

基于个人舒适系统杭州住宅冬季热舒适与能耗

陈淑琴^{1,2}, 陈悦^{3,1}, 华颖¹, 孔舒怡¹, 张彦彤¹, 王子煜¹, 刘佳琪¹, 徐怡宁¹

(1. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学平衡建筑中心, 浙江 杭州 310058;

3. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为揭示该地区个人舒适系统(PCS)作用下的居民冬季热舒适特征和供暖能耗需求,以杭州市为对象,采用问卷调查和入户现场实测的方式得出冬季住宅开窗、遮阳、使用空调和 PCS 等典型热环境组合调节模式以及典型供暖模式和居民活动状态组合下的热舒适特征;在此基础上模拟得到冬季室内热舒适和供暖能耗特征。结果表明,冬季“无设备+静坐”、“空调+静坐”、“PCS+静坐”、“无设备+家务劳动”、“空调+家务劳动”、“PCS+家务劳动”等 6 种工况下的冬季中性温度分别是 17.3、18.8、16.4、15.7、15.7、13.9℃,舒适温度区间分别是 14.3~20.3℃、17.1~20.5℃、14.4~18.4℃、13.7~17.8℃、13.3~18.1℃、11.0~16.9℃。冬季室内热舒适水平受热环境调节模式影响较大,客厅在室舒适时间占比在 43.74%~80.21% 之间,卧室在室舒适时间占比均为 70% 以上。使用空调与 PCS 供暖时,典型建筑在冬初冬末的供暖能耗强度是 1.28 kWh·m⁻²,在严冬的供暖能耗强度是 13.06 kWh·m⁻²。

关键词: 夏热冬冷地区;个人舒适系统;热舒适;供暖能耗;住宅

中图分类号: TU111

文献标志码: A

Characteristics of Residential Thermal Comfort and Energy Consumption in Winter in Hangzhou Based on Personal Comfort Systems

CHEN Shuqin^{1,2}, CHEN Yue^{1,3}, HUA Ying¹, KONG Shuyi¹, ZHANG Yantong¹, WANG Ziyu¹, LIU Jiaqi¹, XU Yining¹

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Center for Balanced Architecture Research, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. The Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to reveal the thermal comfort characteristics and heating energy consumption demand of residents in winter under the effect of personal comfort

systems (PCS), this paper takes Hangzhou as the object. By means of questionnaire survey and on-site measurement, the thermal comfort characteristics under various typical thermal environment regulation methods, such as opening windows, shading, using air conditioning and PCS, and indoor hourly temperature and energy consumption are simulated. The results show that the neutral temperatures of “no equipment + sitting”, “air conditioning + sitting”, “PCS + sitting”, “no equipment + housework”, “air conditioning + housework” and “PCS + housework” in winter are 17.3, 18.8, 16.4, 15.7, 15.7, 13.9℃ respectively. A comfortable temperature range respectively is 14.3 to 20.3℃, 17.1 to 20.5℃, 14.4 to 18.4℃, 13.7 to 17.8℃, 13.3 to 18.1℃, 11.0 to 16.9℃. The indoor thermal comfort level in winter is greatly affected by behavioral patterns. The proportion of comfortable time in the living room is 43.74%~80.21%, and the proportion of comfortable time in the bedroom is more than 70%. When air conditioning and PCS are used for heating, the energy intensity of a typical building is 1.28 kWh·m⁻² in early and late winter and 13.06 kWh·m⁻² in severe winter.

Keywords: hot summer and cold winter zone; personal comfort system; thermal comfort; heating energy consumption; residence

夏热冬冷地区的气候特点是夏季高温闷热,冬季阴冷潮湿,最冷月平均温度为 0~10℃、最热月平均温度为 25~30℃,日平均温度≤5℃的天数在 0~90d 之间,日平均温度≥25℃的天数在 40~110d 之间^[1]。该地区 2000 年以前建成的住宅建筑围护结构热工性能非常差,住宅室内热环境恶劣^[2-4],居民对于室内热环境的满意度也较低^[5-6]。随着我国经济的发

收稿日期: 2022-05-15

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划(2023C03173);浙江大学平衡建筑研究中心科研项目(K横 20212710)

第一作者: 陈淑琴,副教授,博士生导师,主要研究方向为建筑能源应用。E-mail: hm_csq@126.com



论文
拓展
介绍

展和人民生活水平的提高,夏热冬冷气候区居民冬季供暖问题近年来越来越受到重视^[7-9]。

夏热冬冷地区住宅供暖设备和供暖方式也有明显的自身特点。个人舒适系统指的是通过改善一个或多个身体部位的局部热状况来改善人体舒适度的系统或设备^[10],是夏热冬冷地区住宅冬季普遍使用的供暖设备形式。冬季居民使用的PCS类型主要包括:红外线取暖器、取暖椅、油汀、暖脚器、局部暖风机等。郭偲悦等^[11]2014年对上海的调查说明采用“PCS”和“PCS+空调”两种模式进行供暖的比例高达80%。本课题组之前的研究发现^[3],当冬季室外温度在12℃至14℃时,居民开始使用空调和PCS;当室外气温低于9℃,空调使用率开始超过PCS。

已有研究^[12]证明,人体各部分对冷热感觉的喜好不同,通过改善局部部位的热舒适条件可以改善全身的热舒适。尽管夏热冬冷地区普遍使用PCS调节人体热舒适,但目前PCS作用下的冬季居民热舒适特征研究非常少。同时,该地区住宅的供热需求计算大多只针对空调能耗,基本没有考虑PCS的能耗。鉴于此,本文以杭州市住宅建筑为对象,通过问卷调研、入户现场实测和能耗模拟,得出该地区PCS作用下的冬季住宅热舒适特征和供暖能源需求,为确定该地区基于特定供暖设备下的住宅室内热环境改善定量需求提供依据,对实现住宅室内热环境的绿色营造和节能减排工作具有重要意义。

