

文章编号: 1671-6612 (2025) 06-842-06

基于局部辐射板的睡眠热舒适及睡眠质量研究

崔文智 向万福

(重庆大学能源与动力工程学院 重庆 400044)

【摘要】 改进了基于局部辐射板的个人热舒适系统 (R-PCS)，该系统可在夏季节节睡眠区人员周围的局部热环境。为了研究不同空气温度、辐射板温度及不同铺设方案下的热舒适性，分析了人体平均皮肤温度的变化规律及睡眠热舒适度。实验结果显示，在稍高于热中性空气温度范围内，局部辐射板能有效调节人体的平均皮肤温度，改善人员所处的睡眠热环境，从而提高热舒适性。通过适用于睡眠状态的 PMV-PPD 指标评估，发现辐射板的运行显著改善了热感觉，并且对相应工况的人员睡眠质量进行了分析，结果表明在接近热中性的条件下，人员平均睡眠质量最佳。可见该系统在保障睡眠热舒适性和睡眠质量方面具有显著潜力。

【关键词】 热舒适；睡眠质量；辐射板；个人舒适系统

中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

The Study of Sleep Thermal Comfort and Sleep Quality Based on Local Radiant Panels

Cui Wenzhi Xiang Wanfu

(School of Energy and Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044)

【Abstract】 This paper improved the personal thermal comfort system based on local radiant panels (R-PCS), which can adjust the local thermal environment around the sleeping area occupants in summer. In order to study the thermal comfort under different air temperatures, radiant panel temperatures and different laying schemes, the variation law of the mean skin temperature of the human body and the thermal comfort of sleep were analyzed. The experimental results showed that within a slightly higher thermoneutral air temperature range, the local radiant panel can effectively adjust the mean skin temperature of the human body, improve the sleeping thermal environment where the occupants are located, and thus enhance the thermal comfort. Through the evaluation of the PMV-PPD index applicable to sleep states, it is found that the operation of the radiant panel significantly improves the thermal sensation. Moreover, this paper analyzed the sleep quality of the occupants under the corresponding working conditions, and the results indicated that the average sleep quality of the occupants was the best under the condition close to thermoneutrality. It can be seen that this system has significant potential in ensuring sleep thermal comfort and sleep quality.

【Keywords】 Thermal comfort; Sleep quality; Radiant panel; Personal comfort system

0 引言

人的一生中大约有三分之一的时间处于睡眠环境，研究表明睡眠质量对人的身体健康状况、次日精神状态及工作效率等均有着极大的影响。而睡眠期间人体热舒适性是维持良好睡眠质量的重要因素^[1-3]。

人类的睡眠空间一般较小，为了调节睡眠期间

人体的热舒适性，个人舒适系统 (PCS) 因其高舒适性及节能型也被学者们广泛关注，该类系统可以适度放宽其他部位的热环境要求，从而满足高热舒适性要求并降低能耗。目前许多学者研究了不同形式的 PCS 系统，如 Wang 等人^[4]设计了一种加热床，利用循环热水进行加热，并通过床底的风扇加快热反应。Pan 等人^[5]设计了一种基于局部送风的 PCS

系统,该系统带有笨重的空气管道和管道。随后, Mao 等人^[6]对其进行了改进,提供了无管道送风口和回风口。研究结果显示上述系统在控制人体周围热环境方面均可达到较优的热舒适性。综合了 PCS 与辐射制冷的优点,利用辐射冷(热)板调节人体附近微气候有不少成果,如 Du 等人^[7]设计了一种基于辐射的空调系统(R-TAC),发现辐射板的运行参数都会显著影响卧室的热舒适度和节能性能,显著降低气流风险。Xin 等人^[8]设计了一种基于辐射顶板的个人舒适系统(R-PCS),并对系统的运行性能、热舒适等指标进行了分析,研究发现该系统可在较好的满足人体的热舒适要求的同时消耗更少的能量。Ismail 等人^[9]设计了一种集成了辐射板的睡眠舱,结果表明在保持较高的送风温度、相对较高的面板温度时可降低人体不满意度。

