

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2025.09.007

引用格式:谢鑫,刘猛,翟英贤,等.室内动态空调环境下老年人热需求评价指标研究[J].重庆大学学报,2025,48(9): 66-75.



室内动态空调环境下老年人热需求评价指标研究

谢鑫,刘猛,翟英贤,李子桥

(重庆大学土木工程学院,重庆 400045)

摘要:空调的送风形式会形成动态的室内热环境,影响老年人的实际热环境需求。传统 PMV 指标适用于稳态环境,较少考虑热环境空间和时间波动对热舒适的影响。文中主要分析室内动态空调环境下的老年人热需求,提出量化空间和时间波动影响的指标。招募了 7 位老年人参与气候室实验,分析了供冷条件下房间空调器 4 种典型空调送风形式下,老年人周围 24 个监测点(3 个高度和 8 个方向)的热环境参数特点,利用均匀性和波动性指标量化了热环境参数的时空分布特征。其中,均匀性是指受试者胸部和背部的环境参数差异,波动性是指受试者周围 8 个方向的环境参数的平均波动值。结果表明,人体周围热环境呈现出明显的均匀性和波动性特征,结合热感知评价发现,随着环境波动性的减小和均匀性的提升,老年人的热感觉和吹风感趋于中性,热舒适得到改善。根据相关性分析同样发现,热感知与提出的指标存在明显相关性。因此,均匀性和波动性指标可以作为评价室内动态空调环境下老年人热需求的重要指标。

关键词:动态环境;空调;老年人;热舒适

中图分类号: TU831.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2025)09-066-10

Research on the evaluation index of heat demand for the elderly in indoor dynamic air-conditioning environments

XIE Xin, LIU Meng, ZHAI Yingxian, LI Ziqiao

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The air supply mode of air conditioners creates a dynamic indoor thermal environment, which can significantly affect the thermal comfort needs of elderly individuals. However, the traditional predicted mean vote (PMV) index is designed for steady-state conditions and fails to consider the impact of spatial and temporal fluctuations in thermal environments. This study investigates the thermal needs of the elderly in dynamic air-conditioned environments and proposes evaluation metrics to quantify the effects of these fluctuations. Seven elderly participants were recruited for a climate chamber experiment. Thermal environment parameters were monitored at 24 points (across three heights and eight directions) surrounding the subjects under four typical air supply modes of room air-conditioners in cooling conditions. The temporal and spatial characteristics of the thermal environment were quantified using two proposed indicators: uniformity (defined as the difference in

收稿日期: 2024-12-18

基金项目: 重庆市高校创新研究群体项目(CXQT21004)。

Supported by Chongqing University Innovative Research Group Item(CXQT21004).

作者简介: 谢鑫(1998—),女,硕士研究生,主要从事热舒适研究,(E-mail) xiexin981211@163.com。

通信作者: 刘猛,男,教授,博士生导师,(E-mail) liumeng2033@126.com。

environmental parameters between the chest and the back of the subjects) and fluctuation (defined as the average variability of environmental parameters across the eight directions). Results showed significant uniformity and fluctuation in the thermal environment surrounding the subjects. Thermal perception evaluation showed that reduced environmental fluctuation and improved uniformity were associated with more neutral thermal and draught sensations, thereby enhancing thermal comfort. Correlation analysis further confirmed a significant relationship between thermal perception and the proposed uniformity and fluctuation indicators. These findings suggest that the uniformity and fluctuation indexes can be used as effective evaluation metrics for assessing the heat demand and thermal comfort of elderly individuals in dynamic indoor air-conditioned environments.

Keywords: dynamic environment; air conditioning; elderly; thermal comfort

据国家卫健委最新数据,截至2021年底,中国60岁及以上老年人口达2.67亿,占总人口的18.9%;65岁及以上老年人口达2亿,占总人口的14.2%。随着人口老龄化的加快,养老问题日益突出,需重点关注老年人健康状况及其影响因素。老年人通常每天超过90%的时间在起居室或卧室度过^[1],室内环境会影响老年人的心理状态、生理健康等。例如,舒适的室内环境可以有效减少老年人由于年龄增长而产生的焦躁、不安^[2],而过热的室内环境可能引起与热相关的疾病甚至死亡^[3]。因此,营造舒适健康的室内环境对老年人的健康至关重要。

在众多室内环境舒适健康的影响因素中,老年人受其生理特征影响(产热降低、散热障碍以及体温调节能力降低等^[4])对室内环境的热舒适性的要求与年轻人存在差异。研究表明,老年群体与普通成年人群体在冬夏季居家舒适温度存在明显差异。例如,日本老年人生活热环境研究会调研了日本南北沿线的45栋住宅,发现老年群体冬季舒适温度要求较高,而夏季较低,提出了不同功能区和季节的室温标准值^[5]。方雪苗^[6]调研了我国夏热冬冷地区农村住宅热环境及老年群体热舒适状况,建立了该地区老年人热感觉模型,并通过与同地区年轻人的热感觉模型对比发现,老年人夏季舒适温度偏低,冬季舒适温度偏高。韦欣超^[7]发现高温环境下老年人的热敏感性低于年轻人,老年人的中性温度高于年轻人。巩新枝等^[8]对夏热冬暖地区居住在农宅中的179位老年人和101位成年人进行实地调研,结果发现夏季老年人的中性温度高于成年人,老年人对热的耐受力较高。郭飞等^[9]调研了寒冷地区大连119名老年人和106名青年人的自然通风住宅的热环境、热适应行为,结果表明老年人喜欢偏冷的热环境,其中性温度低于青年人。

