

DOI:10.11918/202009020

人员热适应对住宅全年供暖、供冷需求影响 ——以重庆为例

杜晨秋¹, 李信仪², 喻伟¹, 姚润明¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228)

摘要: 为研究住宅建筑中人员适应性调节及热舒适需求动态变化对其全年建筑供暖、供冷能耗影响, 首先通过分析夏热冬冷地区典型城市—重庆住宅全年热环境调研数据(样本量 2 151 份), 揭示了居民全年舒适温度随室外温度呈 S 型变化特性, 进而得到了基于人员适应性和动态热舒适的住宅全年供暖、供冷起止时间和动态温度设计参数。结合 EnergyPlus 建立了典型样本建筑模型(三人户, 建筑面积 105 m²), 分析了在执行 JGJ134—2010《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》基础上, 基于人员热适应和温度动态调节下的住宅全年供暖、供冷节能潜力。模拟结果表明: 住宅全年自然通风情况下室内热环境处于舒适区间(18~26℃)的比例仅占 32.2%, 采用传统供暖、供冷设定温度(18~26℃)下住宅全年舒适小时比例增加至 62.87%, 而基于人员适应性的供暖、供冷温度动态调节下舒适比例进一步增加 5.45%; 采用传统温度设计下住宅全年供暖、供冷单位面积能耗分别约为 8.93、17.18 kWh/m², 相比采用温度动态调节下全年单位面积供暖、供冷能耗显著降低, 分别为 7.78、12.96 kWh/m², 节能量达 20.6%, 且供冷节能潜力更大。

关键词: 住宅建筑; 人员适应性; 动态舒适温度; 供暖、供冷设计温度; 节能潜力

中图分类号: TU119+.5 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2022)06-0138-09

Effect of occupant dynamic thermal adaption on residential heating and cooling demands in Chongqing

DU Chenqiu¹, LI Xinyi², YU Wei¹, YAO Runming¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: The effects of thermal adaption and dynamic demands for thermal comfort of occupants on heating and cooling energy consumption in residential buildings were explored. First, taking Chongqing as a typical city in the hot summer and cold winter zone, a thermal environment database for residences (sample size 2 151) was analyzed, and the S-shaped variation trend of annual comfort temperatures of occupants with outdoor temperatures was revealed. Then, the annual heating and cooling periods and the dynamic temperature settings for residences were determined based on the thermal adaption and dynamic comfort of occupants. Lastly, a typical reference residence was established by using EnergyPlus, with a family number of three and building area of 105 m². According to the design requirements of the JGJ 134—2010 standard, the annual energy saving potential for heating and cooling in residential buildings was analyzed based on the thermal adaption and dynamic demands of occupants. Results show that under annually natural ventilation condition, only 32.2% of thermal environment was distributed in the comfort zone (18–26℃). With the traditional heating and cooling temperature design (18–26℃), the proportion was increased to 62.87%, and it was further increased by 5.45% under dynamic temperature settings. The annual energy consumptions per area for traditional heating and cooling temperature settings were nearly 8.93 kWh/m² and 17.18 kWh/m². While the dynamic temperature settings significantly reduced the annual energy consumptions for heating and cooling, with the values of 7.78 kWh/m² and 12.96 kWh/m² respectively. The annual energy saving was up to 20.6%, and the energy saving potential for cooling was greater.

Keywords: residential buildings; occupant adaption; dynamic comfort temperature; heating/cooling design temperature; energy saving potential

收稿日期: 2020-09-03

基金项目: 十三五国家重点研发计划项目(2016YFC0700301)

作者简介: 杜晨秋(1990—), 女, 副教授;

喻伟(1984—), 男, 教授, 博士生导师;

姚润明(1963—), 女, 教授, 博士生导师

通信作者: 杜晨秋, duchenqiu90@163.com

夏热冬冷地区由于典型的夏季炎热、冬季寒冷、全年高湿的气候特点, 室内热环境较差, 尤其是冬季, 使得该地区改善室内热环境的呼声日益强烈。据统计, 2001—2011 年该地区仅供暖电耗已经从 77 亿 kWh 增加到 414 亿 kWh, 而且随着家庭收入增

加和人们舒适度提高,预计将来会持续增加^[1],这将对中国建筑碳排放达峰产生重要影响。因此,如何平衡人员热舒适需求和建筑节能减排压力,已成为该地区建筑可持续发展的关键问题。

根据适应性理论,夏热冬冷地区人员由于长期生活在该地区独特的气候特征和建筑特性背景下,已经通过生理适应、心理期望和行为调节,适应了该地区的气候和室内环境,其对环境的容忍度和可接受度也更高^[2-3]。加上住宅中人员适应性调节行为更加多样,包括开窗通风、增减衣服、使用风扇、空调等^[4],其热舒适区间更广^[3,5-7]。Du等^[8]分析了夏热冬冷地区住宅人员全年适应性调节行为(服装/开窗)等随室外温度的变化,发现即使同样的室内温度下,由于前期人员热经历,人员服装热阻和室内风速在秋季和春季也存在一定差异。Liu等^[9]调研了该地区住宅建筑全年不同季节人员适应性随室内热环境的变化,结果显示该地区居民全年热中性温度在夏季较高(24.25℃),冬季较低(21.02℃),而过渡季节的中性温度则在冬季和夏季之间,表明人员的真实热舒适需求是随着室外气候和季节而动态变化的。即使在供暖期间,Wang等^[10-11]对严寒地区冬季住宅调研发现,随着供暖的深入,室内平均温度高于24℃的频率逐渐增加,供暖初期、中期和后期人员的热中性温度分别为21.6、23.5、23.1℃。同样,一项对教室的调研分析也显示,人员的热中性温度会随着供暖时间推移发生变化,冬季和春季的热中性温度存在显著差异,冬季的热中性温度要低于春季,因此同样的供暖温度设定引起更多人员不舒适。而Hoyt等^[12]采用模拟的方法模拟了美国4个城市办公建筑在调节温度设定策略下全年空调能耗:当供冷温度从22.2℃增加到25.0℃,供冷能耗可节约29%;供暖温度从21.1℃降低到20.0℃,其供暖能耗可节省34%。进一步将温度设定区间扩大到18.3~27.8℃,空调系统节能潜力可达32%~73%。上述研究表明,真实环境中人员的热舒适需求是随着室外气候、季节和自身适应性而动态变化的,这一特性会对室内实际供暖空调用能需求和节能潜力产生显著影响。

