

DOI: 10.13791/j.cnki.hsfwest.20210309

杜晓辉, 张永超. 室内环境因子交互作用对人体舒适度影响的研究综述[J]. 西部人居环境学刊, 2021, 36(3): 73-80.

DU X H, ZHANG Y C. Review of the Interaction Effect of Indoor Environmental Factors on Human Comfort[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2021, 36(3): 73-80.

室内环境因子交互作用对人体舒适度影响的研究综述*

Review of the Interaction Effect of Indoor Environmental Factors on Human Comfort

杜晓辉 张永超 DU Xiaohui, ZHANG Yongchao

摘要: 人体对室内环境的舒适度感受, 是多种环境因子交互作用下的综合反映, 对人体舒适度的研究正在从单一环境因子向多环境因子交互作用的方向上发展。文章从数据获取和数据分析两个方面总结了相关研究的实施框架, 阐述了室内环境因子对人体单一感官舒适度交互作用的效应、类型和对整体舒适度的非对称影响, 论述了相关研究结论的应用价值。综述中发现了室内环境因子对人体舒适度作用机理的一般规律, 也发现现有研究结论存在可比性较差的问题, 通过对此展开分析, 提出了数据获取和研究方法上的改进措施, 探讨了建立更为综合的人体舒适度预测模型的路径。

关键词: 人体舒适度; 室内环境; 环境因子; 交互作用; 室内环境质量

Abstract: With the improvement of living standards, people put forward higher requirements for indoor environmental comfort. A series of research shows that the improvement of a single indoor environmental factors does not necessarily lead to the equal melioration of human comfort perception. The comfort feeling of human body to indoor environment is a comprehensive reflection of the interaction of a variety of environmental factors. The research on human comfort is also developing from a single environmental factor to the interaction of multiple environmental factors. This paper reviews the related research on the interaction effect of multiple indoor environmental factors on human comfort, summarizes the research methods in this field, and expounds the current research results from the following two aspects: the interaction of indoor environmental factors on human single sensory comfort and the asymmetric influence on human overall comfort.

The specific research contents of this paper include: 1) The implementation framework of related research is summarized from two aspects of data acquisition and data analysis. The research on the interaction effect of indoor environmental factors on human comfort is based on the investigation of occupants' subjective comfort, combined with the actual measurement of the objective environment or environmental simulation experiments, and establish the relationship between the subjective and objective data through qualitative or quantitative analysis method, the interaction mechanism of environmental factors on the overall comfort of human body is revealed at last. 2) The relevant conclusions of the existing research are summarized. Firstly, in terms of the interaction effect of multiple indoor environmental factors, it is found that the interaction between environmental factors is asymmetric. Most studies have proved that the effect of temperature on other sensory comfort is more obvious, while the effect of air quality on other sensory comfort is less, this asymmetric interaction can be classified into seven types in *ASHRAE Guideline 10-2016*. Secondly, in terms of the effect of indoor environmental factors on the overall comfort of human body, it is found that different environmental factors have different impact weights on the overall comfort of human body, which is closely related to the building type and the performance of the building itself, and the impact of environmental factors on the overall comfort of human body is dynamic, so that it is difficult to establish a universal human comfort evaluation model for all buildings types.

Through literature review, it is found that the existing research has the following problems: 1) The current research conclusions are not consistent, and the comparability is poor, which is mainly due to different researchers' selection of indoor environmental factors. The selection of

中图分类号 TU119

文献标识码 A

文章编号 2095-6304(2021)03-73-08

*国家自然科学基金青年项目(51908026); 中建股份科技研发课题(CSCEC-2019-Z-7)

作者简介

杜晓辉(通讯作者): 北京交通大学建筑与艺术学院, 副教授, xhdu@bjtu.edu.cn

张永超: 北京交通大学建筑与艺术学院, 硕士研究生

environmental factors cannot be based on a unified standard. For example, in the same research on thermal environment quality, many researchers only consider the temperature factor, while ignoring several other environmental factors determined by PMV (Predicted Mean Vote). 2) There are some differences between the setting of environmental parameters and the actual application in the environmental simulation experiment, which leads to the poor guidance of the conclusions of the environmental simulation experiment to the practice. Based on the above problems, this paper puts forward the following suggestions: 1) Extract several environmental factors that are more important to the perception of human environmental comfort, and take them as the unified standard for the selection of environmental factors, so as to make the conclusions of different comparable studies. At the same time, when environmental simulation experiment is used for research, the value of environmental parameters in experiment should be based on the actual application situation, and a closed-loop research route from simulation experiment to application practice should be established. 2) In view of the fact that it is not feasible to establish a unified human comfort model, this paper puts forward that the indoor environment comfort evaluation should be included in the conventional post evaluation process of buildings, so as to regulate the indoor environment quality more precisely.

With the gradual deepening of related research, the application value of related research will gradually transform from the exploration of the mechanism of the interaction effect into the practical application. The interactive effects of indoor environmental factors on human comfort are complex and dynamic, and related research is not yet mature, which requires extensive cooperation among researchers, through a large number of empirical studies and innovations, in order to explore the interaction effects of indoor environmental factors on human comfort and provide a theoretical basis for creating a more healthy and comfortable building environment.

