

文章编号: 1671-6612 (2020) 01-127-12

# 建筑室内人员开窗行为的驱动因素及模型算法综述

李 斐<sup>1</sup> 郑恒杰<sup>1</sup> 周 斌<sup>1</sup> 刘晓冉<sup>1</sup> 张 恺<sup>1</sup> 陈 晨<sup>2</sup>

(1.南京工业大学 南京 210009; 2.南京师范大学 南京 210097)

**【摘 要】** 建筑室内人员的开窗行为不仅会对室内空气品质产生影响,还会在一定程度上影响建筑能源消耗,因此人员开窗行为的测量及建模具有一定的意义。对人员开窗行为的研究进行了综述,对开窗行为目前的测量及建模方法进行了总结分析,并提出了改进建议。将综述研究分为四个部分,包括数据采集方法、开窗行为驱动因素的筛选、模型建立及其检验,对每一部分常用的方法优缺点进行了对比分析。同时,针对现有研究中存在的问题,如数据采集范围和采集量较小、没有充分考虑人员随机行为对窗口开度大小变化的影响等问题提出了一些新的解决思路,比如在数据采集中结合图像智能识别及热成像技术来增大样本采集量和采集速度,建立表征窗口开度变化的偏态模型,并结合蒙特卡洛模拟和质平衡方程来分析室内外环境的演化关系等。

**【关键词】** 数据采集; 统计建模; 显著性分析; 假设检验

中图分类号 TU834.1 文献标识码 A

## Driving Factors and Stochastic Models for Occupants' Window Opening Behavior: A Review

Li Fei<sup>1</sup> Zheng Hengjie<sup>1</sup> Zhou Bin<sup>1</sup> Liu Xiaoran<sup>1</sup> Zhang Kai<sup>1</sup> Chen Chen<sup>2</sup>

(1.Nanjing Tech University, Nanjing, 210009; 2.Nanjing Normal University, Nanjing, 210097)

**【Abstract】** Occupant window opening behavior would affect the indoor air quality and the building energy consumption to a certain extent. Therefore, the study on the window opening behavior is important. In this paper, the experimental and modeling methods for window opening behavior is briefly analyzed, and some suggestions are proposed. The review has four parts: data sampling methods, factor analysis methods, statistical modeling methods of behavior, and model test methods. We compared and analyzed the different methods for each part. For the problem in previous research, such as insufficient sampling data and inattention of behavior stochastic characteristic, proposes some new methods. For example, combination of the image recognition and thermal imaging can be used to increase the sampling quantity and speed, and Skewed model can be built to represent the size of the window opening can be used to study the evolution relationship of indoor and outdoor pollutant concentrations associating with Monte Carlo simulation.

**【Keywords】** Data sampling; Statistical modeling; Significance analysis; Hypothesis testing

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51708286); 江苏省自然科学基金 (BK20171015);

江苏省第十四批“六大人才高峰”高层次人才项目 (JNHB-043)

作者(通讯作者)简介: 李 斐 (1987.4-), 男, 博士, 副教授, E-mail: faylee@njtech.edu.cn

收稿日期: 2019-03-25

## 0 引言

近年来环境污染日趋严重。据统计,我国每年

由室内空气污染引起的死亡人数可达 11.1 万人,门诊数 22 万人次,急诊数 430 万人次<sup>[1]</sup>。研究发

现, 儿童呼吸系统疾病(感冒时咳嗽、气喘和哮喘等)的患病率与空气污染呈显著正相关, 已产生高度有害的影响<sup>[2]</sup>。室内环境污染对人体健康的影响已经成为人们越来越关注的问题, 医学研究表明环境污染已经成为诱发白血病的主要原因, 世界银行已把室内环境污染列为全球四个最关键的环境问题之一<sup>[3]</sup>。总之, 室内环境污染种类多、浓度低、作用时间长, 对人体健康的影响是累积式的, 容易造成极大危害<sup>[1]</sup>。自然通风作为最普遍的受开窗行为不确定性所影响的通风方式, 能对室内环境产生极大影响。通过合理开启门窗及调节窗的开度<sup>[4]</sup>控制室内空气流动, 来改善室内温湿度及建筑内部热环境, 这样不仅可以引入室外新鲜空气, 还可及时地将污染物排出<sup>[5]</sup>。一些住宅通风设计中也提倡以自然通风为主, 力求能最大限度发挥自然通风的效能, 减少空调设备的使用<sup>[6]</sup>。谢子令等人<sup>[7]</sup>的研究表明自然通风可使得空调能耗至少减少 30%。由此可见, 人员开窗行为对室内环境、能源节约以及室内人员的生活是极其重要的。

本文对以往学者的研究方法进行了总结, 对目前存在的一些问题做了简要分析并提出了建议。文章的综述分为四部分: 第一部分是介绍建筑物及建筑内部环境、居住人员及周围环境参数的采集方法, 第二部分是阐述对人员开窗行为产生影响的影响因子分析方法, 第三部分是针对影响因子建立模型并验证的方法, 第四部分是对目前人员开窗行为研

究的结论总结以及提出存在的问题。

### 1 数据采集方法

对于开窗行为影响因素的分析, 首先需要对研究对象的周围环境以及建筑室内情况进行了解, 对可能产生影响的因素进行数据采集。本文将数据采集分为室内人员活动状态、窗口状态、室内环境参数以及室外环境参数四个部分。调查问卷是数据采集方法中最原始的方法, 通过问卷既可以了解建筑周围基本概况, 又能得到室内人员基本活动状态。Yao 等人<sup>[8]</sup>将居住者的生活状况分为工作日和周末两类进行问卷调查, 而周浩等人<sup>[9]</sup>为室内人员准备纸质问卷, 让人员每日记录自己的行为, 主要集中在门窗开关控制的频率、门窗开关动作发生的时间及原因等问题上, 在此基础上, Belafi 等人<sup>[10]</sup>在学校教室的窗口调查研究中, 分别对学生和教师采取调查访问的形式, 使调查更具有科学性。通过调查问卷可以了解建筑物大致情况、室内居住人员的生活习性等。表 1 为室内人员生活习性调查样表。除调查问卷外, 对室内人员活动状态的判定还可通过监测室内二氧化碳浓度变化来判断室内是否有人<sup>[11]</sup>, 或者直接采用人员传感器进行监测以及采用红外热像仪通过监测室内热点变化来判断人员在室情况。对于某些人员活动较规律的建筑, 例如办公室, 每天都会有固定的人员在室内工作, 可根据人员上下班签到表来判断人员在室情况。

