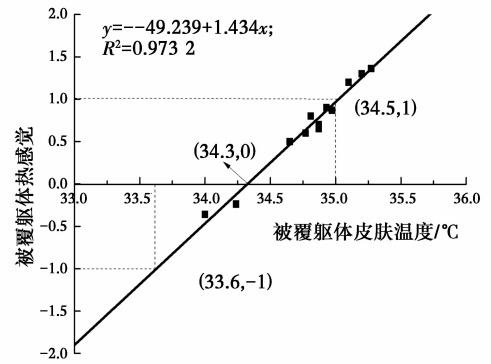
### 2.2 局部热感觉与局部皮肤温度

人体皮肤温度是反应人体热舒适的重要生理指标之一。局部皮肤温度也有一定的限值,低于或者高于该值,人体会感到极大的不舒适,因此,有必要找出局部热感觉与局部皮肤温度的关系,头部和被覆躯体与各自皮肤温度的关系如图2所示。

由图2可知,局部热感觉与局部皮肤温度呈现较好的线性关系,局部皮肤温度可以较好地表示局部热感觉;此外,对比两个局部热感觉与各自皮肤温度关系曲线的斜率可知,当热感觉均变化一个单位



(a) 头部热感觉与头部皮肤温度的关系



(b) 被覆躯体热感觉与其皮肤温度的关系

图2 局部热感觉与局部皮肤温度的关系

Fig. 2 The relationship between local thermal sensation and local skin temperature

时,头部皮肤温度变化2.9℃,被覆躯体皮肤温度仅变化0.7℃。表明睡眠状态下,相比于头部热感觉随其皮肤温度的变化,被覆躯体热感觉随其皮肤温度变化更敏感。

### 2.3 被覆躯体热感觉对整体热感觉及头部热感觉的影响

采用9.2、11.5、15.0℃3组工况所对应的数据进行影响因子及权重的确定。

$$TSV_{WS} = \omega_H \cdot TSV_{HS} + \omega_B \cdot TSV_{BS} \quad (1)$$

$$TSV_{WE} = \omega_H \cdot TSV_{HE} + \omega_B \cdot TSV_{BE} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)得

$$\Delta TSV_W = \omega_H \cdot \Delta TSV_H + \omega_B \cdot \Delta TSV_B \quad (3)$$

根据影响因子的定义

$$\Delta TSV_H = f_{B-H} \cdot \Delta TSV_B \quad (4)$$

$$\Delta TSV_W = f_{B-W} \cdot \Delta TSV_B \quad (5)$$

故有

$$f_{B-W} = f_{B-H} \cdot \omega_H + \omega_B \quad (6)$$

式(1)~(6)各变量的下标中:H表示头部;B表示被覆躯体;W表示全身;WS表示被褥未加热时全

身状态;HS 表示被褥未加热时头部状态;BS 表示被褥未加热时被覆躯体状态;WE 表示被褥加热后全身状态;HE 表示被褥加热后头部状态;BE 表示被褥加热后被覆躯体状态。 $\omega_H$  为头部热感觉占整体热感觉权重; $\omega_B$  为被覆躯体热感觉占整体热感觉权重; $f_{B-H}$  为被覆躯体对头部热感觉的影响因子; $f_{B-W}$  为被覆躯体对全身热感觉的影响因子。根据影响因子的定义,被覆躯体热感觉变化值与全身热感觉变化值关系如图 3 所示。

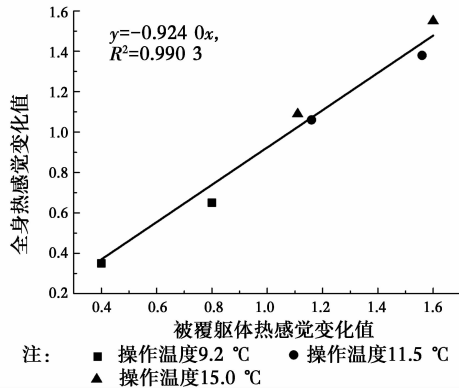


图 3 被覆躯体热感觉对全身热感觉的影响因子

Fig. 3 The impact factor of thermal sensation of covered body on the whole body

由图 3 可知,被覆躯体热感觉变化值与全身热感觉变化值呈现良好的线性关系; $f_{B-W}$  约为 0.92,同理得  $f_{B-H}$  约为 0.54,又局部热感觉对整体热感觉影响权重之和为 1,代入计算可得  $\omega_B = 0.82$ ,  $\omega_H = 0.18$ 。

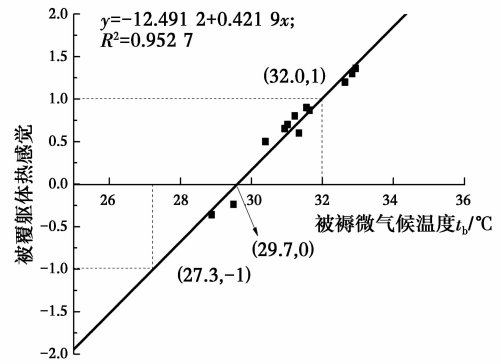
#### 2.4 睡眠热环境舒适温度

考虑到局部热感觉之间的相互影响,笔者研究局部热感觉与局部环境温度关系时,保证其余部位处于舒适状态。将局部热感觉投票在-1 到 1 之间视为舒适,则局部热感觉与局部环境温度的关系如图 4 所示。