Keywords: Human Comfort; Indoor Environment; Environmental Factors; Interaction Effect; Indoor Environment Quality

0 引言

随着生活水平的提高,人们对室内环境舒适度提出了更高的要求。大量研究针对影响人体舒适度的单一环境因子制定相应标准,以确定相关环境参数的可接受范围^[1]。然而实践发现,尽管满足了相关标准的要求,使用者对室内环境的满意度水平却仍然没有达到期望值。这一方面是因为室内环境因子之间存在复杂的物理或化学作用^[2-3],对人体舒适度感知也存在着生理或心理上的交互作用;另一方面在于非环境因素(人的个体差异、主观认知、社会文化等)对人体舒适度感知也存在复杂影响^[4-7]。相关研究已经从单一环境因子延伸到室内环境因子的交互作用上,试图揭示多环境因子对人体舒适度的作用机理。

文章对室内环境因子交互作用对人体舒适度影响的相关研究进行了梳理,总结了该领域的研究方法,从室内环境因子对人体单一感官舒适度的交互作用,以及对人体整体舒适度的非对称影响两个方面阐述了当前的研究成果。在此基础上,发现既有研究中的现存问题,展望了后续研究的实施路径。

1 研究方法

关于室内环境因子交互作用对人体舒适

度的研究,都是基于对客观环境参数和使用者的主观舒适度评价两者相关关系的分析进行的,首先获取主客观数据,再进行定性或定量分析,最后得到环境因子交互作用对人体各感官舒适度影响和对整体舒适度作用的结论(图1),笔者对相关研究的研究框架进行了图示(图2)。

1.1 数据获取途径

1.1.1 人体舒适度调查

对人体环境舒适度的研究,基本上是延续了房格尔(Fanger)对人体热舒适的研究路线,通过大量的人体环境满意度问卷调查,获取使用者对环境的感知评价^[9]。5点或7点舒适度或满意度量表是问卷调查中常用方法^[10-13],

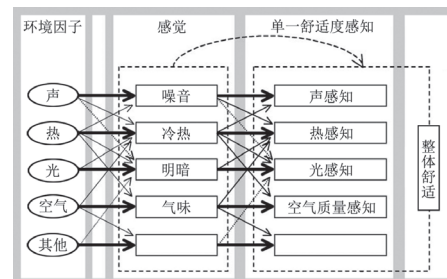


图1 室内环境因子对整体舒适度的作用机理^[8]
(注:不同的线型代表作用强度的不同,线型随作用强度增强而加深)

Fig.1 mechanism of indoor environmental factors on human overall comfort^[8] (linetype deepens with the increase of action intensity)

相关量表将客观环境参数和人对空间环境舒适度转化成可以量化分析的数量关系。

部分研究者将新陈代谢率^[14]、心率^[15]、皮肤温度^[16-17]等人体客观生理指标引入到人体舒适度评价中,但是人体对环境舒适度的评价受社会文化背景、个人心情等多方面因素影响,客观生理指标并不一定能够真实度量使用者心理层面的满意度感知情况,因此无法完全以生理指标作为衡量使用者环境满意度的依据。

1.1.2 客观环境参数获取

现场环境实测:一些研究者^[18-19]对特定建筑类型进行现场物理环境实测和主观舒适度调查,以获取相应的主客观数据,现场环境实测大多应用于使用人群相对稳定的

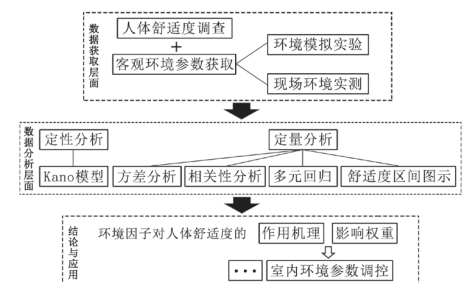


图2 室内环境因子对人体舒适度交互作用影响的研究框架

Fig.2 research framework of interaction effect between indoor environmental factors and human comfort

办公类、住宅类建筑,而对使用率变化较大的建筑类型较少涉及^[20]。且实测结果容易受季节、天气等因素的影响,在考虑时变因素的情况下,需要在不同时段内进行多次重复数据采集,才能获得相对更能够反映客观结果的数据,带来了实验周期较长、误差较大的问题。

环境模拟实验:一些研究依托于环境舱进行客观环境参数的调节,统计不同环境参数组合下受试者的主观舒适度情况^[17, 21-26]。大部分环境模拟实验采用了被试内设计的实验流程,让所有受试者轮流参与到全部预设的环境变量中。小部分实验采用被试间设计或混合设计的实验流程,受试者仅参与部分预设的模拟环境变量^[27]。表1对参考文献^[21, 23, 25-26]中所述实验的环境参数设置情况进行了总结,可以看出,模拟实验中环境参数取值范围更为广泛,且能够弥补现场环境实测中观测周期过长的缺点。环境模拟实验采用因子设计的实验方式,当需要模拟的环境因子数量过多时,会带来实验流程复杂、样本需求量剧增的问题。

环境模拟实验的研究结论能否直接应用于实践尚待进一步验证,这主要是因为:首先,实验设计中较少考虑受试者对周围环境的自适应性,而这被大量研究证实是影响人体舒适度的重要非环境因素^[28-30];其次,实验中受试人群、不同环境参数下的暴露时间等条件都不同于建筑实际应用情况。环境模拟实验大多选择青年学生作为受试者(表1),这显然和现实应用中,使用者年龄阶段跨度较大的情况是不符合的;最后,虽然一些环境模拟实验具备预设的建筑背景,对办公室^[17, 21, 25-26]、飞机舱^[31]等特定的