表 1 室内人员生活习性调查样表<sup>[9]</sup>

Table 1 Sample survey of indoor living habits

用户名	家庭住址			住宅户型	家庭组成人员					
设备放置 房间情况	安装房间			安装房间的窗户						
	位置	高度	房间面积	窗户总面积	开窗大小	窗户类型	朝向			
日期:										
时间	窗户+窗帘				空调		活动内容		若不舒适, 其原因	备注
	窗户		窗帘		开		关	类别		
	开	关	开	关	温度	风速				
10:00	√									
12:00			√		25°C					
16:00		√						4	2	3
20:00							√			
说明:										
1. 窗户类型: 平开窗(传统窗型, 窗扇-侧铰链, 可内、外开); 推拉窗(左右或上下推拉开启)										

- |   |
|---|
| <p>2. 开窗大小: 开启一半以上为大开, 一半以下为小开</p> <p>3. 活动内容类别: 1 看书看报; 2 看电视; 3 看电脑; 4 会客聊天; 5 吃饭; 6 外出; 7 睡觉; 8 其他</p> <p>4. 不舒适原因: 1 冷; 2 热; 3 干燥; 4 潮湿; 5 太暗; 6 闷; 7 气味不正常; 8 其他</p> |
|---|

由于人员在室情况对开窗行为具有很大影响, 因此对门窗开启状态的监测也是必不可少的。门窗开启状态检测仪一般分为两种类型, 一种是对窗口开启或关闭状态的判断<sup>[8,12]</sup>, 另一种则可以对窗口的开度情况进行监测<sup>[11]</sup>, 通过对窗口状态的监测来获取人员在室时对窗口的操作状态及窗口状态持续实间。图1为窗口状态位移记录装置, 图2为HoboU9监测仪监测窗口开窗角度。



图1 窗口状态位移记录装置

Fig.1 Window state displacement recording device



图2 Hobo U9 监测仪

Fig.2 Hobo U9 monitor

对室内环境的数据则通常用专门的室内检测仪器获取。周浩等人<sup>[9]</sup>研发了一整套无线传感环境检测系统, 采用无线传感器对室内外环境数据及人员行为动作的信息进行采集; Lai 等人<sup>[13]</sup>综合采用二氧化碳、门窗开启状态及压差监测仪, 并将数据通过网络进行传输, 采集了全国5个不同气候区内46间公寓的自然及机械通风的使用情况进行数据分析; Cali 等人<sup>[14]</sup>使用 Sense Air CO Engine TM(K30)传感器监测二氧化碳、Sensirion SHT75 传感器测室内温度和相对湿度。室外环境参数一般是从当地气象局获取实时数据, 包括二氧化碳浓度、相对湿度、室外温度以及 PM<sub>2.5</sub> 浓度等, 也可在建

筑周围放置探测仪器来获取周围环境数据。邱少辉等人<sup>[15]</sup>对所在建筑物1240个窗户进行为期30天的实时调查, 其数据均从天气预报实时获得, 再进行抽查校核, 以及在室外放置便携式气象站来测量室外温度和室外风速, 用DT-8852噪声计监测室外噪声等<sup>[16]</sup>。

此外, 在采集数据时需要根据建筑物特点对建筑物进行分区域检测。例如对建筑物的高度分析时将建筑物分为高、中、低三个区域进行数据采集<sup>[17]</sup>, 这样采集的数据较为准确; 或者将目标建筑视为一个整体, 根据窗口位置将房间划分为四种类型, 并考虑各房间类型之间的影响, 对每个房间进行标号<sup>[18]</sup>。在进行数据采集期间, 可能会出现数据缺失、采集不完全或者出现数据异常的情况。为保证数据可靠性, 需要利用统计方法对异常值进行分析, 以及对缺失数据进行修补。另外, 对于开窗状态的监测目前常用的门窗状态监测仪采集效率比较低, 无法实现大范围的监测。

## 2 影响因素的初步筛选与分析

影响人员开窗行为的因素有很多, 不同条件下人员开窗行为的影响因素不同, 并且每个变量对开窗行为的影响显著性也不同。Haldi 等人<sup>[19]</sup>详细分析了室内温度和室外气候参数(温度、风速和风向、相对湿度和降雨量)对人员开闭窗户的影响; 潘嵩等人<sup>[20]</sup>就当地建筑对室内外温度、室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度、先前的窗户状态、不同时间段、人员在室情况和个人习惯(抽烟、做饭、洗澡等)分析对窗口状态的影响; Schweiker 等人<sup>[21]</sup>则分析了室内外温度、室内外相对湿度、太阳辐射及风速等因素的影响; 一些研究人员还将影响居民开窗行为的因素分成主观和客观两方面, 主观因素包括人的生理、心理和习惯等因素, 客观因素包括温度、湿度、风度、噪声等因素<sup>[22]</sup>。此外, 建筑物类型<sup>[15]</sup>、空气品质<sup>[23]</sup>通风形式(自然通风、机械通风), 供暖系统(集中供暖、不供暖)<sup>[24]</sup>等也会对开窗行为产生影响。图3展示了影响人员开窗行为的一些影响因素, 可以看出每个人研究的影响因素各不相同, 但总体可分为四大类室内环境因素(室内温度、相对湿度、CO<sub>2</sub>浓度、颗粒物浓度、室内空气品质等)、室外环境

因素（室外温度、风速、噪声、高度、窗口朝向、降雨量、季节性变化、PM<sub>2.5</sub> 等）、室内人员状态（在室情况、抽烟、做饭、洗澡开窗习惯、对空气的敏感度、心理因素等）以及建筑状况（建筑类型、通风形式、采暖设备、房间功能、窗口类型<sup>[25]</sup>等）。

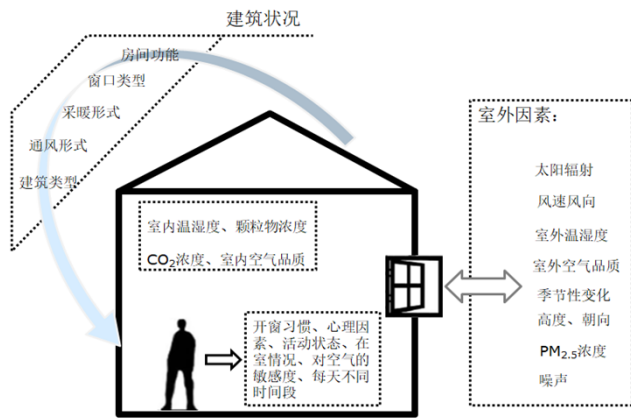


图 3 影响因素总结<sup>[26]</sup>

Fig.3 Summary of influencing factors

然而在实际研究过程中，无法将所有的影响因素都进行分析，而且对于目标建筑物，有些影响因素可能对开窗行为影响不明显或无相关性。例如，在某些高层建筑，风向和建筑高度则可能对人员开窗产生较大影响，在一些要求较高的室内环境中则必须考虑人员抽烟、做饭等情况。在冬季和夏季，室内采暖设施和空调的使用情况应着重考虑，而对于人的心理状态则是一个不确定影响因素，很多人会因为更高要求的舒适度的心理作用而产生开关窗的行为。在王闯博士对人为行为模拟的研究中<sup>[27]</sup>，认为人动作发生的概率与感觉大小呈正相关，而感觉大小与刺激强度的关系，可用心理物理函数进行定量描述，这种方法可对人的心理影响进行定量分析。表 2 对四个部分的影响因素对开窗行为的影响进行了概括分析。

