

长沙地区混合通风住宅老年人空调使用行为

李念平[†], 韩阳丽, 何颖东, 彭晋卿, 贾继康
(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为研究混合通风建筑内人员的空调使用行为对建筑能耗的影响,对夏热冬冷地区以老年人为主的住宅空调系统及室内环境进行为期一年的连续监测,收集了气象参数、空调使用率、开启时间、室内的设定温度等数据.分析表明:夏季和冬季在客厅、餐厅以及主卧开启空调的时间均有所不同.在夏季,客厅与餐厅的设定温度较为集中,主要为 26~28℃,主卧的室内设定温度主要为 25~29℃,三者设定温度的峰值均在 27.5℃左右;在冬季,各房间的室内设定温度相差不大,频率最高的温度为 20.5℃.夏季住宅内老年人日间室外耐受温度约为 31℃,夜间约为 26℃;而冬季住宅内老年人日间室外耐受温度约为 12℃,夜间耐受温度约为 8℃.同时建立了空调开启率与环境温度之间的逻辑回归模型、空调开启时间以及室内温度正态分布模型,为研究混合通风住宅建筑空调使用行为提供参考.

关键词:混合通风;空调使用行为;模型;老年人

中图分类号:TU241.8

文献标志码:A

Air-conditioning Use Behaviors of Elderly in Mixed-mode Residential Buildings in Changsha

LI Nianping[†], HAN Yangli, HE Yingdong, PENG Jinqing, JIA Jikang
(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Air-conditioning use behaviors of the people in mixed-mode buildings have a significant impact on building energy. A one-year field investigation was conducted in mixed-mode residential buildings mainly on the elderly in the Hot Summer and Cold Winter Region. Climate parameters, air-conditioning usage rates, turning-on time, and indoor set-point temperatures were continuously monitored and recorded. The results show that the periods of the elderly using air conditioners in the living rooms, dining rooms, and bedrooms were different in summer and winter. In summer, the indoor set-point temperatures of living rooms and dining rooms were both mostly within 26~28°C, and those of bedrooms mainly varied within 25~29°C. The most frequent set-point temperature of the three rooms was 27.5°C. In the winter, the indoor set-point temperatures of all rooms were similar, and the most frequently selected one was 20.5°C. In summer, the outdoor tolerance temperatures of the elderly were about 31°C and 26°C in the daytime and night, respectively. In winter, the outdoor tolerance temperature of the elderly was about 12°C and 8°C in the daytime and night, respectively. Besides, this study established the logistic regression models between air-conditioning use rates and outdoor temperatures, normal-distributed models of air-conditioning use rates over time, as well

* 收稿日期:2019-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878255), National Natural Science Foundation of China(51878255)

作者简介:李念平(1962—),男,湖南邵阳人,湖南大学教授,博士生导师

[†] 通讯联系人, E-mail: linianping@126.com

as the models of indoor set-point temperature distribution. This study provides a reference for researches on air-conditioning use behaviors in mixed-mode residential buildings.

Key words: mixed-mode; air-conditioning use behavior; models; older people

建筑能耗被认为是世界第三大能源消耗部分. 建筑能耗不仅与气象参数、围护结构等有关, 而且与室内人员行为有关. 相关研究表明, 影响建筑能耗最重要的因素之一为建筑室内人员行为^[1]. 目前的建筑能耗模拟软件采用固定室内温度和固定作息的方式, 从而导致模拟结果与实际值有较大的差值. 因此研究室内人员空调使用行为对于准确分析建筑空调能耗具有重要意义.

国内外学者对建筑室内人员行为进行了大量研究. 李俊鸽^[2]对中国夏热冬冷地区住宅建筑的用户行为进行了调查, 发现夏季空调状态的室内温度在 27.5~29.5 °C 温度段的频率最高, 约占总量的 40%; 采暖室内温度分布频率在 18 °C 时最高, 约占 30%. 张才俊^[3]通过对广州 22 台使用中的房间空调器进行测试, 发现用户开启空调器的概率随着平均室外空气温度升高而增加, 当平均室外温度从 27 °C 提升到 32 °C 时, 用户开启空调器进行降温的意愿显著增加, 当室外平均空气温度达到 33 °C 时, 用户开启空调的概率将达到 94.95%. 虞洋等^[4]对中国杭州某办公建筑开展了夏季空调使用行为测试, 并采用逻辑回归构建出夏季空调开启率预测模型, 得出测试房间空调开启室外耐受温度为 32.0 °C. Tanimoto 等^[5]在 2000 年夏季日本的 Fukuoka 收集了 5 个家庭住宅和 3 个单元房的现场实测数据, 得出空调使用频率与室内外温度之间的关系, 并将该关系转化为状态转移概率函数. Hwang 等^[6]通过对台湾居住建筑中的老年人进行调研发现, 老年人在夏季和冬季 80% 的可接受温度范围分别为 23.2~27.1 °C 和 20.5~25.9 °C. 为了保护老年人, 世界卫生组织在 20 世纪提出了关于冬季可接受的内部温度的指导意见, 即所有房间的室内温度为 18 °C, 但有老年人所在的房间为 20~21 °C^[7]. 本文旨在研究夏热冬冷地区居住建筑老年人空调使用行为. 通过对长沙市某以老年人为主体的住宅建筑进行现场测量, 分析了混合通风住宅中的热环境、老年人的空调使用行为, 并建立了相关模型. 本研究为未来以老年人为主的住宅建筑舒适环境的营造提供参考.