但是现有研究中辐射板铺设位置与使用条件受限,对人体热舒适及睡眠质量影响的实验研究较少。因此本研究重点探究新辐射板铺设条件下,夏季制冷时不同辐射板温度和空气温度对睡眠中人体热舒适及睡眠质量的影响。

1 研究方法

1.1 实验装置

本实验基于此前的辐射冷却系统(R-PCS)进行改进^[8],如图1所示。

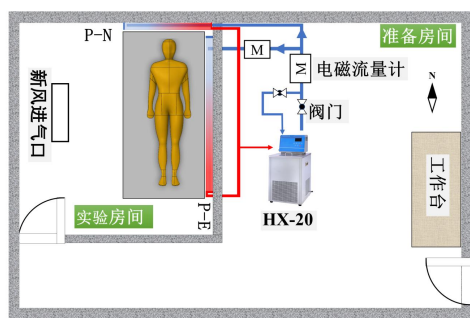


图1 实验系统图

Fig.1 Diagram of the experimental system

测试室内设有一张单人床,其床褥系统由椰棕床垫、乳胶枕头及典型夏季空调被组成。为调节室内空气温度、湿度和洁净度,测试室天花板设有新风口,出风温度和流量可调。R-PCS的辐射末端由两块相同的辐射板组成(1900mm×800mm),一块横向安装在床铺东侧的墙面(P-E),另一块则竖向安装在床铺北侧方的墙面上(P-N),如图2

所示。



图2 辐射板铺设现场图

Fig.2 Site plan of radiant panel laying

1.2 实验参数测量

实验过程中主要监测了辐射板表面及墙面温度、室内空气温度、睡眠区(床铺上方0.9m空间)空气温湿度及空气流速。

人体皮肤温度是反映身体冷热负荷和人体与环境之间热交换状态的关键生理指标。采取10点测量法获取人体平均皮肤温度,如式(1)^[10]进行计算。

$$MST = 0.06t_{\text{前额}} + 0.12t_{\text{左胸}} + 0.12t_{\text{左背}} + 0.12t_{\text{腹部}} + 0.08t_{\text{右上臂}} + 0.06t_{\text{左手前臂}} + 0.05t_{\text{右手背}} + 0.19t_{\text{右前大腿}} + 0.13t_{\text{右小腿前}} + 0.07t_{\text{右足背}} \quad (1)$$

测量仪器为纽扣温度计(iButton® DS1922L),测量时间间隔为2min。

使用同类研究中广泛使用的Fitbit HR设备^[11-14]收集睡眠数据,包括入睡、醒来时间和各睡眠阶段。

(3) 预测热感觉投票 PMV-PPD 计算

客观指标预测平均投票(PMV)和预测不满意百分比(PPD)被用于评估受试者的热舒适度。本文采用Lin等人改进的适用于睡眠环境的PMV和PPD指标,如式(2)和(3)所示^[15]。

$$PMV = [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028]L \quad (2)$$

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2)] \quad (3)$$

式中: M 代表人体睡眠期间的新陈代谢率,取 $40W/m^2$; L 代表人体热负荷, W , 根据 Song 等人^[16]提出的人体换热模型计算而得。

1.3 实验人员及工况

本次实验招募了4名大学生男性志愿者(年龄: 24.5 ± 0.9 岁;身高: $173.0 \pm 5.0cm$;体重: $70.2 \pm 3.0kg$),为了保证实验的准确性,受试者在参加

试验前必须养成良好的睡眠和饮食习惯。每一名实验人员均参与了整个过程的实验,同时在实验前均提前进入了睡眠实验室进行了适应性睡眠实验。

实验中辐射板温度分别为: 17.0℃、19.0℃、21.0℃、25.7℃ (系统未供给冷水工况), 睡眠区空气温度分别为: 25.0℃、27.0℃、29.0℃、30.5℃。由于人体不同部位对热的感知存在差异,当人体头部朝向北侧睡眠与朝南侧睡眠时,头部及身体其他部位所处的热环境也存在较大差异。因此本研究设计了四种实验运行方案,即 P-E 与 P-N 共同运行且头部朝北 (D-N)、P-E 与 P-N 共同运行且头部朝南 (D-S)、P-N 单独运行且头部朝北 (M-N)、P-N 单独运行且头部朝南 (M-S)。所设定工况详情如表 1 所示。

