

分体式空调建筑行为调节对热舒适的影响研究

孙震¹, 杨柳^{2,3}, 王敏丽¹, 郭利强⁴, 闫海燕^{1,2}

(1. 河南理工大学 建筑与艺术设计学院, 河南 焦作 454000; 2. 绿色建筑国家重点实验室(XAUAT), 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710055; 4. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450048)

摘要: 为了解分体式空调建筑中行为调节对热舒适的影响, 以焦作住宅为调研对象, 采用热环境参数测试和问卷调查相结合的方法, 共收集 509 份数据。结果表明: 室内平均操作温度 28.6 °C, 居民的中性温度为 27.7 °C, 均高出 GB 50736 标准规定的夏季一级舒适度范围(24~26 °C)。然而, 由于分体式空调住宅提供了丰富而有效的行为调节机会以及由此产生的较强感知控制, 仍有超过 80% 的居民对自己的住宅热环境感到满意。服装热阻与室内热经历强度的负相关关系表明居民可以通过服装调节行为来有效地适应当前的热环境。居民偏爱开启门窗这种被动式调节措施, 当室外热经历强度在 30 °C 以下, 较高的门窗开启率可以有效改善自然通风模式下居民的热感觉。然而, 当室外热经历强度超过 30 °C 时, 居民会选择关闭门窗, 使用空调来改善自身热舒适。分体式空调住宅中居民使用空调具有个性化、差异化和多样化的时空特征, 同时更倾向于低碳的空调使用模式。随着室外热经历的强度和作用时间的增加, 居民适应了较高的室外温度, 空调开启/设定温度也在提高。然而, 室外热经历对空调开启/设定温度造成显著影响的所需时间并不一致。以上研究可为分体式空调住宅建筑室内热环境设计和节能调控提供理论依据。

关键词: 分体式空调建筑; 行为调节; 空调使用行为; 室内外热经历; 热舒适

中图分类号: TU119⁺.5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)03-0442-11

Influence of behavioral adjustment on thermal comfort in split air-conditioned buildings

SUN Zhen¹, YANG Liu^{2,3}, WANG Minli¹, GUO Liqiang⁴, YAN Haiyan^{1,2}

(1. School of Architectural and Artistic Design, Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454000, China;
2. State Key Laboratory of Green Building(XAUAT), Xi'an 710055, China;
3. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
4. China Construction Seventh Engineering Division. Co., Ltd., Zhengzhou 450048, China)

Abstract: In order to understand the influence of behavioral adjustment on thermal comfort in split air-conditioned buildings, a total of 509 data were collected by combining thermal environment parameter tests and questionnaire surveys with the residential building in Jiaozuo as the research object. The results showed that the mean indoor operative temperature was 28.6 °C, and the neutral temperature of residents was 27.7 °C, both of which were higher than the temperature limit value of category I (24~26 °C) in summer stipulated in the standard GB 50736. However, more than 80% of residents were still satisfied with the residential thermal environment due to the rich and effective behavioral adjustment opportunities provided by split air-conditioned residential buildings and the resulting strong perceived control. The negative correlation between clothing insulation and indoor thermal history intensity indicated that residents could effectively adapt to the current thermal environment through clothing adjustment behavior. Residents preferred passive adjustment measures such as opening doors and windows. When the outdoor thermal history intensity was below 30 °C, the higher opening rate of doors and windows can improve residents' thermal sensation in the natural ventilation mode. However, when the outdoor thermal history intensity

收稿日期: 2022-05-04

修回日期: 2023-04-22

基金项目: “十三五”国家重点研发计划基金项目(2018YFC0704500); 河南省科技厅重点研发与推广专项(科技攻关)基金项目(46202102310566; 222102320310); 西部绿色建筑国家重点实验室开放基金(重点)(LSKF202101); 河南省高校基本科研业务费专项资金(NSFRF200306)

第一作者: 孙震(1997—), 男, 硕士生, 主要从事人体热舒适研究。E-mail: 937514598@qq.com

通信作者: 闫海燕(1976—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事绿色建筑与节能、人体热舒适等方面研究。E-mail: yhy@hpu.edu.cn

exceeded 30 °C, residents would choose to close doors and windows and use air conditioners to improve their thermal comfort. The use of air conditioners by residents in split air-conditioned residential buildings had obvious characteristics of individuation, differentiation and diversification, and at the same time, they were more inclined to low-carbon air conditioners usage mode. With the increase of outdoor thermal history intensity and action time, residents gradually adapted to higher outdoor temperatures, and air conditioners' start/set temperatures also rose. The time required for outdoor thermal history to significantly influence air conditioners' start/set temperatures were inconsistent. These studies provide the theoretical basis for indoor thermal environment design and energy-saving regulation of split air-conditioned residential buildings.

Key words: split air conditioned building; behavioral adjustment; air conditioning behavior; indoor and outdoor thermal history; thermal comfort

随着经济的快速发展,人们对舒适生活环境的需求不断提高,但同时也造成了大量的能源消耗和碳排放。住宅建筑的能源消耗被认为是中国温室气体排放的主要因素之一,2018年中国住宅建筑能耗和碳排放分别占全国能源消费总量的13%和碳排放的14%^[1]。因此,在我国“碳达峰与碳中和目标”背景下,在保证建筑内居住者热舒适的前提下,实现节能减排具有重要意义。

我国大多数住宅多为分体式空调(SAC)建筑,其夏季采用空调(AC)模式和自然通风(NV)模式协同调控室内热环境。GB/T 50785 标准^[2]将SAC建筑限制在基于PMV/PPD^[3]计算的室内热环境条件下运行,为了保持其相对稳定、均匀、连续的室内热环境,空调设备需保持全天连续运行。同时,GB 50736 标准^[4]规定其夏季一级舒适度范围为24~26 °C。然而,居民的热舒适性会受到热环境条件和热经历的共同影响^[3,5],其可以通过行为、心理和生理适应进行调节。热经历分为室外热经历和室内热经历,分别反映了影响人体热舒适的室外气候和室内环境因素。现有研究^[6,7]已经表明即使SAC住宅室内热环境高于我国现行标准,居民依旧有着较高的满意度。我国SAC住宅多采用“部分时间、部分空间”间歇空调运行模式^[8],而现行标准显然忽视了人体热适应的作用,这将无法最大程度地发挥这类建筑的节能潜力。

住宅能源消耗的巨大差异可以直接归因于居民行为调节的差异^[9]。IWASHITA等^[10]的早期调研发现不同住宅中居民使用门窗或空调方式和习惯有很大差异,这直接影响了建筑的通风率和能耗。NICOL和HUMPHREYS^[11]提出了一种概率分析方法,通过室外温度变化来预测居民采取行为调节的可能性,包括对窗户、风扇、照明和加热器的操作,此后越来越多学者开展了室内外温度变化对住宅居民行为调节的影响研究。RAJAN等^[12]通过建立日本住宅居民的开窗比例和室外温