1 方法

1.1 建筑信息及通风特征

本文中被研究的建筑位于长沙市区, 该地区属于夏热冬冷地区. 该小区采用热源塔热泵空调系统为住户提供冷热空调供应及全年生活热水. 小区内均为 16 层的高层住宅楼, 每套住房内均有可自由开启的外窗. 小区的实景图及典型住房的平面图如图 1 所示. 被测试的每户住有老年夫妻二人, 平均年龄高于 60 岁. 每套房内空调系统的开启、关闭以及室内温度的设定由住户自行控制.



图 1 建筑实景图及典型单套住房平面图

Fig.1 The on-site scene of the surveyed building and the typical single housing plan

混合通风可充分利用室外气候条件来满足室内热舒适, 改善室内空气品质并达到节能的目的. 本文所选住户均采用典型的自然通风与机械通风交替运行的混合通风模式. 本文中的混合通风对空调使用的影响体现在老年人在特定的房间、固定的时段开启空调, 其他房间则采取自然通风; 并且室内设定温度随室外温度变化, 即室外环境影响空调使用行为.

1.2 测量参数

在本研究中, 现场连续测试了冬夏两季室内的空气温度、湿度、风机盘管末端的电量, 以及室外的空气温度和湿度, 其中夏季 (2018 年 6 月 1 日至 2018 年 8 月 31 日) 收集了 8 户住户的数据, 冬季

(2018 年 12 月 1 号至 2019 年 2 月 28 号)收集了 12 户住户的数据. 室内的温湿度传感器安装在墙上, 距离地面约 1.5 m, 餐厅、客厅及每个卧室各一个, 用以监测室内温湿度; 智能插座型电表安装在风机盘管末端, 用以监测末端开启情况及电量, 智能插座与传感器监测的数据被实时无线传输到云数据库, 再传输至计算机和手机, 可进行实时监测, 并可在电脑端导出. 室外温湿度用放置在室外的小型气象环境监测站来收集, 室外温湿度的传感器被存储在设备内, 由电脑导出. 所有数据收集时间间隔为 5 min. 仪器具体信息见表 1.

表 1 仪器信息

Tab.1 Instruments used in this study

物理参数	仪器	精度	测量范围
室外空气温度	TRM-ZSC 型	± 0.1 °C	-50~+80 °C
室外相对湿度	气象环境监测站	± 2%RH	0~100%RH
室内空气温度	Aqara 温湿度	± 0.3 °C	-20~+60 °C
室内相对湿度	传感器	± 3%RH	0~100%RH

1.3 数据分析

首先通过测量系统收集数据, 然后去除异常值, 接着对数据进行初步分析并建立相关模型. 采用逻辑回归的方法建立了冬夏季空调开启率随室外温度变化的数学模型, 模型形式见式(1)^[8]. 由于同一时间, 住户同时开启两个房间的空调的概率较小, 因此某时刻只要有一个房间的空调开启, 即认为该户在使用空调, 并将 50%空调使用率对应的室外温度定义为耐受温度. 其次建立了冬夏季室内空调设定温度与室外空气温度之间的模型; 并对空调的开启时间和设定温度分别建立了相应的正态分布模型^[9], 见式(2). 对于前者, 纵坐标频率表示该小时内, 所有住户空调开启动作所出现的次数占总次数的百分比; 对于后者, 纵坐标频率表示在该设定温度下, 所有住户室内温度处于该温度范围内的次数占总次数的百分比. 由于本研究中的住户基本全天在家, 因此对数据分时段处理. 且由于主卧、客厅、餐厅的使用行为不尽相同, 因此对不同房间的设定温度与空调开启时间分别处理.

$$y_1 = \frac{1}{1 + \exp^{-(a+bx)}} \quad (1)$$

式中: a 和 b 为常数.