但是,现有关于供暖空调温度调节的研究主要以结果导向,研究对象多以公共建筑为主,假定人员的适应性可以拓宽舒适温度区间,进而研究温度动态调节下的节能潜力。对于其温度调节策略的理论依据,这一调节策略是否满足人员真实热舒适需求等,缺少理论依据和支撑。针对该问题,本文首先以夏热冬冷地区典型城市—重庆为例,基于课题组建立的重庆住宅建筑全年热环境数据库,探讨该地区

居民在充分发挥自身适应性基础上,其全年热舒适随时间的动态变化特性,从而确定基于舒适温度动态变化的全年供暖空调调控策略。在此基础上,利用EnergyPlus建立重庆地区典型住宅样本建筑模型,在执行该地区最新版JGJ134—2010《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》^[13]基础上,模拟住宅分别采用传统供暖空调温度设计(18~26℃)和基于人员动态适应性和温度动态调节设计的全年室内热环境,分析其动态温度调节的节能潜力。研究结果有助于进一步认识该地区人员长期形成的热适应性对其舒适需求的影响,量化得到的全年舒适温度动态变化特性可为该地区住宅室内热环境营造和最优供暖空调动态调控提供一定理论基础和研究参考,实现在满足人员热舒适需求的同时最大化建筑节能潜力。

1 住宅人员全年动态热舒适需求

1.1 住宅热环境数据库

笔者所在课题组前期对夏热冬冷地区6个典型城市的住宅建筑开展了超过一年的入户调研。调研同时涵盖了室内热环境参数测量和居民主观问卷调查,具体调研方法可参考文献[9~14]。需要指出的是,使用局部供暖、供冷设备,比如风扇、空调、暖气等,均可看作居民适应性行为调节,且会显著影响其主观舒适度。前期调研中通过设置问题“此时,您是否开启供暖空调设备?如果是,请选择设备__”和“采用空调供暖/供冷时,其设定温度为__”来反映人员适应性行为调节,具体请参考文献[8]。本文选择典型城市—重庆为例,在数据筛选中也包含这些样本案例。经初步统计,剔除一些缺失主要信息的样本,得到的重庆地区住宅调研有效样本数为2151份,涵盖全年12个月,且每个月样本量近似。

现有标准ASHRAE 55^[15]、GB/T 50785^[16]等建立的适应性模型,主要基于自然通风建筑,给出人员舒适温度随室外月平滑或周平滑温度线性变化关系,但温度变化范围较窄(约10~30℃)。在该范围内,人员可以充分发挥适应性调节来改善自身热舒适。然而,对于夏热冬冷地区典型夏热、冬冷气候特点,冬季和夏季环境下人员的适应性调节能力有限,其舒适温度是否仍随室外温度线性变化尚不明晰。因此,本文主要基于数据库中全年室内热环境参数(室内/室外空气温度)和人员热感觉投票(ASHRAE 55^[15] 7级标尺, -3~+3),分析人员全年舒适温度随室内外温度变化特性,进而给出该地区全年供暖空调动态温度设计。

1.2 人员全年舒适温度动态变化

考虑全年不同季节、不同时间人员适应性的动态变化,本文将调研数据根据月份分为 12 批次。人员舒适温度根据 Griffiths 法^[17] 计算,见式(1)。Griffiths 方法中 G 值实际上反映了在无热适应情况下,热感觉投票随室内操作温度变化的敏感程度。Nicol 等^[18] 提出 G 取 0.5 较合理,表示室内操作温度变化 2 °C 对应平均热感觉投票变化一个刻度,本文亦取 G 值为 0.5。

$$C - 0 = G(T_{op} - T_c) \quad (1)$$

式中: C 为热感觉投票值; G 为 Griffiths 常数, °C⁻¹; T_{op} 为操作温度, °C, 本文近似等于空气温度; T_c 为舒适温度, °C。

利用 G 值、热感觉投票值 C 以及 T_{op} 即可计算人员单个热感觉投票对应的舒适温度 T_c 。考虑人员舒适温度受室外气候变化显著,这里进一步采用温频法,取 1 °C 温度间隔,计算每月每个温度区间内对应的人员平均舒适温度 T_c ,绘制如图 1 所示。从图 1 可以看出,室外温度在 10 ~ 15 °C 范围内变化时,人员的舒适温度随室外温度的增加而升高,且呈显著的线性关系。然而,图 1 显示当室外温度高于 30 °C,其人员舒适温度逐渐降低,当室外温度低于 10 °C,人员舒适温度逐渐升高,两者的线性关系不再显著。

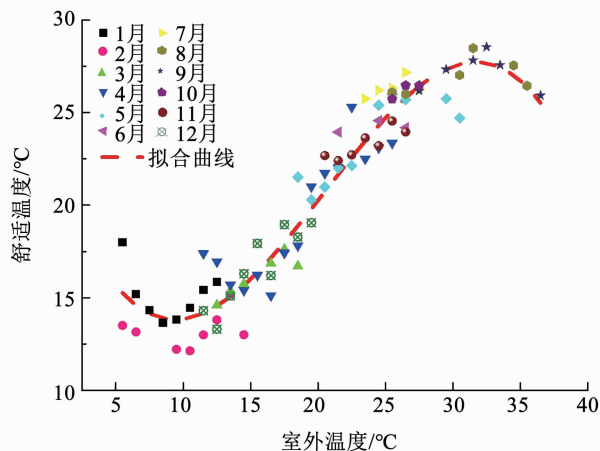


图 1 人员舒适温度随室外温度动态变化

Fig. 1 Variation of comfort temperatures with outdoor temperatures

采用多项式拟合得到人员舒适温度 T_c 随室外温度 T_{out} 变化的回归模型表示为

$$T_c = 23.34 - 2.24T_{out} + 0.15T_{out}^2 - 0.003T_{out}^3 \quad (R^2 = 0.9) \quad (2)$$

