

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.01.007



# 基于人行为影响的住区建筑多主体 集成能耗模型

孙禹, 冷红, 蒋存妍

(哈尔滨工业大学 建筑学院, 哈尔滨 150090)

**摘要:**在城市建筑节能研究中,政府常常依赖城市能源与碳排放模型工具制定并评估节能策略。而当前的城市建筑能耗模型受限于开发技术等因素,尚存在诸多不足,例如,考虑人行为对建筑能耗的影响,建立行为、日常活动及与环境相关的综合能耗模型。关于此类模型合理的数学形式、参数选择的方法以及不同行为的模拟方式等问题还尚待进一步研究。采用多主体(Multi-Agent)建模技术,设计集成建筑能耗模型,以住区中的居民作为模型中活动的主体,模拟使用者行为习惯、活动对建筑能耗的影响;采用 ISO 13790 标准模拟建筑的供热和降温需求,并在集成环境中设计统一的描述框架,以相对独立的环境模拟、行为模拟模块形式进行交互,实现热环境模拟和基于主体活动的设备能耗模拟的有机结合。研究表明,住区居民的用能行为是影响城市建筑能耗密度变化的重要因素,实现对住区主体行为特征的引导是实现城市建筑节能目标的有效途径。

**关键词:**建筑能耗模型;多主体技术;行为能耗;城市节能

**中图分类号:**TU111.19 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2017)01-0038-13

## Multi-agent based energy model for domestic buildings based on occupant behavior

Sun Yu, Leng Hong, Jiang Cunyan

(School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, P. R. China)

**Abstract:** Energy model is one of the most significant tool to investigate building energy saving, which has been widely used by government in energy policy evaluation. However, there are still many limitations in current research technology and methodology. Especially the interaction between energy consumption and occupant behavior in daily activities should be further discussed. Lots of the research method and conception have not been well expanded by modeling and quantizing. Agent Based Domestic Community Energy Model is proposed to develop the simulation framework of energy consumption in the stock of domestic buildings. The occupants are taken as the agent to simulate the occupant behavior factors that influence building energy-saving potential under various policy scenarios. The proposed model can associate

**收稿日期:**2016-03-16

**基金项目:**国家自然科学基金(51678178);黑龙江省自然科学基金(E2015011)

**作者简介:**孙禹(1984-),女,博士生,主要从事城市规划研究,(E-mail)sunyuishere@126.com。

冷红(通信作者),女,教授,博士生导师,(E-mail)hitlaura@hit.edu.cn。

**Received:**2016-03-16

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 51678178); Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (No. E2015011)

**Author brief:** Sun Yu(1984-), PhD candidate, main research interest: urban planning, (E-mail) sunyuishere@126.com.

Leng Hong(corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail)hitlaura@hit.edu.cn.

the standard ISO-13790 for calculation the cooling and heating load, but also incorporate the interaction of agent behavior and energy use, which realize the organic combination of environment and behavior simulation. The results demonstrate that the agent behavior is one of the significant factors that influence building energy use intensity, and strengthening the guidance of occupant behavior is a scientific and effective way to achieve the goal of building energy efficiency.

**Keywords:** building energy model, multi-agent based model, occupant behavior, city energy efficiency

住宅建筑能耗是城市能源消耗的主要因素<sup>[1]</sup>,相比商业、教育和政府建筑等,住宅建筑缺乏统一规范的使用管理体系和更加专业的节能管理办法,导致微观上的能耗使用规律复杂、更容易被忽视<sup>[2-3]</sup>。住宅建筑的节能空间与潜力很大,大部分研究主要集中在既有建筑的改造策略,如改进建筑墙体的隔热特性或对建筑内部设备和设施进行更新<sup>[4-7]</sup>。然而,建筑内部使用者的行为和使用习惯对能耗也有显著影响,其能耗水平高度依赖于居民的个人活动<sup>[8]</sup>。长期以来,中国形成的建筑使用模式以自然优先,通常利用机械系统改善室内环境的极端情况,而使用者行为可以影响室内环境变化,在节能研究中也应该考虑和突出人的适应和调节能力等,考虑人行为对于建筑能耗的影响<sup>[8-9]</sup>。

目前,住宅建筑能耗的预测研究普遍采用基于物理特性的自下而上模型方法,其设计多以单体建筑为对象,通过实际物理关系预测建筑能耗,通常节能措施对建筑的影响可以在这种模型中反映出来,具有便于政策评估、使用人数众多<sup>[10-11]</sup>的特点。例如,CREEM模型<sup>[13]</sup>通过划分住宅建筑类别选取典型参数,研究减少碳排放的政策措施。Snäkin等<sup>[14]</sup>的区域建筑能耗模型以北卡(North Karelia)地区为示例,通过自下而上的数值模型,模拟区域住宅建筑每年的CO<sub>2</sub>排放量,但模型的静态性使其不能够对实时变化的政策进行动态响应模拟。劳伦斯伯克利国家实验室开发了住区建筑能耗模型<sup>[15]</sup>,模型主要考虑建筑的物理材料,如窗户、屋顶、墙体等因素,计算用能负荷,但模型主要用于模拟房屋热环境的能耗需求,对于其他用途,如热水、照明等,模拟较为简单,亦没有考虑到人的行为对能耗系统产生的影响。Hens等<sup>[16]</sup>同样采用基于物理特性的自下而上模型方法建立住宅建筑能耗模型,对不同的能源消耗形态进行预测与节能评估。该方法的不足是对数据依赖较大,模拟过程中不能灵活引入其他建筑形式或应用不同技术。总的来说,自下而上模型的设计多以单体建筑为单位,通过实际物理关系模拟建筑能

源需求,通常节能、改造措施对建筑能耗的影响可以在这种模型中反映出来,因此,方便进行节能政策评估。目前,此类方法的主要局限在于数据需求量大,模型对于动态变化的需求响应政策(Demand Response)缺乏模拟能力,亦不能实现对使用者行为的模拟,影响了模型对节能政策评估的准确性<sup>[17-18]</sup>。对此,很多研究开始关注日常行为的模型方法,为建筑节能领域研究开辟了新的视角<sup>[19-21]</sup>。其中,基于多主体(Muti-Agent)建模方法的引入,为建筑中的行为模拟研究开辟了新的空间。例如,Zhao等<sup>[22]</sup>建立了针对商业建筑的多主体能耗模型;Zhang等<sup>[23]</sup>建立了针对办公建筑的多主体建筑能耗模型,并进一步将建筑内部设备分为连续设备与间歇设备进行模拟。此类研究对于充分理解城市建筑的能耗模式、评估节能策略具有重要意义<sup>[24]</sup>。