随着公众改善室内环境和提高生活水平需求的增加,空调已成为中国家庭的常用室内热环境改善设备^[10],随着极端天气的频发,空调设备也逐渐成为老年人群维持室内健康热环境的重要途径。由于空调器依靠出风口的局部高风速实现气流的快速扩散和室内温度的变化,因而在实际居家情况下空调营造的室内热环境属于非均匀分布。为满足不同室内热环境需求,房间空调器往往具备多种出风气流形式,例如,中吹、非直吹、扫风和无风感等,在使用者周围形成非均匀的、动态变化的热环境。然而,传统热舒适评价方法往往针对室内稳态热环境,对房间空调器所营造的动态热环境下的热舒适评价效果不佳。同时,由于老年人群温度受体密度、感觉神经损失和传导率的下降,导致温度敏感度下降^[11],使用单一稳态热环境参数或难以有效识别老年人群热环境需求,综合考虑室内空气温度、相对湿度和风速等参数的非均匀性与波动性对评价老年人对房间空调器所营造的动态热环境的热需求具有重要意义。

从热环境非均匀性对热感觉的影响来看,Wang等^[12]发现胸部的热感觉在预测整体热感觉方面的准确性最高。Fang等^[13]指出整体热感觉与胸部和背部呈强烈的线性相关。Jin等^[14]发现胸部的敏感性最高,其次是背部。Zhang等^[15]根据健康成年人局部热感觉的最大范围建立了一个整体热舒适度模型。因此,局部热感觉的绝对值或最大范围可以作为预测整体热感觉或热舒适的指标。目前的研究没有考虑局部身体敏感度比成年人弱的老年人的热反应,而确定局部身体部位的周围热环境参数,客观预测整体热感觉是非常必要的。在

速度波动方面,Fanger等^[16]分析了气流中速度波动的影响,并通过加入湍流度来扩展模型,湍流度等于标准差除以平均流速。Huang等^[17]研究了空气流速的频率波动,发现对人员的热感觉有明显的影响。Qin等^[18]采用湍流指数评估机械通风条件下的室内空气速度。Hua等^[19]发现速度差异会影响老年人的停留意愿。对于温度波动,Melikov等^[20]研究了空气温度的分布,并强调了其对热感觉和吹风感的影响。Madsen等^[21]采用标准差来描述温度波动。标准差忽略了温度的振幅,而温度振幅会影响热感觉。此外,老年人对空气流速的变化更加敏感,更有可能遭受通风引起的不适^[22]。

综上所述,文中研究的主要目的是提出室内动态空调环境下老年人热需求特征的评价方法,通过热环境参数和热感知问卷分析老年人的热需求,选择胸部和背部2个热环境区的差异作为均匀性指数以量化均匀性特征,提出参考湍流度的温度波动指数以量化波动性特征。文中提出并定义了均匀性和波动性指数,系统地描述了老年人周围热环境的均匀性和波动性,弥补了多数研究缺乏考虑热环境空间和时间波动对热感知影响的缺点。

1 研究方法

1.1 实验条件

研究选择了双层内外控制的气候室作为测试实验室,根据《民用建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB50736-2012)^[23],气候室的外室环境的空气温度和相对湿度设定为重庆室外空调设计温度35.5℃及设计相对湿度59%。测试房间的尺寸为7.0 m(长)×4.0 m(宽)×2.4 m(高)。选择1台制冷量为7 200 W的立式房间空调作为测试设备,其尺寸为0.5 m(长)×0.5 m(宽)×1.8 m(高),并放置在房间侧墙的中央。实验共安置了27个测点来监测热环境参数,其中3个测点(3个高度和1个方向)设置在空调出风口,24个测点(3个高度和8个方向)设置在受试者周围,受试者坐在房间的中央,距离空调器3.5 m。受试者静坐状态下,头部的位置高度为1.1 m,胸部的位置高度为0.6 m,与测试仪器的水平距离为0.5 m。在水平方向上,距离坐姿受试者0.5 m处,每间隔45°的放置测量点;在垂直方向上,测量点放置在0.1、0.6、1.1 m的高度处;形成三高度八方位环形测点;为保证实验过程安全,陪护和测试员在房间右下角靠墙就坐,不影响室内环境营造,具体布置如图1所示。