表 2 开窗行为影响因素的概括分析

Table 2 Summary analysis of the influencing factors of window opening behavior

类别	影响因素	筛选方法	相关性分析
室内环境	室内温度 <sup>[8,16,20,22,28-31]</sup> 及相对湿度 <sup>[8,16,22,28,32]</sup> 、CO <sub>2</sub> 浓度 <sup>[8,11,22,28,30]</sup> 、室内颗粒物浓度、室内空气品质 <sup>[16]</sup>	调查问卷 <sup>[16]</sup> 、方差分析 <sup>[22]</sup>	1) 室内温度及 CO <sub>2</sub> 浓度 <sup>[11]</sup> 在大多数研究中已被证明是重要的影响因素 <sup>[33]</sup> ; 2) 相对湿度被认为在不同地区对开窗影响会呈现相反的影响 <sup>[32]</sup> ; 3) 室内颗粒物浓度在某些工厂或实验室可能会产生显著影响
室外环境	室外温度 <sup>[8,11,15,16,18-20,22,28-32,34]</sup> 及相对湿度 <sup>[15,16,28,32]</sup> 、PM <sub>2.5</sub> 浓度 <sup>[8,20,28,32]</sup> 、室外空气质量 <sup>[16]</sup> 、风速 <sup>[16,22,32]</sup> 风向 <sup>[8,15,19]</sup> 、噪声 <sup>[16]</sup> 、季节性变化 <sup>[18,29,31,34,35]</sup> 、降雨量 <sup>[19,28]</sup> 、太阳辐射 <sup>[16,29,31]</sup> 、日照时数 <sup>[29]</sup>	调查问卷、方差分析 <sup>[22]</sup>	1) 室外温度 <sup>[11]</sup> 是开窗行为研究中不可或缺的影响因素，在某一温度值内，室外温度会与开窗行为呈正相关，超过此温度，则会呈现负相关； 2) PM <sub>2.5</sub> 浓度也在不少研究中被认为是显著影响因素，尤其是 PM <sub>2.5</sub> 浓度较严重的城市 <sup>[12,28,29]</sup> ； 3) 季节性影响在其他研究中也得到验证 <sup>[34]</sup> ，并且春季开窗频率最高 <sup>[8]</sup> ，冬季开窗时间最少，从北到南，开窗时间增加，但持续时间的季节性变化减少 <sup>[35]</sup> ； 4) 风速风向、噪声、太阳辐射等对开窗行为均有一定影响，但需要根据实际情况而定
室内人员状态	每天不同时间段 <sup>[18,20,29,31,34]</sup> 、人员在室情况 <sup>[34]</sup> 、人员到达时的窗口状态 <sup>[19,20]</sup> 、人员活动、对空气的敏感度、性别及年龄差异 <sup>[36]</sup>	调查问卷、马尔科夫链 <sup>[19,27]</sup> 生存分析	1) 人员在室活动对窗口状态有着直接影响 <sup>[27]</sup> ； 2) 每天不同时间段是开窗最常见的驱动因素 <sup>[14]</sup> ，而且人们倾向于在早起或者下午下班回家时开窗 <sup>[12]</sup> ； 3) 人员是否在室对开窗行为有着决定性影响 <sup>[34]</sup> ，人员在房间做饭、抽烟时都可能会增加开窗频率； 4) 老年人被认为是在卧室时开窗时间会增加，并且有孩子的家庭比没有孩子的家庭更倾向于开窗通风 <sup>[36]</sup>
建筑状况	建筑类型 <sup>[11]</sup> 、房间类型 <sup>[37]</sup> 、窗口高度 <sup>[17]</sup> 及朝向 <sup>[15,18]</sup> 、供暖方式 <sup>[17]</sup> 、窗口类型	调查问卷	1) 租用建筑和占有类建筑的不同也会对开窗行为会产生影响 <sup>[11]</sup> ，而卧室的开窗频率可能会多于客厅，并且非空调和非供暖时间相比空调和供暖时间，开窗频率会增加；

从表中可以看出,研究者对室内外温度及相对湿度、室内 CO<sub>2</sub> 浓度、季节及每天不同时间段研究较多。影响因素的筛选通过问卷调查的形式了解目标窗口及建筑物状况后,一方面可根据问卷的结果进行数学统计大概得知哪些影响因素对开窗行为具有较大影响;另一方面,可使用  $t$  检验、 $Z$  统计、ANOVA (Analysis of Variance) 方差分析等方法检验采集的数据是否符合实际,以保证数据的可靠性。

$t$  检验是用  $t$  分布理论来推论差异发生的概率,从而比较两组平均数的差异是否显著。 $Z$  统计可以检验开窗概率与所研究的解释变量的相关性, $Z$  统计一般用于大样本(即样本容量大于 30) 平均值差异性检验。它是用标准正态分布的理论来推断差异发生的概率,从而比较两组平均数的差异是否显著,在国内也被称作  $\mu$  检验。这两种检验主要是对两组数据间是否存在显著差异而进行分析比较。在进行建模之前,如果是由于时间和环境受限导致所采集的数据并不是很充分,可以采用  $t$  检验将实验数据与该地区另一时期的实验数据进行比较,检验两者是否存在显著差异,这样做是为了使实验结果更具有说服力和代表性<sup>[16]</sup>。

方差分析则是将测量数据的总变异按照变异原因的不同分解为因素效应和试验误差,对其作出数量分析,比较各种因素在总变异中的重要程度。当对开窗行为存在多个可能因素的时候,可以利用方差分析来分析具体哪些因素对开窗行为有显著影响,影响程度有多大,各因素之间有没有交互影响等<sup>[22]</sup>。