式中: T_c 为舒适温度, °C; T_{out} 为室外空气温度, °C。

1.3 基于人员热适应的供暖、供冷调节策略

由图 1 可以看出,重庆住宅中由于人员适应性调节,其全年舒适温度随室外气候动态变化,这必然

影响其供暖、供冷期间人员的真实热舒适需求。考虑到不同时期、不同年份室外温度变化不同,在提出基于人员适应性热舒适的供暖、供冷温度设计时,为使分析更具代表性,选择典型气象年室外温度作为基准参考,结合式(2),可以计算得到人员全年舒适温度变化,如图 2 中蓝色虚线所示。结合图 1,由于人员在冬季和夏季的舒适温度并不随室外温度线性变化,因此图 2 仅给出了过渡季节人员舒适温度变化。同时,对于需要辅助供暖、供冷时期,结合图 1 舒适温度变化趋势,确定住宅供暖、供冷起止时间及适宜设计温度,如图 2 所示。具体来讲,图 2 中供暖起始时间为室外日均温度低于 16 °C,供暖结束时间为 2 月 28 日。此外,考虑人员适应性引起的舒适温度变化(图 1),在供暖初期推荐设定温度 16 °C。随着供暖的深入,由于室外温度降低,人员的适应性无法满足自身热舒适,而图 1 显示温度低于 10 °C 时,人员的舒适温度反而提高,因此此时推荐供暖温度提高到 18 °C。同样,对于夏季供冷,供冷初期由于人员的适应性,其供冷起始时间为室外日均温度高于 28 °C,设计温度为 28 °C。随着供冷的深入,室外温度逐渐升高,而人员的舒适温度逐渐减低。因此,当供冷中期室外日均温度高于 26 °C 时,此时推荐供冷设计温度调整为 26 °C。供冷后期,由于人员夏季热经历,当室外日均温度低于 28 °C 时,停止供冷,基于人员的适应性调节即可满足人员舒适需求。此外,根据重庆市标准 DBJ50-071-2016《居住建筑节能 65% (绿色建筑) 设计标准》^[19],重庆地区的供冷计算期为 6 月 1 日 ~ 9 月 30 日,供冷温度 26 °C,供暖计算期为 12 月 1 日 ~ 2 月 28 日,供暖温度 18 °C。因此,图 2 同时也给出了传统供暖、供冷的设计温度和起止时间。

综上所述,结合人员动态适应性和热舒适需求的变化,提出重庆住宅供暖、供冷温度动态调节策略如下:

1) 夏季:6 月 15 日 ~ 7 月 15 日,室内温度高于 28 °C 开启空调,空调设定温度为 28 °C; 7 月 15 日 ~ 8 月 31 日,室内温度高于 26 °C 开启空调,空调设定温度为 26 °C; 9 月 1 日 ~ 9 月 15 日,室内温度高于 28 °C 开启空调,空调设定温度为 28 °C。

2) 冬季:11 月 15 日 ~ 12 月 15 日,室内温度低于 16 °C 开启空调,空调设定温度为 16 °C; 12 月 15 日 ~ 2 月 15 日,室内温度低于 18 °C 开启空调,空调设定温度为 18 °C; 2 月 15 日 ~ 2 月 28 日,室内温度低于 16 °C 开启空调,空调设定温度为 16 °C。