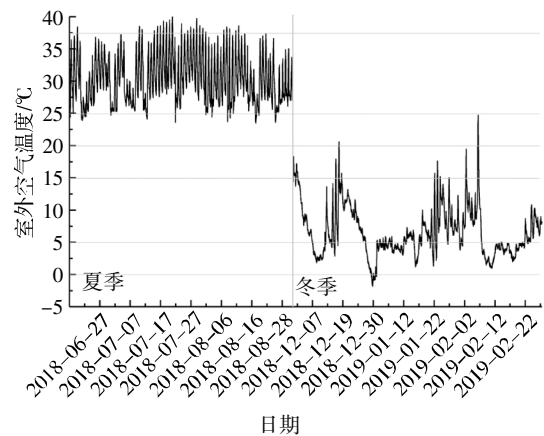
$$y_1 = y_0 + A \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2)$$

式中: μ 为平均值; σ 为标准差; y_0 和 A 为常数.

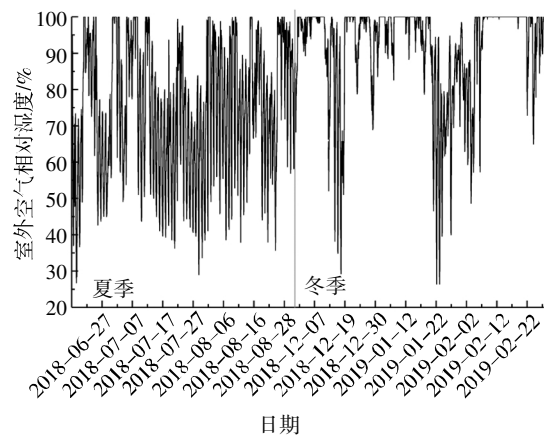
2 结果

2.1 室外温湿度

图 2 显示了冬夏季室外空气温度和相对湿度. 夏季室外温湿度均随昼夜呈现周期性变化, 其中主要温度区间为 25~37 °C, 在 14:00 左右室外相对湿度约为 60%, 在夜间室外相对湿度通常高于 80%. 冬季室外温湿度随昼夜的变化并不明显, 室外温度大部分在 0~15 °C 之间, 室外湿度多数超过 80%.



(a) 室外空气温度



(b) 室外空气相对湿度

图 2 冬夏季室外空气温度和相对湿度

Fig.2 Outdoor temperatures and relative humidity in summer and winter

2.2 空调使用率与室外温度之间的关系

由于白天和夜晚空调使用率有所不同, 因此将一天分为白天(7:00—18:00)和夜间(19:00—次日 6:00)分别进行分析, 如图 3 和图 4 所示. 从图中可看出空调开启频率与室外温度高度相关: 在夏季随着室外温度的升高而增加, 在冬季则规律相反. 从逻辑回归中可得夏季白天和夜间的耐受温度分别约为 31 °C 和 26 °C; 冬季白天和夜间的耐受温度分别约为 12 °C 和 8 °C, 逻辑回归模型参数见表 2.

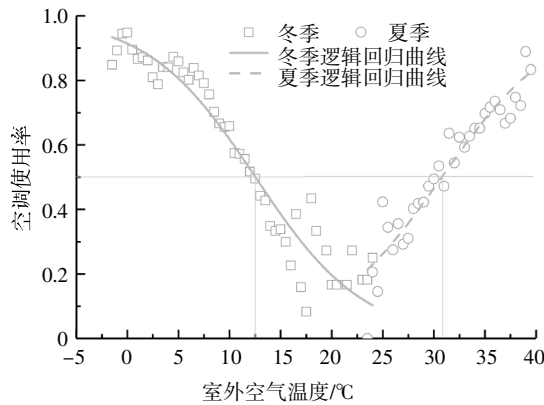


图3 夏季与冬季日间空调使用率与室外温度的关系
Fig.3 Relationship between outdoor temperatures and air conditioning use rates during daytime in summer and winter

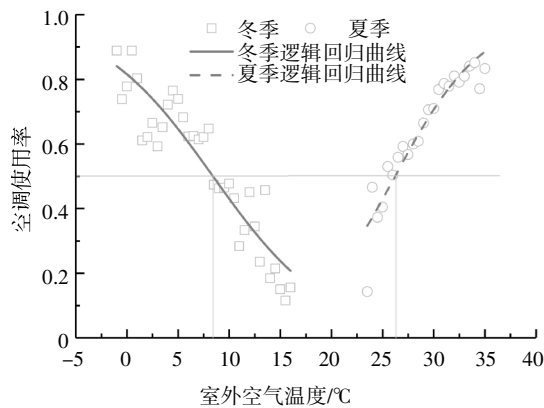


图4 夏季与冬季夜间空调使用率与室外温度之间的关系
Fig.4 Relationship between outdoor temperatures and air conditioning use rates during night-time in summer and winter