需要考虑的另外一个问题就是影响因素间的多重共线性问题。多重共线性的典型表现是线性回归模型中的解释变量之间由于存在相关关系而使模型估计失真或估计不准确。当自变量间存在多重共线性时,会导致拟合的回归模型系数不稳定从而导致偏差,结论难以解释,因此必须充分考虑回归模型中的多重共线性问题。针对这个问题,也有不同的处理方法,比如可以采用 Pearson 相关性分析来检验两变量之间的相关性,再用容许值(TOL)和方差膨胀因子(VIF)指标对多个变量之间的多重共线性进行检验<sup>[16]</sup>;也可以用广义方差膨胀因子(GVIF)分析解释变量之间的相关性在多元线

- 2) 针对窗口类型,平开窗,下悬窗会更多用于开窗通风;
- 3) 窗口高度及朝向也在研究中被分析证明会产生显著影响,但多在高层建筑中<sup>[17]</sup>

性 Logistic 回归模型中的影响<sup>[32]</sup>; Jones 等人<sup>[31]</sup>针对由于多重共线性导致窗口打开和关闭模型系数不稳定的情况也使用广义方差膨胀因子(GVIF)来校正。上述中提到的方差分析方法也可用来解决多重共线性问题。

方差膨胀因子(VIF)是指变量之间存在多重共线性时的方差与不存在多重共线性时的方差之比。其计算式为:

$$VIF=1/(1-R^2) \quad (1)$$

(1)

式中, $R^2$  是以  $x_j$  为因变量时对其他自变量回归的复测定系数。VIF 越大,表明多重共线性越严重。经验判断方法表明:当  $0 < VIF < 10$ , 不存在多重共线性;当  $10 \leq VIF < 100$ , 存在较强的多重共线性;当  $VIF \geq 100$ , 存在严重的多重共线性。

总之,对影响因素的分析要与研究目标建筑物相结合,根据研究目地和当地环境进行分析,然后采用调查问卷、 $t$  检验、 $Z$  统计或方差分析等统计方法对影响因素进行筛选,确认出对人员开窗行为有显著性的影响因素,这些主要为开窗行为的模型建立提供依据及良好的数据保证。

### 3 开窗行为模型的建模及检验

#### 3.1 模型建立

开窗行为目前一般用二分类问题(1代表开,0代表关)来处理,故 Logistic 模型应用最为广泛。Logistic 模型是一种广义的线性回归分析模型,常用于数据挖掘、疾病自动诊断和经济预测等领域。它也经常应用于因变量为二分类的分类变量或某事件的发生率问题。在以往大多数开窗问题的研究中均采用 Logistic 回归模型来建立开窗概率模型和影响因素之间的关系。其模型的依据是应变量  $Y$  作为一个二值变量,其取值分为 1(发生)或 0(未发生),而  $X_1, X_2, \dots, X_m$  作为自变量, $P$  表示在  $m$  个自变量作用下事件发生的概率,可表示为:

$$P = P(Y=1 | X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (2)$$

事件发生概率  $P$  与自变量  $X_1, X_2, \dots, X_m$  之间的 Logistic 回归模型为:

$$P = P(Y = 1 | X_1, X_2, \dots, X_m) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_m x_m)} \quad (3)$$

这个函数就称为 Logistic 函数，令  $Z = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_m X_m$ ，若将  $Z$  在负无穷至正无穷变化时的函数画出来，其结果具有 S 型分布。

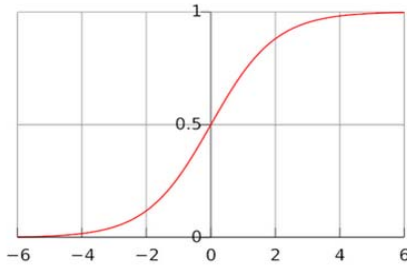


图 4 Logistic 函数曲线示意图<sup>[16]</sup>

Fig.4 Schematic diagram of the Logistic curve

Logistic 回归模型在开窗行为的研究上已有非常广泛的应用，许多学者在研究中经常采用此方法建立模型，并在不同方向上对此模型进行演化。除 Logistic 模型，还有一些其他模型，例如 Probit 分析、贝叶斯分类、马尔可夫链、生存分析、数据挖掘、聚类算法以及深度学习方法等都在开窗行为的研究中得到应用。表 3 为不同回归模型的相关总结。

表 3 不同回归模型的应用及分析

Table 3 Application and analysis of different regression models

作者	模型	使用方式	优势	劣势
李芸等人 <sup>[16]</sup> 和 Shi 等人 <sup>[32]</sup>		先建立单参数模型对单个影响因素分析，再用多参数模型分析多个因素对开窗概率的影响	对影响因素的分析较为清晰，包括多个影响因素之间的交互作用	若呈非线性相关，则无法分析
Tahmasebi <sup>[38]</sup>		利用 Logistic 回归将窗口模型分为聚合和个体两种模型分析窗口和人员的交互作用		
Yao 等人 <sup>[8]</sup> 、Andersen 等人 <sup>[11]</sup> 和 Jones 等人 <sup>[31]</sup>	Logistic 回归	采用多变量 Logistics 回归模型对多个影响因素分析住宅的开窗行为	高效、计算量不大、数据容易调整	
Cali 等人 <sup>[14]</sup>		在 Logistic 基础上，将模型分为两个子模型来分析窗口打开和关闭的概率		未考虑窗口状态的持续时间过程
Shi 等人 <sup>[28]</sup>		利用 Logistics 模型分夏季、过渡季和采暖季三个部分分别建立三个回归模型预测其窗口状态	按季节区分，使模型分析更加简洁、直观	
Jeong 等人 <sup>[24]</sup>	Logistic 回归和变点模型	两模型相互结合，将开窗比作为室外温度的函数来分析室外温度对开窗行为的影响	变点模型能将数据集划分为多个段，分析每个段是否发生较大变化，保证数据的稳定性	
Pan Song 等人 <sup>[29]</sup>	Logistic 回归和 Pearson 相关	用 Logistic 回归分析直接对原始数据进行分析，Pearson 相关方法分析数据间相互作用	用 Pearson 相关方法对两变量分析，相关性展示比较直观	
Zhang 等人 <sup>[18]</sup>	Probit 分析	用 Probit 模型预测办公室内窗口状态变化，并将室外温度作为唯一的自变量	对某一单个因素分析较清晰	总体上没有 Logistic 回归简单、灵活
Jia 等人 <sup>[12]</sup> 和 Barthelmes 等人 <sup>[26]</sup>	贝叶斯定理的朴素贝叶斯分类器 (NBC) 模型	论证贝叶斯分类模型预测窗口开关行为的适用性	充分利用混合信息中的数据并具有高置信度和更好预测概率模型	在参数交互方面需更加重视
Haldi 等人 <sup>[19]</sup>	Logistic 回归、马尔可夫过程和连续时间随机过程	提出了两个特定分布：指数分布和威布尔分布，并确定三种建模方法预测窗口状态：1) 基于对数概率的伯努利过程；2) 不同居住状态下具有子模型的马尔	不仅能预测窗口开关概率模型，对窗口状态的持续时间过程也进行建模分析	建模过程较复杂