度之间的关系,发现室外气温为28 °C时,开窗的比例为0.65,这表明居民倾向于将开窗作为改善热舒适的首选。Lai等^[13]的研究表明中国住宅的开窗时间随着室外温度的升高而增加,直到室外温度达到一个临界温度。在此临界温度之后,随着室外空气温度的升高,开窗时间逐渐减小。CHEN等^[14]对杭州住宅进行了全年调研,发现当夏季室外温度低于30 °C时,家庭主要依靠电扇调节室内热环境;当室外温度高于30 °C时,家庭主要使用空调控制室内温度,电扇的使用比例较小。上述研究通过分析行为调节随室内外温度变化的使用情况,进而探究对热环境或热舒适的影响。然而,居民的行为调节也会受到热经历的影响^[8,15],而现有研究并没有从室内外热经历的角度揭示对行为调节的影响机理,此外也较少有室内外热经历对分体式空调相关使用行为的研究。据全球建筑建设联盟报告显示,使用空调系统对室内环境降温是目前建筑中增长最快的能源最终用途,未来几年还将持续增长^[16]。因此,进一步探究中国住宅居民行为调节模式的特点和通过室内外热经历对空调使用等行为调节进行定量研究是促进SAC住宅节能型热舒适性研究的重要一环。

综上所述,居民的行为调节是影响住宅能耗和热舒适的因素。因此,本研究以河南省焦作地区SAC住宅为研究对象,采用环境客观测量与主观问卷调查相结合的方法,对SAC住宅建筑的行为调节及其模式进行系统地研究,并探讨室内外热经历对行为调节的影响机理。研究结果可为夏季分体式空调住宅建筑室内热环境设计和节能调控提供理论依据。

1 研究方法

1.1 调研地点

焦作市位于河南省西北部(113°25'E, 35°22'N),地处北温带,属于我国GB 50176—2016《民

用建筑热工设计规范》^[17] 一级区划中的寒冷气候。但夏季平均气温 27~28℃, 极端气温可达 43.6℃, 高温多雨, 导致居民极度的热不适。在此背景下, 分体式空调成为夏季焦作住宅建筑常用的制冷设备。

1.2 调研对象

本次调研时间为 2019 年 6 月 9 日至 8 月 15 日, 调研对象为焦作的 93 栋住宅建筑。被调研建筑的主要结构形式是当地常见的多层砖混和高层剪力墙结构, 窗户均可开启, 并均安装了分体式空调。在调研期间, 受试者均能根据个人意愿调节服装、使用电扇、开关门窗和空调等措施来改善自身热舒适。受试者的男女比例为 1:1.45, 根据 Liu 等^[5] 的研究, 将受试者年龄控制在 20~60 岁之间。通过调研, 共获得 509 份有效问卷数据。根据 ASHRAE 标准^[18] 估算受试者的服装热阻和代谢率。所有受试者均愿意参与本次调研, 调研中不会讨论与测试相关的问题, 以免影响受试者的主观选择。本次调研受试者的具体情况见表 1。

表 1 受试者背景统计

Tab. 1 Background statistics of subjects

个人信息	平均值	最大值	最小值	标准差
年龄/岁	34	60	20	8.35
身高/cm	168	190	150	8.76
体重/kg	64	110	45	12.09
服装热阻/clo	0.29	0.56	0.12	0.09
代谢率/met	1.0	1.2	0.8	0.06

1.3 现场测试方法

(1) 现场调研采用室内外热环境参数测试和主观问卷调查相结合的方法, 主要分为横向设计和纵向设计。采用横向调研方法(不重复抽样)随机选择受试者, 由工作人员将仪器放入户内, 指导受试者自行测试其所在房间(卧室、客厅、书房)的环境参数并填写主观问卷。随后采用纵向调研方法, 在横向调研的基础上, 每个受试者需在早、中、晚不同时间里共填写 3 次问卷, 连续调查 2~3 d。这样既避免了重复抽样时间过长受试者产生厌倦心理, 消除增强的熟悉程度(厌烦)^[19], 确保观察的独立性, 同时也增加了样本量。根据问卷中设置的问题“此时是否开启空调”, 将数据分为两大类: 填写问卷时开启空调(AC 模式)和填写问卷时未开启空调(NV 模式), 全部数据放在一起则定义为混合模式。热环境参数测试包括室内外空气温度、相对湿度以及室内黑球温度、风速等;

主观问卷调查内容包括受试者的基本信息以及主观热反应。本次调研使用的主观热反应标尺和环境参数测试仪器见表 2 和表 3。

(2) 在进行主观问卷调查时, 测量室内外环境参数。室内环境参数采用 II 类方法^[18] 测定, 测量高度为离地面 0.6 m(坐姿)或 1.1 m(站姿), 室外环境参数采用自动气象站测量, 所用仪器的量程和测试精度符合 ISO 7726 标准^[20]。

表 2 主观热反应标尺

Tab. 2 Subjective thermal response voting scale

标尺	热感觉	热可接受度
-3	冷	
-2	凉	完全不可接受
-1	微凉	刚刚不可接受
0	中性	
1	微暖	刚刚可接受
2	暖	完全可接受
3	热	

表 3 仪器的测量范围和精度

Tab. 3 Measured range and accuracy of the instrument

仪器名称	测试项目	量程	误差范围
PC-4 自动	空气温度/℃	-40~70	±0.1
气象站	相对湿度/%	0~100	±5
	空气温度/℃	1~60	±0.3
JT-IAQ 室	相对湿度/%	0~100	±1.5
内热舒	风速	0.05~5 m/s	±(0.03 m/s + 2%读数)
适仪	黑球温度/℃	1~60	±0.3

1.4 数据处理方法

适应性热舒适理论认为, 人体热感觉不仅受到当天室外天气的影响, 还和过去 7 d 的热经历有关, 采用 de Dear^[15] 给出的加权系数法计算室外连续 7 d 平均温度(T_{out-7}), 作为室外热经历的评价指标。操作温度(T_{op})考虑了空气温度和平均辐射温度对人体热感觉的综合影响, 两者影响权重取决于风速大小, 根据 ASHRAE 标准^[18] 计算操作温度, 作为室内热经历的评价指标。将室内外温度按 0.5℃ 进行分组, 其平均值作为每组的自变量, 对相关因变量进行加权线性或多项式回归分析; 采用独立样本 T 检验比较不同组数据; 采用协方差分析检验回归线之间的显著性差异。所有统计分析均采用 SPSS v 26.0 软件进行, 以 P 值描述 2 组数据间差异水平, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P >$

0.05 表示差异不显著。

2 研究结果

2.1 环境参数

SAC住宅调研期间的室内外环境参数如表4所示。室内平均操作温度为28.6℃,平均相对湿度为59.6%。在空调使用期间,室内操作温度和相对湿度达到最小值,分别为22.3℃和33.3%。此外,室内平均风速为0.15 m/s,保持在较低的水平。