表2 夏季和冬季空调使用率逻辑回归参数

Tab.2 Parameters of the logistic regression of air conditioning use rates in summer and winter

参数	夏季		冬季	
	白天	夜晚	白天	夜晚
a	-5.50	-6.11	2.37	1.49
b	0.18	0.23	-0.19	-0.18
R^2	0.897	0.893	0.934	0.858

2.3 空调设定温度与室外温度之间的关系

2.3.1 夏季空调设定温度与室外空气温度

图5所示为夏季室外空气温度与室内空调设定温度之间的关系(逻辑回归关系,见式(3)).从图中可看出,当室外温度约为22℃时,室内设定温度约为24.5℃;当室外空气温度为40℃时,室内空调设定温度约为28℃.随着室外温度继续升高,室内设

定温度继续上升但渐趋平缓.

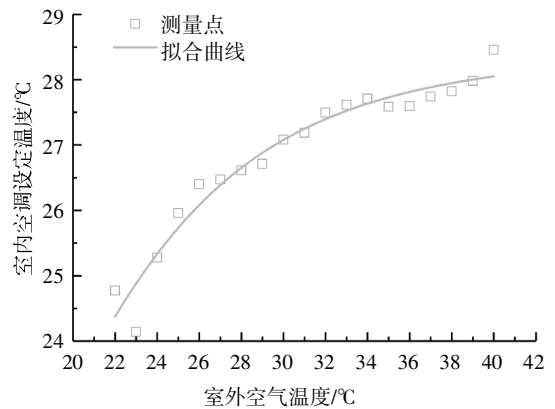


图5 夏季不同室外空气温度下的室内空调设定温度
Fig.5 Indoor set-point temperatures with different outdoor temperatures in summer

$$T_{s1} = 28.46 - \frac{11.02}{1 + (t_1/19.59)^{4.55}}, R^2 = 0.95. \quad (3)$$

式中: T_{s1} 为室内空调设定温度; t_1 为室外空气温度.

2.3.2 冬季空调设定温度与室外空气温度

图6所示为冬季室内空调设定温度与室外空气温度的关系(见式(4)).从图中可看出,随着室外温度的升高,室内设定温度会逐渐上升,但上升的趋势逐渐平缓,最后趋近于21℃,且在室外温度为2℃时,室内设定温度最低,约为17.5℃,比最大值低4℃左右.

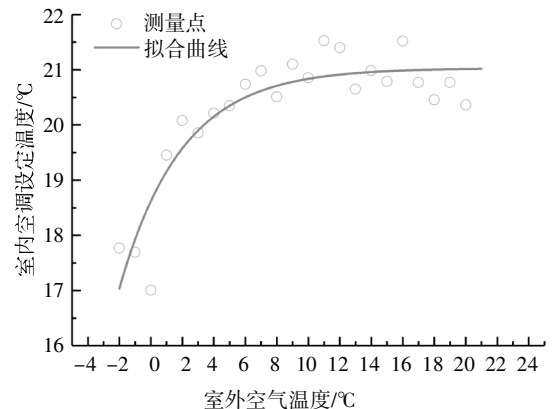


图6 冬季不同室外空气温度下的室内空调设定温度
Fig.6 Indoor set-point temperatures with different outdoor temperatures in winter

$$T_{s2} = 21.03 - 2.41\exp(-0.25t_2), R^2 = 0.82. \quad (4)$$

式中: T_{s2} 为冬季室内设定温度; t_2 为冬季室外空气温度.

2.4 夏季各房间空调使用行为

2.4.1 夏季主卧空调开启时间

夏季主卧空调开启时刻如图7所示.从图中可

看出,主卧空调的开启时间主要在 11:00—13:00,19:00—23:00,且在 8:00 时也有一个较小的高峰,其中白天在 11:30—13:30 的空调开启频率最高.在 19:00 时,开启频率明显高于 18:00,在 19:30—23:30 时达到较大值,之后明显下降.

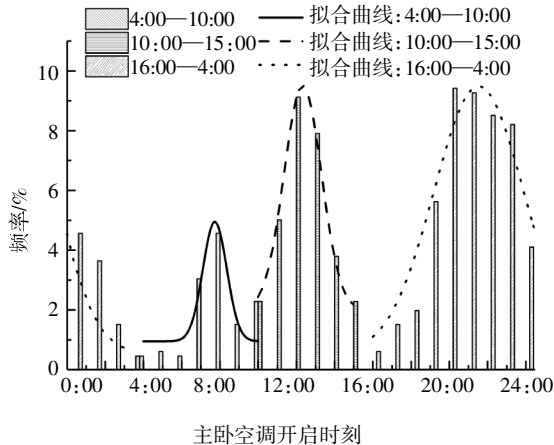


图 7 夏季主卧空调开启时间正态分布曲线

Fig.7 Normal-distributed curves of air-conditioning use time of bedrooms in summer

2.4.2 夏季客厅空调开启时间

从图 8 中可看出,客厅空调的开启时间主要在 8:00—12:00,18:00—20:00.在 7:00 时,客厅的空调开启频率有明显上升,在 12:00 之后空调开启频率明显下降;在 12:30—15:30 客厅的空调开启频率一直处于很低的状态,在 16:00 时开始上升,并在 19:00 达到峰值,之后空调开启频率逐渐降低.