Wolf 等人 <sup>[39]</sup> 和 Fabi 等人 <sup>[40]</sup>	马尔可夫模型与生存分析的混合模型	可夫过程; 3) 将 2) 扩展为连续的随机过程 通过比较马尔可夫模型和马尔可夫与生存分析的混合模型, 得出混合模型对窗口开关行为的预测更为精确	对室内人员及窗口的动态变化有更好的预测性	分析过程较复杂
---	------------------	---	----------------------	---------

续表 3 不同回归模型的应用及分析

作者	模型	使用方式	优势	劣势
D'Oca 等人 <sup>[41]</sup> 和周浩等人 <sup>[9,42]</sup>	Logistic 回归和数据挖掘分析方法	首先用 Logistic 回归法来确定影响开窗和关窗行为的因素, 其次采用聚类算法和数据挖掘技术将影响因素进行分类	一种新颖的方式对数据进行汇总, 以便所有者充分理解和利用数据	
范瑞娟等人 <sup>[22]</sup> 和 Tian 等人 <sup>[43]</sup>	Logistic 回归与蒙特卡洛模拟	Logistic 模型和蒙特卡洛随机分析的思想相结合, 通过多次蒙特卡洛模拟分析预测窗口打开或关闭概率, 确定开窗概率的分布特征	结合蒙特卡洛方法, 过程更具有随机性	需要估计模拟次数
Markovic <sup>[44]</sup>	深度学习	提出一种深度前馈神经网络识别窗口状态的通用模型, 并运用超参数对模型进行优化	深度学习方法显示出更好的泛化能力和鲁棒性, 且有利于提高精度使模型复杂度降低	
孟庆龙等人 <sup>[45]</sup>	BP 神经网络	建立 BP 神经网络模型预测建筑室内人员的开窗行为, 并与 Logistic 模型进行对比, 其预测准确度基本稳定在 74%, 比 Logistic 回归模型的预测准确率高出 4% ~6%	相较于 Logistic 回归模型, 对窗口预测具有更好的适用性及优越性	需要大量的训练数据
Pan Song 等人 <sup>[46]</sup>	高斯分布模型	提出机器学习方法中的高斯分布模型预测人员开窗行为, 与 Logistic 回归模型比较, 其预测精度比 Logistic 回归高出 9.5%	相较 Logistic 回归模型与 BP 神经网络, 具有更高的预测精度	

Logistic 回归模型尽管能够得出影响开窗概率显著的影响因素, 但对于窗口状态的变化、窗口打开和关闭的概率转换无法有效分析, 常用于二分类问题中。而 Probit 模型和 Logistic 回归相比, 则是专门用于研究只有两个结果的二项响应变量, 但没有 Logistic 回归模型简洁、灵活, 二者具有相互转化关系。朴素贝叶斯分类器(NBC)模型与 Logistics 回归相比, 能够在不同变量组合上构建联合概率分布, 对于多个解释变量与开窗行为的复杂关系也能够进行建模。即使使用小数据集, 贝叶斯分类模型也被证明具有良好的预测能力。此外, 采用 Logistic 回归和马尔可夫过程以及连续时间随机过程相结合的模型相较于上面几个模型能够提供高准确度的预测, 产生窗口状态间的最佳区分, 而马尔科夫模型和生存分析相结合的方法能够对窗口状态转换进行更深入的分析, 尤其是针对室内人员及窗口的动态变化过程, 马尔科夫过程具有更好的预测能力。深度学习、神经网络等模型, 虽然准确率有一定的提高但需要大量的样本训练, 其在位置场景下的预测效果也有待验证。

除此之外, 还有一些更为独特的方法, 比如 Rijal 等人<sup>[47]</sup>提出了一个基于适应性舒适理论的更全面的模型, 他们开发了“Humphreys 自适应算法”来预测窗户的状态, 将室内温度与舒适度(取决于外部温度)进行比较, 并将其嵌入到 ESP-r 中; 王闯等人<sup>[27]</sup>建立了人员移动模型和人员动作模型来分析室内人员的行为现象, 提出了基于马尔可夫链和人员移动随机模型相结合的方法分析室内人员的动态随机变化, 这种模型能够准确反映出不同类型的人员在建筑中的行为差异。这些模型的提出对开窗行为的研究过程提供了很好的思路及方向。

基于数据挖掘技术和聚类算法相较于 Logistic 回归, 属于算法学习中的非监督式学习算法, 频繁模式挖掘算法最早被用于购物篮分析——通过提取顾客购物篮里的物品的关联性来分析顾客的购物习惯。频繁模式是指某项参数在数据中频繁发生的模式(一系列的样本点、子序列或子结构等)。假定  $i = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$  是项的集合, 而某项集  $a$  则由  $i$  中的  $j$  个项组成, 项集  $\beta$  则由  $i$  中  $k$  个项组成。如果项组合  $\alpha \rightarrow \beta$  满足如下关联规则, 则该组合可

被认为是频繁的:

$$a \Rightarrow \beta [\text{min\_sup} = \theta \quad ; \quad \text{min\_con} = \omega] \quad (4)$$

其中,  $\theta$  为用户自定义的最小支持度阈值 ( $\text{min\_sup}$ ),  $\omega$  则是用户定义的最小置信度阈值 ( $\text{min\_con}$ )。模式  $a \rightarrow \beta$  的支持度和置信度可用以下式子计算:

$$\text{support}(a \Rightarrow \beta) = p(a \cup \beta) \quad (5)$$

$$\text{confidence}(a \Rightarrow \beta) = p(\beta | a) \quad (6)$$

其中,  $p(a \cup \beta)$  是一次“购物事件”数据集  $D$  中项集  $a$  和  $\beta$  同时发生的时间数所占的百分比  $p(\beta | a)$  则是在项集  $a$  发生的条件下  $\beta$  发生的概率。对于一个频繁模式  $a \rightarrow \beta$ , 要求  $p(a \cup \beta)$  和  $p(\beta | a)$  值必须相应地不低于  $\theta$  和  $\omega$ 。一旦得到  $a$ ,  $\beta$  和支持度及可信度, 则可导出对应的关联规则  $a \rightarrow \beta$ , 并根据最小支持度和置信度阈值检查该规则是否是强规则。这种频繁模式挖掘算法, 能够有效分析室内环境因素与人员在室内行为动作之间的相关性。然而, 由于实际场景的复杂性, 这种算法对数据的挖掘以及信息提取的准确性仍然需要进一步提高。