建筑室内环境进行了模拟,但是即使是具有相同的模拟环境,环境参数的具体取值范围也不尽相同(表1),而一些不具备预设建筑对象的环境模拟实验,其环境参数取值和现实应用相比,稍显极端。因此,环境模拟实验所得结论的适用性,还需要在应用实践中进行检验,而目前研究普遍缺乏这一环节。

1.2 数据分析方法

1.2.1 定性分析

金(Kim Jungsoo)首次将营销领域中评价产品质量和消费者满意度的Kano模型引入到对室内环境因子对整体环境舒适度影响的研究中,基于对使用者主观评价结果进行虚拟变量的多元回归分析,得到室内单一环境因子对整体环境舒适度的正向和负向作用关系,并据此将其划分为基本要素、激励要素和绩效要素^[32-33](图3)。定性分析可以揭示不同室内环境因子对人体整体舒适度的作用效应,为室内环境参数控制中,优先考虑何种因子,如何提高建筑管理有效性提供参考^[33]。

1.2.2 定量分析

基于使用者对室内环境舒适度的评价,和客观环境参数数值,以数理统计的方法定量研究室内各项环境因子对人体感官舒适度的影响。常见分析方法如下:

1.2.2.1 方差分析、相关性分析

方差分析可以检验分项环境因子是否对整体舒适度存在作用关系^[25, 34],相关性分析可以检验分项环境因子与整体舒适度是否存在协同变化以及协同变化的程度^[35-37],两者作为判定分项环境因子与整体舒适度交互作用关系的统计学方法,在相关研究中广泛应用。

1.2.2.2 多元回归分析

使用多元线性回归^[38-41]和多元逻辑回归^[42-44]等分析方法,可以在定量计算各环境因子对整体舒适度影响权重的基础上建立人体舒适度预测模型。如曹彬等人^[38]对北京和上海两地文教类建筑进行现场环境实测和使用者舒适度调查,利用最小二乘法将多项室内客观环境与整体舒适度进行线性回归分析,最终建立了使用者舒适度与各项环境参数之间的预测模型(式1),为室内环境参数调节提供了依据。

$$S=a_1 t_0+a_2 C_{CO_2}+a_3 E+a_4 L_A+b \quad (1)$$

注:上式中, S :整体环境舒适度; t_0 :综合温度; C_{CO_2} :二氧化碳浓度; E :照度; L_A : A 计权声压级; a :回归系数; b :常数项。

弗朗西斯科(Fassio Francesco)等人^[45]比较了线性回归和逻辑回归在预测整体舒适度方面的适用性,认为线性回归分析会放大单项环境因子对整体舒适度的作用系数,逻辑回归更适用于预测模型的构建。唐(Tang Hao)等人^[26]也认为由于某些单项环境因子之间自身存在高度的相关性会带来多元线性回归分析中多元共线性问题,进而导致预测模型失真。因此,在构建人体舒适度预测模型时,有必要首先进行多元共线性检验,或者将两种分析

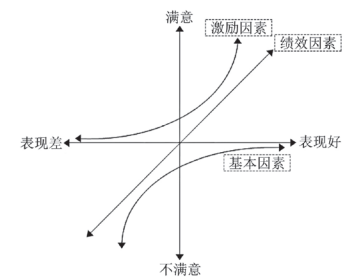


图3 Kano模型图示^[33]

Fig.3 diagram of Kano's model

表1 不同环境模拟实验中的环境因子参数设置情况

Tab.1 parameters settings of environmental factor in different experimental works

模拟背景	环境因子	参数取值	参数单位	受试者群体(平均年龄)	受试者数量/人
办公环境	温度	18/20/22/24/26/28/30	℃	大学生(22岁)	120
	声压级	45/50/55/60/65	dB		
	光照照度	100/300/500/700/900/1 100/1 300	Lx		
无	声压级	30/60/90	dB	大学生(19—23岁)	20
	光照照度	200/500/800	Lx		
	温度	20/25/30	℃		
办公/教室环境	光照照度	150/500/1 000	Lx	大学生(男: 23.27岁; 女: 21.3岁)	60
	声压级	45/55/65/75	dB		
	声音类型	嘈杂人声/风扇声/乐声/水声	无		
	热平衡预测平均评价(PMV)	-1.5/-0.97/-0.5/0/0.5/0.97/1.5	无		
办公环境	声压级	40/44.7/48.5/52.5/56.5/60.6/65	dB	研究生(23岁)	8
	光照照度	100/259/400/550/700/841/1 000	lx		
	二氧化碳浓度	500/677/830/1 000/1 160/1 323/1 500	ppm		

方法同时运用, 根据实际情况选用更适用的舒适度预测模型。

1.2.2.3 舒适度区间图示

该方法主要是将人体舒适度评分结果进行统计, 得出使用者感到舒适时的环境因子的参数范围并进行图示^[8, 21]。如黄 (Huang Li) 等人^[21]通过环境模拟实验, 得到不同热、光、声参数组合条件下, 受试者主观舒适度评分情况, 并根据分值分布图示出使用者感到舒适时所对应的环境参数的值域范围 (图4), 辅助于室内环境的调控。

2 室内环境因子的交互作用

2.1 一阶环境因子的交互作用

使用者所处的室内环境, 主要包括热环境、光环境、声环境和空气质量四项基本环境要素^[46]。各环境要素又由多项物理、化学因子所组成, 它们之间存在复杂的相互影响。目前的研究主要聚焦于一阶环境因子^[46], 如温度、光照照度、噪声值等。笔者对部分研究的结论进行了总结 (表2), 可以看出, 人体单一感官舒适度, 受多种环境因子的交互作用, 不同环境因子的作用强度并不相同, 但整体趋势可以看出, 温度对其他感官舒适度的作用效果更为明显^[47]。而关于空气质量对其他感官舒适度影响的研究相对较少, 这主要是由于空气质量依赖于多项物理和化学参数 (如单一气体或颗粒物含量、细菌含量), 无法用单一量进行全面表征, 从而难以被使用者正确感知和评价^[20, 48], 目前的研究大多以二氧化碳浓度表征空气质量^[49], 研究结论能否代表使用者对空气质量的真实感受尚待进一步证实。