1 研究方法

1.1 季节划分方法

首先获取杭州市典型气象年数据,进行季节划分。根据《气候季节划分》(QX/T152—2012)^[13]的规定确定杭州的冬季从11月下旬持续到次年2月下旬。统计分析杭州冬季每旬的平均气温值将冬季划分成冬初冬末和严冬两个时间段。其中冬初冬末包括11月下旬、12月上旬和2月下旬,平均气温为5~10℃;严冬从12月中旬到次年2月中旬,平均气温为5℃以下^[14]。

1.2 研究方法

本文研究方法如图1所示。供暖设备运行状态和人体新陈代谢水平均会影响人体的热舒适特征。首先通过问卷调研和聚类分析获得杭州市住宅居民开窗、遮阳、空调供暖、PCS供暖等典型热环境组合调节模式;通过入户现场测试获得典型冬季典型供暖方式和居民活动状态组合下的热舒适区间;通过调研和统计分析获得杭州典型住宅建筑形式,在此基础上,模拟上述典型热环境调节模式下的冬季室内热环境和能耗;基于入户现场实测得到的冬季典型供暖方式和居民活动状态下的热舒适区间,对卧室和客厅的冬季室内热舒适情况进行评价。

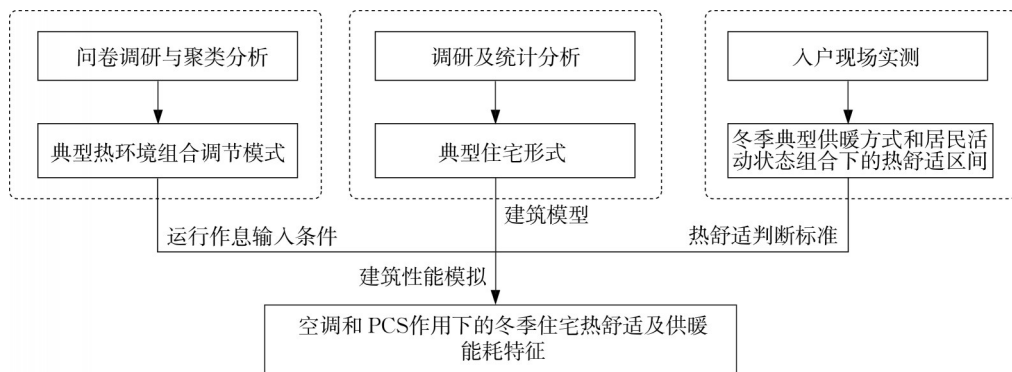


图1 本文研究方法

Fig. 1 Research method of this paper

1.2.1 典型热环境调节行为问卷调查及模式聚类

为揭示杭州市住宅居民典型热环境组合调节行为方式(包括空调供暖、PCS供暖、开窗及遮阳行为),于2020—2021年冬初冬末和严冬分别发放调查问卷,采取随机抽样的方法在杭州市主城区进行问卷调研。问卷调研共回收样本数量为240份,其中冬初冬末112份、严冬128份。根据简单随机抽样

的样本数量公式^[15],大规模问卷调研的样本数量在95%置信度、10%抽样误差下至少需达到96份,本次问卷调研的样本量均已超过必须达到的样本规模。

问卷调研内容如表1所示,以了解冬季PCS、空调、开窗和遮阳的使用特征。

根据问卷调研数据,使用SPSS软件的k-means

表1 问卷调查内容
Tab.1 Survey contents

调研内容	特征参数
受访者个人信息	性别、年龄段、家庭结构、
建筑基本信息	住宅户型、建筑面积、建筑层数、建造年代、建筑围护结构
冬季典型热环境组合调节方式	冬初冬末和严冬典型日内空调和PCS的逐时使用状态;逐时开窗和遮阳状态;PCS的类型和使用房间
在室情况与活动状态	典型日在室时间、典型日内卧室和客厅的逐时在室行为(看电视、办公、阅读、打扫卫生、睡觉等)

聚类方法对冬初冬末和严冬两个时间段的居民热环境调节行为进行聚类分析。每个时间段的聚类参数包括客厅和卧室的空调行为、开窗行为、遮阳行为以及PCS使用行为。将每一样本的空调行为、开窗行为、遮阳行为以及PCS使用行为转化成2进制,即1代表开,0代表关,将最大迭代次数设定为100,根据数据集包含数据样本的数量及数据集可压缩性来确定簇数 k ,使 k 的取值满足如下条件: k 个分类相互之间具有显著的差异性;簇数为 $k+1$ 时,各分类的样本存在重合的特征。

1.2.2 热舒适特征入户实测

为了确定冬季典型供暖方式下的居民热舒适特征,进行入户现场测试。冬季的入户现场测试时间从2020年11月28日到2021年2月25日,所测试的天气状况均符合当地冬季典型气候特征。

在杭州市主城区中选取能代表该区经济水平的26个小区进行随机抽样,测试样本量总计204份,回收有效样本193份,其中男性80人(占41.5%),女性113人(占58.5%)。

为了确定杭州居民在冬季典型供暖方式和居民活动状态组合下的热舒适特征,现场研究遵循客观环境参数测试与主观问卷调查相结合的原则。其中,客观热环境测试参数包括室内温度、相对湿度、空气流速、黑球温度,并记录入户测试时的空调开启情况、空调设定温度、PCS的功率及使用状态、开窗状态、窗帘内遮阳状态。在房间中心点和人体附近(0.3m以内)布置室内温湿度和黑球温度测点,测点高度为0.6m。

为了获得稳态热舒适特征,实验人员开始测试时被测对象至少已在房间内停留并保持了该活动状态1h以上。主观问卷调查内容主要包括:①空调及PCS的使用习惯;②测试时的衣着,以及静坐、打扫卫生等活动情况;③测试时的热感觉。