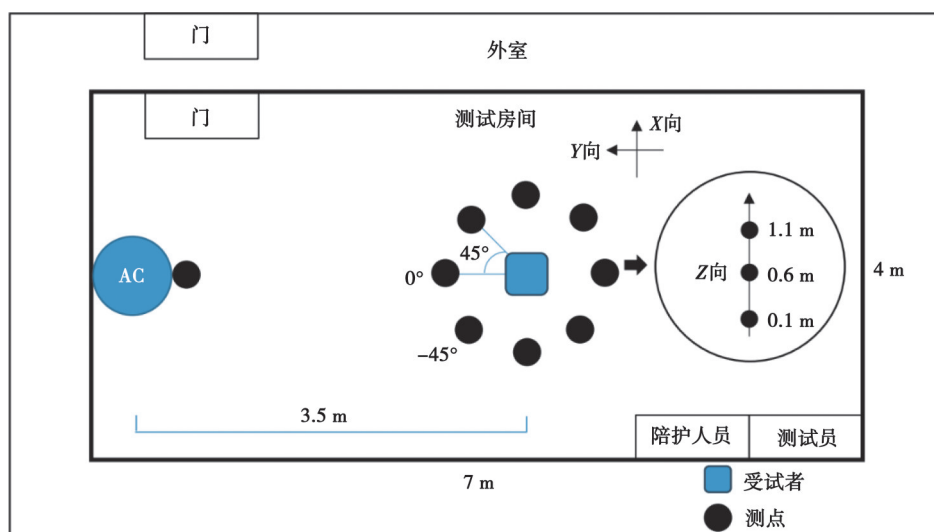


图1 气候室布置图

Fig. 1 Layout of the climate chamber

1.2 实验方案

实验选择制冷模式下常用的26℃作为设定温度,设定气流形式包括中吹、非直吹、扫风和无风感,气流

形式如图 2 所示。采用拉丁方^[24]实验设计,以消除工况顺序影响,工况排列为:中吹-不直吹-无风感-扫风、不直吹-扫风-中吹-无风感、扫风-无风感-不直吹-中吹、无风感-中吹-扫风-不直吹。实验开始前,开启空调运行到稳定状态,在此期间向受试者介绍实验流程及注意事项并填写个人基本信息;实验测试中,每个工况下的操作时间为 20 min,并在开始时设定 10 min 用于适应实验环境。每个工况下收集空调器运行处于相对稳定阶段的最后 15 min 的数据。实验流程如图 3 所示。

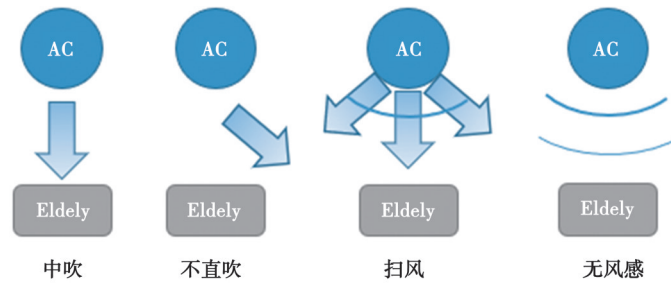


图 2 气流形式图

Fig. 2 Air supply modes

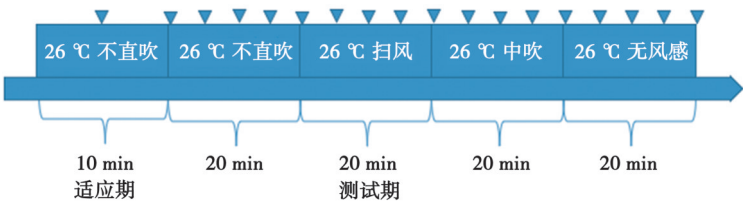


图 3 实验流程图

Fig. 3 Flowchart of the experiment

1.3 受试者

招募了 7 位老年人(5 位男性、2 位女性)作为受试者,老年人的健康状况良好,未患影响热感受的疾病,其年龄、身高等基本信息的平均值与标准差如表 1 所示。

表 1 受试者基本信息
Table 1 Data of the subjects

年龄/岁	身高/m	体重/kg	BMI/(kg·m ⁻²)
66.6±1.2	1.62±0.57	60.1±10.0	22.7±2.7

老年人在测试中穿着服装热阻为 0.7clo 的统一服装(短袖、长裤、运动鞋),在整个测试期间保持静坐状态,每 5 min 填写 1 次热感知问卷。主观问卷包括热感觉、吹风感和热舒适,采用标尺如表 2 所示。

表 2 投票标尺
Table 2 Voting scale

热感知	-3	-2	-1	0	1	2	3
热感觉	冷	凉	稍凉	适中	稍暖	暖	热
吹风格	风太小	风小	风有点小	适中	风有点大	风大	风太大
热舒适	非常不舒适	不舒适	有点不舒适	—	有点舒适	舒适	非常舒适