由于室内环境因子的复杂性, 不同研究者对不同环境要素的研究中所选择的一阶环

境因子并不相同。尽管人体热平衡预测平均评价方程 (PMV) 已经确定了空气温度、辐射温度、气流速度、湿度四项环境因子, 作为计算人体热舒适评价的物理量^[50], 但只有部分研究以PMV作为热舒适评价标准^[13, 26], 大部分研究仅仅将其中部分物理量作为热环境评价的指标^[17, 25, 40], 这就造成了相关研究结论难以比较。因此, 为了得到系统、可比的研究成果, 对一阶环境因子的选取应该基于确切的标准, 并在对研究结论论述时明确何种环境因子对何种感官舒适度有何种影响, 而不是笼统地将研究结论概括为某环境要素对感官舒适度具有影响。

2.2 环境因子交互作用的类型

基于一阶环境因子交互作用的广泛探讨, 可以发现室内环境因子交互作用对人体单一感官舒适度的影响是非对称的, 这和对各项环境因子的敏感程度和可接受程度的不同有关。比如, 热环境可以直接影响室内空气品质 (与微生物生长环境有关), 造成人体对嗅觉舒适度的变化, 而空气质量变化却不能直接引起人体热舒适度的变化。美国供暖、

制冷和空调工程师学会发布的《美国暖通空调工程师协会指导手册10—2016》(ASHRAE Guideline 10—2016)^[46]中, 将这种室内环境因子对人体单一感官舒适度的非对称交互作用, 总结为七种类型 (表3)。

这七种交互作用类型表明, 当试图调节某项环境因子来提高室内环境整体舒适度时, 需要考虑是否对其他环境造成了潜在影响以及这种影响的性质, 只有平衡好各种环境因子之间的交互作用, 才能最大化地提高室内环境的舒适度。

3 室内环境因子对人体整体舒适度的影响

3.1 环境因子与整体舒适度的非线性关系

室内环境因子之间的复杂交互作用, 导致人体对整体环境的感知不是由单一感官舒适度简单相加, 对一个或多个环境因子的满意度水平不能代表对整体环境的评价^[39, 51, 55]。人们对室内环境的舒适度感受, 是多种环境因子引起的生理和心理的综合反映^[56], 各项环境因子对整体舒适度的作用效

表2 室内环境因子对人体舒适度的交互作用效应

Tab.2 interaction effect of indoor environmental factors on human comfort

舒适度感知	环境因子	研究方式	研究结论
热感知	光	环境模拟实验	热感知受照度水平的影响 ^[51]
	声	环境模拟实验	噪音水平和类型对热舒适度有显著影响 ^[52]
	空气质量	现场环境实测 (办公建筑)	污染物浓度影响热感知 ^[22]
光感知	热	环境模拟实验	亮度感知受气温变化影响 ^[53]
	声	现场环境实测 (办公建筑)	视觉舒适性随噪声水平的降低而增加 ^[25]
声感知	热	环境模拟实验	热条件对噪声感知有显著影响 ^[8]
	光	环境模拟实验	环境照明系统的照度水平并不影响声学感知 ^[25]
空气质量感知	热	现场环境实测 (办公建筑)	空气质量感知和室温、壁面辐射温度正相关 ^[54]
	声		空气质量感知和噪声声级没有相关性 ^[54]

表3 室内环境对人体舒适度交互作用的类型

Tab.3 types of interaction effect between indoor environment and human comfort

交互作用类型	释义	例证
独立性	两种环境因子独立作用, 独立调节	通过增加空气流速来提升热舒适度, 与通过提高照度提升光舒适度独立作用
叠加性	两种环境因子共同的影响近似于其单独影响的总和	辐射温度和空气温度对人体热舒适度的综合影响, 近似于单项因素的作用
协同性	两种环境因子共同的影响大于其单独影响的总和	同时增加空气温度和湿度, 对人体热舒适度的作用大于它们独立影响的总和
对抗性	一种环境因子的作用抵消另一环境因子的作用	通过挥发性有机化合物掩盖室内异常气味
可预防性	提前对环境进行预设以排除不良影响	保持室内干燥, 通风良好, 以抑制霉菌生长, 保障室内空气质量
累积性	某一环境因子的影响随时间累积	长期暴露在强噪音中可能导致听觉敏锐度下降
意外性	调节某项室内环境因子时, 意外的对其他因子产生影响	开窗通风以改善室内热环境, 带来室内外空气的交流, 改变了室内空气质量

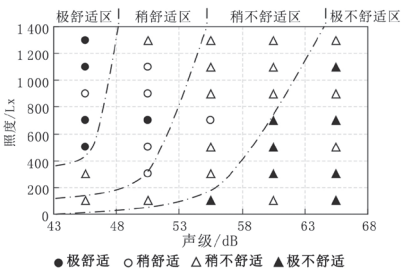


图4 声光交互作用下的人体舒适度区间图示^[21]
Fig.4 human comfort zone under the interaction effect of sound and light