通过上述测试和问卷,可以反映杭州市住宅在PCS作用下的热环境和居民热舒适特征。主观问卷调查中热感觉采用本领域内常用的七级评价指标

(即-3代表冷,-2代表凉,-1代表较凉,0代表中性,1代表较暖,2代表暖,3代表热)。通过入户实测和问卷,可以反映杭州市住宅居民在典型供暖方式和活动状态组合下的热环境和热舒适特征。

1.2.3 基于PCS的典型住宅冬季室内热舒适和能耗模拟预测方法

从房产网站(房天下、安居客等)获取杭州市主城区的住房信息,得到住宅建筑样本7714栋。收集的样本信息包括建成年代、建筑楼层、平面形式、单元数量、建筑面积。得出典型的住宅建筑特征为16层高层板式建筑,户型为三室两厅,每户建筑面积为90~100m²,2个单元,一梯两户。结合以上特征,筛选出典型平面,作为本研究的典型建筑形式,见图2。

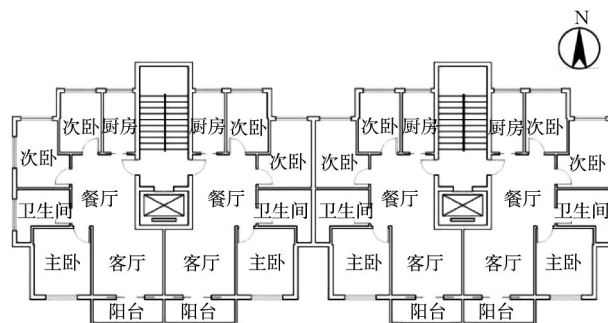


图2 典型建筑平面图

Fig.2 Typical architectural plan

2010年建设部发布《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ134—2010,要求该地区住宅建筑节能率达到节能率50%。上述典型建筑的建成年代在2010—2015年之间,因此围护结构根据《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》JGJ134—2010的规定进行设置。构造及热工性能参数如表2所示。换气次数为1次·h⁻¹,各朝向窗墙比为南北向0.4、东西向0.3。

以问卷调研数据聚类得到的住户典型热环境调节组合模式(空调、开窗、遮阳)作为输入参数,利用Design Builder模拟软件进行模拟计算,输出结果为

表 2 典型建筑的围护结构构造及热工性能参数

Tab.2 Envelope structure and thermal performance parameters of typical buildings		
建筑围护结构	构造	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)
外墙	20mm 厚水泥砂浆;20mm 厚聚苯乙烯保温板;240mm 厚砖墙;20mm 厚水泥砂浆;	1.0
屋顶	6mm 厚卷材防水层;40mm 厚聚苯乙烯保温板;10mm 厚 1:3 水泥砂浆找平层;40mm 厚水泥砂浆 2% 找坡层;120mm 厚钢筋混凝土屋面板;20mm 厚水泥砂浆	0.8
窗户	铝合金双层中空玻璃窗	2.2
隔墙	20mm 厚水泥砂浆;120mm 厚砖墙;20mm 厚水泥砂浆	2.22
楼板	100mm 厚钢筋混凝土屋面板	2.93

空调系统作用下的冬季能耗和室内逐时温度。

根据调研得到的客厅和卧室 PCS 逐时使用率,认为该栋建筑中相应比例的住户使用 PCS,根据平均功率和使用时间可以计算得出单位面积的 PCS 能耗。总能耗为空调能耗与 PCS 能耗的总和。

2 研究结果

2.1 冬季典型供暖方式聚类

问卷调研共回收样本数量为 240 份,其中冬初冬末 112 份、严冬 128 份。性别和年龄分布如表 3 所示。

表 3 各季节问卷被试者的性别和年龄分布						
时间	性别分布		年龄分布			
	男	女	20~29 岁	30~39 岁	40~49 岁	50 岁以上
冬初冬末	51	61	38	27	30	17
严冬	59	69	34	30	24	12

调查样本的性别比例接近,年龄段涵盖 20~50 岁,根据问卷调研结果,得出居民的典型在室规律:8:00—12:00、15:00—22:00 在客厅,其中 15:00—16:00 进行家务劳动,其余时间为看电视、阅读等静坐状态,13:00—14:00 及 23:00 至次日 7:00 在卧室睡觉。

对问卷调研的空调、开窗、遮阳及 PCS 使用数据进行多次聚类发现,当 k 取值为 3 时,满足聚类要求。从而得到三类典型模式。图 3a~3h 分别为冬初冬末客厅和卧室的典型热环境组合调节模式聚类结果。图中纵坐标为使用率/开启率,三条曲线分别代表聚类的三种结果。三类模式的样本数量分别是 47,22 和 43。由图可知,模式 1 傍晚(17:00—20:00)客厅空调使用频率较高,但最高仅为 30%,卧室空调夜间睡前开启,最高使用率为 40%;客厅白天开窗,卧室全天较低频率开窗;客厅卧室均为白天较高频率拉开窗帘,开窗帘的概率高于 50%,夜间关闭窗帘;PCS 仅中午和傍晚使用且使用率低于 20%。模式 2 客厅各时刻空调使用率均低于

10%,卧室夜间(21:00—次日 6:00)使用空调;客厅和卧室均为白天高频率开窗且打开窗帘;PCS 傍晚使用率最高,为 20%。模式 3 客厅卧室的空调均为较低频率开启,各时刻均低于 30%;客厅和卧室均为较低频率开窗,开窗率低于 40%;客厅全天较高频率打开窗帘,卧室白天开启窗帘,夜间关闭窗帘;卧室白天高频率使用 PCS。