表 1 实验工况

Table 1 Experimental working conditions

序号	辐射板运行方案	辐射板温度 $T_p/^\circ\text{C}$	睡眠区空气温度 $t_a/^\circ\text{C}$
1		19.0	25.0
2		19.0	27.0
3		19.0	29.0
4	D-N	19.0	30.5
5		17.0	27.0
6		21.0	27.0
7		25.7	27.0
8	D-S	19.0	29.0
9	M-N	19.0	29.0
10	M-S	19.0	29.0

1.4 统计分析方法

通过 G*Power 3.1 计算,在每一个因素的对照实验中,总样本量 40 组 (4 人均全程参与实验)

可达到实际效力 0.95,大于预设标准 0.8。效力分析结果表明,当前设计能够以高概率检测到目标效应。对实验数据进行 Kolmogorov-Smirnov 检验,并得到测量数据满足正态性 ($\sigma>0.05$)。因此可通过 F 检验对结果进行显著性差异分析,显著性水平设置为 0.05 ($p<0.05$),最终结果表明数据具有显著性差异。实验数据用均数±标准差表示。为了清楚起见,一些图中省略了误差线。

2 实验结果与分析

2.1 平均皮肤温度

图 3 展示了实验人员在刚开始进入睡眠阶段时皮肤温度的变化趋势。初始阶段,皮肤温度呈现上升趋势,这主要是由于被褥系统的保温效果,导致人体与外界环境之间的热交换受到限制,从而使皮肤温度上升。随着睡眠的进行,人体的新陈代谢率降低,皮肤温度随之逐渐下降,并在一定范围内波动,直至达到一个相对稳定的水平。

随着睡眠区空气温度、辐射板温度的增加,人体平均皮肤温度也呈现出逐渐上升的趋势 ($p<0.05$)。尤其当 $t_a=30.5^\circ\text{C}$ 时,人体平均皮肤温度甚至高于 35°C 。相比于环境空气温度为 25°C 的工况,人体平均皮肤温度上升了 1.5°C 左右。在图 3 (b) 中,相比于 $t_p=25.7^\circ\text{C}$,辐射板温度 $t_p=17^\circ\text{C}$ 时人体平均皮肤温度相对降低了约 1°C 。而从图 3 (c) 中可以看出,仅 P-N 运行时人体平均皮肤温度也明显高于两块辐射板共同运行时人体平均皮肤温度 ($p<0.05$)。并且当人体头部朝向北墙辐射板时 (D-N 与 M-N 工况),人体平均皮肤温度要略低于人体头部朝南墙辐射板时 (M-N 与 M-S 工况),这意味着 P-N 辐射板对头部进行局部冷却可以调节人体平均皮肤温度从而影响热感觉。