### 3.2 模型检验

模型建立以后, 需要对模型建立的回归方程进行检验并最终得出开窗行为的概率模型。模型检验常用的方法包括: 似然比检验<sup>[28,32]</sup>、Cox & Snell  $R^2$ <sup>[22]</sup>、Nagelkerke  $R^2$ <sup>[28,32]</sup>、ROC 曲线<sup>[16,28,32,44]</sup>以及 Akaike 信息准则<sup>[11,14,31,40]</sup>等方法。采用似然比检验可以对单变量和多变量模型进行整体评估, 似然比检验 (likelihood ratio, LR) 和一般的假设检验 (或称显著性检验) 含义一样, 用于比较两个模型 (一个是所有参数都是自由参数的无约束模型, 另一个是由原假设约束的含较少参数的相应约束模型) 的拟合优度以确定哪个模型与样本数据拟合得更好。当具有嵌套关系的两个模型的样本量较大时, 两个模型的对数似然值的差具有  $\chi^2$  分布的特点, 所以将-2 倍的对数似然值称为似然比<sup>[48]</sup>, 其公式如下:

$$L.R. = (-2LLm_2) - (-2LLm_1) = -2\ln(Lm_2/Lm_1) \quad (7)$$

其中,  $LLm_1$ 、 $LLm_2$  分别为所设定原模型和省略模型的最大似然函数的对数。

Cox & Snell  $R^2$  是在似然比的基础上模仿线性回归模型的  $R^2$  来解释 Logistic 回归模型, 一般小于

1。其公式为:

$$R_{CS}^2 = 1 - \left[ \frac{l(0)}{l(\beta)} \right]^2 \quad (8)$$

其中,  $l(0)$  表示初始模型的似然值,  $l(\beta)$  表示当前模型的似然值。

Nagelkerke  $R^2$  则是对 Cox & Snell  $R^2$  的进一步调整, 使得取值范围在 0~1 之间, 其计算公式为:

$$R_N^2 = R_{CS}^2 / \max(R_{CS}^2) \quad (9)$$

$$\text{其中, } \max(R_{CS}^2) = 1 - [l(0)]^2。$$

Cox & Snell  $R^2$  与 Nagelkerke  $R^2$  从不同角度对 Logsitic 回归模型进行解释。研究表明, Nagelkerke  $R^2$  越大, 说明 Logistic 回归模型具有更好的预测性能<sup>[28,32]</sup>。

ROC 曲线分析主要用于描述诊断系统对正、反两种状态的判断能力。当预测效果最佳时, 曲线应该是从左下角垂直上升至顶, 然后水平方向向右延伸至右上角。如果 ROC 曲线呈主对角线分布, 表明诊断方法无效; ROC 曲线下面积大于 0.5, 说明模型的拟合程度较好。Shi 等人<sup>[32]</sup>和 Jia 等人<sup>[12]</sup>分别用 ROC 曲线分析各自模型的拟合程度, 以此来保证模型的优良性。

Akaike 信息准则 (Akaike information criterion), 简称 AIC, 是衡量统计模型拟合优良性的一种准则, 由日本统计学家赤池弘次创立和发展, 因此又称赤池信息准则。它建立在熵的概念基础上, 可以权衡所估计模型的复杂度和此模型拟合数据的优良性, 用来消除模型的过度拟合。通常情况下, AIC 可以表示为:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (10)$$

其中:  $k$  是参数的数量,  $L$  是似然函数。

假设条件是模型的误差服从独立正态分布。让  $n$  为观察数,  $RSS$  为剩余平方和, 那么 AIC 变为:

$$AIC = 2k + n\ln(RSS/n) \quad (11)$$

增加自由参数的数量提高了拟合的优良性, 尽管 AIC 支持数据拟合的优良性, 但要尽量避免出现过拟合 (Overfitting) 的情况, 所以优先考虑的模型应是 AIC 值最小的那一个。Fabi 等人<sup>[40]</sup>用 AIC 信息准则验证模型优良性; 以及 Jones 等人<sup>[31]</sup>、Andersen 等人<sup>[11]</sup>和 Cali 等人<sup>[14]</sup>研究中的解释变量都是基于 AIC 信息准则的向前和向后选择程序来



确定的。这种方法是将所有模型,无论是单变量模型、双变量模型以及多变量模型都进行互相比,然后确定出 AIC 值最小的变量模型即为最佳模型,对拟合的准确性和严谨性都比较高。

另外,为保证数据稳定性也可采用交叉验证的方法。交叉验证的基本思想是在某种意义上将原始数据进行分组,一部分作为训练集,另一部分作为验证集。首先用训练集对模型进行训练,再利用验证集来测试训练得到的模型,以此作为评价模型性能的指标,目的就是为了得到可靠稳定的模型。Cali 等人<sup>[14]</sup>和 Jia 等人<sup>[12]</sup>采用十倍交叉验证,保证了结果的可靠性,准确度可以达到 82.14%。此外还有一些其他的验证方法,例如采用外部模型验证并使用三个分析标准,将模拟的窗口状态与测量的窗口状态进行比较<sup>[39]</sup>,以保证模型的可靠性。但这种方法可能会存在样本需求量较大的问题。

从模型建立及检验的整个过程来看,建立模型最常用的仍然是 Logistic 模型以及结合马尔可夫链和生存分析的扩展模型,但这些模型很少考虑窗口开度大小变化的过程,以及人的随机行为对窗口开度的影响,即利用简单的二分类问题来分析一个复杂的问题。考虑到窗口开度对室内环境和通风的影响<sup>[25,49]</sup>,这类模型需要改进。另外,对于模型的检验,存在众多的统计学方法可以应用,这些方法的结论是否相同,是否可以相互佐证,以及哪些模型更为可靠,也有待进一步研究。

#### 4 讨论

通过以上人员开窗行为的研究方法,可以得出影响开窗行为的显著因素也是不同的。Wolf 等人<sup>[39]</sup>得出室外温度是人员开窗行为的主要驱动因素之一,并且已有研究证明得出室内外温度差对开窗行为表现出显著影响<sup>[50]</sup>,这说明了室内外温度是影响窗口状态不可缺失的因素。而 Jian 等人<sup>[51]</sup>认为室内二氧化碳浓度是开窗行为最佳预测因子,并提出室内外热环境对开窗行为具有强烈影响,对此,也有学者得出室内二氧化碳浓度是打开窗口最常见的影响因素,并且每天不同的时间段也成为影响开窗行为较为显著的影响因素<sup>[14,30]</sup>;另一方面,陈伟煌等人<sup>[52]</sup>分析得出空调房间和自然通风房间室内人员的开窗概率都随室内外温度的增加而增加,但空调房间开窗概率的变化幅度明显大于自然通风