图 4 分别为严冬客厅和卧室的典型供暖方式聚类结果,图中纵坐标为使用率/开启率,三条曲线分别代表聚类的三种结果。三类模式的样本数量分别是 19,54,55。由图可知,模式 1 白天(8:00—22:00)客厅空调高频率开启,最高时刻可达到 89%,夜间卧室空调高频率开启,其中 23:00—次日 6:00 开启率为 100%;客厅卧室均为白天较低频率开窗,所有时刻开窗率均低于 55%;客厅卧室白天较高频率拉开窗帘,开窗帘的概率高于 80%,夜间关闭窗帘;PCS 仅傍晚使用且使用率低于 40%。模式 2、3 客厅卧室的空调均为较低频率开启,各时刻均低于 30%。模式 2 客厅卧室均为白天(8:00—18:00)开窗且拉开窗帘;客厅白天 8:00—22:00 较高频率使用 PCS,使用率在 57%~96% 之间。模式 3 客厅和卧室均为较低频率开窗,开窗率低于 40%;客厅全天较高频率打开窗帘,卧室白天开启窗帘,夜间关闭窗帘;卧室白天高频率使用 PCS。

2.2 居民热舒适状况与室内环境的关系

现场测试中,居民使用的 PCS 类型包括小太阳、暖风机、油汀和其他各种加热设备,其比例为 42.2%、26.3、21.4% 及 10.1%。由于空调和 PCS 的运行状态和人体的活动状态均会影响人体的热舒适特征,因此,根据实测结果将设备运行分为无设备、使用空调、使用 PCS 三类。人员活动状态可归纳为静坐和家务劳动两类。结合设备运行和人员活动类型,共计“无设备+静坐”、“空调+静坐”、“PCS+静坐”、“无设备+家务劳动”、“空调+家务劳动”、

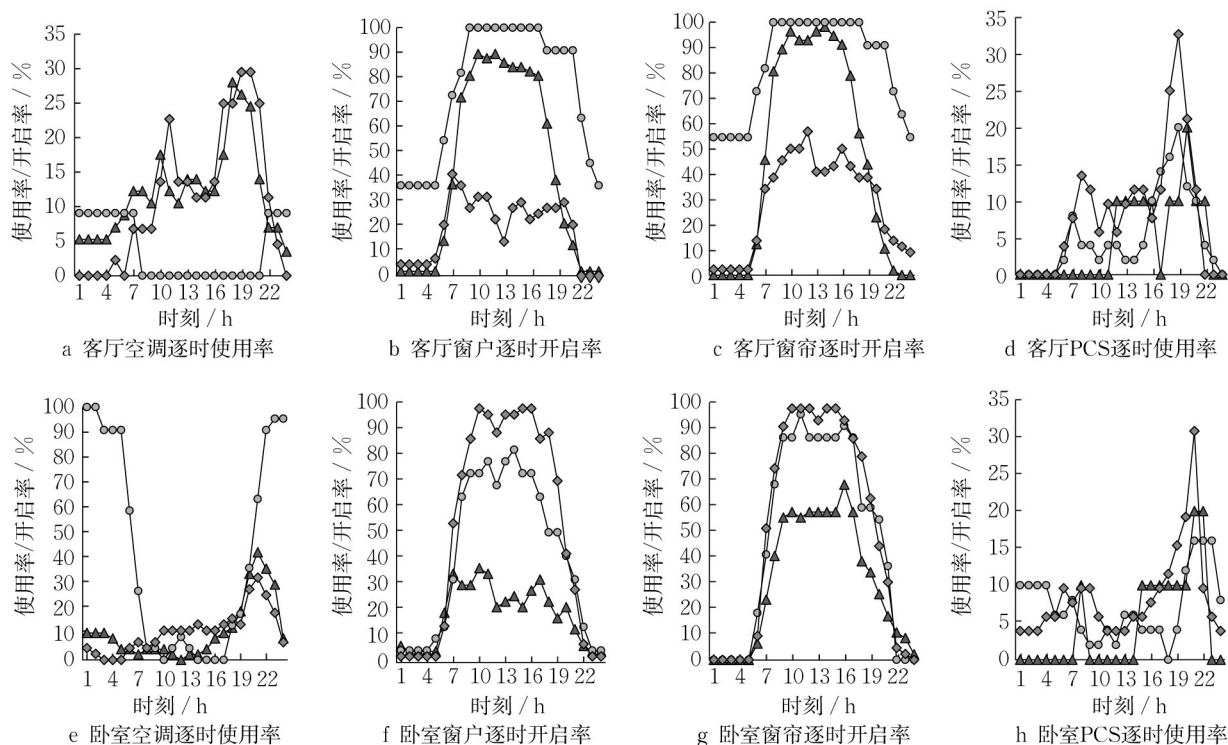


图3 冬初冬末典型热环境组合调节模式

Fig. 3 Typical combination regulation mode of thermal environment in early and late winter