表4 室内外环境参数

Tab.4 Indoor and outdoor environment parameters

室内外环境参数	平均值	最大值	最小值	标准差
室外连续七天 平均温度/℃	30.2	34.1	26.9	1.82
室外相对湿度/%	60.6	86.2	18.9	17.34
室内操作温度/℃	28.6	34.5	22.3	1.82
室内相对湿度/%	59.6	81.7	33.3	9.25
室内风速/m·s ⁻¹	0.15	1.06	0.00	0.15

2.2 主观热反应

根据GB/T 50785标准规定,假定7级热感觉投票标尺中处于中心位置的3个投票(-1微凉、0中性、1微暖)的居民对自己所处的室内热环境感到满意,如图1(a)所示,共有88.8%的居民对自己所处的室内热环境感到满意。当直接询问居民是否可以接受当前的热环境时,如图1(b)所示,共有88.1%的居民接受当前的热环境。因此,即使室内平均操作温度远高于GB 50736标准规定的夏季一级舒适度上限(26℃),仍有超过80%的居民满意自己当前所处的热环境。

在图1(a)的热感觉分布中,居民的热感觉投票集中在微凉、中性和微暖,且居民选择微暖投票的比例高于微凉。而在图1(b)的热可接受度分布中,居民选择可接受投票一侧的比例要远高于选择不可接受投票一侧的比例。

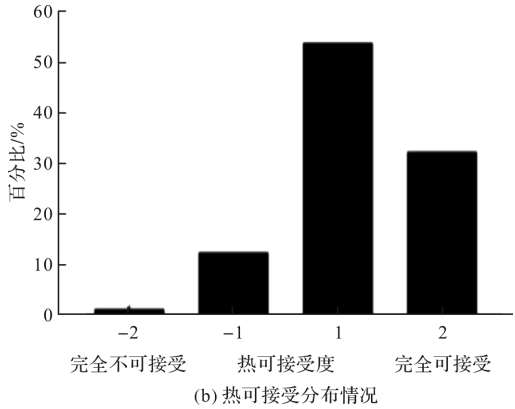
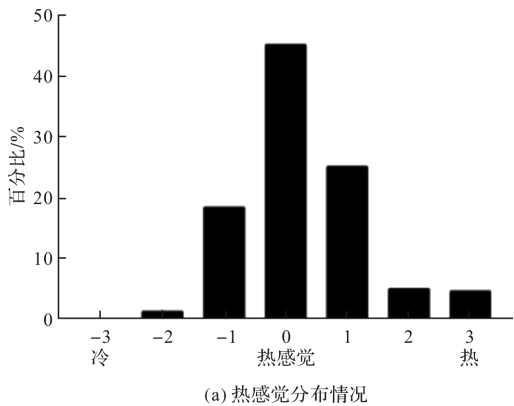


图1 主观热反应

Fig.1 Subjective thermal responses

2.3 中性温度和可接受温度

根据Fanger^[3]的预测平均热感觉PMV的方程,通过编制MATLAB程序计算PMV值。对PMV、平均热感觉(TSV)与操作温度进行加权线性回归分析,如图2(a),方程分别为式(1)和(2)。

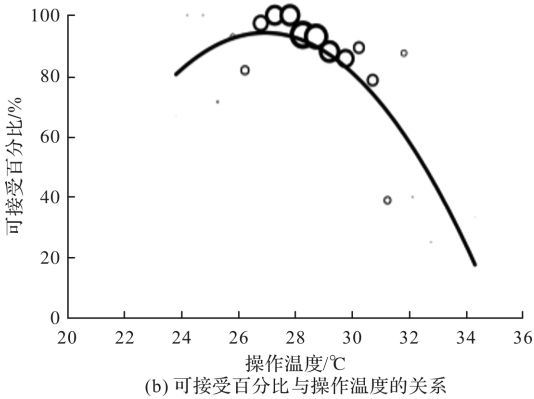
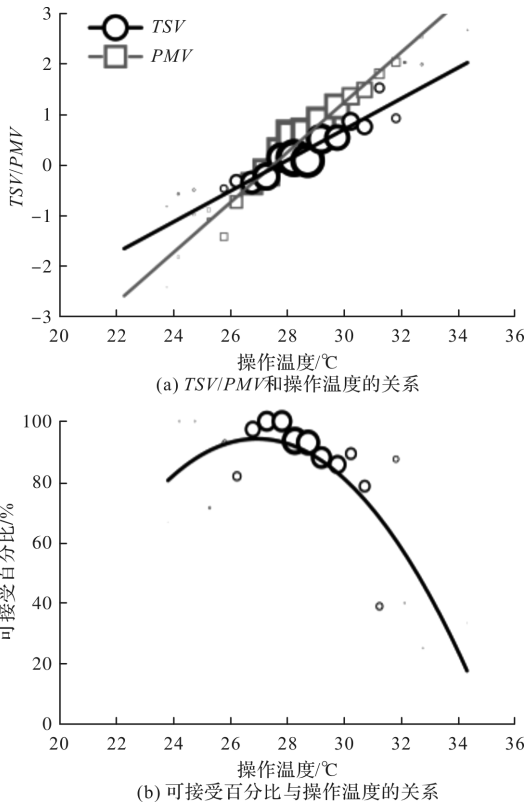


图2 中性温度和可接受温度

Fig.2 Neutral temperature and acceptable temperature

$$PMV=0.491T_{op}-13.498 \quad (R^2=0.987) \quad (1)$$

$$TSV=0.305T_{op}-8.454 \quad (R^2=0.936) \quad (2)$$

计算可得实测热中性温度和预测热中性温度分别为27.7℃和27.5℃,两者接近。经协方差检验,发现两者斜率和截距均有显著性差异($P<0.05$),说明PMV模型预测人体热感觉随室内操作

温度变化的敏感性($0.491/\text{K}$)大于 $TSV(0.305/\text{K})$ 。当室内操作温度高于 27°C 左右时, PMV 模型高估了受试者的热感觉, 实际的热感觉投票比 PMV 预测更加接近中性, 表明实际情况下居民对于室内热环境具有较强的耐受性, 能够适应当前的热环境。

在统计热可接受度投票时, “刚刚可接受”和“完全可接受”投票均为可接受投票。计算每 0.5°C 区间内可接受投票占全部投票的百分比, 并与操作温度进行回归分析, 如图 2(b)。求得居民 80% 可接受温度范围, 即 $23.7\sim 30.1^\circ\text{C}$ 。

2.4 服装热阻

服装热阻是影响居民舒适温度的关键因素。经 T 检验, 本研究中 NV 模式的平均服装热阻为 0.277 clo , 显著低于 AC 模式的 0.292 clo ($P=0.042$)。服装热阻与室内操作温度显著负相关($P=0.027$), 但与室外连续七天平均温度无相关性($P>0.05$)。服装热阻与操作温度的回归分析表明(图 3), 随着温度的升高, 居民的服装热阻有降低的趋势。