相比,传统供暖、供冷设计以室内温度 18 ~ 26 °C 作为供暖、供冷边界条件,即在室内温度超过 26 °C 时考虑供冷,低于 18 °C 时考虑供暖。

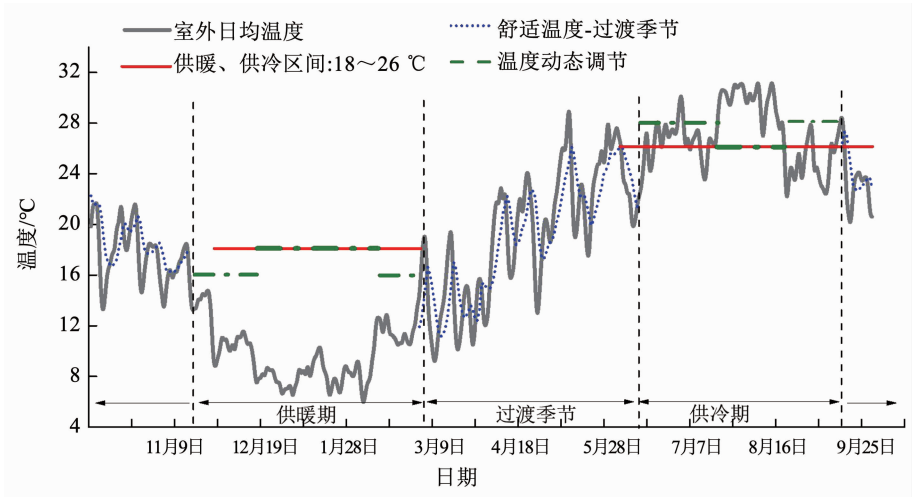


图 2 住宅全年室内供冷、供暖温度设计

Fig. 2 Annual temperature design for heating and cooling in residences

2 住宅样本建筑能耗模拟

2.1 住宅建筑样本模型

为进一步探讨采用动态温度调节下住宅全年供暖、供冷节能潜力,选择重庆一户住宅作为典型样本建筑开展模拟分析。根据 2010 年重庆市人口普查数据^[20],重庆地区上班族夫妇+一个小孩为主要家庭结构之一,比例占 26.26%。因此这里以该类家庭结构为对象进行样本建筑建模。此外,结合重庆地区居住建筑典型户型布局 and 人均居住面积统计(重庆城镇人均居住建筑面积约为 35 m²),两室一厅为该家庭结构常见户型,因此选择典型户型为两室一厅,总面积 105 m²,具体平面布局如图 3 所示,且各不同功能房间面积满足 GB 50096—2011《住宅设计规范》^[21]规定的最小面积要求。为简化相关因素的影响,使模拟的住宅样本更具代表性,本研究选择典型家庭户位于建筑中间层,含有 3 面外墙和 1 面内墙,入户门位于内墙。

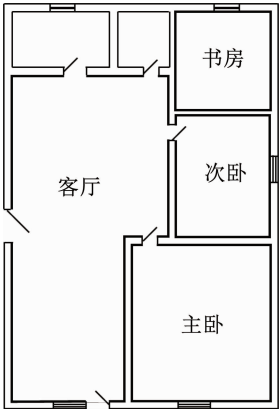


图 3 住宅建筑样本模型平面图

Fig. 3 Layout of reference residence model

首先,根据 JGJ 134—2010《夏热冬冷地区居住

建筑节能设计标准》^[13],确定模拟的建筑热工参数输入,见表 1。此外,为简化模拟过程,建筑所有内围护结构内表面(包括内墙、楼板和天花板)均设置为绝热表面。

表 1 居住建筑围护结构与热工性能

Tab. 1 Thermal performance of building envelopes in residences

建成年代	围护结构			换气 次数/h
	外墙	外窗	换气	
	传热系数/ (W·(m ² K) ⁻¹)	传热系数/ (W·(m ² K) ⁻¹)	太阳得热 系数 SHGC	
2010 年后	0.83	2.67	0.34	1

参考文献[20],建筑内部得热情况设置如下:居住建筑人工照明密度设置为 6 W/m²,设备密度设置为 4.3 W/m²,人员在室时间情况见表 2,同时考虑人员典型的工作/上学时间段安排和睡眠习惯,当室内人员处于非睡眠状态时,在 17 点后开启人工照明。

表 2 不同房间类型的人员在室时间表

Tab. 2 Occupancy timetable for residents in different types of rooms

房间类型	0:00 ~ 8:00	8:00 ~ 12:30	12:30 ~ 14:00	14:00 ~ 17:00	17:00 ~ 22:00	22:00 ~ 24:00
卧室—上班/ 上学人员	Y. S *	N	N	N	N	Y. N *
客厅—上班/ 上学人员	N *	N	Y. N	N	Y. N	N

注: * N 为无人;Y. N 为有人使用且非睡眠状态;Y. S 为有人使用且处于睡眠状态。

2.2 供暖、供冷设计及模拟输出

传统建筑热环境营造多以室内温度 18 ~ 26 °C

作为供暖、供冷使用的判定依据,并未细化考虑不同舒适需求对住宅供暖、供冷的影响,因而并不能真实反映该地区居住建筑用能情况。结合上述分析得到的人员动态舒适温度变化(图1)和温度动态调节策略(图2),本文在模拟设置时进一步细化供暖、供冷设定温度,具体参数设置情况如下:

1) 每日供暖、供冷时段设置:考虑人员在厨房、卫生间等区域停留时间有限,且这些房间一般未安装空调对其室温进行控制,所以这里仅针对两个卧室和客厅的供暖、供冷使用情况开展模拟计算,同时仅在有人使用时间段内开启供暖、供冷设备。其不同类型房间供暖、供冷使用时段如下。

① 工作日。客厅:周一至周五,中午 12:30 ~ 14:00,晚上 17:00 ~ 22:00;卧室:周一到周五,晚上 22:00 ~ 8:00(次日)。

② 周末。默认在室率 100%。

2) 供暖、供冷起止时间及相应温度设定:根据基于人员热适应的供暖、供冷调节策略得到的供暖、供冷起止时间和各时间段推荐温度进行输入设置。同时,选择传统供暖、供冷设计温度 18 ~ 26 °C 和推荐供暖、供冷时间分别进行模拟。

本文采用 EnergyPlus 对住宅样本的全年逐时负荷进行模拟计算,选择中国标准气象数据集(CSWD)中的重庆沙坪坝气象站数据作为模拟的典型气象年数据。模拟设置 3 种情景:住宅样本全年自然通风和两种供暖、供冷温度设计模式(传统/动态温度设置),输出住宅室内各个功能房间温湿度,以及供暖、供冷逐时负荷等数据(8 760 h)。为了进一步分析住宅室内不同时期、不同设定温度对住宅全年供暖、供冷运行能耗的影响,本文将模拟得到的供暖、供冷累计负荷数据换算为千瓦时,并折算为供暖空调耗电量进行分析讨论。考虑到住宅中人员多采用分体式房间空调器作为供暖、供冷主要设备,根据 JGJ 134—2010《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》推荐^[13],采用动态计算法计算空调年耗电量时,房间空调器制冷季节能源消耗效率(SEER)取 2.3,制热季节性能系数(HSPF)取 1.9。