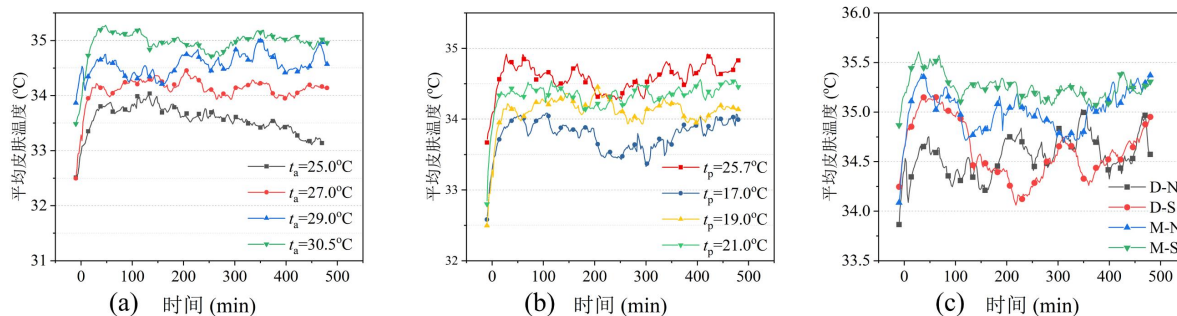


图 3 不同空气温度、辐射板温度及运行方案下的平均皮肤温度变化

Fig.3 Variation of mean skin temperature under different air temperatures, radiant panel temperatures and operating scenarios

2.2 PMV-PPD

图4(a)为在不同空气温度下($t_p=19.0^{\circ}\text{C}$, 布置方案为D-N)人体热感觉的变化。可以发现随着睡眠环境空气温度 t_a 从 25.0°C 上升到 30.5°C 时,PMV从-0.6逐渐增加到+0.9,这也意味着人体热感觉从稍冷状态逐步变为较热的状态($p<0.01$)。当环境温度到达 30.5°C 时,人体热不满意率达25%。图4(b)表示了在不同辐射板温度下($t_a=27.0^{\circ}\text{C}$, 布置方案为D-N)人体热感觉与不满意率。随着辐射板温度的上升,人体热感觉显著上升($p<0.01$)。当 $t_p=25.7^{\circ}\text{C}$ 时,此时人体热感觉约+0.5,处于稍热的状

态,当 $t_p=19.0^{\circ}\text{C}$ 时,最接近于热中性状态,并且人员热感觉随着辐射板表面温度的降低持续下降。从图4(c)可以看出不同的系统运行方案($t_a=29.0^{\circ}\text{C}$, $t_p=19.0^{\circ}\text{C}$)对人体热舒适的影响,结果显示两块辐射板共同运行时效果明显优于单块辐射板运行时的效果。在相同的辐射板运行时,实验人员头部朝向北墙睡眠时的总体的热舒适度略高于朝向南墙(无辐射板一侧)的热舒适度。这是因为在稍热的环境中,当头部接近有辐射板一端时,头部处于辐射板营造的局部冷环境,从而实现了人员整体热舒适的调节。

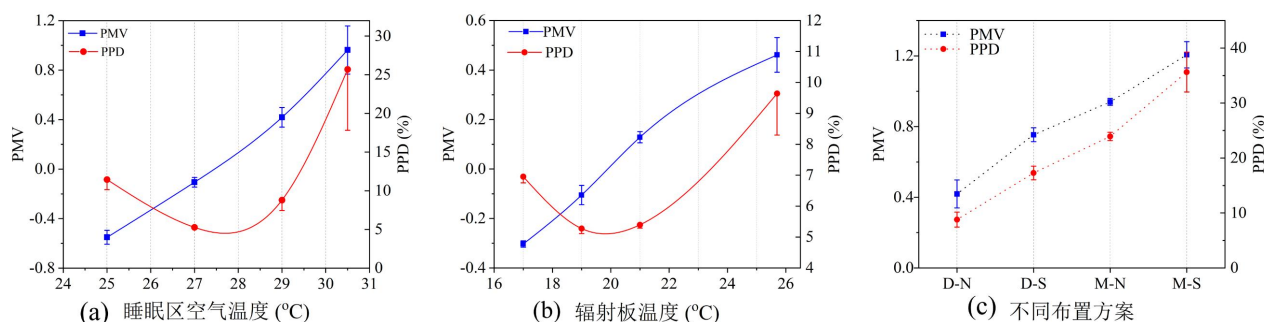


图4 不同空气温度、辐射板温度及运行方案下的PMV-PPD变化

Fig.4 Variation of PMV-PPD under different air temperatures, radiant panel temperatures and operating scenarios

2.3 睡眠质量

图5展示实验人员的深睡阶段、浅睡阶段、快速眼动的睡眠时长占比。在所有的睡眠阶段中,浅睡阶段占比最大,深睡阶段与快速眼动阶段占比较低,在不同工况下,睡眠阶段具有相似的特性,其中深睡阶段时间越长,睡眠质量越高^[17]。

