空气湿度对人员可接受热环境的影响及评价

杜晨秋, 李百战*, 刘红, 李超

重庆大学绿色建筑与人居环境营造国际合作联合实验室, 重庆 400045

* 联系人, E-mail: baizhanli@cqu.edu.cn

2019-08-30 收稿, 2019-09-29 修回, 2019-10-08 接受, 2019-12-13 网络版发表

国家自然科学基金(51908079)和国家重点研发计划(2016YFC0700300, 2017YFC0702704)资助

摘要 室内温湿度对人员舒适健康有着显著影响, 尤其在偏热和偏冷环境下. 如何评价较大空气湿度范围内温湿度耦合作用及其影响尚缺乏系统认识. 我们在人工气候室分别开展了冬夏季涵盖偏冷到偏热(16~32°C)、低湿到高湿(15%~85%)共40个工况的人体热舒适实验, 累计800余人次. 结果显示, 相对湿度对人员热舒适的影响随温度升高逐渐显著(夏季32°C/冬季28°C), 湿感觉随相对湿度增加而显著增加; 低温下空气绝对含湿量低, 人体各部位刺激感比例随相对湿度降低而增加; 低温下人员感知空气品质随暴露时间增加而降低, 高温下人员适应性提高了人员对空气品质感知. 研究计算了不同工况下人体呼吸总热损失, 并建立其与人员热感觉(thermal sensation vote, TSV)和可感知空气品质(air quality vote, AQV)的关系: 随着呼吸总损失增加, 人员热感觉线性降低(回归系数: -0.66), 感知空气品质升高(回归系数: 0.2). 基于TSV $\in$ (-0.5, +0.5)和TSV $\in$ (-0.75, +0.75), 得到了冬夏季满足90%和80%人员满意率的标准有效温度(standard effective temperature, SET)上下限值, 和等SET条件下温度-相对湿度(30%~70%)舒适区间, 且大于国际标准ASHRAE 55推荐的温度区间. 研究量化了空气湿度对人员热感觉的影响, 揭示了低湿和高湿通过影响皮肤表面散热和呼吸蒸发热损失影响人员可接受温度区间, 研究结果可为提出合理室内空气湿度设计参数、保障室内热环境舒适健康营造提供一定参考.

关键词 空气温度, 相对湿度, 热舒适, 空气品质, 温湿度区间

空气湿度作为热环境设计和评价的重要物理参数, 由于不同于温度感知, 至今尚未有研究发现人体存在特定的响应湿度信号的感受器来感受湿度刺激并引起调节响应^[1]. 因此, 关于湿度对人体舒适健康的影响机理, 以及适宜的热环境设计, 一直是建筑环境领域学者的研究热点.

大量研究已经证实, 中性热环境下空气湿度对人体热舒适影响较小, 加上适应后的人员对湿度不敏感^[2], 因而较大温度范围内湿度对人体热舒适的影响可以忽略^[3,4]. 但当环境温度升高, 或者人体代谢加强时^[5], 高湿度会抑制人体出汗, 减小蒸发热损失, 从而

增加人体热感觉, 降低可接受的温度上限^[6,7], 且湿度越高, 可接受温度的带宽越窄^[8]. 更重要的是, 随着建筑围护结构性能提高、密闭性增加以及通风率降低, 较高的空气湿度还会引起普遍的建筑室内潮湿问题^[9], 诱发一系列的潜在危险因素, 包括增加建筑墙体或材料表面潮湿程度、促进室内尘螨和霉菌等微生物生长、诱发室内装修材料中各种化学污染物挥发等, 影响室内空气品质, 使人群呼吸系统相关疾病患病风险增加^[10]. 一些在欧洲、北美、亚洲等地区开展的大样本横断面调研结果显示^[11-15], 室内潮湿及其表征(霉点湿点、窗户凝水、水损、发霉气味等)与儿童哮喘、鼻

引用格式: 杜晨秋, 李百战, 刘红, 等. 空气湿度对人员可接受热环境的影响及评价. 科学通报, 2020, 65: 311-324

Du C Q, Li B Z, Liu H, et al. Effect of air humidity on human acceptable thermal environments and evaluation (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 311-324, doi: [10.1360/TB-2019-0461](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0461)

炎及过敏性症状(喘息、喉咙痛、流鼻涕)之间有着显著的相关性,是儿童哮喘、鼻炎等症状出现的显著危险因素,更进一步反映了高空气湿度对人员舒适健康的影响。

Wei等人^[16]分析了评价室内空气品质的6个关键指标,指出相对湿度是影响室内空气品质的关键因素。空气湿度的变化会直接影响呼吸道吸入空气的冷却效率^[17],低温低湿的空气会增加呼吸道和外界的对流换热和蒸发换热,而高温湿度情况下人体的呼吸黏膜冷却效果降低,人员可感知室内空气品质下降。Fang等人^[18,19]通过实验发现,温度不变、湿度增加和湿度不变、温度增加条件下,人员的感知空气品质不满意率均显著增加。相反,干燥的空气会影响人体黏膜的生理特性,较低的空气水分含量会加速泪液蒸发速度,尤其是人体角膜前泪液膜^[20],造成人员眨眼频率降低,引起眼部不适等症状。Fanger^[21]曾指出,短期暴露情况下人员对干冷空气的可接受空气品质更好,但长期暴露情况下,相对湿度大于40%比低于30%的环境对眼睛和上呼吸道更好^[22]。

但是,相对湿度对人体舒适健康的影响与温度存在耦合关系。Nevins等人^[23]通过偏冷-中性-偏热环境中热舒适实验,发现相对湿度降低10%,温度可相应增加0.3℃。从人体热平衡的角度来看,除了极端条件,湿度对人体整体热损失的影响较小,人员的热感觉、皮肤温度等基本不受湿度影响^[24,25],因此空调系统可以在较大的湿度范围内考虑温度设置而不考虑湿度作用。早期的美国标准ASHRAE 55给出的夏季湿球温度不高于20℃、冬季不高于18℃,参考的是保证人体皮肤表面的湿润度维持在0.2左右,但这一结果并没有科学的实验研究背景^[26]。现行最新版ASHRAE 55 2017^[27]给出的湿度上限0.012 kg/kg考虑的也是湿度增加可能引起墙面结露、材料腐蚀,以及尘螨、真菌和其他微生物生长的风险增加,而不是湿度对热舒适影响。国际标准ISO7730-2005^[28]也并未对湿度做出规定,而是认为相对湿度每增加10%,等价于空气温度升高0.3℃。其他一些关于热舒适和建筑节能的相关标准,如美国ASHRAE 62.1^[29]、欧洲EN15251^[30]、中国健康建筑评价标准T/ASC 02-2016^[31]等,出于通风、节能等考虑,对湿度设计也给出了一定的参考范围,但其适用性还有待进一步研究。