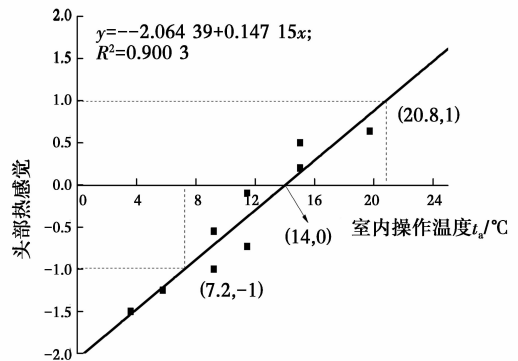
由图 4 可知,保持其他部位处于舒适状态时,局部热感觉和局部环境温度存在较好的线性关系,可以根据局部环境温度很好地预测局部热感觉;此外,对比两个局部热感觉与各自环境温度关系曲线的斜率可知,当热感觉均变化一个单位时,室内操作温度需改变 6.8 °C,被褥微气候温度仅需改变 2.4 °C;表明睡眠状态下,相比于头部热感觉随室内操作温度的变化,被覆躯体热感觉随被褥微气候温度的变化更敏感。

#### 2.5 室内操作温度与被褥微气候温度的匹配

由 2.3 节和 2.4 节的分析可知全身热感觉与  $t_a$



(a) 被覆躯体热感觉与被褥微气候温度的关系



(b) 头部热感觉与室内操作温度的关系

图 4 局部热感觉与局部环境温度的关系

Fig. 4 The relationship between local thermal sensation and local ambient temperature

及  $t_b$  关系为

$$TSV_w = -10.6143 + 0.0265 t_a + 0.3459 t_b \quad (7)$$

式中:  $TSV_w$  为全身热感觉。

将整体热可接受度投票小于 0 视为不满意,当不满意百分比  $PPD \leq 26\%$  时,热环境认为是可接受的。实验结果表明,局部环境温度  $t_a$ 、 $t_b$  分别与  $PPD$  呈现二次多项式函数关系,且均存在不同温度值对应相同不满意百分比的现象;因此,将  $t_a$  与  $t_b$  分别作为横、纵坐标时,采用椭圆抛物面函数对  $t_a$ 、 $t_b$  与  $PPD$  三者关系进行拟合。此外,椭圆抛物面函数可以更加直观地表现出  $t_a$  与  $t_b$  的匹配关系;椭圆抛物面函数长、短轴数值之差可体现人体对  $t_a$  与  $t_b$  的敏感度差异。综合考虑  $TSV_w$  与  $PPD$  可得睡眠热环境舒适区域如图 5 所示,其中斜线代表  $TSV_w$ ,椭圆曲线代表  $PPD$ 。

由图 5 可知,当  $TSV_w$  一定时,室内操作温度与被褥微气候温度成反比; $PPD$  从内到外呈现递增趋势。 $TSV_w$  在 -1 到 1 之间并非都能满足热舒适,比

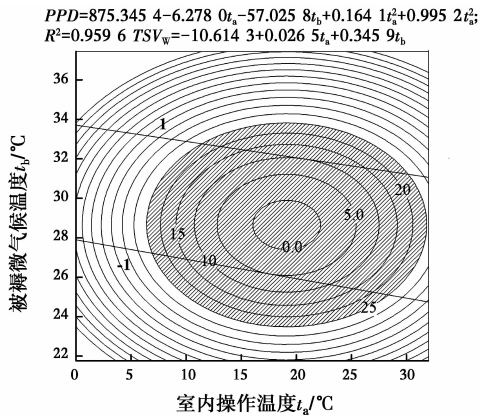


图5 睡眠热环境舒适区间

Fig. 5 The comfortable zone of the sleeping thermal environment

如:室内操作温度为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,虽然 $TSV_w$ 可能满足要求,但是超出了 $PPD$ 的可接受范围。在睡眠热环境舒适区域中, $TSV_w$ 和 $PPD$ 不是同步的,同一 $TSV_w$ 对应着不同的 $PPD$ ,反之,同一 $PPD$ 也对应着不同的 $TSV_w$ ,比如:当 $TSV_w$ 为1时, $PPD$ 可能为25%、15%或者10%。在该舒适区域中,室内操作温度最低约为 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,低于室内舒适温度区间下限约 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时,被褥微气候温度约为 $30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;被褥微气候温度最低及最高分别约为 $25.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $33.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,超出其舒适温度区间上下各约 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对应的室内操作温度分别为 $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $11.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但是此时人体依旧是可接受的;由此可知,即使局部热感觉偏离热中性较大,整体也可保持一个舒适状态。

当室内操作温度取本次实验最高温度 $20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,被褥微气候温度不低于 $26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,不高于 $32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。综上可知,整体热舒适必须同时满足 $PPD$ 与 $TSV_w$ 的要求。