从图5中可以看出,在不同环境温度及辐射板温度下,深睡阶段存在显著差异($p<0.05$),其中深睡阶段占比最长的为 $t_p=19.0^{\circ}\text{C}$, $t_a=27.0^{\circ}\text{C}$, 布置方案为D-N的工况,从2.2节可知,此时人体热感觉最

接近热中性,当人体热感觉偏离热中性时,深睡时间所占比例存在一定程度的下降,如图5(a)中空气温度 25.0°C 的工况与图5(c)中M-S布置方案的工况,而其中较冷工况下,深睡阶段占比更少。可以推得热中性条件下的受试者比非热中性条件下的睡眠质量更好,这表明热中性的环境对于保证睡眠质量具有重要作用,这在此前学者们的研究中也观察到了类似的现象^[18-20]。总的来看,局部辐射板的加入可以在稍高的环境温度下调节睡眠局部热环境,维持睡眠期间较高的热舒适性,从而保障良好的睡眠质量。

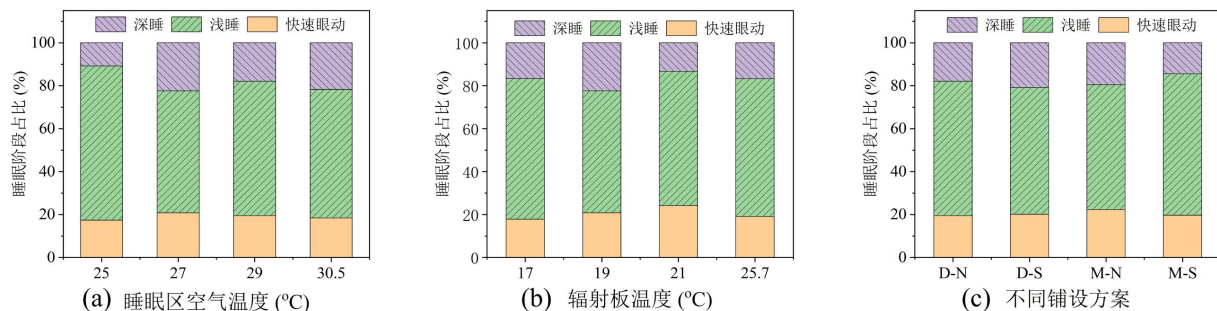


图5 不同空气温度、辐射板温度及运行方案下的睡眠阶段占比

Fig.5 Variation of Percentage of sleep stages under different air temperatures, radiant panel temperatures and operating scenarios

2.4 节能性分析

该 R-PCS 在提升人体睡眠热舒适度的同时具有显著的节能潜力。布置方案为 D-N, 环境温度为 27℃, 辐射板温度为 25.7℃ (辐射板未供给冷水) 的工况 PMV 值约为 +0.5, 处于偏暖状态。而随着辐射板温度降至 19℃ (供水温度为 15.2℃, 供回水温差 0.6℃, 供水流量为 0.2m³/h), 此时 PMV 值约 -0.1, 满足 EN15251 标准^[21]的 I 类热舒适度要求。因此接下来以该工况为例估算能耗。

结合 Zhang 等^[22]的研究结果, 与实验工况的人体代谢率、被褥系统总热阻、空气流动速度、空气相对湿度相同的情况下, 为了满足人体躺卧时热舒适性, 使用传统空调系统的房间环境温度需控制在 26℃ 左右。根据《实用供热空调设计手册》^[23]规定, 我国室内设计温度为 26℃ 时, 供冷设计冷负荷为 70~100W/m², 按 80W/m² 估算。测试室的总面积约为 5.52m², 床铺区占 1.8m²。

因此无 R-PCS 系统时室内温度为 26℃ 时的室内冷负荷 $Q_1=8080\text{W}/\text{m}^2 \times 5.52\text{m}^2=441.6\text{W}$ 。