综上,一般热环境范围内空气湿度的作用并不明显,因此对于适宜的温湿度范围,研究并未得出一致的

结果^[32]。大量关于湿度对空气品质影响的研究表明,要营造一个舒适健康的人居环境,其温湿度设计不仅需要基于人员的热舒适评价,也应考虑湿度耦合温度对人员感知空气品质和健康的影响。而室内热环境设计要实现这一目的,应首先明晰温湿度的相互作用对人员热舒适的影响,并基于人员评价和可接受的合理温湿度区间,才能实现合理地调节室内温湿度和空调系统的节能运行。基于此,本研究利用人工气候室在冬夏季营造较大范围内的湿度变化,开展不同温湿度水平下人员热舒适评价的基础研究,旨在全面认识人员在低湿到高湿较大范围内的主观热反应评价,揭示湿度与温度的耦合作用,提出综合考虑人员热感觉和感知空气品质的适宜的温湿度区间,以期更全面地评价空气湿度对室内温度设计和调控的影响,为室内热环境的舒适健康营造及建筑节能提供一定基础参考和支撑。

1 研究方法

1.1 实验平台

实验在重庆大学人工气候室(尺寸4 m(长)×3 m(宽)×3 m(高))开展。气候室采用内围护结构,可精确控制室内热环境参数:干球温度控制范围-5~40℃,精度±0.3℃(10℃以下,±0.5℃);相对湿度(relative humidity, RH)控制范围10%~90%,精度±5%。其中,气候室低湿环境由转轮除湿机控制,相对湿度控制范围为0~100%,控制精度±2%。实验中,气候室空气经处理后由顶部孔板送入室内,通过底部孔板回风,整个工作区气流均匀,且控制工作区风速≤0.1 m/s,近似静风环境。需要说明的是,由于人工气候的室外环境为房间的室内环境,且采用双层结构设计,围护结构采用双面涂塑钢板和100 mm聚氨酯发泡填充,不受室外环境变化和太阳辐射的影响。另有一控制室与气候室相邻,通过变频空调控制维持中性热环境,实验中做准备室用。人工气候室内外环境和实验现场测试示意如图1。

1.2 受试者

本实验采用自愿方式招募受试者。受试者均为重庆大学在校学生,每一季度实验男女受试者各招募10名,减小性别差异影响。要求受试者在重庆居住1年以上,身体状况良好,且实验前1天禁止剧烈运动或饮酒等。受试者基本信息见表1。实验时受试者服装由实验

图1 (网络版彩色)人工气候室和实验示意图。(a)气候室外;(b)气候室内;(c,d)现场实验

Figure 1 (Color online) Artificial climate chamber and experiment. (a) Outside of climate chamber; (b) inside of climate chamber; (c, d) on-site tests

表1 受试者基本信息参数(平均值±标准差)

Table 1 Detailed information of subjects (mean±SD)

季节	性别	人数	年龄(岁)	身高(cm)	体重(kg)
夏季	男	10	22.8±1.5	172.6±4.5	70.3±9.3
	女	10	23.1±1.0	161.0±4.9	49.6±4.5
总计		20	23.0±1.2	166.8±4.7	59.9±7.5
冬季	男	10	22.2±1.0	176.0±4.7	65.6±8.5
	女	10	22.0±0.7	161.3±6.7	49.5±6.5
总计		20	22.1±0.1	168.5±7.4	57.6±8.0

人员统一提供,夏季为棉质短袖+薄长裤+薄棉袜+休闲鞋,整体服装热阻约0.4 clo(1 clo=0.155 m² °C/W)^[27],冬季为棉质秋衣+毛衣+棉服(外套)+棉质秋裤+厚外裤+运动鞋,整体服装热阻约1.2 clo.

1.3 工况设计

实验主要研究不同湿度水平对人员热反应的影响,而湿度和温度的耦合作用不能忽略^[25].因此,结合重庆地区全年室内温度波动范围,实验分别选择在冬季和夏季开展,均对应设计了偏凉、中性、偏暖、热4种温度水平,每一温度工况对应低湿到高湿5种相对湿度水平,共40个实验工况,具体见表2.为避免受试者个体差异对实验结果的影响,实验均采用被试内设计,要求冬

季招募的20名受试者参加冬季的所有20个工况实验,夏季招募的20名受试者参加夏季的所有20个工况实验(表2).冬夏季实验最终累计开展800人次,可确保实验结果的有效性和数据可信度.

Gagge等人^[33]基于二节点模型,提出了包含空气温度、相对湿度、风速、辐射温度等热环境参数以及服装热阻和活动水平的综合热舒适指标——标准有效温度(standard effective temperature, SET),即相对湿度为50%的假想等温环境下,人体着装对应活动水平的标准服装时,与真实环境有相同的皮肤温度和皮肤湿润率,则该环境温度即为标准有效温度^[27].表2同时给出了相应设计工况计算得到的SET值.可以看出,SET随温度的增加迅速增加,同一温度下随相对湿度增加而增加,