应呈非线性关系^[32]。

为了探究不同的环境因子对整体舒适度的作用效应,金(Kim Jungsoo)等人^[57]和耿阳(Geng Yang)等人^[58]针对不同类型或不同通风条件的建筑,对其使用者展开主观舒适度调查,并对结果进行了虚拟变量的回归分析,建立了对应的Kano模型,将室内环境因子进行分类(表4)。可以看出,室内环境因子对整体舒适度非线性作用是普遍存在的,具体的影响效应因调查对象的不同而存在差异,但是在同为空调控制的建筑环境中又表现出极大相似性(温度都表现为基本因素,空气质量和光照都表现为绩效因素)。这表明对人体舒适度的研究不能忽视建筑类型和建筑通风等建筑自身性能的影响。

3.2 人体整体舒适度预测模型

室内各项环境因子之间存在着复杂的非对称交互作用对人体舒适度感知产生综合影响,一些研究者通过定量分析的手段以揭示室内不同环境因子对人体舒适度的影响权重,笔者对部分研究进行了总结(图5),从中可以发现以下规律。

一是不同类型的建筑中,各项环境因子对整体舒适度的影响权重并不相同,总体来说,热环境对整体舒适度的影响最为

大^[37-39, 42, 44],而光环境对整体舒适度的影响并不显著。

二是即使在同类型建筑中,各环境因子对整体舒适度的影响权重也尚未得到完全一致结论。如同样是关于办公类建筑的研究,汉弗莱斯(Michael A Humphreys)^[39]和王(Wong L T)等人^[42]分别对英国和中国香港的常规办公建筑进行调研,并通过回归分析得出热环境对整体舒适度影响最大的结论,而梁(Liang Han Hsi)^[35]对中国台湾的绿色办公建筑进行调研,通过相关性分析发现热环境不如声环境和空气质量对整体舒适度影响大。这证明针对不同建筑建立普适性的人体舒适度预测模型的做法并不可行,关于人体舒适度的探讨需要基于特定的建筑建成环境。

三是阿斯托尔夫(Arianna Astolfi)等人^[37]对意大利一所中学教室展开对照实验,结果发现,普通教室中,声环境对学生整体舒适度的影响大于热环境的影响,而经过声环境的优化改造的教室中,热环境成为影响整体环境舒适度的最主要因素。这说明,环境因子对整体舒适度的影响作用是动态的,这和建筑自身的性能特点密切相关,当某项环境因子远远低于使用者预期时,对整体舒适度的影响更为显著,这也证明了不同环境

因子对整体舒适度作用的非对称性。

尽管室内环境因子对整体舒适度的作用是动态且复杂的,但是不同研究者仍然试图根据室内环境因子对人体舒适度影响权重^[59],建立针对特定建筑的人体舒适度预测模型以明确提升人体整体舒适度水平,室内各项环境因子的最佳参数范围,为更好地进行室内环境质量的调控提供依据。但是,不同研究者选取的建筑对象差异较大,对室内环境因子的选取也并不相同,造成了相关预测模型可比性较差。

4 研究展望

4.1 数据获取规范化

室内环境因子选取的差异是造成相关研究结论可比性差的重要原因。在后续研究中,环境因子的选取有必要基于统一标准,重点关注室内环境中的热、光、声、空气质量四项基本环境要素。同时,应综合考虑PMV值计算中所涉及的多项环境因子,而不能仅仅只关注于室内温度。

环境模拟实验和现实应用情况的客观差别导致实验结论无法直接应用于实践。为了更好地通过环境模拟实验,探究实际环境中的人体舒适度感知情况,首先,应当对拟模拟的建筑类型进行环境实测,为实验中的环境参数设定提供参考;其次,有必要设计从环境模拟实验到应用实践的闭环研究路线,将模拟实验所得的结论在应用中进行校核和修正。

4.2 分析方法多样化

室内环境因子交互作用对人体舒适度的影响,受建筑类型、建筑性能等非环境因素的作用,很难建立起统一的人体舒适度预测模型。加之随着相关研究的深入,数据分析的方式也越来越多元化,不同数据分析方法的适用性存在较大差异。这些因素促使研究者在将来的研究工作中针对不同建筑类型、不同建筑性能,采用多样化的分析方法,通过对比论证不同方法的适用性原则。

4.3 应用价值的拓展

随着人们对室内环境质量关注度和舒适度要求的提高,对建筑建成环境的使用后

表4 室内环境因子对整体舒适度作用的Kano模型

Tab.4 Kano's model of the effect of indoor environmental factors on human overall comfort

类别	室内环境因子/单一感官舒适度			含义
	办公建筑 (自然通风)	办公建筑 (空调控制)	机场航站楼 (空调控制)	
基本因素	视觉舒适度 (无眩光问题)	温度、声级	温度	负向影响效应对整体舒适度的影响幅度大于正向影响效应对整体舒适度的影响
激励因素	温度、声级	无	无	正向影响效应对整体舒适度的影响幅度大于负向影响效应对整体舒适度的影响
绩效因素	声音私密性	空气质量、光照、声音私密性、视觉舒适度	噪声、空气质量、光照	使用者的整体舒适度与该环境因子的表现呈线性关系