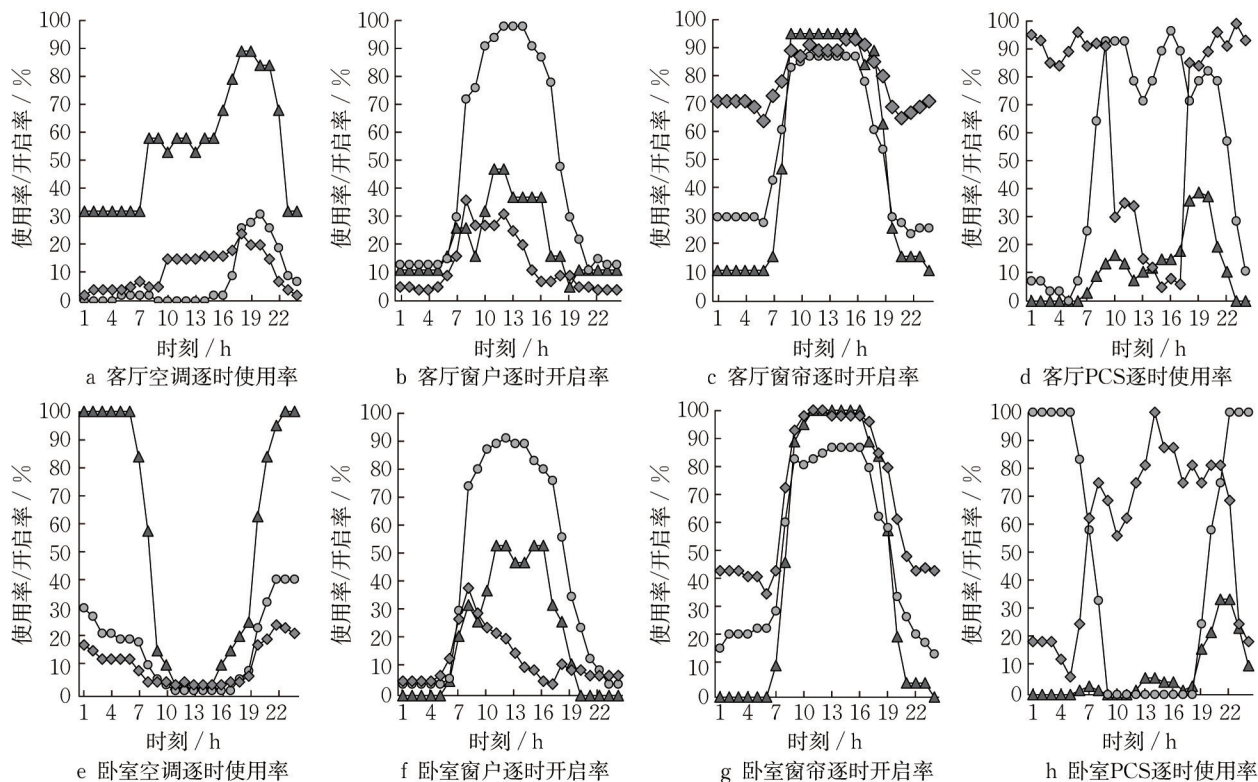


图4 严冬典型热环境组合调节模式

Fig. 4 Typical combination regulation mode of thermal environment in severe winter

“PCS+家务劳动”6种组合,采用温度频率法拟合出平均热感觉(y_{MTS})与室内温度的关系式,令 $y_{\text{MTS}}=0$,可以得出不同建筑冬季典型供暖方式和人员活动状态下的中性温度,令 $y_{\text{MTS}}=\pm 0.5$,可以得出不同建筑冬季典型供暖方式和人员活动状态下的舒适温度区间,见表4。其中,6种组合下的服装热阻值均根据《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB-T 50785-2012附录C查询获得单件服装热阻计算得出该状态下总服装热阻平均值,新陈代谢量根据该标准附录B取值。可以得出“无设备+静坐”、“空调+静坐”、“PCS+静坐”、“无设备+家务劳动”、“空调+家务劳动”、“PCS+家务劳动”6种工况下的中性温度分别是17.3、18.8、16.4、15.7、15.7、13.9℃,舒适温度区间分别是14.3~20.3℃、17.1~20.5℃、14.4~18.4℃、13.7~17.8℃、13.3~18.1℃、11.0~16.9℃。这些热舒适区间低于ASHRAE 55-2017标准,是由于居民长期的生活环境与生活习惯使得他们对于冬季的寒冷环境具有一定的适应性。与《民用建筑室内热湿环境评价标准》GB-T 50785-2012(以下简称“标准”)相比也存在差异,标准中将室内环境分为人工冷热源和非人工冷热源环境。对人工冷热源室内环境,因为冬季居民服装热阻 $>1.0\text{clo}$,标准中采用图示法进行评价,可知当人体代谢率为 $1.0\text{met}\sim 1.3\text{met}$ 时,Ⅱ级舒适区的体感温度范围约为 $19\sim 24^\circ\text{C}$ 。本文的舒适区间以空气温度为指标,在“空

调+静坐”情况下,舒适温度区间为 $17.1\sim 20.5^\circ\text{C}$,按照标准附录D折算为体感温度为 $16.7\sim 20.2^\circ\text{C}$ 。标准中人工冷热源指的是空调环境,没有涉及到居民使用PCS的情况,也未规定人体代谢率较高(如“无设备+劳动”、“空调+劳动”、“PCS+劳动”工况)时的舒适温度区间。对非人工冷热源室内环境评价的Ⅱ级舒适区为体感温度 $16\sim 30^\circ\text{C}$,根据标准附录D可知,此时体感温度可近似等于空气温度,即冬季热舒适的下限为 16°C ,本文得出的冬季“无设备+静坐”工况下热舒适区间为 $14.3\sim 20.3^\circ\text{C}$,略低于标准。这是由于标准对于夏热冬冷、夏热冬暖和温和地区均采用了相同的舒适区间,在一定程度上无法准确反映某一地区如杭州市特定条件下的居民热舒适特征。

本文采取大样本问卷调查的方法,热舒适评价使用居民热感觉投票这一指标,数据来源于作者住宅现场测试特定设备运行方式(空调、PCS或无设备)和居民活动情况(静坐、家务劳动)下的实验结果,可以较准确的反映当地居民在住宅内的热舒适情况。对于同一种人员行为,无设备时的舒适区间最宽,使用空调或PCS缩小了热舒适区间,降低了居民的热适应性。例如,在静坐时,不使用设备时居民可以接受的温度下限为 14.3°C ,使用PCS和空调后,这一数值分别提高了 0.1°C 和 2.8°C 。另外,入户实测发现,PCS的平均功率为837W。