表 2 冬夏季实验工况^{a)}

Table 2 Experimental conditions in summer and winter

夏季设计工况					冬季设计工况				
温度(°C)	RH(%)	风速	服装热阻	SET(°C)	温度(°C)	RH(%)	风速	服装热阻	SET(°C)
23	15	≤0.1 m/s	0.4 clo	20.7	16	15	≤0.1 m/s	1.2 clo	20.8
	30			20.9		30			20.9
	50			21.1		50			21.1
	70			21.4		70			21.2
	85			21.6		85			21.3
26	15			23.9	20	15			24.2
	30			24.0		30			24.4
	50			24.4		50			24.7
	70			24.9		70			25.2
	85			25.5		85			25.6
29	15			26.4	24	15			27.2
	30			26.8		30			27.7
	50			27.7		50			28.5
	70			29.0		70			29.4
	85			30.5		85			30.4
32	15			28.8	28	15			30.0
	30			29.6		30			30.8
	50			31.1		50			32.1
	70			33.4		70			33.8
	85			36.1		85			35.4

a) 由于气候室内采用围护结构, 且实验提前1 h将气候室环境调至实验设计工况, 因此假定气候室内壁面温度近似等于空气温度, 下述分析中不考虑辐射影响. 计算SET时, 假定气候室中平均辐射温度等于空气温度, 人体活动水平为静坐, 代谢率为1.1 met(1 met=58.2 W/m²)^[27], 计算工具见<http://comfort.cbe.berkeley.edu/>

且湿度越大, 增加越显著, 表明SET可以较好地表征温湿度综合作用, 可用于后续不同实验工况下热舒适分析和综合评价指标.

1.4 问卷

本实验问卷设置分为两部分. 其中, 问卷背景信息包括受试者性别、年龄、身高、在重庆居住时间、平时所处环境等, 问卷主观调查主要包括受试者的热感觉、湿度感觉、热舒适、湿度刺激感、出汗、可感空气品质、环境期望、环境可接受度等, 参考ASHRAE 55主观测量的标尺设置^[27]. 考虑到本文重点研究湿度对人员湿度舒适性及可感空气品质的影响, 表3给出了本文涉及的主观评价指标及标尺设置. 由于人员整体

和局部对温湿度的反应不同, 问卷针对不同问题同时设置了不同部位的整体和局部主观评价问题.

1.5 实验流程

为减小室外气候对人员热经历的影响, 实验分别在重庆典型冬季(12~1月)和夏季(7~8月)开展. 由于每一季节实验工况较多, 为避免受试者参与实验的疲劳效应^[34], 采用拉丁方设计确定所有受试者参加20个工况实验的顺序. 实验前由测试人员提前1 h将气候室热环境参数调至设计工况(表2), 确保气候室内热环境的均一稳定. 要求受试者提前30 min到达气候室, 随后在准备室更换服装, 并静坐一段时间, 以消除室外环境和自身代谢影响. 期间由测试人员向受试者详细讲解问

表3 问卷主观评价指标及标尺

Table 3 Subjective indices and scales in questionnaire

标尺	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
热感觉 ^{a)}	冷	凉	稍凉	中性	稍暖	暖	热
湿感觉 ^{a)}	非常干燥	干燥	稍干燥	中性	稍湿润	湿润	非常湿润
感知空气品质	非常差	差	稍差	中性	还可以	好	非常好
空气新鲜度	非常沉闷	沉闷	稍沉闷	中性	稍感清新	清新	非常清新
身体刺激感 ^{b)}				无刺激	有刺激,但不明显	有明显刺激	强烈刺激
温度/湿度/空气品质可接受度			完全不可接受	+0刚好可接受 -0刚好不可接受	完全可接受		

a) 本研究主要分析整体热感觉和整体湿感觉,不考虑局部; b) 本研究主要考虑空气温湿度对人体眼睛、鼻子、喉咙3个部位造成的刺激感。

卷内容和实验流程,并告知一些实验注意事项,受试者如有不适可随时终止实验。

冬夏季正式实验均为90 min。每次实验由两名受试者参加,实验在受试者进入气候室静坐后正式开始。要求受试者前30 min每10 min重复填写一次问卷,后60 min每15 min重复填写一次问卷。实验期间,受试者可以进行阅读、打字、听音乐等轻度活动,避免大声说笑、走动等剧烈活动。同时,采用德国美翠热舒适仪(MI 6401, METREL)对室内的空气温度、相对湿度、黑球温度、空气流速等物理参数进行测量(空气温度: -20~60℃,精度±0.20℃;相对湿度: 0~100%,精度±2%),确保气候室的温度和相对湿度波动较小,满足设计工况的要求。测试期间,将仪器放置在距离受试者0.5 m位置,探头距离地面高度0.6 m,采样频率5 min。实验结束后,将连续测试数据导出到Excel保存。

1.6 统计分析

本文分析数据均为每个工况下20名受试者问卷投票的均值。首先,通过重复测量方差分析确定受试者在每个工况下主观投票稳定时间。结果显示,稳态环境下受试者的主观感觉投票均在30 min内达到稳定。因此,分析时采用每个工况下60~90 min内20名受试者3次投票的平均值作为该稳态工况下受试者投票均值(平均值±标准差)。采用二维组间方差分析(two-way ANOVA)分析不同温湿度水平下各主观测量指标的差异性,采用单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)分析同一温度水平下各相对湿度水平引起的主观投票的差异。采用一元、二元线性回归和非线性回归对主观感觉变量和温湿度等的相关关系进行回归分析。所有统计检验的显著性水平均取 $\alpha \leq 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 热反应

2.1.1 湿感觉

图2给出了冬夏季各个工况下20名受试者的稳态湿感觉投票分布箱体图。可以看出,冬夏季受试者的湿感觉投票值在偏凉、中性、偏暖环境下近似,均值均在0上下,不同于热环境下投票值。二维组间方差分析结果显示,冬夏季不同温度水平下受试者湿感觉投票有显著差异($P < 0.05$),不同湿度水平下投票值也有显著性差异($P < 0.05$)。进一步采用单因素方差分析对同一温度水平下不同湿度影响进行分析,图2(a)显示夏季温度为23和26℃时,各湿度水平下湿感觉无显著差异($P > 0.05$),而29℃时只有15%和85%相对湿度水平有显著性差异($P < 0.05$)。这可能是由于这些工况接近中性热环境,湿度对人员主观感觉的影响不显著。相比,当温度升高到32℃时,5种湿度水平之间具有显著性差异($P < 0.05$),人员的湿感觉随着相对湿度的增加而显著升高,这与其他一些学者的研究结果相似^[5-7,23,25-26],在32℃/85%RH工况下,人员的湿感觉甚至达1.5。冬季不同工况下受试者湿感觉变化趋势与夏季近似,28℃时不同湿度水平下湿感觉存在显著差异($P < 0.05$)。这一结果表明,人们对相对湿度变化的可接受度要远高于对温度变化的接受度,中性及偏冷环境下较大的湿度变化对人员湿感觉的影响不大,但偏热环境下人员对湿度变化较敏感。