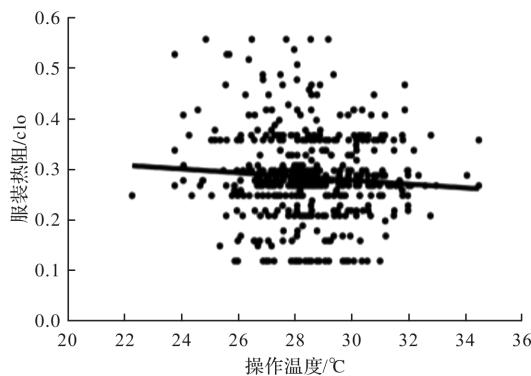


图 3 服装热阻与操作温度的关系

Fig. 3 Relationship between clothing insulation and operative temperature

2.5 门窗使用行为

在实验室研究中, 门窗一般不可控制, 但在住宅建筑中, 居民有着丰富的门窗使用行为。经检验, AC 和 NV 模式下门窗开启率具有显著性差异($P<0.001$)。如图 4(a)所示, 81.9% 的居民在 AC 模式下会关闭所有门窗, 但仍有 18.1% 的居民会打开门窗。在 NV 模式下, 门窗均开的比例最高, 达到 48.2%, 而窗户开启的比例高达 88.6%。同时, 门窗开启行为也会受室外温度的影响($P=0.014$), 如图 4(b)所示, 居民的门窗开启率随着室外连续七天平均温度的升高呈现着先增加后降低的趋势。在 2.3 节中可知居民的 80% 可接受温度上限为 30.1°C , 这说明当室外温度过高(30°C

左右)时, 门窗开启会引起居民的热不适, 居民会选择关闭门窗。

进一步分析 SAC 住宅中两种模式下门窗开启率与室内操作温度的关系, 如图 4(c)所示。结果表明, 相同操作温度下, NV 模式下门窗开启率远高于 AC 模式。此外, 两种模式下的门窗开启率随操作温度的变化趋势也不相同。NV 模式下门窗开启率随操作温度的升高而增加($P=0.015$); 而在 AC 模式下, 仍有一定比例的居民打开门窗, 当操作温度低于 26°C 时, 门窗开启率随温度的升高而增加, 当操作温度高于 26°C 时, 门窗开启率随温度的升高而降低($P=0.006$)。以上分析说明居民的门窗开启率会受到室内外温度和建筑运行模式的影响。

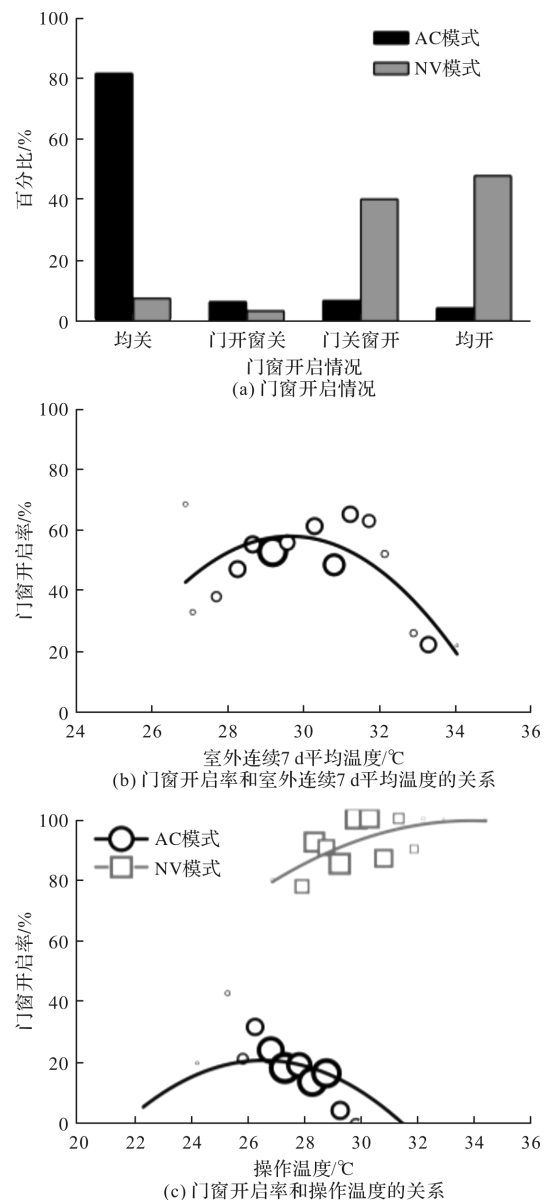


图 4 门窗使用行为

Fig. 4 Use behavior of doors and windows

2.6 空调使用行为

2.6.1 空调使用时间

在本次调研中,只有82户家庭填写了使用时间、设定温度、使用模式和降温措施等相关内容。如图5(a)所示,通过对每天空调使用时长的统计发现,居民每天使用空调时长在4~8 h的比例最高,此外,卧室每天空调使用时长超过4 h的比例高于客厅。

进一步分析不同时间段的空调使用率,如图5(b)所示,卧室和客厅均为下午13~15时空调使用率最高,但客厅空调使用率(80.6%)略高于卧室(79.2%),而其他时间段卧室空调使用率均高于客厅。此外,居民在下午或晚上的空调使用率要高于上午。

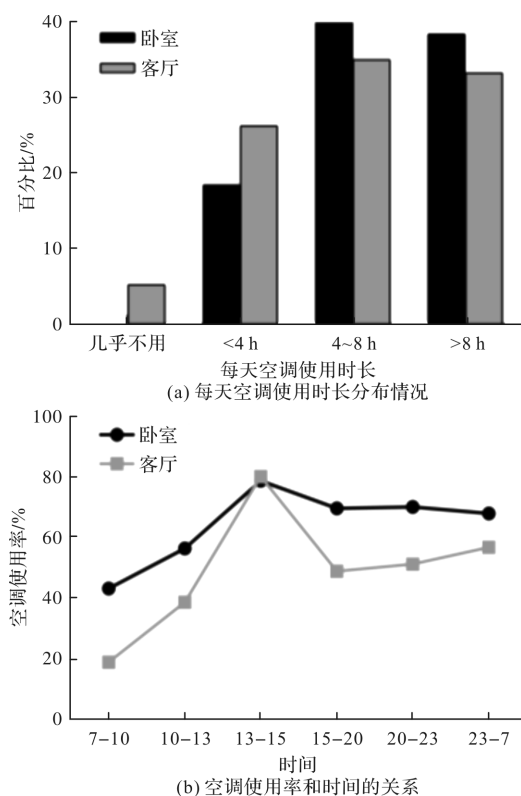


图5 卧室和客厅空调使用情况

Fig. 5 Use of air conditioning in bedroom and living room

图6(a)和(b)为各家庭空调使用的起止时间。其中6月初开始使用空调的家庭所占比例最大,达到34.2%。而在8月末和9月初,共有55.7%的家庭停止使用空调,占比最高。除了识别空调开始和结束使用时间外,还可以从中确定空调使用月数。通过图6(c)对每户家庭空调使用月数的统计,发现空调使用月数为2个月和3个月占比最大,总计达56.3%。整个夏季居民使用空调月份最短的只有1个月,最长可达5个月。