房间,说明室内冷热源设备的状态对开窗行为也具有不可忽视的影响;而 Herkel 等人<sup>[34]</sup>在分析时将窗户分为大窗口和小窗口、倾斜打开和完全打开,结果表明不同开度大小对开窗持续时间有着明显的影响,但是对具体的开度大小没有量化分析;Park 等人<sup>[53]</sup>通过多元 Logistic 回归模型同样分析了室内外不同变量对开窗行为的影响,得出开窗行为与室内外温度之间有显著的相关性。最后在 Fabi<sup>[33]</sup>的总结中,将开窗行为的驱动力分为五大类(物理环境、情景、心理、生理和社会),并指出开窗行为的研究不能仅限于调查窗口本身的状态,更要着重于从一个状态到另一个状态的变化,指出尽管关于主要触发因素还没有统一的认识,但仍然可总结出三个普遍影响开窗行为的驱动因素——室外温度、室内温度及二氧化碳浓度。从结论中可以看出,影响开窗行为的因素并不一致,原因主要在于建筑物类型、当地气象环境和室内人员的生活习性的不同等,但普遍因素与 Fabi 的总结大致相同。

根据目前研究可以得出,尽管学者们对人员开窗行为有了较为全面的认识,但仍然存在一些问题。正如前面提到的:(1)针对实地测量中出现的的数据缺失、采集不完全或者异常的情况,需要利用统计学方法对异常值和缺失的数据进行分析;(2)限于采样设备的技术水平,特别是对于开窗状态的监测数据的采集范围和采集量较小,大多数研究仅针对某几个房间的多个窗口进行检测,无法发挥大数据的优势,这种传统的侵入式仪器安装方式也可能对室内人员对窗口的操作造成干扰;(3)对于开窗模型大部分研究仍然采用简单的二分类问题来分析,很少考虑窗口开度大小变化的过程,以及人员随机行为对窗口开度的影响,更没有考虑窗口开度的随机性对室内外环境演化关系的影响;(4)对于模型检验,众多检验方法的比较和分析也较少。据此,我们针对目前人员开窗行为的建模和分析方法,提出一些设想和建议以期解决目前存在的问题,图 5 为我们总结的人员开窗行为研究流程图。如图所示,首先我们认为可以采用对建筑立面窗口的图像智能识别和热成像分析来实现窗口开度大小的数据采集;基于采集到的大量数据,可以通过偏态分布和生存分析来解释窗口开度随环境参数的变化规律;最后,可以通过蒙特卡洛模拟结合质平衡方程来分析窗口开度的随机性对室内外环境演

化关系的影响。

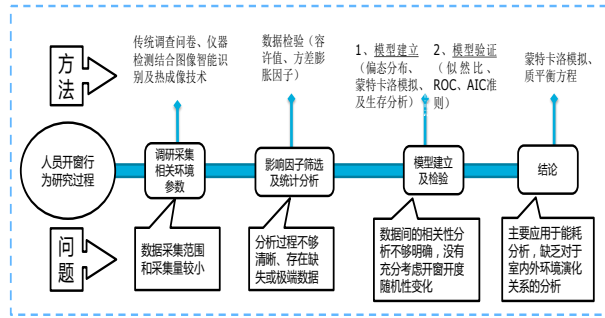


图5 人员开窗行为研究过程流程图

Fig.5 Flow chart of the research process of occupant windowing behavior

### 5 结论

本文针对开窗行为的研究,进行了较为全面的论述,目前的研究在普遍情况下公认的对人员开窗行为具有显著影响的影响因素为室内外温度、二氧化碳浓度及每天不同的时间段。目前研究中所采用的建模方法主要为 Logistic 回归模型,也包括马尔可夫链、频繁模式挖掘等较为新颖的方法。此外,对于模型检验,ROC 曲线分析以及 AIC 信息准则被大多数研究所采用。尽管许多研究过程都值得借鉴,但仍存在一些尚未解决的问题。例如研究所收集样本数据不充分,模型具有局限性,未充分考虑行为随机性以及心理、生理因素等影响。文章中对人员开窗行为的综述性分析,针对现有的问题提出了一些新的方法,例如在数据采集中结合图像智能识别及热成像技术来增大样本采集量和采集速度,建立表征窗口开度变化的偏态模型,以及结合蒙特卡洛模拟和质平衡方程来分析室内外环境的演化关系等。本文为研究寻求新的方法奠定了基础,对避免重复性劳动和提高研究的价值都有较大的意义。

### 参考文献:

[1] 刘晓红,周定国.室内环境污染的危害及其预防[J].浙江农林大学学报,2003,20(3): 297-301.  
 [2] 熊志明,张国强,彭建国,等.室内可吸入颗粒物污染研究现状[J].暖通空调,2004,34(4): 32-36.  
 [3] 张显辉,李长玉.浅谈室内环境污染问题[J].环境科学与管理,2008,33(10):68-70.  
 [4] 马惠颖,邵晓亮,梁超,等.雾霾天气下住宅开窗通风与空气净化联合策略可行性研究[J].暖通空调,2016,46(2):18-23.

[5] 李先庭,杨建荣,王欣.室内空气质量研究现状与发展[J].暖通空调,2000,30(3): 36-40.  
 [6] 赵晓颖,柳孝图.南京地区住宅自然通风设计研究[D].南京:东南大学,2005.  
 [7] 谢子令,孙林柱,杨芳.住宅自然通风节能率及其开窗行为相关性分析[J].建筑热能通风空调,2012,32(1):20-23.  
 [8] Yao M Y, Zhao B. Window opening behavior of occupants in residential buildings in Beijing[J]. Building and Environment, 2017,124:441-449.  
 [9] 周浩.基于室内环境监测数据的人行为识别方法研究[D].天津:天津大学,2016.  
 [10] Belafi Z D, Naspi F, Amesano M, et al. Investigation on window opening and closing behavior in schools through measurements and surveys: A case study in Budapest. Building and Environment, 2018,143:523-531.  
 [11] Andersen R, Fabi V, Toftum J, et al. Window opening behaviour modelled from measurements in Danish dwellings[J]. Building and Environment, 2013,69:101-113.  
 [12] Jia S S, Liu J J. Window opening behaviors in residential buildings in different regions of China[J]. Tianjin University, 2017.  
 [13] Lai D, Qi Y, Liu J, et al. Ventilation behavior in residential buildings with mechanical ventilation systems across different climate zones in China[J]. Building and Environment, 2018,143:679-690.  
 [14] Cali D, Andersen R K, Muller D, et al. Analysis of occupants' behavior related to the use of windows in German households[J]. Building and Environment, 2016,103:54-69.  
 [15] 邱少辉,李安桂,张新记.西安市自然通风住宅窗开启率调查分析[J].建筑热能通风空调,2009,28(1):58-61.  
 [16] 李芸.重庆地区过渡季节高校学生公寓人员门窗开关行为研究[D].重庆:重庆大学,2014.  
 [17] 张剑.建筑朝向和高度对办公室使用者开窗通风行为的影响研究[J].华中建筑,2011,29(8):50-53.  
 [18] Zhang Y F, Barrett P. Factors influencing the occupants' window opening behaviour in a naturally ventilated office building[J]. Building and Environment, 2012,50: 125-134.  
 [19] Haldi F, Robinson D. Interactions with window openings by office occupants[J]. Building and Environment,