根据 Hoyt 等^[24]的研究, 对于暖通空调设定温度每放宽 1℃, 空调系统能耗可降低约 10%。因此维持环境为 27℃ 所需的能耗需在维持环境温度 26℃ 能耗的基础上乘 0.9。即环境温度为 27℃ 时空调承担冷负荷 $Q_{2,1}=0.9 \times 80\text{W}/\text{m}^2 \times 3.3\text{m}^2=267.8\text{W}$ 。辐射板承担的热负荷可以根据进出水温度、流量进行计算, $Q_{2,2}=\rho c_p \Delta t=139.21\text{W}$ 。

假设为辐射板和非卧铺区空调提供冷水的设备均为空气源热泵。根据 GB/T 25127.2-2020^[25]的规定, 对于连接风机盘管末端的机组 COP 为 2.50。而辐射板供水温度为 15.2℃, 根据《实用供热空调设计手册》^[23]查询可得制冷 COP 约为 3.2。

对于传统空调系统, 其总供冷能耗 $E_1=441.6\text{W} \div 2.5=176.6\text{W}$ 。使用 R-PCS 供冷时, 非卧铺区供冷能耗 $E_{2,1}=267.8\text{W} \div 2.5=107.1\text{W}$ 。辐射板供冷能耗 $E_{2,2}=139.2\text{W} \div 3.2=43.5\text{W}$ 。因此总能耗 $E_2=E_{2,1}+E_{2,2}=150.6\text{W}$, 相较于传统空调整体降低了约 15%。

此外, 辐射板面积及铺设方案对人体热舒适度和能耗的影响值得深入探究。更大面积的辐射板在提供更广泛热调节范围的同时, 也将增大运行能耗。未来研究可在辐射板面积和铺设方案上进行优化, 通过实验测量和模拟分析, 建立更完善的能耗

-舒适关系模型, 为实际应用提供更具针对性的指导。

3 结论

本研究搭建了一个基于局部辐射板的睡眠环境热舒适系统, 通过实验的方式探究了在不同环境温度、辐射板温度及铺设方案下的人体热舒适及睡眠质量。得到如下结论:

(1) 在相同的铺设方案下, 人体皮肤温度、热感觉与辐射板温度、环境温度呈正相关关系。辐射冷板可对人体睡眠环境进行局部冷却, 从而使得在稍高的环境温度下, 人体依旧可以保持较好的热舒适性。

(2) 辐射板的铺设方案是影响睡眠局部热环境的重要因素之一。人员头部靠近辐射板 (P-N) 睡眠时的工况对人体热舒适的影响要高于头部远离辐射板 (P-N) 的工况。

(3) 睡眠质量与人员睡眠期间的热舒适度有着重要关系。当人体热感觉越接近热中性时, 人员的睡眠质量越好。在该实验中, 当 $t_p=19^\circ\text{C}$, $t_a=27^\circ\text{C}$, 布置方案为 D-N 的工况最接近热中性, 此时人员睡眠质量最好。在保持相同的热舒适性前提下, 相较于传统空调系统该 R-PCS 可节能约 15%, 具有良好的节能潜力。

参考文献:

- [1] Zaki S A, Rosli M F, Rijal H B, et al. Effectiveness of a Cool Bed Linen for Thermal Comfort and Sleep Quality in Air-Conditioned Bedroom under Hot-Humid Climate[J]. Sustainability, 2021,13(16):9099.
- [2] Zhang C J, Ren C G, Li Y, et al. Designing a smart electrically heated sleeping bag to improve wearers' feet thermal comfort while sleeping in a cold ambient environment[J]. Textile Research Journal, 2017,87(10): 1251-1260.
- [3] Song C, Zhao T T, Song Z Y, et al. Effects of phased sleeping thermal environment regulation on human thermal comfort and sleep quality[J]. Building and Environment, 2020,181:107108.
- [4] Wang D J, Chen P H, Liu Y F, et al. Heat transfer characteristics of a novel sleeping bed with an integrated hot water heating system[J]. Applied Thermal