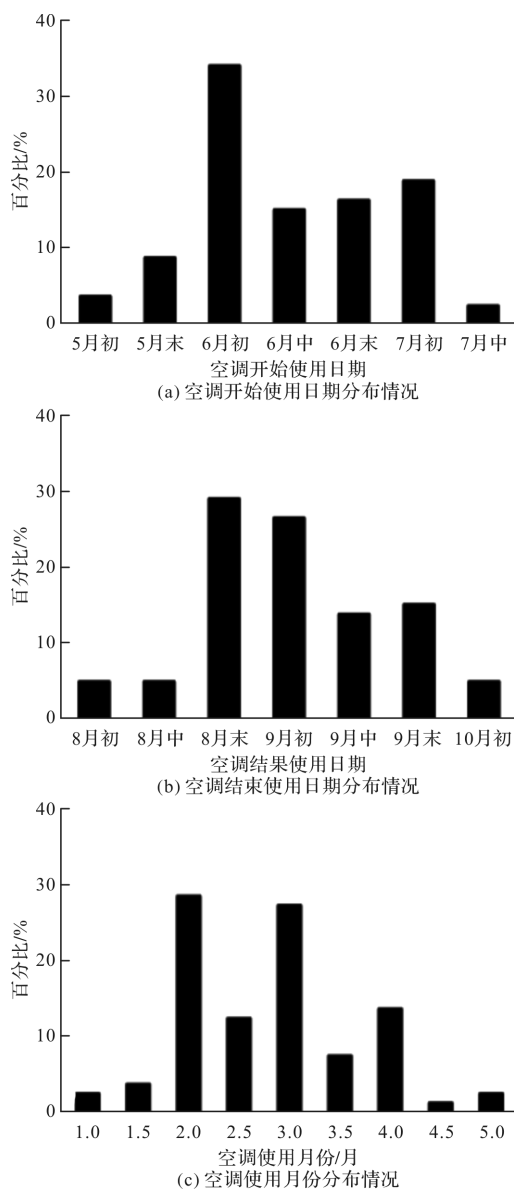


图6 空调使用时间

Fig. 6 Air conditioning use time

2.6.2 空调开启和设定温度

空调开启时的室内空气温度即为空调开启温度,其分布情况如图7(a)所示。56.9%的居民在室温为28~30℃时开启空调,而在室温30℃以上开启空调的居民占比为33.1%。这说明SAC住宅居民会选择室内温度较高时开启空调。在图7(b)的空调设定温度的分布情况中,尽管有36.5%居民的空调设定温度为26℃,但仍有38.9%的设定温度高于GB 50736标准^[4]的夏季一级舒适度温度上限(26℃)。经统计,空调设定温度为27~30℃时居民的平均热感觉为-0.003,这表明较高的设定温度依旧可以满足居民的热舒适需求。

空调开启温度与年龄、经济收入均具有显著相关性($P < 0.05$),年轻人和高收入家庭空调开启

温度较低. 这可能是因为年轻人新陈代谢较快, 产生的热量多, 更容易产生热感^[21]; 此外, 随着空调的普及, 居民对偏热环境的容忍度降低, 而高收入家庭更愿意在夏季花费必要的钱来保持相对凉爽的室内环境^[22]. 结合 2.6.1 节分析, 反映了 SAC 住宅空调使用具有明显的个性化、差异化和多样化的特征.

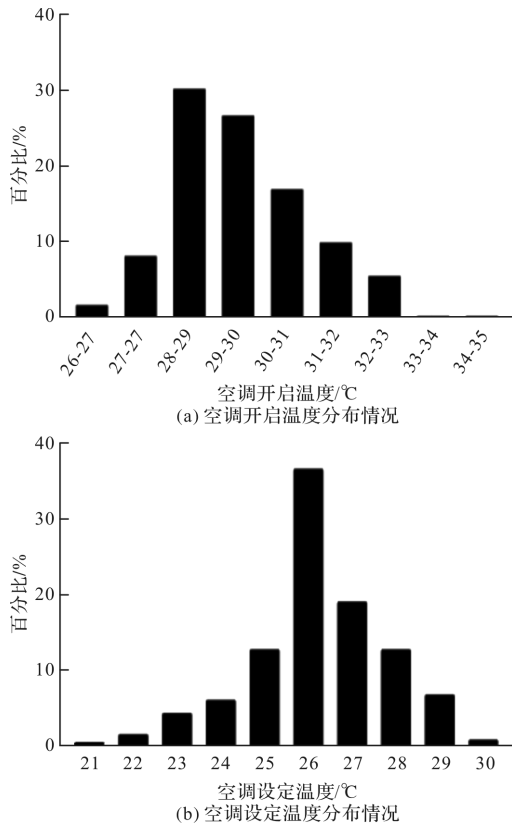


图7 空调的开启和设定温度

Fig. 7 Starting and setting temperature of air conditioner

进一步分析居民的空调开启/设定温度与室外连续七天平均温度的关系, 如图 8 所示. 随着室外温度的升高, 居民的空调开启温度逐渐增加 ($P < 0.05$); 此外, 当室外连续七天平均温度高于 30°C 时, 随着室外温度的升高, 居民的空调设定温度也在逐渐增加 ($P < 0.001$). 这表明随着室外温度的升高, 居民已经逐渐适应了高温, 空调开启/设定温度也在增加.

2.6.3 空调使用模式

通过居民的空调使用模式情况的统计(图 9 (a))发现, 居民感觉“热时开空调”的占比最高, 达到 85.5%, 其次是“睡觉时开空调”, 占比为 37.5%, 而“定时开空调”和“全天开空调”两者的占比均接近 0%. 图 9(b)中居民的降温措施情况的统计表明, 空调的使用比例最高, 占 56.6%, 其中一些居民在使用空调时也使用电风扇和打开门窗, 同时在调研中也有 43.4% 的样本采用自然通

风来调节室内热环境. 对于居民来说, 自然通风一直是调节住宅建筑室内热环境的常用方式, 因此他们会有意识降低空调的使用.

2.6.4 空调使用率

经 T 检验, 调研期间 SAC 住宅 AC 模式的室外连续七天平均温度 (30.4°C) 显著高于 NV 模式 (29.8°C) ($P < 0.001$), 说明较高的室外温度是人们使用空调的驱动力之一. 通过图 10 对空调使用率(Y)与室外连续七天平均温度($T_{\text{out-7}}$)进行加权回归分析, 方程如式(3).