2.1.2 感知身体刺激感

空气湿度不仅会影响人员角膜前泪腺膜水分蒸发,引起眼睛刺激,同时会影响空气焓值,引起人体呼吸道对流和蒸发散热变化,对鼻子、喉咙等产生刺激^[17,19]。

图2 (网络版彩色)不同工况下受试者稳态湿感. (a) 夏季; (b) 冬季

Figure 2 (Color online) Mean humidity sensation of subjects under different conditions. (a) Summer; (b) winter

统计冬夏季不同工况下, 实验过程中受试者对身体各部位刺激感(眼睛、鼻子、喉咙)投票非0值(即表3中身体刺激感投票为1, 2, 3)的投票数占总投票数的百分比, 如图3所示. 为便于反映温湿度综合影响, 图3以SET为横坐标, 4段折线分别表示冬夏季每一温度下相对湿度从15%逐渐增加到85%引起的SET值的增加.

可以看出, 不同温度水平下, 受试者身体各部位刺

激感随湿度增加呈现不同的变化趋势. 图3(a)显示, 在16°C/15%RH工况下, 受试者感受到眼睛、鼻子、喉咙的刺激感比例都最大, 分别为37%, 48%, 23%. 随着SET值增大(湿度逐渐增加), 投票刺激感比例逐渐减小, 相对湿度为85%时达到最低, 表明受试者在16°C/85%RH时感受到环境的刺激感最小. 这可能是因为低温环境下本身空气含湿量较低, 低相对湿度下空气含湿量

图3 (网络版彩色)冬夏季不同工况对受试者身体刺激感投票比例. (a) 冬季; (b) 夏季

Figure 3 (Color online) Stimuli sensation vote proportion of subjects under winter and summer conditions. (a) Winter; (b) summer

更低,因而较多受试者感受到空气干燥带来的刺激感,尤其是鼻子,刺激感比例最大(48%)。相比之下,当空气温度为20, 24和28°C时,受试者刺激感投票比例呈先降低后增加的U型趋势。例如, 28°C/15%相对湿度下各部位刺激感比例分别为15%, 40%和25%,而当湿度增加到50%时,其比例降低至最低,分别为20%, 30%和0%。随着湿度继续增加,其刺激感比例又逐渐增加,到85%时比例最大,达35%, 40%和32%。这可能是由于偏热环境下高湿度抑制了人体黏膜水分蒸发和呼吸散热,受试者感到刺激的比例增加。图3(b)显示,夏季受试者身体各部位感知到的刺激感比例整体低于冬季。这可能是由于夏季温度增加,即使相对湿度水平与冬季一样,空气中绝对含湿量增加,对人员皮肤和呼吸道黏膜表面的水分蒸发影响较小,人员感到刺激感的比例较低。在23和26°C时,受试者刺激感投票比例随着相对湿度的增加变化不大,且在中性湿度50%RH, 70%RH下比例有一定波动。温度为29和32°C时,其比例也呈近似U型变化,但相比图3(a)不十分显著,表明高湿和低湿一定程度上会刺激人体,引起局部不适,但与环境温度存在耦合作用。

2.1.3 空气品质可接受度

已有大量研究表明^[16,35,36],空气湿度会引起人员眼睛不适、感官刺激、呼吸不适,以及室内潮湿、霉菌、污染物挥发等环境问题,显著影响人员可感知空

气品质。但由于人员感知有一定的适应性,随着暴露时间的延长,人员对湿度引起的空气品质感知的敏感性也会逐渐下降。图4对比了冬夏季不同工况下20名受试者在暴露初始时刻(0 min)和结束时刻(90 min)的空气品质可接受度的投票均值。可以看出,不同季节和温湿度工况下,受试者对空气品质的可接受度随暴露时间变化。当相对湿度为15%时,不论是冬季还是夏季温度工况,受试者对空气品质可接受度在实验初始阶段较高,而在暴露结束时明显降低,表明长时间暴露在极低湿度环境下,人员的可感空气品质会降低。这一现象在冬季更明显,即使相对湿度增加到30%和50%,受试者对空气品质可接受度投票在实验结束时均不同程度地降低。在夏季时,除了15%RH,其余湿度水平下受试者在暴露结束时可感空气品质均显著提高。分析其原因,可能是由于人员长时间暴露后产生了一定适应性^[2],降低了对湿度感知的敏感性,因此对空气品质的可接受度提高。

2.2 热环境评价

2.2.1 热感觉及空气新鲜度随呼吸热损失变化

空气湿度一方面会通过影响人体皮肤表面的水分蒸发而影响散热,另一方面也会通过影响呼吸道换热间接影响人体对热环境和空气品质的感知。低温低湿的空气会增大人体呼吸系统的对流和蒸发冷却换热量,

图4 (网络版彩色)不同工况下受试者空气品质可接受度随时间变化。(a)冬季;(b)夏季

Figure 4 (Color online) Air quality acceptability of subjects changes with time under different conditions. (a) Winter; (b) summer

而高温高湿的空气则会抑制呼吸道散热. 这里参考ASHRAE Handbook^[37]中人体呼吸道换热计算公式(式(1)和(2)), 计算不同工况下受试者呼吸对流和蒸发换热量.

$$C_{\text{res}} = 0.0014M(34 - t_a), \quad (1)$$

$$E_{\text{res}} = 0.0173M(5.87 - P_a), \quad (2)$$

式中, C_{res} 为呼吸对流热损失, W/m^2 ; E_{res} 为呼吸蒸发热损失, W/m^2 ; M 为代谢率, 本文假定代谢率为1.1 met(静坐活动), 折合65 W/m^2 ; t_a 为环境温度, $^{\circ}\text{C}$; P_a 为空气水蒸气分压力, kPa .