1.4 测量与指标

1.4.1 测量参数及仪器

实验测试参数包括温度、风速等客观热环境参数和热感知问卷,具体的测试参数及仪器如表 3 所示。

表 3 测试参数及仪器
Table 3 Test parameters and instruments

测试参数	测试仪器	范围	精度	采样间隔
温度	Swema 热线风速仪	0~100.00 °C	±0.01 °C	1 s
风速		0~2.0 m/s	0.01 m/s	
相对湿度	Vaisala 相对湿度传感器	0~100%	±1.5%	5 min
热感知	主观问卷	—	—	

1.4.2 热环境参数指标的定义

文中提出了均匀性和波动性指标,分别用于描述热环境参数的空间均匀性和时间波动性。

1) 均匀性指数。均匀性指的是高度为 0.6 m 处的-45°、0°和 45° 3 个方位的平均值与 135°、180°和-135° 3 个方位的平均值之间的差异,即为胸部和背部的环境参数差异。计算公式为

$$X_{\text{uni}} = \frac{1}{3} \left\{ \bar{X}_{(0.6, -45^\circ)} + \bar{X}_{(0.6, 0^\circ)} + \bar{X}_{(0.6, 45^\circ)} - \left(\bar{X}_{(0.6, -135^\circ)} + \bar{X}_{(0.6, 180^\circ)} + \bar{X}_{(0.6, 135^\circ)} \right) \right\}, \quad (1)$$

式中: X_{uni} 是 1 个参数的前后之差; $\bar{X}_{(0.6, \theta)}$ 是 1 个方向的 0.6 m 的平均值。

2) 波动指数。波动性是指受试者周围 8 个方向的平均波动值,其计算公式为

$$X_{\text{fu}} = \frac{1}{8} \left(\frac{\sigma_{0^\circ}}{\bar{X}_{0^\circ}} + \frac{\sigma_{45^\circ}}{\bar{X}_{45^\circ}} + \frac{\sigma_{90^\circ}}{\bar{X}_{90^\circ}} + \frac{\sigma_{135^\circ}}{\bar{X}_{135^\circ}} + \frac{\sigma_{180^\circ}}{\bar{X}_{180^\circ}} + \frac{\sigma_{-135^\circ}}{\bar{X}_{-135^\circ}} + \frac{\sigma_{-90^\circ}}{\bar{X}_{-90^\circ}} + \frac{\sigma_{-45^\circ}}{\bar{X}_{-45^\circ}} \right), \quad (2)$$

式中: X_{fu} 是 1 个参数的波动值; σ_{θ} 是 1 个参数 1 个方向 3 个高度的平均值的标准偏差; \bar{X}_{θ} 是 1 个方向 3 个高度的平均值。

采集的温度、风速等数据,将采用 IBM SPSS Statistics 26 进行相关性等分析,并利用 Origin 2024 可视化呈现图片。

2 结果分析

2.1 热环境参数特征

2.1.1 均匀性

根据公式(1)可得,各工况下受试者胸部和背部的温度和风速之差(即均匀值),如表 4 所示,呈现出温度负差、风速正差的特点,可以看出均匀性无风感最高,中吹最差。由图 4 可知,温度在中吹和扫风工况中,呈现出胸部低于背部,而不直吹和无风感则相近;风速在中吹和扫风工况中,胸部明显高于背部,而不直吹和无风感相对相近。

表 4 各工况温度和风速均匀值表

Table 4 Uniformity values of temperature and wind speed for each operating condition

工况	温度/°C	风速/(m·s ⁻¹)
中吹	-1.2~-0.6	0.14~0.25
不直吹	-0.2~0.2	-0.02~0.02
扫风	-0.9~-0.6	0.09~0.15
无风感	-0.2~0.0	-0.01~0.03

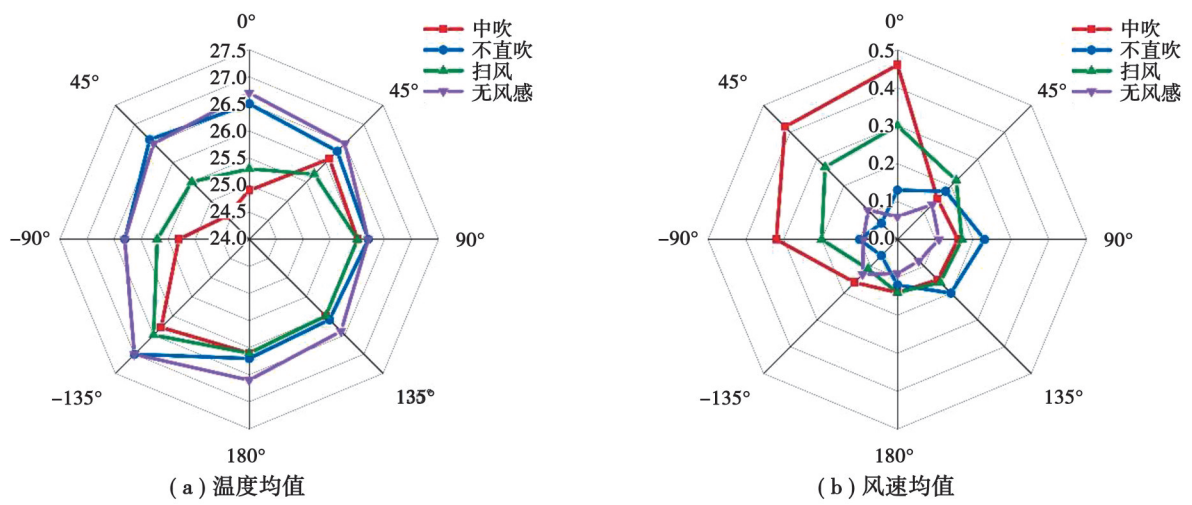


图 4 各工况各方位温度、风速均值图

Fig. 4 Average values of temperature and wind speed in each direction for each operating condition