但目前基于智能主体(Agent)的建模方法在建筑能耗领域的应用研究仍然较少,特别是住宅建筑缺乏统一监督,相关用能行为的动态模拟研究较少。其次,独立的行为能耗模拟往往带有一定的随机性和统计特征,其模拟的精确水平仍有待提高<sup>[8,11]</sup>。此外,Agent建模方法的应用仍主要基于独立的个体行为特征,表达个体层面的建筑能耗,不能充分发挥基于多主体(Muti-Agent)建模的优势。因此,笔者基于将两种方法结合的定位,将自下而上的方法用于最终的能耗计算,将Agent方法用于个人行为建模,合理选择模型的参数建立自下而上的物理与多主体(Agent)行为综合的集成方式研究,实现二者有机结合,提高行为能耗模拟的准确性是本研究构建多主体能耗模型的主要目的。

## 1 研究思路及相关概念

### 1.1 集成能耗模型的研究思路

建筑能耗受很多因素影响,如气象条件、室内人员行为、外墙保温性能、暖通空调系统等,其中一些环境和物理因素可以在建筑能耗模型中进行参数化计算<sup>[12,25]</sup>。同时,人员密度、使用者对设备的使用习

惯和生活行为也对建筑能耗有明显影响,这两种因素都应该反映在建筑能耗模拟中。笔者对影响能耗的两类因素分别建模,并在集成环境中实现对建筑用能中环境、物理与生活行为因素叠加影响的动态分析。模型中环境能耗的计算基于热环境的仿真,这是学者们研究的重点,同时也是多数能耗仿真软件的内在机理<sup>[26-27]</sup>。研究中,周围环境与建筑内部热交换的能耗计算方法采用 ISO 13790 建筑温度模拟标准的小时简化模式,ISO 13790 即建筑物能源性能-空间供热和制冷的能源使用计算标准<sup>[28]</sup>,该标准是由欧洲标准化委员会(CEN)在其建筑用能管理项目(Energy Performance of Buildings Directive EPBD)中发布的一个建筑能源性能计算方法。标准中提供了以周/月两种模式的建筑空间用能详细计算方法。后期为了增加如温度值设定、依据日照阴影而指定的操作时间表等控制类型条件,标准扩展了以每小时为单位的计算方法,固定部分参数简化了计算程序。无论哪种计算方法的选择,标准都为边界条件和物理输入数据提供了基本的规则。很多研究根据此标准开发了标准化的能耗计算模型,如 Energy Performance Standard Calculation (EPSCT)<sup>[29]</sup>。笔者基于 ISO 13790 方法建立热平衡来计算维持室内适宜范围内温度所需的能耗,其中周围环境与建筑内部热交换考虑的因素主要为热摄取(如墙体渗透、日照、通风、室内电器散热、室内的人散热等)和热散耗(如通风散耗、墙体渗透等),研究中称为“环境能耗”。其次,需要考虑作为建筑能源消耗主体的居民行为<sup>[8-9,18]</sup>。建筑内部需要通过设备使用满足居民的饮食、娱乐等生活需求,这些设备的耗能称为“生活能耗”。此外,从使用者自身属性和习惯出发,根据其对环境热舒适的适应和对生活、娱乐的需要,通过智能体模型反映各个时刻设备的使用状态和其他调节环境行为,实现使用者主体行为对建筑内部温度和能耗影响的计算。最后,进一步采用集成模型方法,在集成多主体环境中设计统一的描述框架,以相对独立的环境模拟、行为模拟模块形式进行交互,实现热环境模拟和基于主体活动的设备能耗模拟的有机结合,完成综合性的系统演化。

综上所述,在基于自下而上物理特性的建筑模型来模拟建筑内部温度变化以及由此带来的能耗需求的基础上,基于 Agent 来模拟个人行为对建筑内部温度和能耗的影响。所搭建的模型除独立个体之

外,同时还考虑不同个体之间的交互及其对建筑能耗的影响。从住区能耗模拟的可操作性角度出发,简化不同类建筑物理特征参数,重点分析人行为与环境对建筑用能的影响,采用 NetLogo 集成平台建立基于多主体仿真的住区住宅建筑集成能耗模型。基于哈尔滨市一典型小区的住宅建筑 1 个月的气候数据、建筑物理数据和行为统计数据进行模型应用研究。

## 1.2 住区建筑能耗

由于城市住宅建筑是城市能耗的主要来源,因此,对住区的住宅建筑能耗进行研究。住区中住户的家庭结构和行为活动也普遍存在规律性,这是构建行为规则的基础。同时,住区建筑能耗也能够反映住区居民的活动内容和功能需求的特征,因此,开展以往住区建筑能耗研究对于实施行为引导、实现节能目标更有现实意义。此外,从模型设计角度来看,自下而上的物理能耗模型研究的重点在于不同类型建筑的材料、围护结构、墙体隔热、HVAC 系统等对能耗的影响,模型中通常包含大量参数,数据计算量相对较大,而基于多主体(Agent)的方法则侧重研究人的行为对能耗的影响,仅需要一定量的数据来支撑 Agent 的行为规则,建筑物理材料参数则尽可能简化,相比之下模型数据需求小。同一住区中建筑的建造时间、建造材料、内部结构基本相同,各类物理数据只需以一种或几种为例即可,满足基于 ISO 13790 的计算方法,也符合侧重 Agent 行为的能耗模拟方式。

## 1.3 多智能体(Agent Based Model, ABM)模型技术

基于主体(Agent)的建模与仿真(Agent Based Modelling and Simulation, ABMS)是一种相对较新的复杂系统建模方法,系统中包含许多相互作用的具有自主行为的主体<sup>[30]</sup>。中国对 Agent 有很多命名方式,如智能体、主体、代理人等,Agent-based 模型也有如多智能体模型、多主体模型、多主体系统等命名,其实质是一样的,都指内部独立的个体能够与其他同类对象进行智能交流和反馈的一类模型。笔者将模型内部独立的基本个体称为“主体 agent”,将含有规则和智能反馈状态的模型称为“智能体”,将多个智能体的组合称为“智能体系统”。ABM 模型中主体与环境、主体与主体之间的相互影响和作用形成系统演化的主要动力。系统中独立的主体按照一定规则运转,在对实际系统进行观察的同时收集微观和宏观数据反映演化规则,使得个体的变化

成为整个系统变化的基础。系统的“宏观行为”由单个主体独立行为的相互作用共同体现,因而,模型的特征主要决定于系统中主体的行为规则,整个系统具有动态响应的特点。Bonabeau<sup>[31-32]</sup>在研究中多次指出在环境中重复进行交互是 ABM 的主要特征,这个过程是纯数理模型而无法实现。很多学者也一致认为,如果在模型规则的制定中必须包含对人行为的理解,那从这个角度出发,基于智能体建模的方法是最适宜的选择<sup>[33-35]</sup>。可见 ABM 技术并不是采用简单的概率叠加方式进行多行为模拟,模型能够反映行为方式的多样性和相互作用,适合在建筑能耗研究中建立多因素、多活动影响的集成模拟。