2.4.3 夏季餐厅空调开启时间

从图 9 中可看出,餐厅空调的开启时间主要集中在 3 个时间段,分别为 4:00—9:00,9:00—15:00,15:00—19:00,并且分别在 8:00、11:00 和 17:00 左右达到最高值.同时对餐厅空调开启期间客厅空调

运行状况进行分析发现,在夏季客厅空调开启期间,客厅空调开启的概率为 38%.

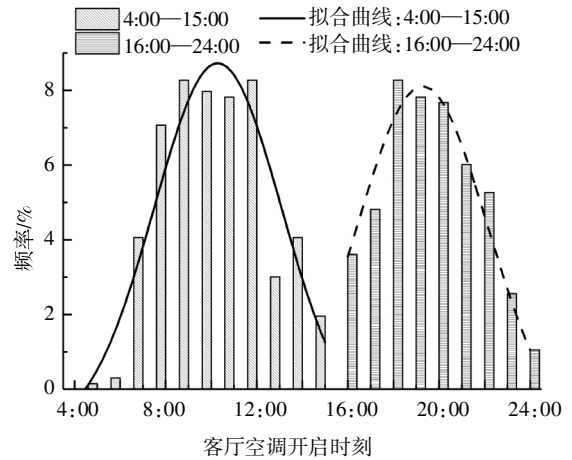


图 8 夏季客厅空调开启时间正态分布曲线

Fig.8 Normal-distributed curves of air-conditioning use time of living room in summer

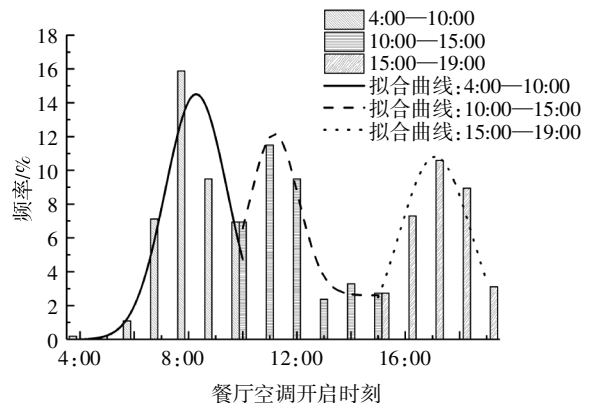


图 9 夏季餐厅空调开启时间正态分布曲线

Fig.9 Normal-distributed curves of air-conditioning use time of dining room in summer

用正态分布对以上各个房间各个时间段空调的开启时间频率拟合的结果见表 3.

表 3 夏季空调开启时间正态分布曲线参数

Tab.3 Parameters of the normal-distributed models of air-conditioning use time in summer

参数	主卧			客厅		餐厅		
	4:00—10:00	10:00—15:00	16:00—4:00	4:00—15:00	16:00—24:00	4:00—10:00	10:00—15:00	15:00—19:00
y_0	0.95	1.98	0.55	-1.14	-1.37	-0.01	2.61	-1.11
A	3.99	7.53	8.94	9.86	9.48	14.52	9.54	11.92
μ	7.73	12.33	21.54	10.29	19.27	8.29	11.17	17.11
σ	0.63	0.98	2.35	2.80	2.86	1.15	0.89	1.36
R^2	0.830	0.999	0.907	0.898	0.952	0.925	0.958	0.992

2.4.4 夏季空调设定温度与时间的关系

用正态分布对夏季空调开启期间的室内空气温度进行拟合,结果见表4.从图10中可看出,夏季主卧的室内设定温度集中在24.5~30℃,跨度较大,从正态分布的 μ 值中可看出,室内设定温度频率最高的值约为27℃.客厅和餐厅的设定温度较为集中,主要在26~29℃,从正态分布的 μ 值中可看出,室内设定温度频率最高的值均为27.5℃左右.