表4 冬季典型供暖方式和居民活动状态组合下的中性温度和舒适温度区间

Tab.4 Typical winter neutral temperature and comfortable temperature range under the combination of typical heating methods and residents' activity state in winter

工况	拟合公式	中性温度/ $^\circ\text{C}$	舒适温度区间/ $^\circ\text{C}$	服装热阻平均值/clo	新陈代谢量平均值/met
无设备+静坐	$y_{\text{MTS}} = 0.17x - 2.89, R^2 = 0.67$	17.3	14.3~20.3	1.32	1.2
空调+静坐	$y_{\text{MTS}} = 0.29x - 5.38, R^2 = 0.73$	18.8	17.1~20.5	1.17	1.2
PCS+静坐	$y_{\text{MTS}} = 0.25x - 4.04, R^2 = 0.73$	16.4	14.4~18.4	1.26	1.2
无设备+劳动	$y_{\text{MTS}} = 0.24x - 3.83, R^2 = 0.76$	15.7	13.7~17.8	1.25	1.6
空调+劳动	$y_{\text{MTS}} = 0.21x - 3.26, R^2 = 0.59$	15.7	13.3~18.1	1.14	1.6
PCS+劳动	$y_{\text{MTS}} = 0.17x - 2.36, R^2 = 0.65$	13.9	11.0~16.9	1.18	1.6

注:1clo=0.155m²·K·W;1met=3.5ml·(kg·min)⁻¹。

2.3 室内热环境模拟结果

根据表4中的热舒适温度区间判断白天热舒适状况,即根据某时段下居民处于静坐或活动状态和该时段所采用的供暖方式(空调或PCS),对应表3中6种组合工况冬季典型供暖方式的热舒适区间,判断该时段是否达到热舒适要求。夜间热舒适的判断标准依据文献确定,冬季居民处于睡眠状态的热舒适区间为 $11.2\sim 18.8^\circ\text{C}$ ^[17]。对于冬季夜间使用PCS的情况,上述入户实测发现^[14]使用PCS后室内

温度平均升高 2.7°C ,因此将模拟得出的夜间室温增加 2.7°C ,再根据冬季睡眠热舒适区间 $11.2\sim 18.8^\circ\text{C}$ 判断是否达到舒适。舒适区间占比为客厅和卧室在室时间内(8:00—12:00、15:00—22:00在客厅,13:00—14:00及23:00—次日7:00在卧室)满足舒适区间的小时数占对应房间在室总小时数的比例。表5统计了该典型建筑冬初冬末的空调+PCS作用下客厅和主卧室室内热舒适指标。模式1、3的客厅、卧室空调使用率相近,模式1客厅开窗频率远高于模式

3,因此,模式1的客厅在室平均温度和客厅在室舒适时间占比低于模式3。可见,对于该典型建筑,冬初冬末的室内热环境受开窗影响较大,调整开窗遮阳行为可使室内舒适时间占比提高。模式2客厅白天基本不使用空调,因此客厅舒适时间占比仅为43.21%。三种模式下卧室热环境质量均较好,同时夜间热舒适室温范围较宽,较低频率使用空调也可达到99%以上的时间满足热舒适。

表5 典型建筑冬初冬末的客厅和主卧室内热舒适情况

Tab.5 thermal comfort situation in living rooms and bedrooms of the typical building in early and late winter

模式	客厅在室平均温度/℃	客厅在室舒适时间占比/%	卧室在室平均温度/℃	卧室在室舒适时间占比/%
模式1	14.73	59.75	16.07	99.59
模式2	13.50	43.21	16.88	100.00
模式3	16.41	80.74	16.49	100.00

表6统计了该典型建筑严冬的客厅和主卧室内热舒适指标。可见,在严冬季空调行为对室温的影响极大。模式1空调客厅和卧室的开启率均为最高,因此在三种模式中平均温度最高,客厅空调在傍晚16:00—22:00使用率达到最高,可明显看出温度较白天升高。卧室夜间空调使用率在80%以上,因此卧室温度较高。居民采用模式1(空调开启率较高)时客厅和卧室分别有83.74%和97.56%的时间达到热舒适,明显高于模式2和3。采用模式2和3时客厅在室平均室温仅为10~14℃左右,满足热舒适条件的时间占比相对较小,分别为47.95%和57.53%;卧室空调使用率所有时刻均低于40%,在室平均温度仅为14.05℃和12.88℃,仅有84.32%和76.10%的时间可以满足热舒适需求。

表6 典型建筑严冬的客厅和主卧室内热舒适情况

Tab.6 Thermal comfort situation in living rooms and bedrooms of typical building in severe winter

模式	客厅在室平均温度/℃	客厅在室舒适时间占比/%	卧室在室平均温度/℃	卧室在室舒适时间占比/%
模式1	17.42	83.74	17.60	97.56
模式2	10.41	47.95	14.05	84.32
模式3	13.17	57.53	12.88	76.10

2.4 能耗模拟结果

以典型建筑形式进行建模,以问卷调研数据聚类得到的住户典型热环境调节组合模式(空调、开窗、遮阳)作为输入参数,利用Design Builder模拟软件进行模拟计算,可输出冬季空调能耗。PCS能耗可根据调研得到的客厅和卧室PCS逐时使用率以及

现场测试得到的取暖器平均功率计算。

表7为典型建筑分别在采用3种热环境组合调节模式时冬初冬末能耗模拟结果。模式1、3空调使用频率接近,因此典型建筑在模式1和模式3作用下的空调能耗也相近。模式2的客厅空调使用率较低但卧室夜间空调使用率较高,可达到60%以上,因此在3种模式中空调能耗最高,达到1.53kWh·m⁻²。PCS能耗在0.30~0.53kWh·m⁻²之间。总能耗在1.07~1.93kWh·m⁻²之间。结合3种模式的比例(47:22:43),采用加权平均的方式得出该典型建筑在冬初冬末的能耗强度是1.28kWh·m⁻²,冬初冬末季节户均能耗为126.97kWh·户⁻¹。