- 2009,44(12):2378-2395.
- [20] 潘嵩,许传奇.北京某高校办公建筑人员开窗行为研究[J].建筑科学,2015,31(10):212-217.
- [21] Schweiker M, Shukuya M. Comparison of theoretical and statistical models of air conditioning unit usage behaviour in a residential setting under Japanese climatic conditions[J]. Building and Environment, 2009,44(10): 2137-2149.
- [22] 范瑞娟.基于蒙特卡罗方法的重庆地区过渡季节办公建筑人员开窗行为研究[D].重庆:重庆大学,2013.
- [23] 刘斌,牛润萍,魏绅.居住建筑开窗行为的研究进展[J].人类工效学,2017,23(2):81-86.
- [24] Jeong B, Jeong J W, Park J S, et al. Occupant behavior regarding the manual control of windows in residential buildings[J]. Energy and Buildings, 2016,127: 206-216.
- [25] Heiselberg P, Svidt K, Nielsen P V. Characteristics of airflow from open windows[J]. Building and Environment, 2001,36(7):859-869.
- [26] Barthelmes V M, Heo Y, Fabi V, et al. Exploration of the Bayesian Network framework for modelling window control behaviour[J]. Building and Environment, 2017,126:318-330.
- [27] 王闯.有关建筑用能的人行为模拟研究[D].北京:清华大学,2014.
- [28] Shi Z N, Qian H, Zheng X, et al. Seasonal variation of window opening behaviors in two naturally ventilated hospital wards[J]. Building and Environment, 2018,130: 85-93.
- [29] Pan S, Xiong Y, Han Y, et al. A study on influential factors of occupant window-opening behavior in an office building in China[J]. Building and Environment, 2018,133:41-50.
- [30] Stazi F, Naspì F, D'Orazio M. A literature review on driving factors and contextual events influencing occupants' behaviours in buildings[J]. Building and Environment, 2017,118:40-66.
- [31] Jones R V, Fuertes A, Gregori E, et al. Stochastic behavioural models of occupants' main bedroom window operation for UK residential buildings[J]. Building and Environment, 2017,118:144-158.
- [32] Shi S S, Zhao B. Occupants' interactions with windows in 8 residential apartments in Beijing and Nanjing, China[J]. Building Simulation, 2015,9(2):221-231.
- [33] Fabi V, Andersen R V, Corgnati S, et al. Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models[J]. Building and Environment, 2012,58:188-198.
- [34] Herkel S, Knapp U, Pfafferott J, et al. Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings[J]. Building and Environment, 2008,43(4):588-600.
- [35] Lai D Y, Jia S S, Qi Y, et al. Window-opening behavior in Chinese residential buildings across different climate zones[J]. Building and Environment, 2018,142:234-243.
- [36] GuerraSantin O, Itard L. Occupants' behaviour: determinants and effects on residential heating consumption[J]. Building Research and Information, 2010,38(3):318-338.
- [37] 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.
- [38] Tian X, Chen S, Wei Z, et al. Impact of Window-opening Random Behaviors on Indoor Ultrafine Particles\_a Preliminary Simulation Study[J]. Procedia Engineering, 2017,205:2793-2799.
- [39] Wolf S, Wölki D, Robinson D, et al. Evaluation and Re-training of Two Window Opening Models Using an Independent Dataset[C]. Healthy Buildings 2017 Europe, 2017.
- [40] Fabi V, Andersen R V, Corgnati S P, et al. A methodology for modelling energy-related human behaviour: Application to window opening behaviour in residential buildings[J]. Building Simulation, 2013,6(4):415-427.
- [41] D'Oca S, Hong T. A data-mining approach to discover patterns of window opening and closing behavior in offices. Building and Environment, 2014,82(11):726-739.
- [42] 周浩,林波荣.基于监测数据的老年人家庭开窗习惯与 QIEQ 分析[C].第八届室内环境与健康分会学术年会 (IEHB2017),2017.
- [43] Tahmasebi F, Mahdavi A. On the Utility of Occupants'

- Behavioural Diversity Information for Building Performance Simulation: An Exploratory Case Study[J]. Energy and Buildings, 2018,176:380-389.
- [44] Markovic R, Grintal E, Wölki D, et al. Window Opening Model using Deep Learning Methods[J]. Building and Environment, 2018,145:319-329.
- [45] 孟庆龙,熊樱子,潘嵩,等.基于 BP 神经网络的办公建筑人员开窗行为预测方法[J]. 建筑科学,2018,34(10):103-108.
- [46] Pan S, Wei S, Wei Y X, et al. A model based on Gauss Distribution for predicting window behavior in building[J]. Building and Environment, 2019,149(0360-1323):210-219.
- [47] Rijal H B, Tuohy P G. Development- adaptive-window-opening algorithm predict the thermal comfort, energy use and overheating in buildings[J]. Journal of Building Performance Simulation, 2008, 1(1):17-30.
- [48] 许传奇.北京某大学办公建筑人员开窗行为研究[D].北京:北京工业大学,2016.
- [49] Huang K L, Feng G, Li H, et al. Opening window issue of residential buildings in winter in north China: A case study in Shenyang[J]. Energy and Buildings, 2014,84:567-574.
- [50] Liang W H, Qin M H. A simulation study of ventilation and indoor gaseous pollutant transport under different window/door opening behaviors[J]. Building Simulation, 2017,10(3):395-405.
- [51] Jian Y W, Guo Y J, Liu J, et al. Case study of window opening behavior using field measurement results[J]. Building Simulation, 2011,4(2):107-116.
- [52] 陈伟煌. 夏热冬冷地区夏季舒适状况及居民开窗行为研究[D].长沙:湖南大学,2009.
- [53] Park J S, Choi C S. Modeling occupant behavior of the manual control of windows in residential buildings[J]. Indoor air, 2019,29(2):242-251.