表4 夏季空调室内设定温度正态分布曲线参数

Tab.4 Parameters of normal-distributed models of set-point temperatures in summer

参数	夏季		
	主卧	客厅	餐厅
y_0	-0.23	0.06	-0.04
A	9.88	16.98	16.56
μ	27.12	27.41	27.50
σ	2.16	1.16	1.22
R^2	0.909	0.998	0.988

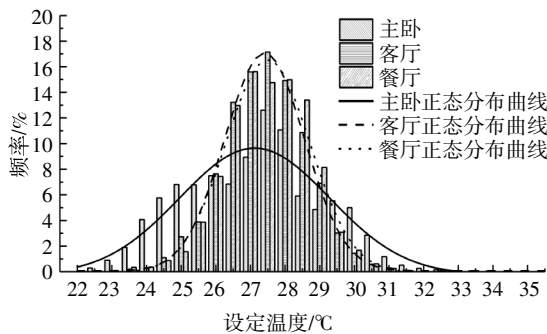


图10 夏季空调室内各房间设定温度

Fig.10 Indoor set-point temperatures for each room in summer

2.5 冬季各房间空调使用行为

2.5.1 冬季主卧空调开启时间

从图11中可看出,冬季主卧空调的开启时间主要在6:00—8:00,10:00—14:00以及17:00—22:00,并分别在7:00、12:00以及21:00左右达到峰值,与夏季相比,在冬季早上5:30—7:30住户有较高的空调使用频率.

2.5.2 冬季客厅与餐厅空调开启时间

冬季客厅和餐厅空调的开启时间基本相同,主要集中在6:30—8:30以及17:30—18:30,如图12和图13所示.同时对餐厅空调开启期间客厅空调运行状况进行分析发现,在冬季餐厅空调开启期间,客厅空调开启的概率为76%.从图12和图13中可看出,早上空调开启的频率明显高于傍晚17:30—18:30空

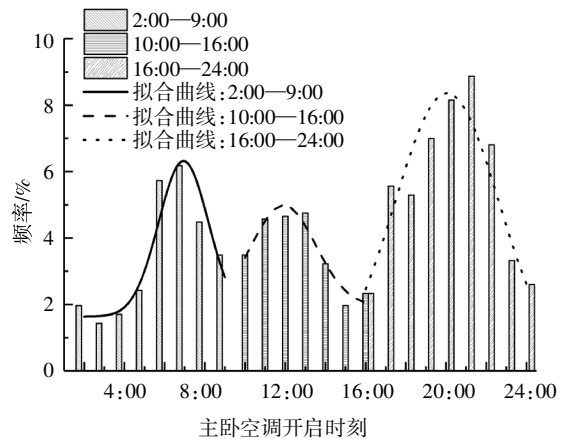


图11 冬季主卧空调开启时间正态分布曲线

Fig.11 Normal-distributed curves of air-conditioning use time of bedroom in winter

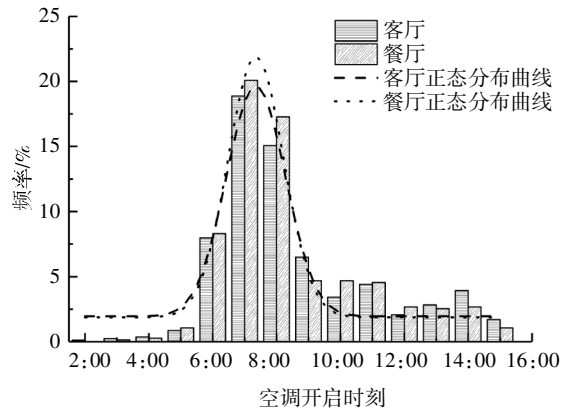


图12 冬季客厅与餐厅空调开启时间正态分布曲线(2:00—15:00)

Fig.12 Normal-distributed curves of air-conditioning use time for living and dining room in winter (2:00—15:00)

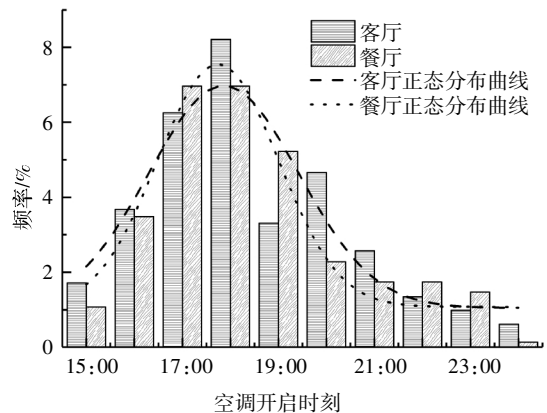


图13 冬季客厅与餐厅空调开启时间正态分布曲线(15:00—24:00)

Fig.13 Normal-distributed curves of air-conditioning use time of living and dining rooms in winter (15:00—24:00)