表7 典型建筑冬初冬末能耗模拟结果(kWh·m⁻²)

Tab.7 Simulation results of energy consumption of typical buildings in early and late winter (kWh·m⁻²)

模式	空调能耗	PCS能耗	总能耗
模式1	0.77	0.30	1.07
模式2	1.53	0.40	1.93
模式3	0.64	0.53	1.17

表8为典型建筑分别在采用三种典型行为时严冬能耗模拟结果。模式2、3空调使用率很低,因此空调能耗较低,仅为2.58~2.95kWh·m⁻²,但此两种模式下PCS使用时间较长,PCS能耗达到9.06~11.00kWh·m⁻²。模式1客厅白天使用空调、卧室夜间使用空调,空调能耗为12.89kWh·m⁻²,PCS能耗为1.66kWh·m⁻²。严冬建筑的总能耗水平在12.01~14.56kWh·m⁻²之间。结合三种模式的比例(19:54:55),采用加权平均的方式得出该典型建筑在严冬的能耗强度是13.06kWh·m⁻²,严冬季节户均能耗为1295.55kWh·户⁻¹。

表8 典型建筑严冬能耗模拟结果(kWh·m⁻²)

Tab.8 Simulation results of energy consumption of typical buildings in severe winter (kWh·m⁻²)

模式	空调能耗	PCS能耗	总能耗
模式1	12.89	1.66	14.56
模式2	2.95	9.06	12.01
模式3	2.58	11.00	13.57

本文的模拟结果基于杭州市典型住宅建筑和热环境调节行为的典型模式,无法与具体某一栋建筑的能耗结果进行对比验证,但是典型建筑冬季能耗强度为13.34kWh·m⁻²,与已有的夏热冬冷地区住宅采暖能耗研究结果一致^[18-24],如武茜^[17]通过调查得出,杭州市居民采暖空调用电量为11.1kWh·m⁻²;朱

荣鑫等^[18]计算杭州市采暖能耗值在 $8.99\sim 24.22\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间;李哲对夏热冬冷地区(苏州和上海)使用非中央空调的居民冬季采暖能耗调查显示,采暖电耗在 $14.7\text{ kWh}\cdot(\text{m}^2\text{ a})^{-1}$ 以内^[19];清华大学建筑节能研究中心的研究^[20]表明夏热冬冷地区冬季采暖能耗普遍分布在 $10\text{ kWh}\cdot(\text{m}^2\text{ a})^{-1}$ 以内,并对位于上海的住宅进行了模拟,控制温度为 $14\sim 22^\circ\text{C}$,采暖耗电量为 $4\sim 28\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[21]。王悦等人通过研究表明,2012年南方城镇住宅采暖能耗为 $15.26\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[22],重庆家庭冬季采暖用电主要集中在 $0\sim 400\text{ kWh}$ 之间,少数家庭采暖用电量在 $400\sim 800\text{ kWh}$ 之间,个别家庭超过了 $1\,000\text{ kWh}$;调研住房平均为 70 m^2 ,单位面积采暖能耗为 $0\sim 11.43\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$,个别超过 $14.29\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ ^[23]。因此可以认为模拟结果具有可信性。

3 结论

本文以杭州地区住宅为研究对象,通过入户实测揭示了典型供暖模式和居民活动状态的组合工况下冬季住宅热舒适特征;通过问卷调研和聚类分析,得出了杭州市居民在冬初冬末和严冬的典型热环境调节模式;在此基础上,选取杭州市最典型的一类住宅建筑类型,基于典型热环境调节模式(空调、开窗、遮阳和PCS使用)和不同供暖方式和活动状态下的热舒适特征,模拟分析现行冬季典型供暖方式下的冬季供暖能源需求和室内热舒适现状,得出以下结论:

(1)通过聚类分析,得出了杭州市居民在冬初冬末和严冬的典型热环境调节模式。

(2)冬季“无设备+静坐”、“空调+静坐”、“PCS+静坐”、“无设备+家务劳动”、“空调+家务劳动”、“PCS+家务劳动”六种工况下的中性温度分别是 17.3 、 18.8 、 16.4 、 15.7 、 15.7 、 13.9°C ,舒适温度区间分别是 $14.3\sim 20.3^\circ\text{C}$ 、 $17.1\sim 20.5^\circ\text{C}$ 、 $14.4\sim 18.4^\circ\text{C}$ 、 $13.7\sim 17.8^\circ\text{C}$ 、 $13.3\sim 18.1^\circ\text{C}$ 、 $11.0\sim 16.9^\circ\text{C}$ 。

(3)该典型建筑在冬初冬末的能耗强度是 $1.28\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$,在严冬的能耗强度是 $13.06\text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ 。冬季室内热舒适水平受热环境调节模式影响较大,客厅在室舒适时间占比在 $43.74\%\sim 80.21\%$ 之间,卧室夜间在室舒适时间占比均为 70% 以上。

由于篇幅所限,本文仅选取了2001—2015年间建成的最典型的一类住宅建筑进行分析,在今后的研究中可采取本文的研究方法,选取更多典型建筑

类型进行PCS作用下的热环境和能耗现状分析,为确定该地区基于自身特定供暖设备下的住宅室内热环境改善定量需求提供依据。

作者贡献声明:

陈淑琴:思路确定、方法指导、论文撰写修改、经费获取;

陈悦:问卷调研、数据处理、聚类分析、入户测试、性能模拟、论文撰写;