目前,主体建模方法已经广泛应用于许多领域与学科中,包括股票市场模拟、流行病的扩散以及消费行为理解等<sup>[30]</sup>。同时,由于主体建模方法在复杂系统建模上的优势,在与建筑用能研究密切相关的城市能耗系统(Urban Energy System)及地理系统建模中,主体模型的应用也很广泛。比较有代表性的是利用 ABM 技术设计主体模型评估需求响应政策,模型情景由供能方和消费者共同参与,依据消费者的能源消耗行为,动态调节能源的实时价格,从而达到节能目的<sup>[36-37]</sup>。基于 Agent 个人行为模拟的研究文献较多<sup>[38-41]</sup>,而 ABM 技术与 5R1C 模型的结合是笔者首次提出,主要定位是二者相结合,将自下而上的方法用于逐时动态建筑能耗计算,将智能体技术用于个人行为建模。

## 2 研究方法

### 2.1 住区建筑能耗的影响因素组成

建筑能耗的影响因素十分复杂,笔者重点考察与人的行为模拟相关的几类因素。一是周围环境对建筑能耗的影响,指维持建筑内部温度环境使其满足使用者热舒适需求的能源使用,主要依靠供热和冷却设备,称为“环境能耗”。二是活动对能耗的影响即满足居民基本生活和习惯的能源使用,如饮食、娱乐等生活需求对各种用能设备的使用,包含设备较多,如厨具、照明设备以及娱乐设备等,根据用能方式将其划分为 4 类,此类用能称为“生活能耗”。三是使用者对建筑内环境和能耗产生的影响,包括建筑内人体向外界散热,居民因热舒适的需求通过多种行为方式改变室内温度环境,例如开风扇、开空调、开窗等。笔者在研究中主要按照影响建筑能耗的以上 3 类组成要素构建模型,为模型应用奠定基础。

### 2.2 模型的模拟机理

2.2.1 环境能耗模拟 基于 ISO 13790 计算建筑内部环境温度。ISO 13790 的全称为“建筑物能源性能—空间供热和降温的能源使用计算标准”,是一种基于 5R1C 等效电阻电容网络的温度计算方法<sup>[28]</sup>。该模型将建筑内部空气温度和内部表面平均温度(即平均辐射温度)加以区分。这使得模型可以用于热舒适度检验,同时增加了对太阳辐射和建筑内部热源计算的准确性。模型通过对每小时供热和降温功率的计算得到房间供热和降温的能耗需求。供热和降温需求本质上是指为使建筑内部温度节点( $\theta_{\text{air}}$ )保持在一定的设定范围内需要向建筑内部提供或抽取的热量,如图 1。通风热传输通道( $H_{\text{ve}}$ )直接连接内部空气温度节点( $\theta_{\text{air}}$ )与供给温度节点( $\theta_{\text{sup}}$ )。热传递通道被分为窗体部分( $H_{\text{tr,w}}$ )和墙体部分( $H_{\text{tr,op}}$ )。窗体通道不包含热迟滞,而墙体部分由于包含热迟滞又被分为 2 部分( $H_{\text{tr,em}}$ 和  $H_{\text{tr,ms}}$ )。建筑环境的太阳辐射和内部热源则被分配到空气温度节点( $\theta_{\text{air}}$ )、中央节点( $\theta_s$ )和建筑墙体迟滞温度( $\theta_{\text{mass}}$ )中。

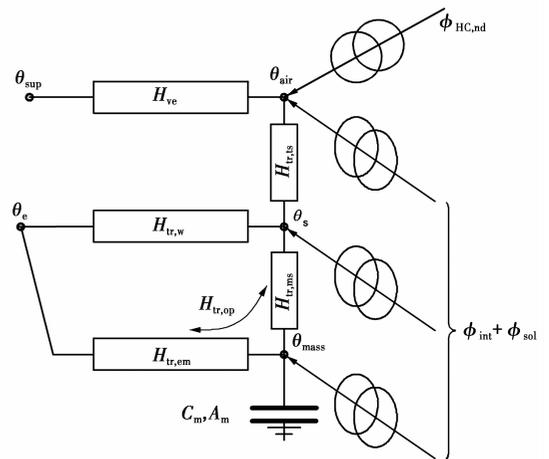


图 1 在基于 ISO 137990 的房屋温度环境模型 (5R1C 温度模型)

Fig. 1 Five Resistance and One Capacitance (5R1C) Model

模型中热量传输途径包括通风、热传递(墙体渗透)、太阳辐射、由内部设备等产生的额外获取的热量等。这些热量从建筑中流入和流出,因此,可以计算得到每小时的供热或降温(Heating or Cooling)需求。标准中要求的参数包括:

1)建筑自身属性:建筑几何形态(建筑面积、墙体面积、房顶面积、高度、窗墙比等),墙体材料和窗户类型(即 U-values, 传热系数; light absorption factors, 光吸收系数),HVAC 设备以及照明等发出

热量的设备。

2)建筑周围环境:建筑墙体的遮挡系数、窗户的遮挡系数、建筑周围的风力等。模型中暖气等供热设备直接向室内温度节点( $\theta_{air}$ )供热;空调等冷却设备直接从室内温度节点( $\theta_{air}$ )抽取热量;通风设备则直接提供室外空气温度( $\theta_{sup}$ )与室内温度( $\theta_{air}$ )的交互;热传递分为墙体热传递和窗体热传递,墙体传递将外部温度( $\theta_e$ )作用到室内墙体节点( $\theta_{mass}$ ),而窗体热传递则作用到室内墙体表面节点( $\theta_s$ );太阳辐射( $\phi_{sol}$ )、室内人员以及室内设备( $\phi_{int}$ )产生的热量则分别通过室内温度( $\theta_{air}$ )、室内墙体表面( $\theta_s$ )和建筑墙体迟滞温度( $\theta_{mass}$ )3个节点影响建筑的热环境。

在基于 ISO 13790 的房屋温度环境模型中,上述建筑自身属性和建筑周围环境为固定参数。此外,输入变量可总结为  $\theta_{sup}$ 、 $\theta_e$ 、 $\theta_s$ 、 $\theta_{mass}$ 、 $\theta_{air}$ 、 $\phi_{sol}$  和  $\phi_{int}$ 。根据 ISO 13790 中各热源的作用结点,设计实现单个房屋的温度环境模拟如图 1。图中房屋内部电器设备和人员等散发出热量( $\phi_{int}$ )的计算来自于 2.2.2 节的“生活能耗”模拟部分。

2.2.2 生活能耗模拟 “生活能耗”中的计算包括两部分:一是房屋内部的电器设备能耗;二是人员与设备散发出的热量( $\phi_{int}$ )。为方便规则定义,根据用能方式将住宅建筑内部设备分为连续设备(Continuous Appliances)、挂起设备(Standby Appliances)、制冷设备(Cold Appliances)、主动设备(Active Appliances)4类,具体的设备定义、特征与计算方式如表 1 所示。