- Engineering, 2017,113:79-86.
- [5] Pan D M, Chan M Y, Xia L, et al. Performance evaluation of a novel bed-based task/ambient conditioning (TAC) system[J]. *Energy and Buildings*, 2012,44:54-62.
- [6] Mao N, Pan D M, Chan M Y, et al. Experimental and numerical studies on the performance evaluation of a bed-based task/ambient air conditioning (TAC) system[J]. *Applied Energy*, 2014,136:956-967.
- [7] Du J, Chan M Y, Pan D M, et al. A numerical study on the effects of design/operating parameters of the radiant panel in a radiation-based task air conditioning system on indoor thermal comfort and energy saving for a sleeping environment[J]. *Energy and Buildings*, 2017,151:250-262.
- [8] Xin Y L, Cui W, Zeng J K. Experimental study on thermal comfort in a confined sleeping environment heating with capillary radiation panel[J]. *Energy and Buildings*, 2019,15:109540.
- [9] Ismail O A, Kassem M A, Hassan M A. Sleeping pods with radiant cooling panels: A first assessment of thermal comfort and cooling capacity[J]. *Energy and Buildings*, 2021,250:111282.
- [10] Xu X B, Lian Z W. Rethinking the calculation method of mean skin temperature in sleep research: Different formulas apply to different purposes[J]. *Building and Environment*, 2024,251:111231.
- [11] 孙宇翔,兰丽,闫艳,等.开/关门窗对卧室环境和睡眠质量的影响研究[J].*建筑科学*,2022,38(12):94-100.
- [12] 张悦.成年人睡眠状态下舒适吹风调控方法研究[D].重庆:重庆大学,2020.
- [13] Guo C, Lan L, Zhang H D, et al. The impact of bedroom environment on sleep quality in winter and summer in the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Building and Environment*, 2023,244:110785.
- [14] Du C Q, Lin X, Yan K, et al. A model developed for predicting thermal comfort during sleep in response to appropriate air velocity in warm environments[J]. *Building and Environment*, 2022,223:109478.
- [15] Lin Z P, Deng S M. A study on the thermal comfort in sleeping environments in the subtropics—Developing a thermal comfort model for sleeping environments[J]. *Building and Environment*, 2008,43(1):70-81.
- [16] Song C, Liu Y F, Liu J P. The sleeping thermal comfort model based on local thermal requirements in winter[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 173: 163-175.
- [17] Lan L, Tsuzuki K, Liu Y F, et al. Thermal environment and sleep quality: A review[J]. *Energy and Buildings*, 2017,149:101-113.
- [18] Wang Z H, Zhang N, Cao B, et al. Thermal sensation and sleep quality in different combinations of indoor air temperature and bedding system conditions[J]. 2023,243:110729.
- [19] Lan L, Pan L, Huang H Y, et al. Experimental study on thermal comfort of sleeping people at different air temperatures[J]. *Building and Environment*, 2014,73:24-31.
- [20] Cao T, Lian Z W, Zhu J W, et al. Parametric study on the sleep thermal environment[J]. *Building Simulation*, 2022,15(5):885-898.
- [21] European Committee for Standardization. EN 15251: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics: EN 15251[S]. Brussels, 2007.
- [22] Zhang N, Cao B, Wang Z, et al. Effects of Bedding Insulation and Indoor Temperature on Bed Microclimate and Thermal Comfort[J]. *Energy and Buildings*, 2020,223:110097.
- [23] 陆耀庆.实用供热空调设计手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:1479-2350
- [24] Hoyt T, Arens E, Zhang H. Extending Air Temperature Setpoints: Simulated Energy Savings and Design Considerations for New and Retrofit Buildings[J]. *Building and Environment*, 2015,88:89-96.
- [25] GB/T 25127.2-2020,低环境温度空气源热泵(冷水)机组 第2部分:户用及类似用途的热泵(冷水)机组[S].北京:中国标准出版社,2020.