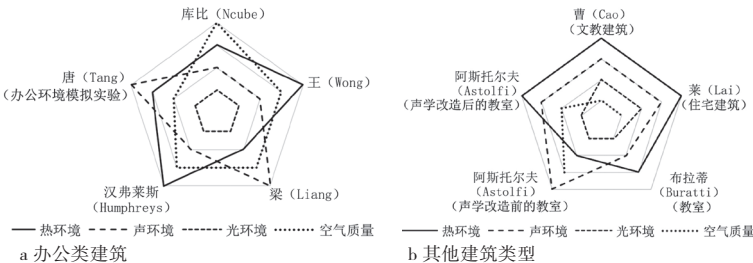


图5 不同环境因子对环境整体舒适度的重要性排名(数字越大表示排名越高,影响越重要)

Fig.5 ranking of importance of different environmental factors for overall human comfort (higher number indicates higher ranking)

评估越来越广泛,而相关研究为使用后评估工作提供了新的方法论。通过对建筑建成环境的主客观调查,可以有针对性地建立人体舒适度预测模型,纳入建筑管理信息系统,辅助于建筑室内环境控制,提升建成环境的舒适度。

研究者证明,通过对室内环境参数的精细化调控,还可以实现建筑节能^[60]、提升劳动生产率^[61]等目的,相关研究的应用价值将随着研究深入而得到进一步拓展。

5 结语

为实现室内环境参数的精细化调控,创造更加舒适的室内环境,对人体舒适度的研究正逐渐从单一环境因子延伸到对多环境因子的交互作用上。本文从相关研究的数据获取和分析方法入手,总结了相关研究的实施框架,阐述了当前研究存在的问题,并从室内环境因子对单一感官的交互作用和对整体舒适度的非对称影响两个方面总结了当前的研究成果。基于对当前研究现状的剖析,展望了未来研究的趋势和应用价值。室内环境因子的交互作用对人体舒适度的影响是复杂且动态的,而相关研究尚不成熟,需要研究者广泛合作,通过大量的实证研究和创新为探究室内环境因子对人体舒适度的作用机理,创造更加健康舒适的建筑室内环境提供理论依据。

参考文献:

- [1] 叶海. 室内环境品质的综合评价指标[J]. 建筑热能通风空调, 2000(1): 31-34.
YE H. Comprehensive Evaluation Index of Indoor Environmental Quality[J]. Building Energy & Environment, 2000(1): 31-34.
- [2] MUJAN I, ANĐELKOVIĆ A S, MUNČAN V, *et al.* Influence of Indoor Environmental Quality on Human Health and Productivity: A Review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 217: 646-657.
- [3] 曾穗平, 田健, 曾坚. 低碳低热视角下的天津中心城区风热环境耦合优化方法[J]. 规划师, 2019, 35(9): 32-39.
ZENG S P, TIAN J, ZENG J. Wind-Heat Coupled Improvement Method from Low Carbon-Low Heat Perspectives, the Central District of Tianjin[J]. Planners, 2019, 35(9): 32-39.
- [4] 方小山, 胡静文. 湿热地区老年人夏季室外热舒适阈值研究[J]. 南方建筑, 2019(2): 5-12.
FANG X S, HU J W. Study of the Outdoor Thermal Comfort Threshold of Elderly People in Hot and Humid Regions in Summer[J]. South Architecture, 2019(2): 5-12.
- [5] KARJALAINEN S. Thermal Comfort and Gender: A Literature Review[J]. Indoor Air, 2012, 22(2): 96-109.
- [6] 翟永超, 李梦, 梁斌, 等. 空气流动对室内健康体育运动人体热舒适的影响及设计策略研究[J]. 西部人居环境学刊, 2019, 34(2): 29-35.
ZHAI Y C, LI M, LIANG B, *et al.* Low Energy Thermal Comfort with Air Movement in Sports Facilities[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2019, 34(2): 29-35.
- [7] KHOSHBAKHT M, GOU Z, LU Y, *et al.* Are Green Buildings More Satisfactory? A Review of Global Evidence[J]. Habitat International, 2018, 74: 57-65.
- [8] NAGANO K, HORIKOSHI T. New Comfort Index During Combined Conditions of Moderate Low Ambient Temperature and Traffic Noise[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(3): 287-294.
- [9] FANGER P O. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering[M]. New York: McGraw-Hill, 1972.
- [10] SHANG Y, LI B, BALDWIN A N, *et al.* Investigation of Indoor Air Quality in Shopping Malls During Summer in Western China Using Subjective Survey and Field Measurement[J]. Building and Environment, 2016, 108: 1-11.
- [11] GOU Z, PRASAD D, SIU-YU LAU S. Are Green Buildings More Satisfactory and Comfortable?[J]. Habitat International, 2013, 39: 156-161.
- [12] 王子涵, 曹彬, 林波荣, 等. 北京某既有住区建筑环境实测与老年住户居住舒适性评价研究[J]. 西部人居环境学刊, 2019, 34(5): 92-99.
WANG Z H, CAO B, LIN B R, *et al.* Studies on Building Environment and Residential Comfort Evaluation of Elderly Residents in an Existing Residential District in Beijing[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2019, 34(5): 92-99.
- [13] RICCIARDI P, BURATTI C. Environmental Quality of University Classrooms: Subjective and Objective Evaluation of the Thermal, Acoustic, and Lighting Comfort Conditions[J]. Building and Environment, 2018, 127: 23-36.
- [14] MATSUDA-NAKAMURA M, YASUHARA S, NAGASHIMA K. Effect of Menstrual Cycle on Thermal Perception and Autonomic Thermoregulatory Responses During Mild Cold Exposure[J]. The Journal of Physiological Sciences, 2015, 65: 339-347.
- [15] YAO Y, LIAN Z, LIU W, *et al.* Heart Rate Variation and Electroencephalograph: The Potential Physiological Factors for Thermal Comfort Study[J]. Indoor Air, 2009, 19(2): 93-101.
- [16] XIONG J, ZHOU X, LIAN Z, *et al.* Thermal Perception and Skin Temperature in Different Transient Thermal Environments in Summer[J]. Energy and Buildings, 2016, 128: 155-163.
- [17] 张璐. 热声复合因素对人体舒适度的影响探究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2016.
ZHANG L. Study on the Effect of Thermal and Acoustic on Human Comfort[D]. Qingdao: Qingdao