表 1 民用建筑内部设备特征与状态设定

Table 1 Initial information of equipment in domestic buildings

设备分类	设备描述	
连续设备 Continuous Appliances	设备/特征	每天 24 h 连续工作的电器设备,连续设备对于建筑能耗有固定持续的影响。
	状态设定	连续使用且功耗恒定。
挂起设备 Standby Appliances	设备/特征	居住建筑内部具备挂起状态的电器设备,挂起设备通常每天 24 h 连续耗电,且其功耗与设备状态有关。
	设备举例	电脑、电视等具有休眠或者待机作用的设备。
	状态设定	常用的状态包括断电、挂起和激活状态;除非居民将挂起设备切断供电,挂起设备将处于挂起或激活状态;当处于挂起状态时,设备的功率较低。

续表 1

设备分类	设备描述	
制冷/热设备 Cold Appliances	设备/特征	住宅中的某些设备与电器设备虽每天 24 h 连续工作,但其功率并非 24 h 恒定,而是随温度传感器检测到的阈值进行加大功率的降温操作,所以部分制冷设备被单独分为一类。
	设备举例	冰箱、冰柜、部分空调、热水器。
	状态设定	当温度传感器检测到室内或设备内部温度变化超出一定阈值、进行大功率的降温操作。
主动设备 Active Appliances	设备/特征	住宅中的主动设备工作时功率恒定,由常用的生活和娱乐等电器设备组成。
	设备举例	灯具、电炊具、娱乐设备等。
	状态设定	主动设备工作时功率恒定;关闭时电源随即切断,此时功率为零。

住区住宅建筑中居民根据行为方式(普遍行为模式,具有节能意识)控制的设备主要为挂起设备和主动设备。居住建筑中总能耗可以表示为

$$E_{total} = E_{con} + E_{std}(S_{std}) + E_{fri}(S_{fri}) + E_{act}(S_{act}) \quad (1)$$

式中: $E_{total}$ 为居住建筑内部总能耗; $E_{con}$ 、 $E_{std}$ 、 $E_{fri}$ 和  $E_{act}$ 分别为连续设备、挂起设备、制冷设备和主动设备的瞬时功率; $E_{std}$ 为挂起设备的工作状态,包含断电、挂起、运行 3 种状态; $S_{fri}$ 为制冷设备的工作状态,包含断电、运行、制冷 3 种工作状态; $S_{act}$ 为主动设备工作状态,包含断电和运行 2 种工作状态。

此外,建筑内部电器设备在工作中电能的消耗有一定效率。多余的电能消耗将产生为热能,进而影响房屋的热环境。笔者考虑的主要设备、参数及效率设定见表 2。

表 2 民用建筑内部设备

Table 2 List of equipment in domestic buildings

类别	设备描述	名称	典型功率/W		效率/ %
			功率 1	功率 2	
连续设备	连续使用且功耗恒定	家用路由/ 无线 WiFi	8		80
挂起设备	使用者对设备的工作状态进行转换,不使用时其功耗或仍可能不为 0	电视-CRT	85	3.5	80
		电视-LCD	130	2.0	80
		电视-plasma	255	3.0	80
		机顶盒	15	12	80
		手机充电器	6	0.3	80
		台式电脑	200	5.5	80
		笔记本电脑	50	0.3	80
		空调	2 000	2.8	80

续表 2

类别	设备描述	名称	典型功率/W		效率/ %
			功率 1	功率 2	
制冷设备	平均每 0.5 h 自动控制制冷状态工作 3 min, 制冷功率和保存功率不同, 24 h 持续工作。	冰箱	1 200	1	80
主动设备	由使用者启动或关闭设备、关闭设备时功耗为 0。	灯	40		80
		电磁炉	2 000		80
		电水壶	1 200		80
		微波炉	1 300		80
		油烟机	200		80
		洗衣机	2 000		80
		电热水器	1 500/8 000		80
		电风扇	60		80
燃气设备	燃气设备消耗燃气, 释放热量影响房屋的热环境, 其功率为释放热能的功率	燃气灶	4 200		85

### 2.2.3 使用者对能耗的影响

1) 居民(使用者 Agent)主体自身对能耗的影响: 居民对房屋热环境的影响可根据普遍算法计算。通常人体向外界散热, 每小时释放的热量可将与人体相等质量的水温度升高 2 °C。处于房屋内的居民散发的热量功率为<sup>[28]</sup>

$$Q = C \times m \times \Delta t \quad (2)$$

式中:  $C$  为水的比热, 为  $4.2 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{°C}$ 。取  $\Delta t = 2 \text{ °C}$ , 重量为  $m(\text{kg})$  的居民散发热量的功率为  $7m/3 \text{ W}$ 。

2) 居民(使用者 Agent)行为对能耗的影响: 居民的作息、生活习惯影响各种能耗设备的使用, 其中包括基本的生活需求, 如使用电灯、炊具; 娱乐需求使用电视、电脑等娱乐设备改变主动设备的状态; 其次, 居民会因为舒适度需求, 使用热水器、控制空调、更改电风扇等设备的工作状态。此外, 居民会根据节能意识设置电器设备的节能状态, 或通过开窗方法以更加节能的方式获得满意的舒适度。通过对主体属性和规则的定义来反映和捕捉个人用能行为, 其规则主要是个人的社会特征、作息和生活习惯。在构建模型时不只针对单个使用者行为进行模拟, 同时, 也考虑家庭的结构和成员的属性, 通过多种行

为方式对室内环境进行调节。

## 2.3 智能体模型的设计及决策规则

2.3.1 模型智能体的组成 在主体模型中, 与主体相关的有主体属性和作用于主体的方法。主体的属性可以是静态的, 也可以是变化的。静态属性可以是主体的名称, 动态的属性可以记录过去的行为。主体的方法定义了主体的行为规则, 这些规则包括指导自己行为、指导行为的变化、甚至还包括规则自身的变化。主体的行为规则通常根据其工作的目的设定。为实现目标, 预定的“规则”指主体与其他主体、周围环境等相互作用的表现。当所有主体均被放置于系统中, 即基于主体的模型(图 3), 主体便具备从系统环境中学习的能力, 即会发生 3 个更新: 基于环境的更新 (situated update)、自主的更新 (adaptive update) 以及基于其他主体交互的更新 (interacting update), 如图 2 所示。