调的开启频率,且与主卧相比,早上客厅与餐厅的空调开启时间高峰稍微延迟,而在傍晚主卧的空调开启时间高峰与客厅和餐厅相比较晚。

用正态分布对以上冬季各个房间各个时间段的

开启时间频率拟合的结果见表 5。从表 5 中可看出 μ 值即代表空调开启时间频率分布的峰值,与曲线图的峰值相对应,从 R^2 可看出,该模型具有较好的拟合性。

表 5 冬季空调开启时间正态分布曲线参数

Tab.5 Parameters of the normal-distributed models of air-conditioning use time in winter

参数	主卧			客厅		餐厅	
	2:00—9:00	10:00—16:00	16:00—24:00	2:00—15:00	15:00—24:00	2:00—15:00	15:00—24:00
y_0	1.64	1.94	-0.01	1.95	1.05	1.88	1.08
A	4.68	3.05	8.37	17.65	5.92	19.97	6.46
μ	6.94	11.92	20.05	7.36	17.86	7.35	17.74
σ	1.24	1.60	2.59	0.93	1.56	0.87	1.26
R^2	0.936	0.932	0.877	0.938	0.825	0.945	0.954

2.5.3 冬季空调设定温度

冬季空调开启期间的室内空气温度分布拟合结果见表 6。图 14 中,冬季室内设定温度主要为 17~22℃,基本高于 16℃。从正态分布的 μ 值中可看出室内设定温度频率最高的值均在 20.5℃左右,高于标准的室内设定温度 20℃。

表 6 冬季空调设定温度正态分布曲线参数

Tab.6 Parameters of normal-distributed models about setting temperature in winter

参数	冬季		
	主卧	客厅	餐厅
y_0	-0.04	-0.05	0.03
A	11.08	13.34	14.52
μ	20.32	20.71	20.40
σ	3.64	3.03	2.73
R^2	0.891	0.922	0.967

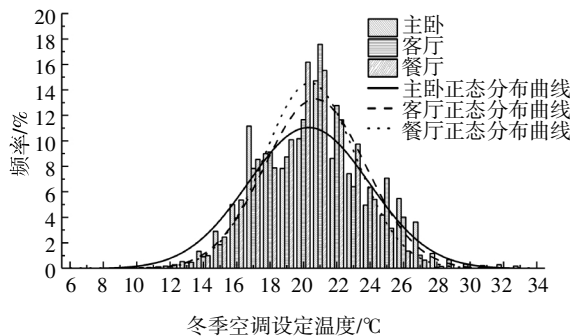


图 14 冬季空调室内各房间设定温度

Fig.14 Indoor set-point temperatures for each room in winter

3 讨论

Song 等^[10]在 2016 年 5 月至 11 月中国天津地区通过现场测试得出住宅建筑 50%空调使用率对应的室外温度为 32.5℃,而在本文中夏季在白天 50%空调使用率对应的室外温度在 31℃左右,夜间 50%空调使用率对应的室外温度约为 26℃,这是因为长沙地区夏季多雨,相对湿度较大。

洪霄伟等^[11]通过统计 8 户中国广州某高校的教师住宅,发现夏季客厅的空调开启时间主要在 12:00—13:00 和 18:00—22:00,卧室空调的空调开启时间主要在 21:00—24:00,午休时间 13:00 时也有一定量的使用频率,但在本研究中客厅在上午也有很大的开启频率,这是由于老年人长时间在家,因此空调开启频率在时间上分布更为均匀。

刘雪麒^[12]的研究指出在太原夏季老年人 80%可接受热舒适温度为 21.4~28.8℃,冬季 80%可接受热舒适温度为 20.4~24.5℃;老年人在夏季的热期待温度为 27.7℃,冬季为 23.8℃。在本研究中,夏季老年人室内空调设定温度主要在 25~29℃,峰值出现在约 27.5℃;冬季室内约 70%的时间室内设定温度高于 19℃,且峰值出现在 20.5℃左右,与刘雪麒的研究相一致,均说明老年人对偏热环境的耐受性较高,对偏冷环境的耐受性较低。

大量的研究表明^[13-15],由于老年人生理和心理的独特性,使得他们对室内小气候的要求与其他群体不同,更容易受到极端天气的影响,更喜欢温度偏高

的环境,且会更加频繁地操作空调系统. Hamza 和 Gilroy^[16]的研究指出,老年人普遍在家中度过大量的时间,例如,65岁的老年人据说在家中度过85%的时间,85岁及以上的老年人在家中度过超过95%的时间,这与本研究中的结论一致,故本文研究结果并不适用于其他人群,但为研究其他人群的空调使用行为提供了借鉴.