- University of Technology, 2016.
- [18] KWON M, REMØY H, VAN DEN BOGAARD M. Influential Design Factors on Occupant Satisfaction with Indoor Environment in Workplaces[J]. *Building and Environment*, 2019, 157: 356-365.
- [19] GUNAY H B, SHEN W, NEWSHAM G, *et al.* Modelling and Analysis of Unsolicited Temperature Setpoint Change Requests in Office Buildings[J]. *Building and Environment*, 2018, 133: 203-212.
- [20] BERQUIST J, OUF M M, O'BRIEN W. A Method to Conduct Longitudinal Studies on Indoor Environmental Quality and Perceived Occupant Comfort[J]. *Building and Environment*, 2019, 150: 88-98.
- [21] HUANG L, ZHU Y, OUWANG Q, *et al.* A Study on the Effects of Thermal, Luminous, and Acoustic Environments on Indoor Environmental Comfort in Offices[J]. *Building and Environment*, 2012, 49: 304-309.
- [22] MELIKOV A K, KACZMARCZYK J. Air Movement and Perceived Air Quality[J]. *Building and Environment*, 2012, 47: 400-409.
- [23] LIN C C. Effect of Noise Intensity and Illumination Intensity on Visual Performance[J]. *Perceptual and Motor Skills*, 2014, 119: 441-454.
- [24] 陈晗. 噪声环境下乐音对人体舒适度及工作效率影响的研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- CHEN H. Study on the Effects of Music on Human Comfort and Work Efficiency Under Noisy Environment[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [25] YANG W, MOON H J. Combined Effects of Acoustic, Thermal, and Illumination Conditions on the Comfort of Discrete Senses and Overall Indoor Environment[J]. *Building and Environment*, 2019, 148: 623-633.
- [26] TANG H, DING Y, SINGER B. Interactions and Comprehensive Effect of Indoor Environmental Quality Factors on Occupant Satisfaction[J/OL]. *Building and Environment*, 2020, 167: 106462. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106462>.
- [27] TORRESIN S, PERNIGOTTO G, CAPPELLETTI F, *et al.* Combined Effects of Environmental Factors on Human Perception and Objective Performance: A Review of Experimental Laboratory Works[J]. *Indoor Air*, 2018, 28(4): 525-538.
- [28] HALDI F, ROBINSON D. On the Unification of Thermal Perception and Adaptive Actions[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(11): 2440-2457.
- [29] BAKKER L G, HOES-VAN OEFFELEN E C M, LOONEN R C G M, *et al.* User Satisfaction and Interaction with Automated Dynamic Facades: A Pilot Study[J]. *Building and Environment*, 2014, 78: 44-52.
- [30] SADEGHI S A, KARAVA P, KONSTANTZOS I, *et al.* Occupant Interactions with Shading and Lighting Systems Using Different Control Interfaces: A Pilot Field Study[J]. *Building and Environment*, 2016, 97: 177-195.
- [31] WINZEN J, ALBERS F, MARGGRAF-MICHEEL C. The Influence of Coloured Light in the Aircraft Cabin on Passenger Thermal Comfort[J]. *Lighting Research & Technology*, 2014, 46: 465-475.
- [32] HONG E, CHO J, CHUN J. Utility Value-Based User's Preference Evaluation to Select Design Alternatives for Customized Apartment Housing Remodeling[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2018, 17(2): 361-368.
- [33] KIM J, DE DEAR R. Nonlinear Relationships Between Individual IEQ Factors and Overall Workspace Satisfaction[J]. *Building and Environment*, 2012, 49: 33-40.
- [34] PELLERIN N, CANDAS V. Combined Effects of Temperature and Noise on Human Discomfort[J]. *Physiology & Behavior*, 2003, 78(1): 99-106.
- [35] LIANG H, CHEN C, HWANG R, *et al.* Satisfaction of Occupants Toward Indoor Environment Quality of Certified Green Office Buildings in Taiwan[J]. *Building and Environment*, 2014, 72: 232-242.
- [36] ALTOMONTE S, SCHIAVON S. Occupant Satisfaction in LEED and Non-LEED Certified Buildings[J]. *Building and Environment*, 2013, 68: 66-76.
- [37] ASTOLFI A, PELLERREY F. Subjective and Objective Assessment of Acoustical and Overall Environmental Quality in Secondary School Classrooms[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, 123(1): 163-173.
- [38] CAO B, OUYANG Q, ZHU Y, *et al.* Development of A Multivariate Regression Model for Overall Satisfaction in Public Buildings Based on Field Studies in Beijing and Shanghai[J]. *Building and Environment*, 2012, 47: 394-399.
- [39] HUMPHREYS M A. Quantifying Occupant Comfort: Are Combined Indices of the Indoor Environment Practicable?[J]. *Building Research & Information*, 2005, 33(4): 317-325.
- [40] NCUBE M, RIFFAT S. Developing An Indoor Environment Quality Tool for Assessment of Mechanically Ventilated Office Buildings in the UK: A Preliminary Study[J]. *Building and Environment*, 2012, 53: 26-33.
- [41] MAIER J, MARGGRAF-MICHEEL C. Weighting of Climate Parameters for the Prediction of Thermal Comfort in an Aircraft Passenger Cabin[J]. *Building and Environment*, 2015, 84: 214-220.