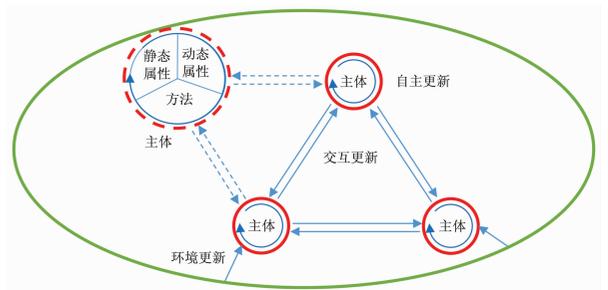


图 2 基于主体的模型及主体更新策略示意图

Fig 2 Agent based model and the update strategy of agent

基于智能体模型的社区住宅建筑能耗模型主要包括环境要素层、智能体层、行为规则及全局变量层。环境要素层是模型中智能体活动的场所(建筑)及其外部的环境。智能体层代表集成系统中的使用者(或家庭)智能体; 行为规则是智能体自主行动的计算方法及程序, 在模型中发挥核心作用; 全局变量层贯穿模型整个运行阶段, 响应每一部分的变化。

1) 环境要素层。环境要素由建筑本身的物理条件和和外部的环境的气候条件组成, 具有建筑系统、室内热源、位置(外部气候条件)等属性特征。

2) 智能体层。智能体层中设计使用者(居民)主体、房屋主体、设备主体、窗主体、门主体、电梯主体等如表 3。其中使用者 Agent 拥有自己的属性, 主要包括个人年龄、收入水平、生活习惯等。Agent 的规则主要指通过个人的属性确定其作息和生活规律, 并进行状态转换, 进而作用到各个能耗设备并消耗能源。

表 3 Netlogo 模拟参数描述

Table 3 Describe of parameters of Netlogo Model

主体类别	参数描述
房间主体	使用者进行活动的独立空间,以单个房间为单位一个单体房间组成一个房屋主体,该主体以居民住房的每个房间为单位,同时该主体区分不同的房屋类型。
居民主体	代表家庭中的不同成员,以个体为单位,成员根据社会属性设定初始习惯状态。
设备主体	对于每个家庭,该主体代表表格 3 中的一种设备,不同类型的房间主体内部的设备和数量不同。
窗主体	窗户为独立主体用于模拟开关窗户和更换窗户及窗帘的类型对于房屋热环境的影响。
门主体	门主体用于模拟门的开关及走廊环境对于房屋热环境的影响。
电梯主体	该主体主要用于模拟高层建筑中电梯的使用能耗。

3) 使用者 (Agent) 行为与环境的反馈。首先,分别定义房屋、人、电器和燃气设备为 Agent, 构建多主体的仿真环境。人作为活跃主体,其属性决定行为并最终影响房屋的能耗,而其他 Agent 的属性决定能耗,并没有行为变化。一次典型的能耗计算过程包括室外温度、阳光等环境因素对房屋属性的影响,以及室内使用者的活动变化对电器等能耗设备属性的影响。

人与建筑内部环境的相互作用,主要由建筑内部的环境舒适度和主体本身属性的转变决定,其中活跃主体的规律包括个人的作息和生活规律。因此,Agent 会根据温度、热舒适度、自身的收入水平、生活习惯(例如空调、开窗等行为的控制方式)作出反应并影响能耗;同时,由于房间内部设备能耗和居民活动发生变化,环境模型再次根据内部环境温度变化和外部环境进行热交换的简化计算。个人行为与室内温度环境之间存在很多反馈,在设定温度舒适度节点方面,模型主要考虑到一定的阈值时主体的不同行为(控制风扇/空调)等的概率会增加或减少,但超过舒适上下限会触发改变。热舒适度着重考虑人体与热环境是交互作用的结果,主体会通过心理和行为调节主动适应热环境的变化,模型设置的行为触发阈值参考《哈尔滨地区人体热舒适与热适应现场研究》设定<sup>[42]</sup>。同时,也考虑家庭的社会属性(收入和年龄等),根据调研结果在 Agent 模型

的编译环境 Netlogo 中增加概率模型的数学期望值。

2.3.2 模型中的假设条件和主体变量 模拟基于小时分辨尺度,模拟过程中以单个家庭的环境能耗及生活能耗作为基础,通过研究室内温度、设备的使用状态和用户习惯等,建立包含触发条件的动态关系。模型中能耗模拟过程可以总结为:行为规则是智能体自主行动的计算方法及程序,在模型中发挥核心作用。环境要素和建筑参数基于 ISO 13790 的计算方法进行建筑表面平均温度(即平均辐射温度)与建筑内部空气温度热交换的简化计算。由此得到建筑内部温度环境并确定内部热舒适度。生活能耗模拟中的两个模型通过行为规则层和建筑温度模拟模块中的热舒适度影响居民的活动状态和设备的使用状态(更改开启电风扇、空调或者打开、关闭窗户等)消耗能源并调节内部温度环境,此时模型全局变量层计算小时能耗,如此下一时刻程序反复进行。建筑能耗模拟如图 3 所示。

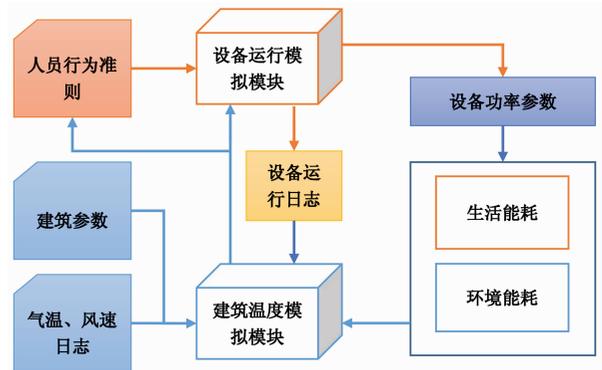


图 3 居住建筑能耗模拟示意图

Fig. 3 The framework of the domestic building energy simulation

### 2.3.3 模型的运行条件及属性设定

1) 建筑模型设定。将哈尔滨地区一处典型的 2 层别墅建筑作为模拟对象。该建筑为南北朝向,占地面积为 130 m<sup>2</sup>,阁楼结构,具有良好的通风隔热特性;建筑外墙墙体采用烧结空心砖块,内部空间分割墙体采用烧结空心红砖;窗户为双层玻璃 PVC 塑料框架,外门为钢表面结合内部泡沫保温芯。该建筑采用自然重力通风,假设换气次数为 1 次/h。除门窗采用设备提供的参数值外,其余根据建筑材料的国家标准进行计算。

对该建筑的一月份能耗情况进行模拟。根据 2015 年哈尔滨市一月份的气温、风速为气候输入数



### 3 模型仿真结果及分析

基于建立的多主体集成能耗模型,对一月份该栋建筑的能耗使用情况进行模拟。该建筑内使用者(agent)的身份包括儿童及其父母、爷爷、奶奶。根据身份属性分别定义为居民主体 1~5。其状态转换如图 6 所示。居民每天会在早上和下午进行开窗换气。研究设定 1 月份时仿真建筑内部居民仍处于正常工作/上学状态。建筑内居民主体活动状态、挂起设备与制冷设备将按预定状态运行。