通过式(1)和(2), 可以得到冬夏季不同工况下受试者总的呼吸热损失 $Q_{\text{res}}(Q_{\text{res}}=C_{\text{res}}+E_{\text{res}})$. 图5给出了稳态环境下受试者热感觉投票(thermal sensation vote, TSV)和空气新鲜感投票(air freshness vote, AFV)随呼吸总热损失(Q_{res})的变化. 从图5(a)可以看出, 不论是冬季还是夏季, 受试者的热感觉均随呼吸总热损失的增加而降低, 两者呈显著的线性负相关($R^2=0.77$). 相比之下, 图5(b)中人员的感知空气新鲜度随呼吸总热损失的增加而提高, 两者呈显著正相关($R^2=0.68$). 对图5中的数据点进行线性拟合, 可以得到人员的呼吸总热损失每增加1 W/m^2 , 热感觉显著降低0.66个刻度, 而感知空气新鲜度提高0.22个刻度. 这可能是由于提高呼吸道热损失增加了呼吸道的冷却效应, 改善了人员对空气品质的感

知, 觉得空气更新鲜.

2.2.2 热感觉及感知空气品质随SET变化

图2~5分析表明, 环境的温湿度会显著影响人员的主观感觉评价, 且温湿度之间存在显著的耦合作用. 因此, 为了全面评价温湿度综合作用对人体热感觉和感知空气品质的影响, 图6给出了受试者稳态热感觉和感知空气品质随SET变化. 可以看出, 不同工况下受试者的热感觉和感知空气品质与SET之间存在显著的线性关系. 冬季环境下(图6(a)), 随着SET从20.8($16^{\circ}\text{C}/15\%\text{RH}$)增加到35.4($28^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}$), 热感觉也逐渐从-2.1增加到2.9. 同样地, 夏季环境下(图6(b)), 随着SET从20.7($23^{\circ}\text{C}/15\%\text{RH}$)增加到36.1($32^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}$), 热感觉也逐渐从-0.9增加到2.9, 进一步证实了SET指标与人员热感觉具有较好的线性关系^[6,25,38]. 相比之下, 人员感知空气品质随SET的变化小于人员热感觉随SET的变化. 冬季环境下随SET增加, 感知空气品质从0.5降低到-0.5, 而夏季从1.25降低到-1.1, 表明人员对温湿度变化引起的热感觉的敏感度大于室内空气品质.

式(3)~(6)分别给出了冬季和夏季环境下人员TSV, AQV随SET的线性回归模型. 不同模型的回归系数显示, 人员的TSV与SET正相关, 而AQV与SET负相关, 且模型系数的绝对值的大小进一步证实了TSV对SET变化的敏感度要大于AQV对SET变化的敏感度.

冬季:

图5 (网络版彩色)不同工况下热感觉和空气新鲜感随呼吸总热损失变化. (a) 热感觉; (b) 空气新鲜感
Figure 5 (Color online) Changes of TSV and AFV with Q_{res} under different conditions. (a) TSV; (b) AFV

图6 (网络版彩色)不同工况下热感觉和感知空气品质随SET变化. (a) 冬季; (b) 夏季
Figure 6 (Color online) Changes of TSV and AQV with SET under different conditions. (a) Winter; (b) summer

$$TSV = 0.31 SET - 8.08, \quad (R^2 = 0.94), \quad (3)$$

$$AQV = 0.12 SET + 3.6, \quad (R^2 = 0.84), \quad (4)$$

夏季:

$$TSV = 0.22 SET - 5.33, \quad (R^2 = 0.94), \quad (5)$$

$$AQV = 0.07 SET + 2.08, \quad (R^2 = 0.80). \quad (6)$$

2.2.3 温湿度耦合作用下舒适区间

虽然现有学者研究了相对湿度对人员热舒适的影响,但一般多关注夏季偏热环境^[2-8],且实验样本量有限,较少对较大温度和湿度范围内的舒适评价开展研究.本研究实验结果证实了冬夏季空气湿度耦合温度会对人体热舒适产生影响,在室内热环境设计时不能忽略.对暖通从业者来讲,他们更关注如何将湿度这一影响量化来指导室内温度设计.对于人工供冷供暖环境,国际标准ASHRAE 55^[27]以人员预测热感觉投票(predicted mean vote, PMV)∈(-0.5, +0.5)为限值,给出了90%人员可接受的温湿度舒适区间.图6给出了热感觉随SET变化的回归模型,在此基础上参考ASHRAE 55中舒适区间定义,以人员实际热感觉投票TSV∈(-0.5, +0.5)为参考,则可计算冬夏季满足热舒适要求的对应SET值.根据SET定义,等SET下不同热环境参数变化对应的人员热感觉相同^[33],因此可以计算在保证人员同样热舒适情况下不同温度对应的相对湿度变化.此外,考虑到一般建筑中人员对热环境的可接受度更

高,本文同时计算了满足80%人员满意率,即TSV∈(-0.75, +0.75)条件下对应的SET值.

基于实验得到的回归模型(式(3)和(5))和计算得到的SET值,同时参考实验设置,假定平均辐射温度等于空气温度,平均风速0.1 m/s,人员服装热阻夏季0.4 clo、冬季1.2 clo,代谢1.1 met,则可以得到在等SET条件下温度和湿度的耦合变化关系.结合室内热环境营造中空气相对湿度变化范围为30%~70%^[39],分别以冬夏季等SET值为约束条件,计算在等SET条件下不同温度水平对应的适宜的相对湿度范围,如图7所示.图7中不同形式阴影分别表示冬季和夏季80%和90%人员满意率对应的温度-相对湿度变化范围.图7同时标注了不同温湿度区间对应的等SET左右边界线.可以看出,冬季满足人员80%和90%舒适区间对应的SET值分别为24.2~27.5°C, 23.6~28.5°C,夏季对应的SET值分别为22~26.5°C, 20.8~27.6°C.此外,图7显示,随着相对湿度增加,在满足等SET条件下,人员可接受温度逐渐降低,冬季相对应的温度区间为18.6(70%)~23.4°C(30%),夏季为22.0(70%)~29.5°C(30%),量化了湿度耦合温度对人员热感觉的影响.