- [42] WONG L T, MUI K W, HUI P S. A Multivariate-Logistic Model for Acceptance of Indoor Environmental Quality (IEQ) in Offices[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 1-6.
- [43] 赵坤. 新建办公建筑室内空气品质、热环境对人体舒适度影响探究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- ZHAO K. The Influence of IAQ, Thermal Environment on Human Comfort in Newly Built Offices[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [44] LAI A C K, MUI K W, WONG L T, *et al.* An Evaluation Model for Indoor Environmental Quality (IEQ) Acceptance in Residential Buildings[J]. *Energy and Buildings*, 2009, 41(9): 930-936.
- [45] FRANCESCO F, FANCHIOTTI A, VOLLARO R. Linear, Non-Linear and Alternative Algorithms in the Correlation of IEQ Factors with Global Comfort: A Case Study[J]. *Sustainability*, 2014, 6(11): 8113-8127.
- [46] Interactions Affecting the Achievement of Acceptable Indoor Environments. ASHRAE GUIDELINE 10-2016[S]. Atlanta: American Society of Heating, 2016.
- [47] TOFTUM J. Human Response to Combined Indoor Environment Exposures[J]. *Energy & Buildings*, 2002, 34(6): 601-606.
- [48] AL HERR Y, ARIF M, KAUSHIK A, *et al.* Occupant Productivity and Office Indoor Environment Quality: A Review of the Literature[J]. *Building and Environment*, 2016, 105: 369-389.
- [49] LAN L, WARGOCKI P, WYON D P, *et al.* Effects of Thermal Discomfort in An Office on Perceived Air Quality, SBS Symptoms, Physiological Responses, and Human Performance[J]. *Indoor Air*, 2011, 21(5): 376-390.
- [50] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017[S]. Atlanta: American Society of Heating, 2017.
- [51] KIM H, TOKURA H. Influence of Two Different Light Intensities from 16:00 to 20:30 Hours on Evening Dressing Behavior in the Cold[J]. *Collegium Antropologicum*, 2007, 31(1): 145-151.
- [52] YANG W, MOON H J. Cross-Modal Effects of Illuminance and Room Temperature on Indoor Environmental Perception[J]. *Building and Environment*, 2018, 146: 280-288.
- [53] ISHII J, HORIKOSHI T. The Combined Effect of Air Temperature and Illuminance on the Human Physiological and Psychological Responses[J]. *Archives of Complex Environmental Studies*, 1995: 1-8.
- [54] ANDARGIE M S, AZAR E. An Applied Framework to Evaluate the Impact of Indoor Office Environmental Factors on Occupants' Comfort and Working Conditions[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 46: 101447.
- [55] BLUYSSSEN P M, ARIES M, VAN DOMMELEN P. Comfort of Workers in Office Buildings: The European Hope Project[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(1): 280-288.
- [56] CLAUSEN G, WYON D P. The Combined Effects of Many Different Indoor Environmental Factors on Acceptability and Office Work Performance[J]. *HVAC& Research*, 2008, 14(1): 103-113.
- [57] KIM J, DE DEAR R. Impact of Different Building Ventilation Modes on Occupant Expectations of the Main IEQ Factors[J]. *Building and Environment*, 2012, 57: 184-193.
- [58] GENG Y, YU J, LIN B, *et al.* Impact of Individual IEQ Factors on Passengers' Overall Satisfaction in Chinese Airport Terminals[J]. *Building and Environment*, 2017, 112: 241-249.
- [59] BURATTI C, BELLONI E, MERLI F, *et al.* A New Index Combining Thermal, Acoustic, and Visual Comfort of Moderate Environments in Temperate Climates[J]. *Building and Environment*, 2018, 139: 27-37.
- [60] HUEBNER G M, SHIPWORTH D T, GAUTHIER S, *et al.* Saving Energy with Light? Experimental Studies Assessing the Impact of Colour Temperature on Thermal Comfort[J]. *Energy Research & Social Science*, 2016, 15: 45-57.
- [61] ANDREAS LIEBL, JÖRG HALLER, BERND JÖDICK, *et al.* Combined Effects of Acoustic and Visual Distraction on Cognitive Performance and Well-Being[J]. *Applied Ergonomics*, 2012, 43: 424-434.

图表来源:

图1: NAGANO K, HORIKOSHI T. New Comfort Index During Combined Conditions of Moderate Low Ambient Temperature and Traffic Noise[J]. *Energy and Buildings*, 2005, 37(3): 287-294.

图2、5: 作者绘制

图3: KIM J, DE DEAR R. Nonlinear Relationships Between Individual IEQ Factors and Overall Workspace Satisfaction[J]. *Building and Environment*, 2012, 49: 33-40.

图4: HUANG L, ZHU Y, OUWANG Q, *et al.* A Study on the Effects of Thermal, Luminous, and Acoustic Environments on Indoor Environmental Comfort in Offices[J]. *Building and Environment*, 2012, 49: 304-309.

表1-2、4: 作者绘制

表3: Interactions Affecting the Achievement of Acceptable Indoor Environments. ASHRAE GUIDELINE 10-2016[S]. Atlanta: American Society of Heating, 2016.

收稿日期: 2020-02-01

(编辑: 苏小亨)