### 3 结论

1)睡眠状态下,相比于头部热感觉随其皮肤温度的变化,被覆躯体热感觉随其皮肤温度变化更为敏感。

2)在睡眠状态下,室内热中性温度约为 $14.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,舒适的室内操作温度区间约为 $7.0\sim 21.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;被褥微气候热中性温度约为 $30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,舒适的被褥微气候温度区间约为 $27.0\sim 32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;此外,相比于头部热感觉随室内操作温度的变化,被覆躯体热感觉随被褥微气候温度的变化更为敏感。

3)得到了基于人体局部热需求差异的睡眠热环境舒适区间。该舒适区间综合考虑了室内热环境与

被褥微气候的热环境参数,当 $TSV_w$ 一定时,室内操作温度与被褥微气候温度成反比关系; $TSV_w$ 在-1到1之间并非都能满足热舒适。

4)对于冬季睡眠热舒适而言,室内操作温度最低约为 $6.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时被褥微气候温度约为 $30.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;当室内操作温度取实验最高温度 $20.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,被褥微气候温度不低于 $26.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 且不高于 $32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 参考文献:

- [1] OKAMOTO-MIZUNO K, MIZUNO K. Effects of thermal environment on sleep and circadian rhythm [J]. Journal of physiological Anthropology, 2012, 31: 14-22.
- [2] TSUZUKI K, MORI I, SAKOI T, et al. Effects of seasonal illumination and thermal environments on sleep in elderly men [J]. Building and Environment, 2015, 88: 82-88.
- [3] FUJII H, FUKUDA S, NARUMI D, et al. Fatigue and sleep under large summer temperature differences [J]. Environmental Research, 2015, 138: 17-21.
- [4] KIM M, HAN J, CHUN C. A study on bedroom environment and sleep quality in Korea [J]. Indoor and Built Environment, 2010, 19(1):123-128.
- [5] DJONGYANG N, TCHINDA R, NJOMO D. Estimation of some comfort parameters for sleeping environments in dry-tropical sub-Saharan Africa region [J]. Energy Conversion and Management, 2012, 58: 110-119.
- [6] 兰丽,连之伟,潘黎.夜间睡眠空调舒适温度实验研究 [C]//中国环境科学学会室内环境与健康分会年会, 2012:18-24.  
LAN L, LIAN Z W, PAN L. Experimental study on thermal comfort of sleeping person in air-conditioned room [C]// Indoor Environment and the Health Branch of China Environmental Science Institute Annual Meeting, 2012:18-24. (in Chinese)
- [7] 罗渊,徐文华.平均辐射温度对睡眠环境人体热舒适的影响 [J]. 制冷技术, 2010(4): 52-56.  
LUO Y, XU W H. Influence of mean radiation temperature on thermal comfort in sleeping environment [J]. Refrigeration Technology, 2010(4): 52-56. (in Chinese)
- [8] 常方圆.浅谈寝床系统总热阻对人体睡眠热舒适度的影响 [J]. 设计研究, 2015, 36(1):32-36.  
CHANG F Y. The influence of total insulation values of the bedding systems on thermal comfort in sleeping

- environments [J]. *Design Research*, 2015, 36(1): 32-36. (in Chinese)
- [9] 潘黎. 基于人体生理参数的清醒和睡眠状态的热舒适研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.  
PAN L. The thermal comfort investigation of awakening and sleeping state based on physiological parameters [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [10] LAN L, PAN L, LIAN Z. et al. Experimental study on thermal comfort of sleeping people at different air temperatures [J]. *Building and Environment*, 2014, 73: 24-31.
- [11] LEUNG C, GE H. Sleep thermal comfort and the energy saving potential due to reduced indoor operative temperature during sleep [J]. *Building and Environment*, 2013, 59: 91-98.
- [12] PAN D M, LIN Z P, DENG S M. A mathematical model for predicting the total insulation value of a bedding system [J]. *Building and Environment*, 2010, 45: 1866-1872.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] LIN Z P, DENG S M. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics: Measuring the total insulation values for the bedding systems commonly used in the subtropics [J]. *Building and Environment*, 2008, 43: 905-916.
- [16] CHOI J K, MIKI K, SAGAWA S, et al. Evaluation of mean skin temperature formulas by infrared thermography [J]. *International Journal of Biometeorology*, 1997, 41: 68-75.
- [17] ANSI/ASHRAE. Thermal environmental conditions for human occupancy: Standard 55-2010 [S].
- [18] GUNNARSEN L, FANGER P O. Adpatation to indoor air pollution [J]. *Environment International*, 1992, 18: 43-54.
- [19] LIU Y F, SONG C, WANG Y Y. Experimental study and evaluation of the thermal environment for sleeping [J]. *Building and Environment*, 2014, 82: 546-555.
- [20] 张宇峰. 局部热暴露对人体热反应的影响[D]. 北京: 清华大学, 2005.  
ZHANG Y F. Effect of local exposure on human responses [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005. (in Chinese)

(编辑 胡英奎)