2.1.2 波动性

根据公式(2)可得,各工况下温度和风速的波动值如表 5 所示,可以看出,扫风的波动性最大,无风感的波动性最小。从图 5 可以看出,对于温度,中吹和扫风工况波动性明显大于不直吹和无风感工况;对于风速,扫风工况的波动性明显高于其余工况,其中无风感工况波动最小。整体来说温度波动不剧烈,而风速波动范围很大。

表 5 各工况温度和风速波动值表			%
Table 5 Fluctuation values of temperature and wind speed for each operating condition			%
工况	温度波动值	风速波动值	
中吹	0.2~1.0	30~38	
不直吹	0.2~0.6	35~40	
扫风	0.4~0.9	46~76	
无风感	0.2~0.6	26~36	

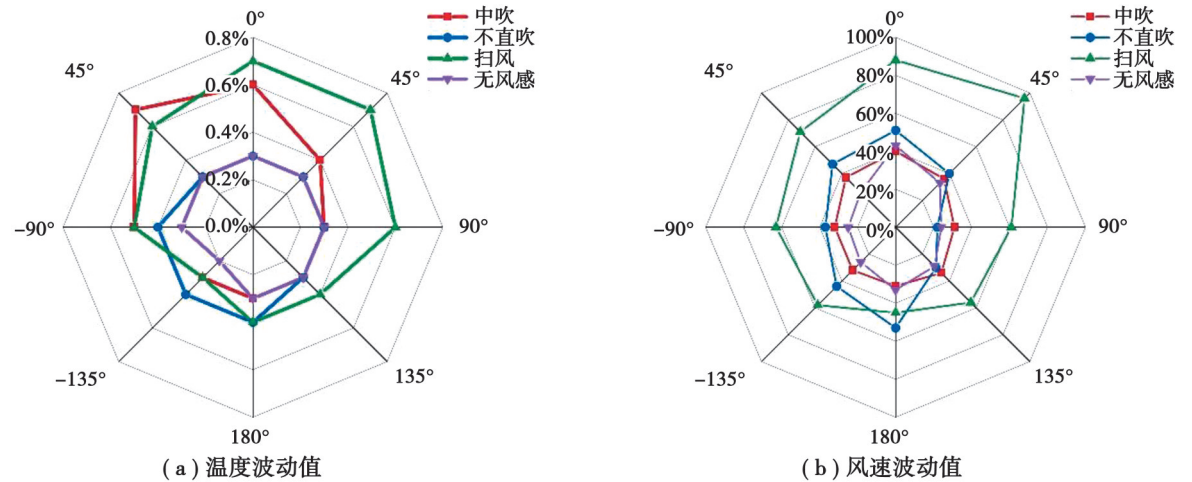


图 5 各工况各方位温度、风速波动值图

Fig. 5 Fluctuation values of temperature and wind speed in each direction for each operating condition

2.2 热感知特征

根据现场实测主观热感知问卷,老年人在每个工况下的热感知如图6所示。对于热感觉,中吹工况下有轻微凉感,其余工况接近中性,这与前述温度波动轻微相对应;对于吹风感,中吹工况有明显通风感,而其余工况接近中性,这与前述中吹工况波动性大相对应;对于热舒适,除中吹存在不舒适且波动大,其余整体感到舒适。

由此可知,由于温度的轻微波动,热感觉几乎没有变化,集中在中性。而随着湍流的减少,吹风逐渐减少并接近中性。此外,热舒适度的投票与热感觉相比更加一致,湍流的减少会使热感觉得到改善。由此可知,老年人更喜欢低波动的热环境。