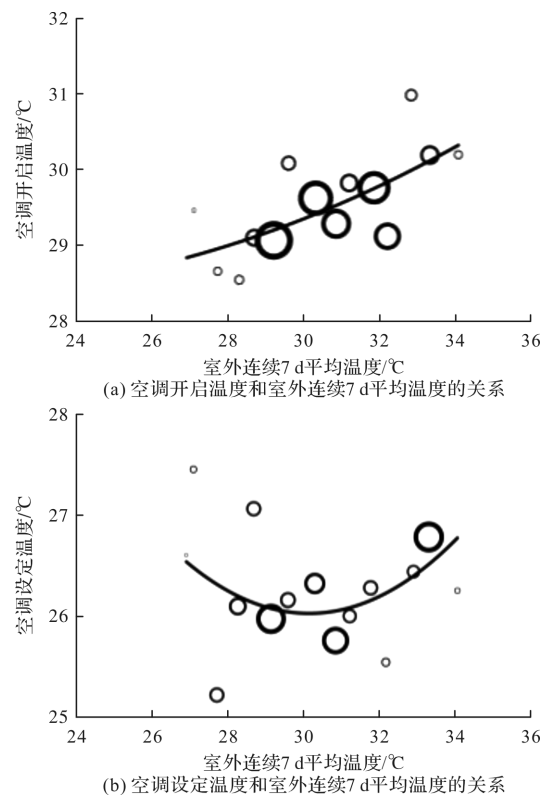
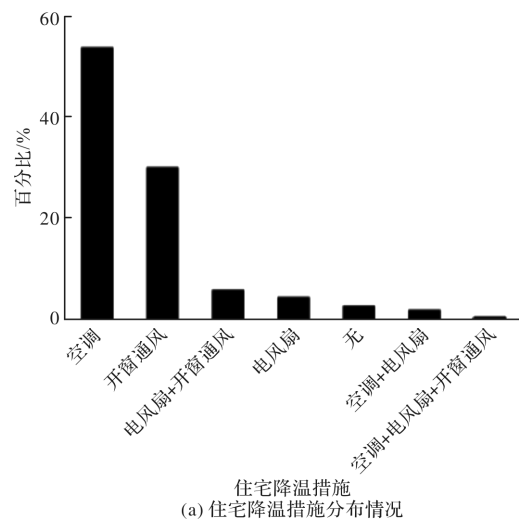


图8 空调开启/设定温度和室外连续7 d平均温度的关系

Fig. 8 Relationship between starting/setting temperature of air conditioner and outdoor average temperature for 7 consecutive days



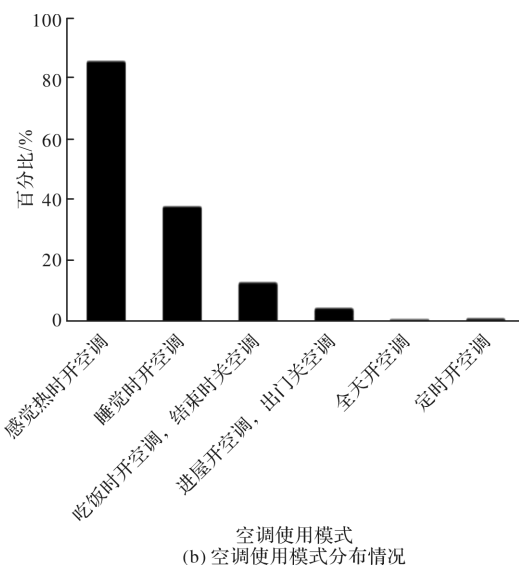


图9 降温措施和空调使用模式

Fig. 9 Cooling measures and air conditioning usage mode

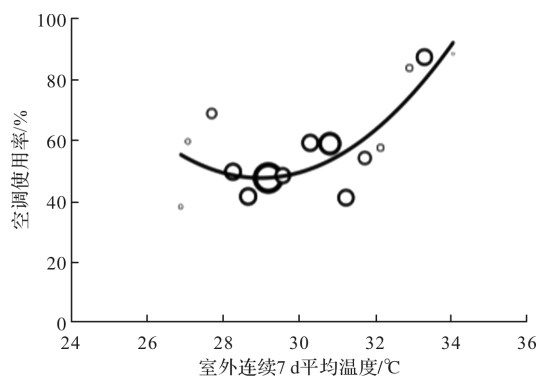


图10 空调使用率和室外连续7 d 平均温度的关系

Fig. 10 Relationship between air conditioning utilization rate and outdoor average temperature for 7 consecutive days

$$Y = 1.74T_{\text{out-7}}^2 - 100.897T_{\text{out-7}} + 1510.521 \quad (R^2 = 0.812) \quad (3)$$

通过回归分析表明,当室外连续7 d 平均温度高于29℃时,随着室外温度的升高,空调的使用率也相应增加。当室外温度为30.1℃时,空调使用率为50%;当室外温度上升到33.3℃时,空调使用率增加到80%。

3 讨论

3.1 分体式空调建筑的行为调节和感知控制

现有空调建筑室内热环境的设计目标是创造一个稳态均匀的室内热环境,但在调研期间,室内平均操作温度28.6℃,居民的中性温度为27.7℃,均高出GB 50736标准规定的夏季一级舒适度上限(26℃),即使如此,居民对自己住宅热环境有着较高的满意度。出现以上情况的原因是SAC住宅存在着丰富的行为调节机会以及由此产

生的较强感知控制。

人们习惯于通过服装调节行为来满足自身的热舒适需求^[23]。在2.4节中,NV模式下的服装热阻显著低于AC模式,此外,随着室内温度的升高,居民的服装热阻有降低的趋势,表明人们可以通过增加和减少服装来有效地适应当前的热环境。门窗使用行为也是住宅居民的行为调节之一。在2.5节中,88.6%的居民在NV模式下会选择开启窗户来提高室内外空气交换速率^[24]。经T检验,当室外温度低于30℃时,NV模式下门窗均开时居民的平均热感觉(0.517)显著小于仅开窗或门时居民的平均热感觉(0.864)($P=0.024$),这说明较高的门窗开启率可以有效改善NV模式下居民的热感觉。在AC模式下,81.9%的居民会关闭所有门窗,然而,仍有18.1%的居民会打开门窗。这不利于节能,但也另一方面反映了居民对开启门窗这种被动式调节措施的偏爱。空调是一种快速而有效的调节室内热环境的措施。从2.6.4节可以看出,较高的室外温度是人们使用空调的驱动力之一。在2.6.1~2.6.2节中,大多数家庭使用空调是按需供冷^[8],大多数居民能够自主控制住宅建筑中空调的使用,而空调的使用位置、时间、开启和设定温度等使用行为会受到个体差异的影响。这反映了住宅居民使用空调的时空特征:个性化、差异化和多样化。在2.6.3节中,居民的空调使用模式是以“感觉热时打开空调”为主,同时在调研中也有43.4%的样本采用自然通风来调节室内热环境,体现了住宅中的居民对自然通风环境偏爱以及更倾向于低碳的空调使用模式的特点。