2.3 讨论

2.3.1 ASHRAE 55温湿度区间对比

将本研究得到的冬夏季温湿度区间与现有ASH-

图7 (网络版彩色)等SET条件下可接受的温度-相对湿度区间

Figure 7 (Color online) Acceptable temperature-relative humidity range with equivalent SET values

RAE 55标准给出的冬夏季舒适温度范围(冬季: 20~24°C(服装热阻1.0 clo), 夏季: 23.5~27°C(服装热阻0.5 clo))进行比较, 本研究得到的人员舒适温度上下限要高于ASHRAE 55标准推荐值. 分析其原因, 一方面, 由于本实验计算的舒适区间的人员服装热阻和ASHRAE 55中给定的冬夏季标准服装热阻有一定差异, 实验中冬季服装热阻偏高, 起到保温作用, 夏季服装热阻偏低, 促进人体散热, 因而获得的人员舒适温度上下限范围更广. 另一方面, 本实验基于中国人群, 而ASHRAE 55标准基于欧美人群, 不同地区人群的热适应性也可能引起舒适区间的差异. 由于重庆全年高湿气候特点, 实验中受试者对高湿度有一定的适应性, 拓宽了可接受温度范围^[40]. 此外, ASHRAE 55新版标准并没有给定相对湿度下限, 而相对湿度上限则考虑含湿量不高于12 g/kg^[27], 这一限值并不方便实际建筑中室内空气温度和湿度的协调调控. 相比之下, 本研究基于中国人群和大样本实验室测试得到的温度-相对湿度区间既保证了人员的热舒适度要求, 又可以较好地为我国室内热环境设计和营造提供一定的参考.

2.3.2 极端温湿度环境对人员热舒适影响

上述实验结果显示, 环境温湿度对人员的热舒适和感知空气品质都存在显著影响. 由于人员的可感知空气品质与空气焓值呈较好的线性负相关关系^[17,19], Toftum和Fanger^[41]曾建议采用人的呼吸系统对湿度的

感觉来定义热湿舒适区的湿度影响. 本文研究结果也证实, 在低温和高温情况下, 空气湿度的变化显著影响人员热舒适和对空气品质的评价, 因此室内热环境舒适区间的确定也应考虑这两方面的综合影响. 采用同样的计算方法, 图7绘制了舒适区间外相对湿度低于30%和高于70%, 同时满足热感觉TSV $\in$ (-0.5, 0.5)和感知空气品质AQV $\in$ (-0.5, 0.5)的温湿度区间. 考虑到极端环境下人员对热舒适的要求更严格, 这里仅给出了满足90%人员满意度的冬夏季温度-相对湿度区间. 可以看出, 极端环境下由于空气湿度对人员热舒适影响显著, 人员可接受温度-相对湿度区间更窄.

分析其原因, 偏热环境下相对湿度增加, 一方面抑制了皮肤表面的汗液蒸发带走热量, 降低了人体皮肤表面蒸发热损失^[6,7], 另一方面高温高湿情况下空气含湿量大, 湿润的空气抑制了呼吸热损失, 使人员感知的空气新鲜度降低(图5), 导致随着相对湿度增加, 人员可接受温度上下限降低. 这一现象在高湿度情况下更显著. 图7显示, 湿度大于70%后人员可接受温度的降低速率要高于等SET条件下低湿环境. 同样地, 低湿环境下空气湿度对人体热舒适的影响也是两方面的. 一方面, 随着温度降低, 即使相对湿度相等, 空气中实际含湿量降低^[25], 因而干燥的空气会引起身体的刺激感. 图3显示, 16°C时, 随着相对湿度降低, 人员身体各部位刺激感投票的比例显著增加. 低温低湿的空气同时也会

刺激呼吸系统和眼睛泪膜,造成鼻腔、眼睛和呼吸道黏膜的水分减少^[17],引起不适,降低人员的可接受温度上下限。另一方面,低温环境下,温度不变、相对湿度降低时,总的蒸发热损失会增加,附加的蒸发热损失减少了干热损失,导致皮肤表面温度降低,因而人员在低湿度时感觉更冷^[42]。在这种情况下,相对湿度的增加可以补偿人体的热损失,图7中人员可接受温度限值降低。

需要注意的是,冬季情况下由于服装吸湿放湿作用,相对湿度对人员热舒适的影响更加复杂。一些学者研究了服装的“冷却效应(after chill)”^[43],但研究多基于夏季偏热、人体出汗情况,服装的吸湿和放湿强化了人体蒸发散热,起到积极作用。然而,冬季冷环境下,人体无显性出汗蒸发,这时如果空气湿度过高(比如本研究RH>70%),人体服装会从空气中吸收多余水分,导致服装材料的导热特性发生变化,热阻降低,湿阻增加。加上冬季皮肤表面的温度远高于服装外表面空气温度,两者间的较大温差导致储存在服装中的一部分水分不断汽化蒸发,不断从人体吸收热量。这种情况下,高空气湿度反而会引起人体的冷不适^[42],这也部分揭示了南方地区冬季人员感觉“更冷”的原因。本研究冬季实验时由于暴露时间有限,暂时没有考虑服装吸湿效应的影响,建议后期关于温湿度对人员热舒适影响的研究,也应充分考虑低温和高温环境下服装微环境的综合影响,分情况进行评价。对于室内热环境的营造,也应考虑不同温度背景下相对湿度的积极或者消极影响,保证室内热环境的舒适健康营造。

3 结论

通过人工气候室冬夏季大样本人体热舒适实验,分析了不同温湿度耦合作用下的人员热反应,得到的主要结论如下:

(1) 相对湿度对人员湿感觉的影响在偏热环境下显著(夏季32℃,冬季28℃),湿感觉随相对湿度增加而显著增加。冬季低温环境下,由于空气含湿量较低,人员感知身体各部位的刺激感显著,尤其是鼻子,随着温湿度增加,刺激感比例呈先降低后增加趋势。长时间暴露在极低湿度环境下,人员的可感空气品质降低,而高湿环境下人员对湿度变化敏感性降低,可感空气品质提高。