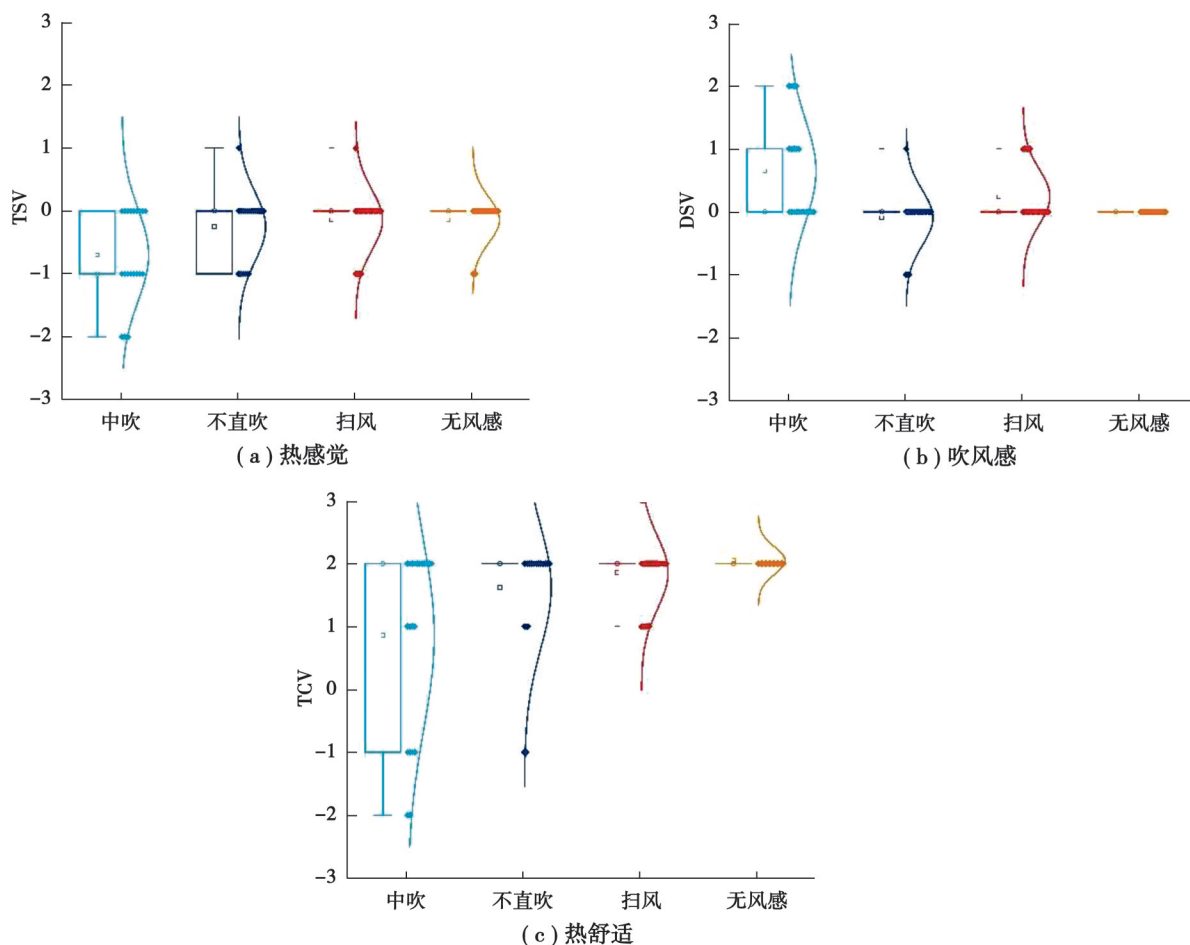


图6 老年人的热感知

Fig. 6 Thermal perception in the elderly

2.3 相关性分析

根据得到的各工况均匀值、波动值以及热感知问卷,为验证所提出指标与热感知之间的影响关系,采用 IBM SPSS Statistics 26 进行相关性分析,并利用 Origin 2024 可视化呈现图片。结果表明,热感知与提出的均匀性和波动性指标存在明显相关性,具体表现为热感觉与温度均匀值存在明显相关性($r=0.38, p<0.05$);热感觉与速度均匀值存在明显相关性($r=-0.28, p<0.05$);吹风感与温度均匀值存在明显相关性($r=-0.44, p<0.01$);吹风感与温度波动值存在明显相关性($r=0.34, p<0.01$);吹风感与速度均匀值存在明显相关性($r=0.42, p<0.01$);热舒适与速度均匀值存在明显相关性($r=-0.33, p<0.01$)。具体如图7所示。

综上所述,受试者周围热环境的时空分布特征可以用文中提出的均匀性和波动性指标来量化。典型空调送风形式下所营造的人体周围热环境呈现出明显的均匀性和波动性特征,具体表现为温度均匀值:-1.2~

0.2℃;速度均匀值:−0.02~0.25 m/s;温度波动值:0.2%~1.0%;风速波动值:26%~76%。结合具体工况分析,在热环境参数特征方面,对于均匀性,无风感>不直吹>扫风>中吹;对于波动性,中吹>扫风>不直吹>无风感。在热感知方面,对于热感觉,中吹工况下有轻微凉感,其余工况接近中性,这与前述温度波动轻微相对应;对于吹风感,中吹工况有明显通风感,而其余工况接近中性,这与前述中吹工况波动性大相对应;对于热舒适,除中吹存在不舒适且波动大,其余整体感到舒适。可以发现,随着环境波动性的减小和均匀性的提升,老年人的热感觉和吹风感逐渐趋于中性,热舒适也得到改善。而根据相关性分析同样发现,热感知与提出的均匀性和波动性指标存在明显相关性。其中,热感觉与温度均匀值、速度均匀值存在明显相关性,吹风感与温度均匀值、温度波动值、速度均匀值存在明显相关性,热舒适与速度均匀值存在明显相关性。因此,均匀性和波动性指标可以作为评价室内动态空调环境下老年人热需求的重要指标,建议纳入构建热需求预测模型的重要指标范围。