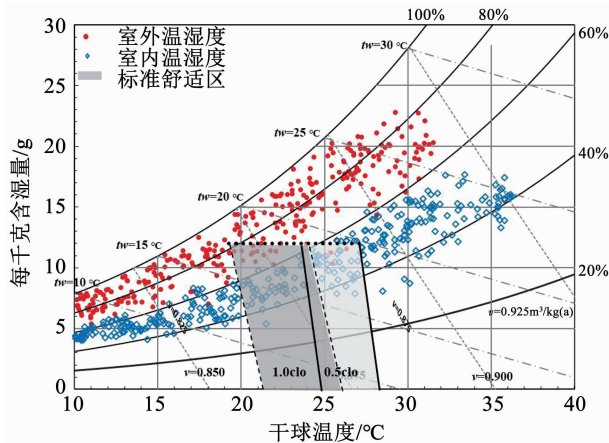
3 模拟结果及分析

3.1 不同运行模式下住宅样本室内热环境

3.1.1 自然环境下住宅室内温湿度分布

这里以模拟住宅典型主卧为例(图3),由于模拟输出的是自然环境下全年 8 760 h 的房间温湿度逐时数据,首先以 d 单位,计算其卧室全年 365 d 室内平均空气温度和含湿量,并绘制在焓湿图上,如图4所示。此外,图4中阴影区间为 ASHRAE55—

2017^[15]标准推荐的供暖、供冷环境下人员热舒适区间。从图4可以看出,重庆地区室外温度全年基本都在舒适区外,且全年含湿量较高(靠近 100% 相对湿度线)。相比,由于建筑节能设计标准提高了围护结构热工性能,其室内热环境明显改善。以传统舒适区间 18 ~ 26 °C 为例,统计得到全年室内温湿度散点位于区间内的比例为 32.2%,低于 18 °C 和高于 26 °C 的比例分别为 33.0% 和 34.7%。这也反映了建筑围护结构热工性能的提高会显著改善室内热环境,从根本上降低室内供暖、供冷需求。



高、冬季热负荷低的特点,表明该地区住宅室内全年仍主要以供冷为主。进一步对比,两种模式也存在一定的差异,一是两种模式的供暖、供冷起止时间不同,二是在供暖、供冷的初期和后期由于设置温度差异,其负荷分布也呈现一定的差异:由于降低了冬季供暖温度,提高了夏季供冷温度设置,因而相对负荷需求降低。

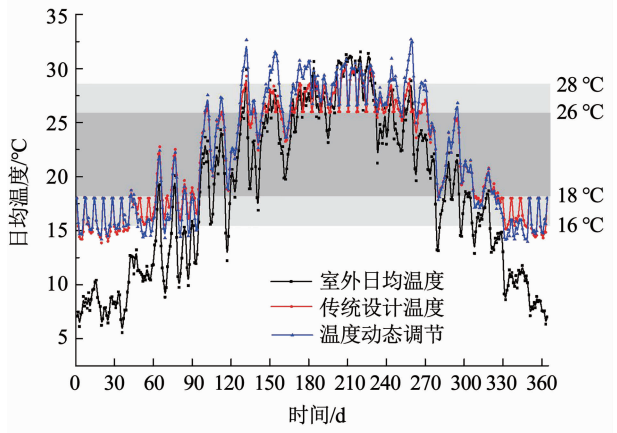


图5 不同供暖、供冷模式下全年室内、外日均温度分布
Fig. 5 Daily mean temperature distribution under different heating and cooling modes

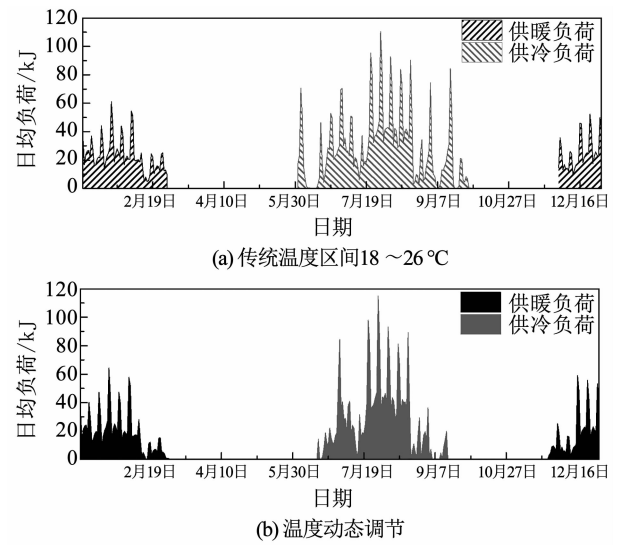


图6 不同模式下住宅全年供暖、供冷负荷分布
Fig. 6 Heating and cooling load distribution in residence under different modes

3.2.2 温度动态调节下供暖、供冷节能潜力

对于住宅建筑,人员对室内环境具有较大的适应性和较高的容忍度,其热舒适需求也随着室外气候和自身热调节而变化^[5-9]。因此,采用传统的恒定供暖、供冷设计参数,不仅无法满足人员真实动态热舒适需求,还会引起不必要的能源浪费。进一步计算两种模式下住宅建筑单位面积年均能耗(注:1)厨房、卫生间未供暖、供冷;2)建筑面积 105 m²;3)供暖 HSPF 1.9,供冷 SEER 2.3),如图7所示。可以

看出,对于传统供暖、供冷设计,其模拟的夏季建筑年均单位面积能耗为 17.18 kWh/m²,冬季为 8.93 kWh/m²,全年累计单位面积能耗为 26.12 kWh/m²。相比,采用温度动态调节后,不仅在满足全年人员舒适的比例增加,而且其全年供暖和供冷能耗有显著降低,夏季供冷能耗降低到 12.96 kWh/m²,冬季供暖能耗降低到 7.78 kWh/m²,全年累计总能耗为 20.74 kWh/m²。相比传统温度设计 18 ~ 26 °C,其节能潜力达 20.6%,且供冷的节能潜力更大。这可能是由于重庆冬季室外温度较低,因而室内低于 18 °C 的时间相对较长,因而采用传统设计参数和采用动态设计参数的供暖时长相差不多,两种情况下供暖单位面积能耗差别不大,节能潜力较小,这也侧面反映了该地区现有住宅建筑冬季室内环境较差,亟待改善。