(2) 人员热感觉和感知空气新鲜度与呼吸总散热损失呈显著线性相关关系。随呼吸总热损失增加,人员热感觉降低,感知空气新鲜度增加,且对热感觉影响(回归系数: -0.66)比对感知空气新鲜度影响(回归系数: 0.2)更显著。

(3) 冬夏季环境下人员热感觉和感知空气品质与SET呈不同线性关系。SET每增加1℃,对热感觉的影响显著大于对可感空气品质的影响,表明人员对相对湿度变化的可接受度要远高于对温度变化的可接受度。

(4) 基于TSV $\in(-0.5, +0.5)$ 和TSV $\in(-0.75, +0.75)$,得到了冬夏季在满足90%和80%人员满意率、等SET限值条件下,人员可接受的温度-相对湿度舒适区间。在等SET条件下,人员可接受的温度上下限随相对湿度增加逐渐降低,且大于国际标准ASHRAE55推荐的温度上下限,量化了湿度耦合温度对人员热舒适的影响,可为室内热环境设计和营造提供一定参考。

参考文献

- 1 Nagda N L, Rector H E. A critical review of reported air concentrations of organic compounds in aircraft cabins. *Indoor Air*, 2003, 13: 292-301
- 2 Givoni B, Khedari J, Wong N H, et al. Thermal sensation responses in hot, humid climates: Effects of humidity. *Build Res Inf*, 2006, 34: 496-506
- 3 Fanger P O. Thermal Comfort-Analysis and Application in Environment Engineering. Copenhagen: Danish Technology Press, 1970
- 4 McIntyre D A. Indoor Climate. London: Applied Science Publishers, 1980
- 5 McNall P E, Jaax F H, Rohles R G, et al. Thermal comfort (thermally neutral) conditions for three levels of activity. *ASHRAE Trans*, 1967, 73: 1-3
- 6 Tan M L. Effect of air humidity and velocity on human thermal sensation in summer (in Chinese). Doctor Dissertation. Chongqing: Chongqing University, 2012 [谈美兰. 夏季相对湿度和风速对人体热感觉的影响研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2012]
- 7 Jing S, Li B, Tan M, et al. Impact of relative humidity on thermal comfort in a warm environment. *Indoor Built Environ*, 2013, 22: 598-607
- 8 Vellei M, Herrera M, Fosas D, et al. The influence of relative humidity on adaptive thermal comfort. *Build Environ*, 2017, 124: 171-185
- 9 Hänninen O O. WHO guidelines for indoor air quality: Dampness and mold. In: Adan O C G, Samson RA, eds. *Fundamentals of Mold Growth in Indoor Environments and Strategies for Healthy Living*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2011
- 10 World Health Organization (WHO). Development of WHO guidelines for indoor air quality: Dampness and mould. Report of a Working Group Meeting. Bonn, Germany, 2007, 17-18/10
- 11 Kennedy K, Grimes C. Indoor water and dampness and the health effects on children: A review. *Curr Allergy Asthma Rep*, 2013, 13: 672-680

- 12 Mendell M J, Mirer A G, Cheung K, et al. Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: A review of the epidemiologic evidence. *Environ Health Perspect*, 2011, 119: 748–756
- 13 Tischer C G, Hohmann C, Thiering E, et al. Meta-analysis of mould and dampness exposure on asthma and allergy in eight European birth cohorts: An ENRIECO initiative. *Allergy*, 2011, 66: 1570–1579
- 14 Zhang Y P, Li B Z, Huang C, et al. Ten cities cross-sectional questionnaire survey of children asthma and other allergies in China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 2504–2512 [张寅平, 李百战, 黄晨, 等. 中国10城市儿童哮喘及其他过敏性疾病现状调查. 科学通报, 2013, 58: 2504–2512]
- 15 Wang H, Li B Z, Yang Q, et al. Dampness in dwellings and its associations with asthma and allergies among children in Chongqing: A cross-sectional study (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 2584–2591 [王晗, 李百战, 阳琴, 等. 重庆地区住宅室内潮湿问题和儿童哮喘及过敏性疾病的相关性分析: 横断面调查. 科学通报, 2013, 58: 2584–2591]
- 16 Wei W, Ramalho O, Derbez M, et al. Applicability and relevance of six indoor air quality indexes. *Build Environ*, 2016, 109: 42–49
- 17 Toftum J, Jørgensen A S, Fanger P O. Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort. *Energy Build*, 1998, 28: 15–23
- 18 Fang L, Clausen G, Fanger P O. Temperature and humidity: Important factors for perception of air quality and for ventilation requirements. *ASHRAE Trans*, 2000, 106: 503–510
- 19 Fang L, Wyon D P, Clausen G, et al. Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance. *Indoor Air*, 2004, 14: 74–81
- 20 Wolkoff P, Nøjgaard J K, Troiano P, et al. Eye complaints in the office environment: Precorneal tear film integrity influenced by eye blinking efficiency. *Occupat Environ Med*, 2005, 62: 4–12
- 21 Fanger P O. Indoor air quality in the 21st century: Search for excellence. *Indoor Air*, 2000, 10: 68–73
- 22 Wolkoff P, Kjaergaard S K. The dichotomy of relative humidity on indoor air quality. *Environ Int*, 2007, 33: 850–857
- 23 Nevins R, Rohles F, Springer W, et al. Temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons. *ASHRAE Trans*, 1996, 72: 283–291
- 24 Atmaca I, Yigit A. Predicting the effect of relative humidity on skin temperature and skin wettedness. *J Therm Biol*, 2006, 31: 442–452
- 25 Li C, Liu H, Li B Z, et al. Seasonal effect of humidity on human comfort in a hot summer/cold winter zone in China. *Indoor Built Environ*, 2018, 28: 1–14
- 26 Toftum J, Jørgensen A S, Fanger P O. Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin. *Energy Build*, 1998, 28: 1–13
- 27 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. ASHRAE 55-2017. Atlanta, GA, 2017
- 28 International Standardization Organization. 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. Geneva, 2005
- 29 American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE 62.1-2013. Atlanta, GA, 2013
- 30 International Standardization Organization. EN 15251-2007. Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, 2007
- 31 Chinese Society of Architecture. Assessment Standard for Healthy Building (in Chinese). T/ASC 02-2016. Beijing, 2016 [中国建筑学会. 健康建筑评价标准. T/ASC 02-2016. 北京, 2016]
- 32 Dj H, Ming C C, Kumaresan S. Effect of humidity on thermal comfort in the humid tropics. *J Build Constr Plan Res*, 2014, 2: 109–117
- 33 Gagge A P, Fobelets A P, Berglund L. A standard predictive index of human response to the thermal environment. *ASHRAE Trans*, 1986, 92: 709–731
- 34 Lan L. Mechanism and evaluation of the effects of indoor environment quality on human productivity (in Chinese). Doctor Dissertation. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010 [兰丽. 室内环境对人员工作效率影响机理及评价研究. 博士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2010]
- 35 Broderick Á, Byrne M, Armstrong S, et al. A pre and post evaluation of indoor air quality, ventilation, and thermal comfort in retrofitted co-operative social housing. *Build Environ*, 2017, 122: 126–133
- 36 Wargocki P, Wyon D P. Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Build Environ*, 2017, 112: 359–366
- 37 ASHRAE Technical Committees. ASHRAE Handbook-2013. Fundamentals-Chapter 9 Thermal Comfort, 2013