华颖、孔舒怡、张彦彤、王子煜、刘佳琪、徐怡宁:入户测试。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑热工设计规范:GB50176-93[S].北京:中国计划出版社,1993.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for thermal design of civil buildings: GB50176-93, [S]. Beijing: China Planning Press, 1993.
- [2] 付祥钊,高志明,康侍民.长江流域住宅冬季热环境质量[J].住宅科技,1993(3):10.
FU Xiangzhao, GAO Zhiming, KANG Shimin. Residential thermal environment quality in winter in Yangtze River Basin [J]. Housing Science and Technology, 1993(3):10.
- [3] CHEN Shuqin, WANG Xinzheng, 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.
- [4] 喻伟.住宅建筑保障室内(热)环境质量的低能耗策略研究[D].重庆:重庆大学,2011.
YU Wei. Research on low energy consumption strategy to guarantee indoor (thermal) environmental quality of residential building [D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [5] 杨捷.夏热冬冷地区住宅建筑室内物理环境质量研究[D].西安:西安建筑科技大学,2005.
YANG Jie. Study on indoor physical environment quality of residential buildings in hot summer and cold winter area [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [6] 王志勇,金蓉,刘畅荣.夏热冬冷地区住宅采暖降温方式及能耗现状调查研究[J].四川水泥,2016(9):78.
WANG Zhiyong, JIN Rong, LIU Changrong. Investigation and research on heating and cooling modes and energy consumption of residential buildings in hot summer and cold winter areas [J]. Sichuan Cement, 2016(9):78.
- [7] 全国人大代表:建议加快发展南方供暖市场[EB/OL]. [2021-01-12]. <http://www.china-heating.com/news/2020/54744.html>.
To the National People's Congress: it is recommended that speed up the development of the south heating market [EB/OL]. [2021-01-12]. <http://www.china-heating.com/news/2020/54744.html>.

- [8] 何雨欣,张展鹏,张亮,等.住建部回应“南方供热”:提倡适宜采暖局部供热.[EB/OL].[2022-04-20].<https://www.chinacourt.org/article/detail/2015/11/id/1757487.shtml>
HE Yuxin, ZHANG Zhanpeng, ZHANG Liang, et al. The Ministry of Housing and Urban-Rural Development responded to "Heating in the South": advising suitable heating and local heating [EB/OL]. [2022-04-20]. <https://www.chinacourt.org/article/detail/2015/11/id/1757487.shtml>
- [9] 张超,张连嘉,邹秋生,等.浅析夏热冬冷地区居住建筑供暖[J].暖通空调,2013,43(6):82.
ZHANG Chao, ZHANG Lianjia, ZOU Qiusheng, et al. Heating, ventilation and air conditioning [J]. Heating, Ventilation and Air Conditioning, 2013, 43(6): 82.
- [10] ZHANG Hui, ARENS Edward, ZHAI Yongchao. A review of the corrective power of personal comfort systems in non-neutral ambient environments [J]. Building and Environment, 2015,91:1
- [11] GUO Siyue, YAN Da, PENG Chen, et al. Investigation and analyses of residential heating in the HSCW climate zone of China: Status quo and key features [J]. Building and Environment, 2015,94:532.
- [12] 何颖东.个人舒适系统作用下的热舒适及用能行为特性研究[D].长沙:湖南大学,2019.
HE Yingdong. Research on thermal comfort and energy consumption behavior characteristics under the action of personal comfort system [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [13] 中国气象局.气候季节划分:QX/T 152-2012[S].北京:气象出版社,2012.
China Meteorological Administration. The division of climatic seasons: QX/T 152-2012 [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [14] 陈淑琴,陈悦,华颖,等.个人舒适系统作用下的杭州市冬季住宅居民热舒适特征[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(5):223.
CHEN Shuqin, CHEN Yue, HUA Ying, et al. Thermal comfort characteristics of residential residents in Winter under the effect of personal comfort system in Hangzhou City [J]. Journal of hunan university (natural science edition), 2022, 49 (5): 223.
- [15] 仇立平.社会研究方法[M].重庆:重庆大学出版社,2015.
QIU Liping. Social research methods [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2015.
- [16] 宋聪.冬季人体睡眠差异化热需求及热环境设计参数研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
SONG Cong. Research on differential thermal demand and thermal environment design parameters of human sleep in winter [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [17] 武茜.杭州地区住宅能耗问题与节能技术研究[D].杭州:浙江大学,2005.
WU Qian. Study on the problem of residential energy consumption and energy-saving technology in Hangzhou [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [18] 朱荣鑫,赵乃妮,王清勤,等.城市热岛效应对我国不同气候区既有居住建筑采暖空调能耗的影响研究[J].南方建筑,2020(5):16.
ZHU Rongxin, ZHAO Naini, WANG Qingqin, et al. Research on the effect of urban heat island on heating and air conditioning energy consumption of existing residential buildings in different climate zones in China [J]. Southern Architecture, 2020 (5):16.
- [19] 李哲.中国住宅中人的用能行为与能耗关系的调查与研究[D].北京:清华大学,2012.
LI Zhe. Investigation and research on the relationship between human energy use behavior and energy consumption in residential buildings in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [20] 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,2009.
Building Energy Efficiency Research Center of Tsinghua University. Study on the development of building energy efficiency in China [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009.
- [21] 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2011[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
Building Energy Efficiency Research Center of Tsinghua University. Study on the development of building energy efficiency in China [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011.
- [22] 王悦,赵鹏军.我国居民住宅建筑生活能耗差异性调查研究[J].北京大学学报(自然科学版),2018,54(1):162.
WANG Yue, ZHAO Pengjun. Investigation on the difference of residential building energy consumption in China [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2018, 54 (1):162.
- [23] 赵娅.夏热冬冷地区城镇居民收入对采暖能耗的影响研究[D].重庆:重庆大学,2020.
ZHAO Ya. Study on the impact of urban residents' income on heating energy consumption in hot summer and cold winter areas [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.