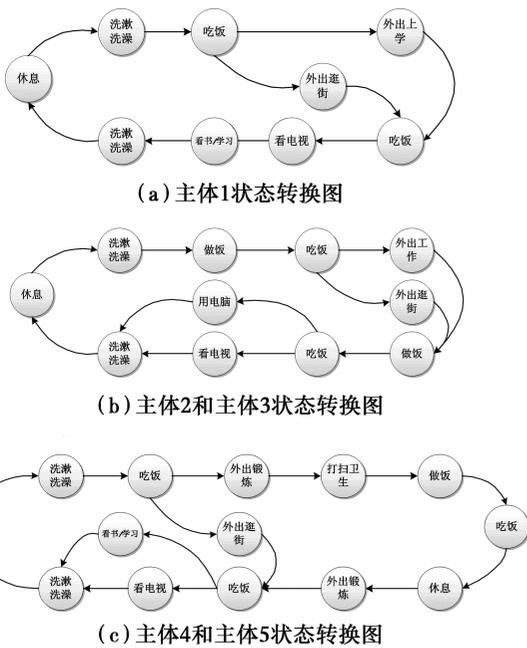


图 6 主体状态转换图

Fig. 6 State flow for agent

1) 环境因素对住区能耗的影响。在一月份的仿真模拟过程中,太阳辐射获取能耗如图 7 所示,一月份起居室内外温度如图 8 所示。当使用室内暖气对室内进行持续供热时(按照  $55 \text{ W/m}^2$ ),室外温度与太阳辐射得热共同影响室内温度与设备的使用状态。图中,红色温度线出现的间歇性下降现象是由于开窗换气引起的。模型基于小时分辨尺度进行模拟,通常开窗换气时间在 1 h 左右。

2) 行为因素对住区能耗的影响。仿真模型中建筑内部电器设备消耗电能功率如图 9 所示,室内能耗存在明显的周期特性,主要是由于居民工作和周末休闲活动时间比较固定。电器设备使用的功率峰值出现在电磁炉、洗衣机等大功率设备同时使用时。建筑内部能耗的局部峰值出现在多数居民在家、多种设备同时使用时,这反映了能耗波动受行为活动

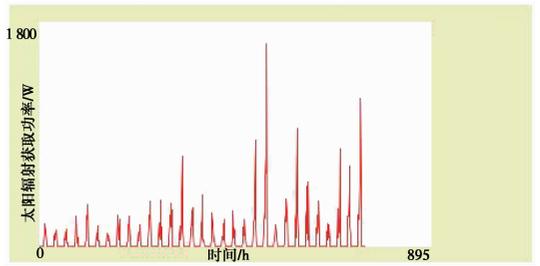


图 7 仿真建筑一月份太阳辐射获取功率

Fig. 7 Solar heat gains of the simulated building in January

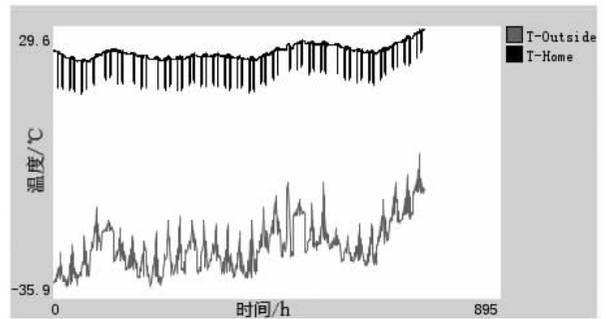


图 8 仿真建筑一月份恒定供暖时室内温度曲线

Fig. 8 The temperature of the internal air under constant heating

影响较大,而且不同用能习惯会导致建筑内部能耗峰值的大小及出现时间存在差异。用电管理部门可以通过行为分析,预测高峰出现的时间和具体数值,用于制定合理的供能管理方案与需求响应政策,确保能源使用的稳定性,抑制用能峰值出现的幅度与频率。

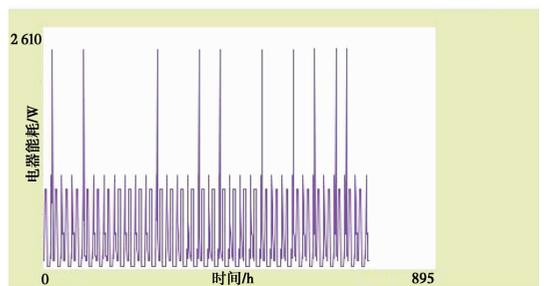


图 9 仿真建筑一月份室内电器能耗曲线

Fig. 9 The electricity consumption of the internal equipment

从预测建筑用电需求峰值出现的位置可以看出,用电需求在相似的区间变化不大,反映出不同家庭使用设备的种类差别不大。由于模型的随机性限制只表现出几种可能的情形,用能峰值出现的间距并不均匀,如图 9 所示,表明高能耗设备使用时间的随机性较大。此外,相对高峰用能的出现间隔相同,说明居住建筑内的能源使用活动、能源使用时间和

设备有明显的规律性,也反映了使用者活动会受到周围邻里活动的影响。图中连续横线描述了多次计算结果之间的集中程度,表示相同活动和状态持续的长短和发生的时间,数据较集中表明这段时间的能耗水平较稳定,规律性较强。

3)情景模拟结果分析。由于供热为哈尔滨市一月份能耗的主要组成部分,因此,对基于室内温度的动态供热策略进行模拟。模拟策略使用如图 4 所示的温度限制条件  $T_{\text{int,H,set}}$  和  $T_{\text{int,C,set}}$  进行动态供暖,包含两种供热情景策略。策略 1:当室内温度低于  $T_{\text{int,H,set}}$  时进行室内高功率( $65 \text{ W/m}^2$ )供热,当室内温度高于  $T_{\text{int,C,set}}$  时则使用低功率( $25 \text{ W/m}^2$ )供热;策略 2:对于居民节能意识高的家庭,当室内温度低于  $T_{\text{int,H,set}}$  时进行室内高功率( $55 \text{ W/m}^2$ )供热,当室内温度高于  $T_{\text{int,C,set}}$  则使用低功率( $35 \text{ W/m}^2$ )供热。采用动态供暖时室内温度及供热功率如图 10、图 11 所示。图中的 Threshold 阈值为  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ,将其作为概率的分隔值,即期望室内温度不低于  $T$  阈值的条件,以保证居民的住区舒适度。与恒定供热策略相比,策略 1 的供能能耗降低了  $7.6\%$ ,高功率供热时间占恒定供热时的  $64.2\%$ 。与恒定供热策略比,策略 2 的供热能耗降低了  $7.7\%$ ,高功率供热时间占恒定供热总时数的  $78.9\%$ ,由此可见情景策略 1 在执行效率上优于情景策略 2。此外,模型温度变化与实际情况波动的主要原因是受限于时间分辨尺度以及开窗行为,导致室内温度变化,从而引起了供热的变化,也表明使用者行为、作息习惯等因素对住区能耗水平特征有明显影响。政府与规划决策人员可以通过预测建筑用电需求的峰值分析制定高峰时段用电调整策略,从而降低能源需求、缓解热岛效应等。此外,还可以通过分析用户行为避免用电时的峰值电力需求迅速增加的问题。