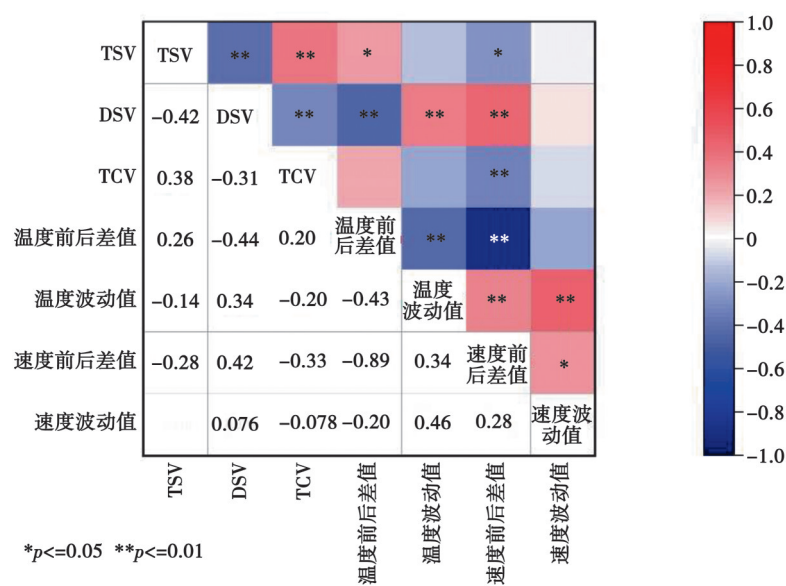


图 7 相关性分析图
Fig. 7 Correlation analysis

综上可知,受试者周围热环境的时空分布特征可以用文中提出的均匀性和波动性指标来量化。典型空调送风形式下所营造的人体周围热环境呈现出明显的均匀性和波动性特征,具体表现为温度均匀值:−1.2~0.2℃;速度均匀值:−0.02~0.25 m/s;温度波动值:0.2%~1.0%;风速波动值:26%~76%。结合具体工况分析,在热环境参数特征方面,对于均匀性,无风感>不直吹>扫风>中吹;对于波动性,中吹>扫风>不直吹>无风感。在热感知方面,对于热感觉,中吹工况下有轻微凉感,其余工况接近中性,这与前述温度波动轻微相对应;对于吹风感,中吹工况有明显通风感,而其余工况接近中性,这与前述中吹工况波动性大相对应;对于热舒适,除中吹存在不舒适且波动大,其余整体感到舒适。可以发现,随着环境波动性的减小和均匀性的提升,老年人的热感觉和吹风感逐渐趋于中性,热舒适也得到改善。根据相关性分析同样发现,热感知与提出的均匀性和波动性指标存在明显相关性。其中,热感觉与温度均匀值、速度均匀值存在明显相关性,吹风感与温度均匀值、温度波动值、速度均匀值存在明显相关性,热舒适与速度均匀值存在明显相关性。因此,均匀性和波动性指标可以作为评价室内动态空调环境下老年人热需求的重要指标,建议纳入构建热需求预测模型的重要指标范围。

由于研究的老年人的样本量有限,今后将扩大样本量以建立老年人热需求预测模型并验证模型预测的准确性。为了深入了解老年人对动态环境的热生理反应和适应性调节,将增加收集热生理参数,包括但不限于皮肤温度、心率、血压以及姿势调节行为。

3 结 论

为了研究室内动态空调环境下老年人的热需求特征,文中通过气候室测试确定了老年人周围24个测点(3个高度和8个方位)的温度、风速和相对湿度的特征,并通过主观问卷调查获得热感知。主要结论如下。

1)提出并定义了均匀性和波动性指数,以量化受试者周围热环境参数的时间和空间分布特征。均匀性指数是指受试者胸部和背部的环境参数差异,波动性指数是指受试者周围8个方向环境参数的平均波动值。

2)房间空调器典型送风形式下,温度均匀值为 $-1.2\sim 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、速度均匀值为 $-0.02\sim 0.25\text{ m/s}$ 。结合热感知评价发现,热感觉与温度均匀性、速度均匀性存在明显相关性,吹风感与温度均匀性、速度均匀性存在明显相关性,热舒适与速度均匀性存在明显相关性。

3)房间空调器典型送风形式下,温度波动值为 $0.2\%\sim 1.0\%$ 、风速波动值为 $26\%\sim 76\%$ 。结合热感知评价发现,吹风感与温度波动值存在明显相关性。

4)随着环境波动性的减小和均匀性的提升,老年人的热感觉和吹风感逐渐趋于中性,热舒适也得到改善。均匀性和波动性指标可以作为评价室内动态空调环境下老年人热需求的重要指标。