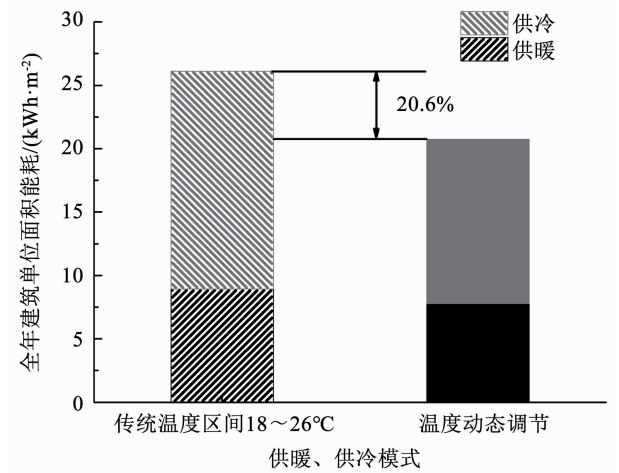


图7 不同供暖、供冷温度设计下住宅全年总能耗
Fig. 7 Comparison of annual energy consumptions under different heating and cooling modes

4 讨论

2016 年国家十三五重点研发计划“绿色建筑及建筑工业化”专项中专门立项“长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统”(项目编号:2016YFC0700300)”重点研发计划项目,提出了“住宅全年供暖通风空调能耗控制在 20 kWh/ m² · 年以内”的定量目标,明确了该地区住宅建筑供暖空调通风的能耗强度限额^[22]。本文通过考虑人员全年动态适应性变化,确定了人员全年舒适温度(图1),同时基于人员适应性提出了全年供暖、供冷起止时间和适宜温度设置(图2),并通过住宅典型情景模拟分析了其节能潜力(图7)。

可以看出,基于传统的供暖、供冷设计参数,全年室内舒适小时数比例由原来的 32.2% 增加到 62.87% (图5),但其住宅单位面积能耗超过 20 kWh/ m² · 年的能耗限额要求。相比,图7显示

在采用动态温度调节策略下,在保证人员室内全年舒适小时数比例相比传统温度设计增加 5.45% 的基础上,其住宅全年供暖、供冷能耗却有显著降低,已经接近住宅能耗限额标准。需要说明的是,对于夏热冬冷地区来讲,其住宅室内供暖、供冷多是间歇运行模式,围护结构热工性能是影响建筑能耗的一个关键因素。王者^[23]采用热电类比方法建立房间尺度动态传热模型,分析了对流和辐射末端在间歇供暖下的动态热过程,并结合实验对比和模型验证,指出间歇供暖下对流末端在舒适性和能耗方面都具有显著优势,但间歇供暖的启动负荷远大于稳定负荷,甚至高于连续供暖的寒冷地区。因此,对于耦合建筑围护结构动态传热特性和动态温度调节对于住宅供暖、供冷运行能耗影响,还需要进一步的研究。此外,Yao 等^[24]以夏热冬冷地区 3 个典型城市(重庆、长沙、上海)为例,分析了采用不同被动技术优化方案下,住宅建筑全年供暖空调时间、延长非供暖空调时长,以及供暖空调能耗,评价了各种被动策略在该地区实施的节能潜力。相比,本文得到的全年预测能耗主要基于执行夏热冬冷地区建筑节能设计标准的基本要求,限于研究目标和文章篇幅,未综合建筑被动优化技术的影响。再者,本文在进行全年供暖和空调耗电量计算时以 2010 版本标准推荐的 SEER(2.3)和 HSPF(1.9)为基准,得到的是在不考虑主动技术优化条件下的预测值。实际上,近年来随着各种节能高效空调技术研发和产品能效等级提高,房间空调器的制冷季节能源效率和制热季节性能系数两个指标都有显著提升,这将进一步提高住宅室内实际供暖、供冷效率,降低全年运行能耗。因此,未来综合被动技术优化、主动设备性能提升,以及人员动态适应性和热舒适需求,其可以预测住宅全年供暖空调能耗将会进一步降低,在保障人员全年热舒适的基础上,实现住宅建筑供暖空调通风能耗限额目标。

此外,由于该地区人员使用空调具有部分时间、部分空间的特点^[25],且使用空调的行为灵活多样,其使用起止时间、设定温度、使用时长等,理论上与模拟都会有一定差异。陈金华等^[26]通过对重庆地区住宅冬季供暖现状调研,结果显示居民冬季采用空调供暖的比例仅占 6.8%,平均每天使用时长约为 2~4 h。相比,本文根据人员舒适温度的变化,模拟了供暖、供冷前期、中期、后期不同温度设定下的全年供暖、供冷能耗,假定的是满足人员在室情况下,当室内热环境不满足设计标准时,会自动开启空调设备并根据时间确定供暖、供冷温度进行调节,得到的是理想工况下结果。而实际上,对于住宅建筑,

不同于办公建筑有一致的使用时间和使用模式,即使室内热环境不在舒适区间内,居民也可能不使用供暖、供冷设备,而采用其他方式进行调节。例如,Cui 等^[27]调研发现,39% 的居民只有在感到冷的时候才会开启空调供暖。此外,家庭结构是影响人员在室率和住宅用能的一个重要因素^[25]。例如,家中有老人的家庭结构其人员在室率显著高于父母+孩子的核心家庭^[28],且老人对供暖、供冷喜好温度与年轻人相比也有较大差异^[29-31],这些都会引起本研究模拟得到的建筑能耗与实际住宅用能之间存在差异。杜晨秋等^[32]通过对重庆地区典型住户全年空调能耗的连续监测,指出该地区居民使用空调主要发生在夏季供冷,且耗电量远大于供暖,其全年累计总耗电量约为 448 kWh,其结果与赵秉文等^[33]对于夏热冬冷地区杭州住宅的全年空调能耗监测结果近似,但都低于本研究模拟得到的结果。因此,未来模拟可以进一步考虑住宅家庭结构、人员在室、经济文化背景等因素,完善模拟设置,量化评价不同因素对住宅建筑用能的影响。此外,随着各种实时监测技术和云数据平台的开发,通过空调内置传感器监测用户空调使用行为^[34-35]、通过机器学习等建立用户空调使用概率模型^[32,36-37]等逐渐成为研究热点,有助于研究学者进一步明晰并量化用户的空调用能行为,为建筑能耗模拟提供更精确、真实的模拟设置,使模拟建筑能耗尽可能逼近真实住宅用能成为可能。