4 结论

通过对以老年人为主体的混合通风住宅建筑空调使用行为进行现场调研,得到如下结论:

1) 夏季室外温度主要在 25~37 °C 之间,室外湿度随昼夜变化. 冬季室外温度主要在 0~15 °C 之间,相对湿度较大,基本在 80% 以上.

2) 夏季白天主卧空调的开启时间主要为 11:30—13:30 和 19:30—23:30; 客厅空调白天的开启时间主要在 8:00—12:00 和 18:00—20:00; 餐厅在三餐时间有一个开启的高峰. 冬季客厅和餐厅空调的开启时间基本相同,主要在 6:30—8:30 和 17:30—18:30, 主卧空调的开启时间主要在 6:00—8:00, 11:00—13:00 以及 20:00—22:00.

3) 夏季白天住宅建筑的耐受温度为 31 °C, 夜间为 26 °C; 冬季白天耐受温度为 12 °C, 夜间约为 8 °C.

4) 在夏季,室内设定温度随着室外空气温度的升高而升高,最大值与最小值相差约 3.5 °C; 在冬季,室内设定温度随着室外空气温度的升高先增加后降低,最大值与最小值相差约 4 °C.

5) 夏季主卧空调的室内设定温度范围较大,但频率最高的设定温度在 27 °C 左右,客厅和餐厅的温度设定值主要在 26~29 °C; 冬季各房间室内温度设定值的跨度差别不大,频率最大值在 20.5 °C 左右.

参考文献

- [1] YAN D, HONG T Z, DONG B, *et al.* IEA EBC annex 66: definition and simulation of occupant behavior in buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 156: 258—270.
- [2] 李俊鸽. 夏热冬冷地区人体热舒适的气候适应模型研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学建筑学院, 2006: 47—50.
LI J G. An adaptive thermal comfort model for hot summer and cold winter context [D]. Xi'an: School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, 2006: 47—50. (In Chinese)
- [3] 张才俊. 基于 BP 神经网络的房间空调器长效性能预测及分析 [D]. 广州: 华南理工大学机械与汽车工程学院, 2015: 50—52.
- [4] 虞洋, 杨玉兰. 办公建筑夏季用能行为测试研究[J]. *环境工程*, 2015, 33(5): 153—156.
YU Y, YANG Y L. Research on energy behavior testing on office building occupants in summer [J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(5): 153—156. (In Chinese)
- [5] 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—187.
- [6] HWANG R, CHEN C P. Field study on behaviors and adaptation of elderly people and their thermal comfort requirements in residential environments [J]. *Indoor Air*, 2010, 20(3): 235—245.
- [7] WHO. Health impact of low indoor temperatures [M]. Geneva: World Health Organization, 1987: 16—27.
- [8] KIM J, DEAR R, PARKINSON T, *et al.* Understanding patterns of adaptive comfort behaviour in the Sydney mixed-mode residential context [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 141: 274—283.
- [9] YAO J. Modelling and simulating occupant behaviour on air conditioning in residential buildings [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 175: 1—10.
- [10] SONG Y R, SUN Y X, LUO S G, *et al.* Indoor environment and adaptive thermal comfort models in residential buildings in Tianjin, China [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 205: 1627—1634.
- [11] 洪霄伟, 杜晓寒, 陈东, 等. 广州住宅中的人体热适应与空调使用特征——以某高校教师住宅为例 [J]. *建筑科学*, 2014, 30(10): 55—62.
HONG X W, DU X H, CHEN D, *et al.* Thermal comfort and air-conditioner use characteristics of homes in Guangzhou—an example study of teacher's homes in a college [J]. *Building Science*, 2014, 30(10): 55—62. (In Chinese)
- [12] 刘雪麒. 太原市改造型养老建筑室内热环境优化研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学建筑学院, 2018: 63—71.
LIU X Q. Research and optimization an indoor thermal environment of reconstructed nursing homes for the elderly in Taiyuan [D]. Xi'an: School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, 2018: 63—71. (In Chinese)
- [13] HOOF V, SCHELLEN L, SOEBARTO V, *et al.* Ten questions concerning thermal comfort and ageing [J]. *Building and Environment*, 2017, 120: 123—133.
- [14] HUGHES C, NATARAJAN S, LIU C, *et al.* Winter thermal comfort and health in the elderly [J]. *Energy Policy*, 2019, 134: 110954.
- [15] GIAMALAKI M, KOLOKOTSA D. Understanding the thermal experience of elderly people in their residences; study on thermal comfort and adaptive behaviors of senior citizens in Crete, Greece [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 185: 76—87.
- [16] HAMZA N, GILROY R. The challenge to UK energy policy: an ageing population perspective on energy saving measures and consumption [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(2): 782—789.