参考文献

- [1] Jiao Y, Yu H, Wang T, et al. Thermal comfort and adaptation of the elderly in free-running environments in Shanghai, China[J]. *Building and Environment*, 2017, 118: 259-272.
- [2] 边一超. 唐山市老年住宅室内环境舒适性研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019.
Bian Y C. Study on Indoor Environmental Comfort of Elderly Residences in Tangshan City[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [3] Williams A A, Spengler J D, Catalano P, et al. Building vulnerability in a changing climate: indoor temperature exposures and health outcomes in older adults living in public housing during an extreme heat event in Cambridge, MA[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(13): 2373.
- [4] 焦瑜. 上海地区公共养老设施老年人适应性热舒适研究[D]. 上海: 同济大学, 2019.
Jiao Y. Study on Adaptive Thermal Comfort for the Elderly in Public Elderly Facilities in Shanghai Area[D]. Shanghai: Tongji University, 2019. (in Chinese)
- [5] (日)健康维持增进住宅研究委员会, (日)健康维持增进住宅研考团. 健康住宅与居住行为指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
[Japan] Research Committee on Health Maintenance and Enhancement of Housing/Health Maintenance and Enhancement of Housing Study Group. Guide to healthy housing and residential behavior[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [6] 方雪苗. 夏热冬冷农村地区住宅热环境与老年人热舒适研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
Fang X M. Research on residential thermal environment and thermal comfort of the elderly in rural areas with hot summers and cold winters [D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)
- [7] 韦欣超. 高温天气老年人室内生理应激与热舒适研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
Wei X C. A study of indoor physiological stress and thermal comfort in the elderly during hot weather[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021. (in Chinese)
- [8] 巩新枝, 陈晨. 贺州地区夏季农宅室内热环境与热舒适实测研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2022, 55(4): 372-379.
Gong X Z, Chen C. Field study on summer indoor thermal environment and thermal comfort of rural houses in Hezhou Area[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55(4): 372-379. (in Chinese)
- [9] 郭飞, 张鹤子. 老年人与非老年人自然通风住宅热适应模型对比研究[J]. *大连理工大学学报*, 2016, 56(2): 147-152.
Guo F, Zhang H Z. Comparative research on thermal adaptive model of elderly people and non-elderly people in naturally ventilated house[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2016, 56(2): 147-152. (in Chinese)
- [10] Yan L, Liu M, Xue K, et al. A study on temperature-setting behavior for room air conditioners based on big data[J]. *Journal of*

- Building Engineering, 2020, 30: 101197.
- [11] Baquero M T, Forcada N. Thermal comfort of older people during summer in the continental Mediterranean climate[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 54: 104680.
- [12] Wang Y M, Chang H Y, Lian Z W. Evaluation of the feasibility of using skin temperature to predict overall thermal sensation in non-uniform thermal environments[J]. Journal of Thermal Biology, 2022, 106: 103254.
- [13] Fang Z S, Liu H, Li B Z, et al. Experimental investigation on thermal comfort model between local thermal sensation and overall thermal sensation[J]. Energy and Buildings, 2018, 158: 1286-1295.
- [14] Jin Q, Li X L, Duanmu L, et al. Predictive model of local and overall thermal sensations for non-uniform environments[J]. Building and Environment, 2012, 51: 330-344.
- [15] Zhang Y F, Zhao R Y. Overall thermal sensation, acceptability and comfort[J]. Building and Environment, 2008, 43(1): 44-50.
- [16] Fanger P O, Melikov A K, Hanzawa H, et al. Air turbulence and sensation of draught[J]. Energy and Buildings, 1988, 12(1): 21-39.
- [17] Huang L, Ouyang Q, Zhu Y X. Perceptible airflow fluctuation frequency and human thermal response[J]. Building and Environment, 2012, 54: 14-19.
- [18] Qin C, He Y P, Li J, et al. Mitigation of breathing contaminants: Exhaust location optimization for indoor space with impinging jet ventilation supply[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 69: 106250.
- [19] Zong H, Wang J, Zhou T, et al. The influence of transient changes in indoor and outdoor thermal comfort on the use of outdoor space by older adults in the nursing home[J]. Buildings, 2022, 12(7): 905.
- [20] Melikov A K, Krüger U, Zhou G, et al. Air temperature fluctuations in rooms[J]. Building and Environment, 1997, 32(2): 101-114.
- [21] Madsen T L, Popiolek Z. An instrument for draught measurements caused by fluctuations in air temperature and/or velocity [C]. Proceedings of Roomvent, 1994, 94: 337-345.
- [22] Singh S, Chani P S. Thermal comfort analysis of Indian subjects in multi-storeyed apartments: an adaptive approach in composite climate[J]. Indoor and Built Environment, 2018, 27(9): 1216-1246.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范 附条文说明: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB 50736—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012. (in Chinese)
- [24] 王元. 数学大辞典[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2017.
- Wang Y. Dictionary of mathematics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2017. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)