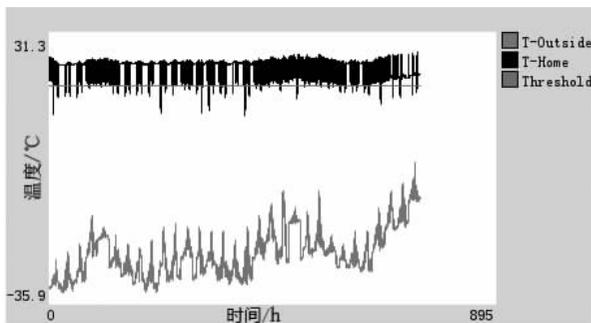


图 10 仿真建筑一月份动态供热策略 1 时室内温度曲线

Fig. 10 The temperature of the internal air under dynamic heating strategy 1

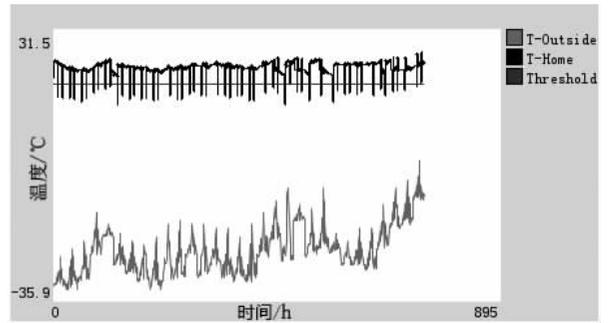


图 11 仿真建筑一月份动态供热策略 2 时室内温度曲线

Fig. 11 The temperature of the internal air under dynamic heating strategy 2

## 4 结论及展望

### 4.1 结论

1)结合 ISO 13790 建筑温度模拟标准、ABM 技术、多主体仿真环境设计住区建筑集成能耗模型,针对小型居住建筑进行了冬季室内温度和能耗情况模拟。研究表明,居住建筑中的温度情况很大程度上受到居民活动状态的影响,而室内的温度情况也会反馈影响居民的活动状态。模型的优点在于实现温度模拟和生活能耗模拟的有机结合。在进行节能策略模拟时,除考虑建筑基本的物理特征外,引入智能体模型,可以实现动态响应(Demand Response)的策略模拟。

2)建筑内使用者行为、作息习惯与政策等非技术因素对住区能耗水平和建筑用能特征有明显的影响,反映出使用者在长期操作并控制家庭设备的过程中所形成的习惯会造成住宅建筑能耗水平的差异;不同的行为和节能意识可以影响政策的节能效率。因此,通过对设备管理、价格调节等合理政策进行控制和引导,降低住区建筑能耗。

3)特别值得提出的是,人体对自然环境具有一定的适应性,合理的建筑与设备系统设计应该给予使用者对环境的控制和调节能力;正确评价和制定易于接受的节能政策,有利于提高节能效率。

### 4.2 展望

自下而上的物理模型可以满足不同类型建筑的冷、热负荷能耗模拟,ABM 技术可以从个体的角度建立具有智能性的行为模型,可用于基于行为影响的能耗仿真。因此,基于 ABM 技术的混合模型将成为解决建筑节能政策评估和政府干预行为影响能耗等问题的理想方法,可以在后续的研究中发挥积极的作用。

笔者的目的在于拓展人行为影响能耗模拟的研究思路,重点是构建物理与智能体综合模型集成方式的研究与尝试。提出的模型方法结合环境、建筑特征与人的主观性来模拟建筑用能的状况,因此更加贴近真实情况。但由于 Agent 模型的运行和实现均以假设条件为前提,因此,与实际用能仍存在差距,属于模型天然的偏差。模型中能耗影响因素的选取、智能体行为规则的设置决定了模型模拟结果的精度,进一步深入采用更全面的数据来支持个人的行为、制定更贴近实际的智能体行为规则有助于提高模型的实用性。未来获取更加详尽的真实数据、验证方法的有效性、建立大规模的模拟环境并模拟节能策略的效果,仍然具有极大的挑战性,也是进一步的努力方向。

#### 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 2015 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [2] CHOUDHARY R. Energy analysis of the non-domestic building stock of Greater London [J]. *Building & Environment*, 2012, 51(7): 243-254.
- [3] 姚润明, 李百战, 丁勇, 等. 绿色建筑的发展概述[J]. *暖通空调*, 2006, 36(11):27-32.  
YAO R M, LI B Z, DING Y, et al. Review of development in green buildings [J]. *HV & AC*, 2006, 36(11):27-32. (in Chinese)
- [4] 卡洛斯·卡尔德隆, 玛卡雷娜·罗德里格斯. 城市能源系统改造模拟方法: 泰恩河畔纽卡斯尔当前实践和未来挑战[J]. 路宁, 李凯. 译. *国际城市规划*, 2014, 29(2): 13-21.  
CARLOS C, MACARENA R. Modelling approaches for retrofitting energy system in cities: Current practice and future challenges in Newcastle upon Tyne [J]. Translated by LU N, LI K. *Urban Planning International*, 2014, 29(2): 13-21. (in Chinese)
- [5] BOARDMAN B. Examining the carbon agenda via the 40% house scenario [J]. *Building Research & Information*, 2007, 35(4): 363-378.
- [6] 杨玉兰, 李百战, 姚润明, 等. 居住建筑节能评价与能效标识理论模型[J]. *土木建筑与环境工程*, 2010, 32(3):105-112.  
YANG Y L, LI B Z, YAO R M, et al. A method for energy efficient assessment and labeling of residential buildings [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(3):105-112. (in Chinese)
- [7] 李兆坚, 江亿. 我国广义建筑能耗状况的分析与思考[J]. *建筑学报*, 2006(7):30-33.  
LI Z J, JIANG Y. Pondering over the situation of domestic generalized building energy consumption [J]. *Architectural Journal*, 2006(7):30-33. (in Chinese)
- [8] 燕达, 丰晓航, 王闯, 等. 建筑中人为模拟研究现状和展望[J]. *建筑科学*, 2015, 31(10):178-187.  
YAN D, FENG X H, WANG C, et al. Current state and future perspective of occupant behavior simulation in buildings [J]. *Building Science*, 2015, 31(10): 178-187. (in Chinese)
- [9] 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 Z. Investigation and analysis of the relationship between residential energy use behavior and energy consumption in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
- [10] SWAN L G, UGURSAL V I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8): 1819-1835.
- [11] KAVGIC M, MAVROGIANNI A, MUMOVIC D, et al. A review of bottom-up building stock models for energy consumption in the residential sector [J]. *Building & Environment*, 2010, 45(7):1683-1697.
- [12] SHORROCK L D, DUNSTER J E. The physically-based model BREHOMES and its use in deriving scenarios for the energy use and carbon dioxide emissions of the UK housing stock [J]. *Energy Policy*, 1997, 25(12):1027-1037.
- [13] FARAHBAKHS H, UGURSAL V I, FUNG A S. A residential end-use energy consumption model for Canada [J]. *International Journal of Energy Research*, 1998, 22(13):1133-1143.
- [14] SNÄKIN J-P A. An engineering model for heating energy and emission assessment: The case of North Karelia, Finland [J]. *Applied Energy*, 2000, 67(4): 353-381.
- [15] HUANG Y J, BRODRICK J. A bottom-up engineering estimate of the aggregate heating and cooling loads of the entire US building stock [J]. *Building Industry Trends*, 2000(10): 135-148.
- [16] POPESCU D, BIENERT S, SCHÜTZENHOFER C, et al. Impact of energy efficiency measures on the economic value of buildings [J]. *Applied Energy*, 2012, 89(1):454-463.