综上所述,本文通过理论分析,将人员适应性行为调节量化反映到全年人员动态热舒适需求变化,并将人员这种对环境的热适应性通过动态温度设计和供暖、供冷能耗加以量化和评价,可为该地区建筑充分发挥人员适应性、更加精细化供暖空调运行调节提供一定的理论参考。未来该地区可以通过制定政策、标准、宣传等,引导居民合理用能,优化提高室内供暖、供冷运行效率,减少不必要的能源消耗,这将对满足该地区住宅室内热环境改善的民生需求和实现建筑能源消费总量控制和节能减排都具有重要意义。

5 结 论

1) 基于重庆住宅建筑全年热环境调研数据库(样本量 2 151)分析,住宅人员全年舒适温度在 10~30℃ 内随室外温度线性增加,而低于 10℃ 人员舒适温度提高,高于 30℃ 人员舒适温度降低,进而得到了基于人员适应性和舒适温度动态变化的全年供暖、供冷起止时间和设定温度。

2) 结合 EnergyPlus 建立住宅典型样本建筑物理

模型(三人户,两室一厅,105 m²),模拟得到住宅自然环境下全年室内温度在 18 ~ 26 ℃ 内的比例约为 32.2%;采用传统设定温度(供暖 18 ℃,供冷 26 ℃)使得全年室内舒适小时数比例增加到 62.87%,而采用温度动态调节后全年舒适小时数比例进一步增加了 5.45%。

3)模拟得到重庆地区住宅夏季供冷负荷强度要显著高于冬季供暖负荷强度;基于传统温度设计(18 ~ 26 ℃)的住宅全年供暖和供冷单位面积能耗分别为 8.93、17.18 kWh/m²;基于人员适应性和温度动态调节下全年单位面积供暖、供冷能耗显著降低,分别为 7.78、12.96 kWh/m²,节能量达 20.6%,且供冷节能潜力更大。

参考文献

[1]清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013
Tsinghua University Building Energy Research Center. 2013 Annualreport on china building energy efficiency [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013

[2]LI Baizhan, TAN Meilan, LIU Hong, et al. Occupant's perception and preference of thermal environment in free-running buildings in China[J]. Indoor and Built Environment, 2010, 19(4): 405. DOI: 10.1177/1420326X10377545

[3]LI Baizhan, DU Chenqiu, YAO Runming, et al. Indoor thermal environments in Chinese residential buildings responding to the diversity of climates[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 693. DOI: 10.1016/j.applthermaleng. 2017.10.072

[4]HUCHUK B, O'BRIEN W, SANNER S. A longitudinal study of thermostat behaviors based on climate, seasonal, and energy price considerations using connected thermostat data[J]. Building and Environment, 2018, 139: 199. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.05.003

[5]YAN Haiyan, MAO Yan, YANG Liu. Thermal adaptive models in the residential buildings in different climate zones of Eastern China [J]. Energy and Buildings, 2017, 141: 28. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.02.016

[6]郑武幸. 气候的地域和季节变化对人体热适应的影响与应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017
ZHENG Wuxing. The impact of regional and seasonal climate changes on human thermal adaptability and its application [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017

[7]ZHANG Yufeng, WANG Jinyong, CHEN Huimei, et al. Thermal comfort in naturally ventilated buildings in hot-humid area of China [J]. Building and Environment, 2010, 45(11): 2562. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.05.024

[8]DU Chenqiu, LI Baizhan, YU Wei, et al. Energy flexibility for heating and cooling based on seasonal occupant thermal adaptation in mixed-mode residential buildings[J]. Energy, 2019, 189: 116339. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116339

[9]LIU Hong, WU Yuxin, LI Baizhan, et al. Seasonal variation of thermal sensations in residential buildings in the Hot Summer and Cold Winter zone of China[J]. Energy and Building, 2017, 140: 9. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.01.066

[10]WANG Zhaojun, JI Yuchen, REN Jing. Thermal adaptation in overheated residential buildings in severe cold area in China[J]. Energy and Buildings, 2017, 146(7): 322. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.053

[11]WANG Zhaojun, LI Aixue, Ren Jing, et al. Thermal adaptation and thermal environment in university classrooms and offices in Harbin[J]. Energy and Building, 2011, 77(7): 192. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.03.054

[12]HOYT T, ARENS E, ZHANG Hui. Extending air temperature setpoints: simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings[J]. Building and Environment, 2014, 88: 89. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.09.010

[13]中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ-134-2010《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China (MOHURD). JGJ 134-2010 Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter zone [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010

[14]杜晨秋, 李百战, 刘红, 等. 基于决策树模型的居住建筑人员热舒适预测[J]. 暖通空调, 2018, 48(8): 42
DU Chenqiu, LI Baizhan, LIU Hong, et al. Human thermal comfort prediction in residential buildings based on decision tree model[J]. HV&AC, 2018, 48(8): 42

[15]ANSI/ASHRAE. ASHRAE Standard 55-2017 thermal environment conditions for Human occupancy[S]. Atlanta: American Society of Heating, Ventilating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2017