- 38 Tian Y Y. Study of human thermal response in hot-humid environment (in Chinese). Doctor Dissertation. Beijing: Tsinghua University, 2001 [田元媛. 热湿环境下人体热反应的研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2001]
- 39 Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of China. Design Code for Heating Ventilation and Air Conditioning of Civil Buildings (in Chinese), GB 50736-2012. 2012 [中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, GB 50736-2012. 2012]
- 40 Li B, Du C, Tan M, et al. A modified method of evaluating the impact of air humidity on human acceptable air temperatures in hot-humid environments. *Energy Build*, 2018, 158: 393–405
- 41 Toftum J, Fanger P O. Air humidity requirements for human comfort. *ASHRAE Trans*, 1999, 2: 641–652
- 42 Du C, Li B, Yu W, et al. Moisture in clothing and its transient influence on human thermal responses through clothing microenvironment in cold environments in winter. *Build Environ*, 2019, 150: 1–12
- 43 Vivekanandan M V, Sreenivasan S. Dynamic transportation of water vapor through cotton and polyester-cotton blended fabrics: Part I: Indices characterizing moisture buffering and their interrelationships. *J Eng Fiber Fabr*, 2012, 7: 70–80

Summary for “空气湿度对人员可接受热环境的影响及评价”

Effect of air humidity on human acceptable thermal environments and evaluation

Chenqiu Du, Baizhan Li^{*}, Hong Liu & Chao Li

Joint International Research Laboratory of Green Buildings and Built Environments, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China

^{*} Corresponding author, E-mail: baizhanli@cqu.edu.cn

Air humidity, coupled with temperature, has been verified with significant effect on human thermal comfort, specifically in warm environments. However, it lacks a holistic understanding on their comprehensive impacts in a wide range of relative humidity, especially in winter. This study aims to evaluate human thermal responses to air humidity, under a wide temperature range, and improve understandings of the role of air humidity on human comfort, with considering the effects of air humidity on human respiratory system. The work is expected to benefit to indoor thermal environment design and building energy saving. To this end, the study conducted a human exposure experiment in a well-controlled climate chamber in summer and winter respectively, with a combination of 20 temperature and relative humidity conditions (temperature: 16/20/24/28°C (winter), 23/26/29/32°C (summer), relative humidity: 15%/30%/50%/70%/85%). Subjective evaluations of 20 subjects in each experimental condition were measured and total 800 samples were collected for analysis. Two-way ANOVA and ANOVA were conducted to test the significance of temperature and relative humidity on thermal perception evaluations of subjects. The results showed that the air humidity had neglectable effects on human humidity sensation in neutral and slightly warm environments; while significant increases of humidity sensation votes were found under warm conditions (summer: 32°C; winter: 28°C). With long term exposure, low relative humidity had remarkable stimulus on human body in cold environments, due to lower moisture content in air enhancing the evaporation on skin surface and mucosa; while the acceptability for air quality of subjects increased with increasing relative humidity under hot environment, which was attributed to long time thermal adaptation and low sensitivity to humidity changes. The heat loss from human respiration was calculated and related to human thermal sensation (TSV) and air freshness sensation (AFV): With increasing respiratory heat loss per 1 W/m², TSV decreased by 0.66 scale and AFV increased by 0.22 scale. To quantify such effects, the standard effective temperature (SET) was adopted as independent variable and the linear regressions between TSV and air quality sensation (AQV) and SET were built. Accordingly, taking TSV∈(−0.5, +0.5) (90% people satisfaction) and (−0.75, +0.75) (80% people satisfaction) as baselines, the upper and lower limits of SET for summer and winter were obtained. Combined with experimental conditions, the corresponding acceptable temperature-relative humidity ranges regarding to equivalent SET were determined, with the same thermal comfort. The obtained temperature ranges were wider than that of ASHRAE 55 standards, which were inferred to differences of clothing insulation and thermal adaptation for different populations. Further, the results indicated that the extreme low and high air humidity affected the heat loss at skin surface and evaporative heat loss from respiratory, reducing the acceptable temperature limits. Overall, the work quantifies the coupling effect of air temperature and humidity on human thermal comfort; the comfort zones enable to obtain the range of relative humidity with given temperatures, and the range of temperature with given relative humidity, which is beneficial for designers and operators for building indoor thermal environments. Further work is discussed regarding to the microenvironment in clothes, especially for the negative effects of clothing absorption, which is worthy of consideration for heating design in cold-humid environments like hot summer and cold winter zone in China, to ensure human comfort and health.

air temperature, relative humidity, thermal comfort, air quality sensation, temperature-relative humidity range

doi: [10.1360/TB-2019-0461](https://doi.org/10.1360/TB-2019-0461)