Nikolopoulou等^[25]指出具有较高的环境控制能力的人员能容受较大的温度变化范围,而且其负面感情反应也会被极大地减小。同时,环境控制能力直接影响了感知控制^[26],感知控制也是改善人体热舒适的重要因素^[27],这种改善是心理上的,即使没有实际使用所提供的控制^[28]。在实验室研究中,人们一般无行为调节机会;在自然通风住宅中,居民拥有服装调节、门窗使用、喝冷饮等调节机会;而在分体式空调住宅中,除上述调节机会外,居民还拥有空调这种快速而有效调节室内热环境的措施。因此,分体式空调住宅的行为调节机会更加多样也更为有效,居民对环境的控制程度较高,感知控制能力更强,这会导致居民对室内热环境更加宽容,从而在温暖环境中也能有较高的满意度。

SAC住宅中调节行为的多样性表明,居民可以通过各种行为调节措施来适应或调节建筑热环境,而不仅仅是建筑热环境的被动接受者^[29],尤其是空调的使用,可以迅速有效改善室内热环境,也从心理上提供了较强的感知控制,从而满足自身的热舒适需求。

3.2 室内外热经历对行为调节的影响

SAC住宅中存在着丰富的行为调节,然而居民的行为调节模式并不是一成不变的,而是随着他们所经历的室内外温度的变化而逐渐变化的^[5],即室内外热经历会显著影响居民的行为调节。此外,室内外热经历对不同调节行为的影响规律也不一致。

在2.4节中,居民的服装调节行为主要受室内热经历的影响,服装热阻的变化趋势表明即使在夏季服装调节范围非常有限的情况下,居民仍有对服装的调节行为。

在2.5节中,门窗开启行为主要受室内外热经历和建筑运行模式的影响。在AC模式下,随着室内热经历强度的增加,居民的门窗开启率以26℃左右为温度阈值随温度升高呈现先增加后降低的趋势,其中在操作温度为25~28℃范围内门窗开启率最高。而在NV模式下,门窗开启率随室内热经历强度的增加一直处于上升趋势,当操作温度超过30℃(居民的80%可接受温度上限)时,门窗开启率一直处于较高的值。这表明不同模式下的居民最大限度地采取门窗行为时的室内热经历强度并不一致。尽管住宅中较高的门窗开启率可以有效改善自然通风环境下居民的热感觉,但随着室外热经历强度的升高(如30℃以上)时,居民会选择关闭门窗,使用空调来改善自身热舒适(2.6.4节中空调使用率随室外温度的升高而增加),这也表明了室外热经历的强度会显著影响居民空调的使用。

在2.6.2节中,当室外温度超过阈值(30℃)时,居民的空调开启/设定温度均随着室外温度的升高而逐渐增加。分析空调开启/设定温度和月份的关系,如图11所示。经 T 检验,6月份的空调开启温度显著小于7、8月份($P < 0.05$),但7、8月份之间的空调开启温度无显著差异($P > 0.05$);8月份的空调设定温度显著高于6、7月份($P < 0.05$),但6、7月份之间的空调设定温度无显著差异($P > 0.05$)。以上分析表明随着室外热经历强度和作用时间的增加,居民逐渐适应了较高的室外

温度,空调开启/设定温度也在提高。室外热经历对空调开启温度造成影响需要的时间为1个月,而对空调设定温度造成影响则需要2个月,表明室外热经历对空调开启/设定温度造成显著影响的所需时间并不一致。当居民开启空调前,室内热环境处于自然通风状态,其直接受室外热环境影响,因此空调开启温度主要受室外热经历的影响。此外,居民开启空调时的设定温度主要受室外热环境的影响,但他们在空调使用期间可能根据室内热环境来即时地调整设定温度,此时空调设定温度会受到室内外热经历的共同作用,因此相比空调开启温度,室外热经历对空调设定温度造成显著影响的作用时间更久。

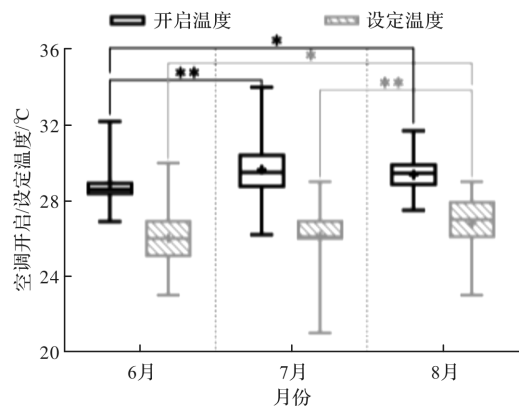


图11 空调开启/设定温度和月份的关系

Fig. 11 The relationship between air conditioning start/set temperature and month

Song等^[8]建立了天津居民的空调开启/关闭温度与室外气候变化的关系,并表明居民开启/关闭空调的决定与他们最近经历的室外气候条件相关。本研究从空调的开启/设定温度与室外热经历强度和作用时间之间的关系进一步为热适应模型的基本理论(人体热舒适区会根据室外的天气和季节性条件逐渐向较暖或较冷的温度区间偏移)^[30]提供了数据支撑。

分体式空调建筑中行为调节与室内外热经历密切相关,当室外温度适宜时居民采用自然通风调节室内热环境减少空调的使用,同时通过室外热经历的强度和作用时间提高人们对高温的适应性,进一步降低了空调的使用强度和作用时间,在满足热舒适的同时达到节能减碳的目的。此外,分体式空调还因人、因地、因时灵活使用,更好地满足居民的个性化、差异化和多样化需求。因此,将自然通风模式和空调模式相结合的分体式空调建筑是一种绿色、低碳、可持续的运行模式。

4 结论

本文通过分析焦作市室内外热经历作用下分体式空调建筑中居民的行为调节模式,研究其对热舒适的影响,得出以下结论:

(1)在调研期间,室内平均操作温度 28.6°C ,居民的中性温度为 27.7°C ,均高出GB 50736标准规定的夏季一级舒适度范围($24\sim 26^{\circ}\text{C}$)。然而,由于SAC住宅提供了丰富而有效的行为调节机会,居民具有较强的感知控制,他们不但可以采取这些措施来适应或调节室内热环境,而且从心理上对室内热环境更加宽容。因此,仍有超过80%的居民对自己的住宅热环境感到满意;

(2)NV模式下居民的平均服装热阻显著低于AC模式。居民的服装调节行为主要受室内热经历的影响。随着室内热经历强度的升高,服装热阻有降低的趋势,因此居民可以通过服装调节行为来有效地适应当前的热环境;

(3)在NV模式下,门窗均开的比例最高,达到48.2%,窗户开启的比例高达88.6%。而在AC模式下,仍有18.1%的居民会打开门窗,这不利于节能,但也另一方面反映了居民对开启门窗这种被动式调节措施的偏爱。门窗使用行为受室内外热经历的共同作用。当室外热经历强度在 30°C 以下,较高的门窗开启率可以有效改善NV模式下居民的热感觉。然而,当室外热经历强度超过 30°C 时,居民会选择关闭门窗,使用空调来改善自身热舒适;