[16]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50785—2012《民用建筑室内热湿环境评价标准》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China (MOHURD). GB/T 50785 Evaluation standard for indoor thermal environment in civil buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012

[17]GRIFFITHS I. Thermal comfort studies in buildings with passive solar features: ENS35090 [R]. UK: The Commission of the European Community, 1990

[18]NICOL F, HUMPHREYS M A. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251[J]. Building and Environment, 2010, 45(1): 11. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.12.013

[19]重庆市城乡建设委员会. DBJ50-071-2016《居住建筑节能 65% (绿色建筑)设计标准》[S]. 重庆: 重庆市城乡建设委员会, 2016
Chongqing Housing and Urban Rural Construction Commission. DBJ50-071 Design standards on residential building energy saving 65% (green building) [S]. Chongqing: Chongqing Housing and Urban Rural Construction Commission, 2016

[20]李信仪. 居住建筑区域能耗模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018
LI Xinyi. A study about residential building stock energy modeling [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018

[21]中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50096—2011《住宅设计规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Ministry of Housing and Urban-Rural Development, People's Republic of China (MOHURD). GB 50096—2011 Design code for residential buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011

- [22] 姚润明, 喻伟, 王晗, 等. 长江流域建筑供暖空调解决方案和相应系统重点项目研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(2): 1
YAO Runming, YU Wei, WANG Han, et al. Solutions to heating and cooling of buildings in the Yangtze river region[J]. HV&AC, 2018, 48(2): 1
- [23] 王者. 夏热冬冷地区城镇住宅采暖需求与适宜末端研究[D]. 北京: 清华大学, 2017
WANG Zhe. Research on demand and suitable terminal for housing heating in hot summer and cold winter climate region of China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017
- [24] YAO Runming, COSTANZO V, LI Xinyi, et al. The effect of passive measures on thermal comfort and energy conservation. A case study of the hot summer and cold winter climate in the Yangtze River region[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 15: 298. DOI: 10.1016/j.jobe.2017.11.012
- [25] WANG Zhe, ZHAO Zhen, LIN Borong. Residential heating energy consumption modeling through a bottom-up approach for China's hot summer-cold winter climatic region[J]. Energy and Buildings, 2015, 109: 65. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.09.057
- [26] 陈金华, 张静, 范凌泉, 等. 重庆市住宅冬季热环境及供暖现状[J]. 暖通空调, 2016, 46(11): 90
CHEN Jinhua, ZHANG Jing, FAN Lingxiao, et al. Analysis of thermal environment and heating status of residential buildings in Chongqing area in winter[J]. HV&AC, 2016, 46(11): 90
- [27] CUI Ying, YAN Da, CHEN Chien-fei. Exploring the factors and motivations influencing heating behavioral patterns and future energy use intentions in the hot summer and cold winter climate zone of China[J]. Energy and Buildings, 2017, 153: 99. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.07.068
- [28] JIANG Haochen, YAO Runming, HAN Shiyu, et al. How do urban residents use energy for winter heating at home? A large-scale survey in the hot summer and cold winter climate zone in the Yangtze River region[J]. Energy and Buildings, 2020, 223: 110131. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110131
- [29] WU Yuxin, LIU Hong, LI Baizhan, et al. Thermal adaptation of the elderly during summer in a hot humid area: Psychological, behavioral, and physiological responses [J]. Energy and Buildings, 2019, 203: 109450. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109450
- [30] INDRAGANTI M, RAO K D. Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: A field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations [J]. Energy and Building, 2010, 42(3): 273. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.09.003
- [31] SCHELLEN L, VAN MARKEN LICHTENBELT W D, LOOMANS M G L C, et al. Differences between young adults and elderly in thermal comfort, productivity, and thermal physiology in response to a moderate temperature drift and a steady-state condition [J]. Indoor Air, 2010, 20(4): 273. DOI: 10.1111/j.1600-0668.2010.00657.x
- [32] 杜晨秋, 喻伟, 李百战, 等. 重庆住宅人员空调使用行为特点及评价[J]. 建筑科学, 2020, 36(10): 12
DU Chenqiu, YU Wei, LI Baizhan, et al. Evaluation of occupant behavior on annual air conditioning use in residential buildings in Chongqing[J]. Building Science, 2020, 36(10): 12. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2020.10.02
- [33] 赵秉文, 杨婷, 戚丽娟, 等. 杭州住宅空调能耗实测与分析[J]. 建筑节能, 2019, 47(7): 22
Zhao Bingwen, YANG Ting, QI Lijuan et al. Measurement and analysis of air conditioning energy consumption in Hangzhou residential buildings [J]. Building Energy Efficiency, 2019, 47(7): 22. DOI: 10.3969/j.issn.1673-7237.2019.07.005
- [34] 刘猛, 晏璐, 李金波, 等. 基于数据监测平台的重庆地区房间空调器使用作息分析[J]. 暖通空调, 2020, 50(5): 1
LIU Meng, YAN Lu, LI Jinbo, et al. Analysis of operation schedule of room air conditioners in Chongqing based on data monitoring platform[J]. HV&AC, 2020, 50(5): 1
- [35] 刘猛, 晏璐, 李金波, 等. 大数据监测平台下的长江流域典型城市房间空调器温度设置分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(5): 164
LIU Meng, YAN Lu, LI Jinbo, et al. Analysis of temperature settings habit of room air conditioners in the typical cities in Yangtze river basin under the big data monitoring platform[J]. Journal of Civil and Engineering, 2019, 41(5): 164. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2019.107
- [36] TANIMOTO J, HAGISHIMA A. State transition probability for the Markov model dealing with on/off cooling schedule in dwellings [J]. Energy and Buildings, 2005, 37(3): 181. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.02.002
- [37] YAO Jian. Modelling and simulating occupant behaviour on air conditioning in residential buildings [J]. Energy and Buildings, 2018, 175: 1. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.07.013

(编辑 张 红)