- [17] 冷红,孙禹,白金. 城市建筑能耗预测模型的国际研究与应用进展[J]. 建筑学报,2015(Sup1):221-227.  
LENG H, SUN Y, BAI J. A review of research on development and application of city building energy consumption models [J]. Architectural Journal, 2015 (Sup1):221-227. (in Chinese)
- [18] YAO R, LIU J, LI B. Occupants' adaptive responses and perception of thermal environment in naturally conditioned university classrooms [J]. Applied Energy, 2010, 87(3):1015-1022.
- [19] 李兆坚,江亿,魏庆波. 环境参数与空调行为对住宅空调能耗影响调查分析[J]. 暖通空调,2007,37(8):67-71.  
LI Z J, JIANG Y, WEI Q P. Survey and analysis on influence of environment parameters and residents' behaviours on air conditioning energy consumption in a residential building [J]. HV & AC, 2007, 37(8):67-71. (in Chinese)
- [20] Federal Energy Regulatory Commission. A national assessment of demand response potential [R]. Washington, D C: U S Department of Energy Federal Energy Regulatory Commission, 2008 :123-156.
- [21] 孙红三,洪天真,王闯,等. 建筑用能人行为模型的 XML 描述方法研究[J]. 建筑科学,2015,31(10):71-78.  
SUN H S, HONG T Z, WANG C. A XML description and study of building energy occupant behavior models [J]. Building Science, 2015, 31(10):71-78. (in Chinese)
- [22] ZHAO F. Agent-based modeling of commercial building stocks for energy policy and demand response analysis [C]// Georgia Institute of Technology, 2012.
- [23] ZHANG T, SIEBERS P O, AICKELIN U. Modelling electricity consumption in office buildings: An agent based approach [J]. Energy & Buildings, 2011, 43(10):2882-2892.
- [24] NATARAJAN S, PADGET J, ELLIOTT L. Modelling UK domestic energy and carbon emissions: an agent-based approach [J]. Energy & Buildings, 2011, 43(43):2602-2612.
- [25] 李红莲,杨柳,于军琪,等. 建筑能耗模拟典型年中气象参数权重的确定[J]. 土木建筑与环境工程,2015,37(1):23-28.  
LI H L, YANG L, YU J Q, et al. Determination of the weighing values of meteorological parameters in TMY of building energy consumption simulation [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(1):23-28. (in Chinese)
- [26] TIAN W, de WILDE P. Thermal building simulation using the UKCP09 probabilistic climate projections [J]. Journal of Building Performance Simulation, 2011, 4(2):105-124.
- [27] CRAWLEY D B, LAWRIE L K, WINKELMANN F C, et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program [J]. Energy & Buildings, 2001, 33(4):319-331.
- [28] European Committee for Standardization. Energy performance of buildings-Calculation of energy use for space heating and cooling: EN ISO 13790:2008 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2008.
- [29] FIRTH S, LOMAS K, WRIGHT A, et al. Identifying trends in the use of domestic appliances from household electricity consumption measurements [J]. Energy & Buildings, 2008, 40(5):926-936.
- [30] MACAL C M, NORTH M J. Tutorial on agent-based modeling and simulation [C]// Simulation Conference, 2005 Proceedings of the Winter, IEEE, 2005:2-15.
- [31] BENENSON I. Multi-agent simulations of residential dynamics in the city [J]. Computers Environment & Urban Systems, 1998, 22(1):25-42.
- [32] BENENSON I, ARONOVICH S, NOAM S. Let's talk objects: Generic methodology for urban high-resolution simulation [J]. Computers Environment & Urban Systems, 2005, 29(4):425-453.
- [33] BATTY M, JIANG B. Multi-agent simulation: New approaches to exploring space-time dynamics in GIS [J]. Journal of Applied Ecology, 1985, 49(3):670-679.
- [34] CROOKS A, CASTLE C, BATTY M. Key challenges in agent-based modelling for geo-spatial simulation [J]. Computers Environment & Urban Systems, 2008, 32(6):417-430.
- [35] MALIK A, CROOKS A, ROOT H, et al. Exploring creativity and urban development with agent-based modeling [J]. Journal of Artificial Societies & Social Simulation, 2015, 18(2):1-19.
- [36] JACKSON J. Improving energy efficiency and smart grid program analysis with agent-based end-use forecasting models [J]. Energy Policy, 2010, 38(7):3771-3780.
- [37] GELLINGS C W. The smart grid: Enabling energy efficiency and demand response [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [38] MARTINEZ-MOYANO I J, ZHAO F, SIMUNICH K L, et al. Modeling the commercial buildings sector: An

- agent-based approach [J]. ASHRAE Transactions, 2011, 117(2): 366-373.
- [39] KASHIF A, XUAN H B L, DUGDALE J, et al. Agent based framework to simulate inhabitants' behaviour in domestic settings for energy management [C]// Icaart 2011 - Proceedings of the, International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Volume 2 - Agents, Rome, Italy, January, 2011: 190-199.
- [40] ZHANG T, SIEBERS P O, AICKELIN U. Modelling electricity consumption in office buildings: An agent based approach [J]. Energy & Buildings, 2011, 43(10): 2882-2892.
- [41] AZAR E, MENASSA C C. Agent-based modeling of occupants and their impact on energy use in commercial buildings [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2012, 26(4): 506-518.
- [42] 王昭俊, 李爱雪, 何亚男, 等. 哈尔滨地区人体热舒适与热适应现场研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8):48-52.
- WANG Z J, LI A X, HE Y N, et al. Human thermal comfort and thermal adaptability in Harbin [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(8): 48-52. (in Chinese)
- [43] European Committee for Standard. Energy performance of buildings--Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods - General criteria and validation procedures: BS-EN-15265: 2007 [S]. United Kindom, 2007.

(编辑 胡英奎)