(4)大多数家庭使用空调是按需供冷,而空调的使用位置、时间、开启和设定温度等使用行为会受到个体差异的影响。这反映了SAC住宅居民使用空调的时空特征:个性化、差异化和多样化。此外,居民的空调使用模式是以“感觉热时打开空调”为主,同时也有44.1%的样本采用自然通风来调节室内热环境,体现了住宅中的居民对自然通风环境偏爱以及更倾向于低碳的空调使用模式的特点;

(5)90%的居民会选择室内温度在 28°C 以上时开启空调,而设定温度在 26°C 及以上的比例占75.4%。随着室外热经历的强度和作用时间的增加,居民适应了较高的室外温度,空调开启/设定温度也在提高。然而,由于空调开启温度主要受室外热经历的影响,而空调设定温度受室内外热经历的共同作用,室外热经历对空调开启/设定温度造成显著影响的所需时间并不一致。

参考文献 References

- [1] 中国建筑节能协会, 2020年中国建筑能耗研究报告[R/OL]. 2020<https://www.cabee.org/site/content/24021.html>.
China Association of Building Energy Efficiency, China Building Energy Consumption Annual Report 2020 [R/OL]. 2020<https://www.cabee.org/site/content/24021.html>.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 民用建筑室内热湿环境评价标准: GB/T 50785—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. Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings; GB/T 50785—2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [3] FANGER P O. Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering[M]. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.
- [4] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
China Academy of Building Research. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings; GB 50736—2012[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012.
- [5] LIU H, WU Y X, LI B Z, et al. Seasonal variation of thermal sensations in residential buildings in the hot summer and cold Winter zone of China[J]. Energy and Buildings, 2017, 140: 9-18.
- [6] 闫海燕, 董梦如, 杨璐璐, 等. 夏季空调混合运行模式建筑室内热环境和人体热舒适研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(8): 41-49.
YAN Haiyan, DONG Mengru, YANG Lulu, et al. Study on indoor thermal environment and human thermal comfort of air-conditioned buildings with mixed mode operation in summer[J]. Building Science, 2021, 37(8): 41-49.
- [7] 刘艳峰, 刘露露, 王登甲, 等. 热湿地区居住建筑自然通风与空调耦合运行模式研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(10): 65-70.
LIU Yanfeng, LIU Lulu WANG Dengjia, et al. Coupling operation mode of natural ventilation and air conditioning for residential buildings in hot-humid area [J]. Heating Ventilating and Air Conditioning, 2018, 48(10): 65-70.
- [8] SONG Y R, SUN Y X, LUO S G, et al. Residential adaptive comfort in a humid continental climate-Tianjin

- China[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 170: 115-121.
- [9] D'OCA S, FABI V, CORGNATI S P, et al. Effect of thermostat and window opening occupant behavior models on energy use in homes[J]. *Building Simulation*, 2014, 7(6): 683-694.
- [10] IWASHITA G, AKASAKA H. The effects of human behavior on natural ventilation rate and indoor air environment in summer: A field study in southern Japan [J]. *Energy and Buildings*, 1997, 25(3): 195-205.
- [11] NICOL J F, HUMPHREYS M A. A stochastic approach to thermal comfort-occupant behavior and energy use in buildings[J]. *ASHRAE Transactions*, 2004, 110: 554-568.
- [12] RAJAN K, RIJAL H B, SHUKUYA M, et al. An in-situ study on occupants' behaviors for adaptive thermal comfort in a Japanese HEMS condominium [J]. *Journal of Building Engineering*, 2018, 19: 402-411.
- [13] LAI D Y, JIA S S, YUE Q, et al. Window-opening behavior in Chinese residential buildings across different climate zones [J]. *Building and Environment*, 2018, 142: 234-243.
- [14] CHEN S Q, WANG X Z, LUN I, et al. Effect of inhabitant behavioral responses on adaptive thermal comfort under hot summer and cold winter climate in China [J]. *Building and Environment*, 2020, 168: 106492.
- [15] MORGAN C, DEAR R D. Weather, clothing and thermal adaptation to indoor climate[J]. *Climate research*, 2003, 24(3): 267-284.
- [16] Global ABC, IEA, UNEP. Global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector [R]. Newyork: United Nations Environment Programme, 2019.
- [17] 中国建筑科学研究院. 民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016. China Academy of Building Research. Code for thermal design of civil building:GB 50176—2016[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2016.
- [18] ASHRAE, Thermal environmental conditions for human occupancy, ASHRAE standard 55—2020 [S]. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2020.
- [19] WYON D P, 张宇峰. 室内环境研究的方法论[J]. 暖通空调, 2006, 36(5): 51-54. WYON D P, ZHANG Yufeng. Methodology for indoor environmental research [J]. *Heating Ventilating and Air Conditioning*, 2006, 36(5): 51-54.
- [20] I. ISO. Ergonomics of the thermal environment, instruments for measuring physical quantities 7726-1998 [S]. Geneva: International Standard Organization, 2001.
- [21] 刘斌, 牛润萍, 魏绅. 北京地区夏季空调使用行为测试分析[J]. 建筑学报, 2017(3): 114-117. LIU Bin, NIU Runping, WEI Shen. An analysis of the use of air conditioners in summer in Beijing [J]. *Architectural Journal*, 2017(3): 114-117.
- [22] JACK B. Indoor thermal comfort: The behavioral component[J]. *Sustainability*, 2013, 5(4): 1680-1699.
- [23] ZHANG Z J, ZHANG Y F, JIN L. Thermal comfort in interior and semi-open spaces of rural folk houses in hot-humid areas[J]. *Building and Environment*, 2018, 128(15): 336-347.
- [24] RIJAL H B, HUMPHREYS M A, NICOL J F. Adaptive thermal comfort in Japanese houses during the summer season: Behavioral adaptation and the effect of humidity[J]. *Buildings*, 2015, 5(3): 1037-1054.
- [25] NIKOLOPOULOU M, STEEMERS K. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces[J]. *Energy and Buildings*, 2003, 35(1): 95-101.
- [26] LUO M H, CAO B, Zhou X, et al. Can personal control influence human thermal comfort? A field study in residential buildings in China in Winter [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 72: 411-418.
- [27] LUO M H, CAO B, JI W J, et al. The underlying linkage between personal control and thermal comfort: Psychological or physical effects? [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 111: 56-63.
- [28] BOERSTRA A A, LOOMANS M M, HENSEN J J. Perceived control over indoor climate and its impact on Dutch office workers[C]//Proceedings Healthy Buildings, Eindhoven: M. G. L. C. Loomans, 2015.
- [29] DEAR R D, BRAGER G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference[J]. *Ashrae Trans*, 1998, 104(1): 73-81(9).
- [30] HUMPHREYS M A, NICOL J F. Understanding the adaptive approach to thermal comfort [J]. *Ashrae Trans B*, 1998, 104(1): 991-1004.

(编辑 吴海西 沈 波)