

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.065

设计初期建筑 HVAC 负荷敏感性分析： 城市环境下的购物中心

魏 莱^{1a,1b}, 刘 刚^{1a,1b}, 黄文龙², 董伟星²

(1.天津大学 a.建筑学院;b.天津市建筑物理环境与生态技术重点实验室,
天津 300072;2.中国中建设计集团有限公司,北京 100037)

摘要:城市环境及设计参数的多样性使购物中心的冷热负荷具有多重不确定性。通过 3 种典型购物中心在 2 种城市环境下的敏感性分析,旨在确定寒冷气候下的关键设计参数。采用拉丁超立方抽样获得 200 种设计组合方式,通过不确定性及敏感性分析,得到购物中心冷热负荷的波动情况及 16 个设计参数的敏感性排序。不确定性分析表明,设计参数引起全年 HVAC(供暖通风与空气调节)负荷高达 62.3% 的变化,热负荷的变化幅度是冷负荷的 5 倍;敏感性分析表明,入口风速、天窗屋顶面积比和屋面传热系数是影响寒冷地区购物中心的建筑全年 HVAC 负荷的 3 个重要设计参数;城市环境影响表明,建筑密集地区对冷负荷的需求低于空旷地区,同时,外窗太阳得热系数的敏感性在空旷地区明显高于建筑密集地区。

关键词:设计初期;购物中心;敏感性分析;建筑 HVAC 负荷;城市环境

中图分类号:TU111.4+8 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2022)09-095-11

Sensitivity analysis of building HVAC load in early design: shopping centers in urban environments

WEI Lai^{1a,1b}, LIU Gang^{1a,1b}, HUANG Wenlong², DONG Weixing²

(1a. School of Architecture; 1b. Tianjin Key Laboratory of Architectural Physical Environment and Ecological Technologies, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China; 2. China Construction Engineering Design Group Corporation Limited, Beijing 100037, P. R. China)

Abstract: The diversity of urban environment and design parameters makes the shopping center's heating and cooling loads have multiple uncertainties. Through the sensitivity analysis of three typical shopping centers in two urban environments, this paper aims to determine the key design parameters in cold region. Latin Hypercube Sampling was used to obtain 200 design combinations. Based on uncertainty and sensitivity analysis, the cooling and heating load fluctuations of the shopping center and the sensitivity ranking of 16 design parameters were obtained. Uncertainty analysis shows that the design parameters cause the HVAC (heating, ventilation and air conditioning) load to fluctuate up to 62.3%, and the change in heating load is 5 times of that in cooling load. Sensitivity analysis shows that the entrance wind speed,

收稿日期:2020-06-27 **网络出版日期:**2020-10-28

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0700200);高等学校学科创新引智计划(B13011)。

National Key R&D Program of China (2016YFC0700200) and the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B13011).

作者简介:魏莱(1993—),女,博士研究生,主要从事建筑节能与绿色建筑技术方向研究,(E-mail) wllayla@163.com。

通信作者:刘刚,男,教授,博士生导师,主要从事绿色建筑技术研究,(E-mail) lglgmike@163.com。

the ratio of skylight area to roof area, and roof U-value are three important design parameters that affect the building HVAC load of shopping centers in cold region. The urban environmental impact shows that the demand for cooling load in the high-density area is lower than that in the low-density of the city. Meanwhile, the sensitivity of the window solar heat gain coefficient is significantly higher in the open areas than in the high-density built areas.

Keywords: early design stages; shopping centers; sensitivity analysis; building HVAC load; urban environment

随着城市化的发展,购物中心建设突飞猛进,据统计,2017年商场建筑的竣工面积居公共建筑之首,占比高达31%^[1]。同时,集聚规模大、内热源高等特征,购物中心的能耗高达普通公共建筑的4~8倍^[2]。通常来说,设计初期建筑师的设计决策对建筑的最终性能影响显著^[3-5],基于购物中心建设量大及能耗高的特点,建筑师有必要在设计初期思考如何进行高效的低能耗设计。

在设计初期,建筑师需考虑众多设计参数,包括建筑布局^[6-7]、空间形态^[8-11]、围护结构热工特性^[12-15]等,这些参数在不同程度上影响着建筑的冷热负荷。因此,建筑师需准确控制影响建筑负荷变化较大的设计参数,以提高设计优化的最终效果^[16]。敏感性分析(sensitivity analysis, SA)可用于定量评价不同设计参数对建筑性能结果影响的大小,指导建筑师筛选出对输出结果影响较大的参数,以提高建筑的节能效果^[17]。一般来说,SA可分为局部敏感性分析(local sensitivity analysis, LSA)和全局敏感性分析(global sensitivity analysis, GSA)。LSA是指保持其他设计参数不变的情况下分析单一参数变化对模型输出的影响,GSA是指改变所有设计参数来评估单一参数对模型输出的影响^[18]。由于实际建筑设计非常复杂,不会仅为单一参数的变化,在设计初期采用GSA来评估设计参数的敏感性更合理^[19]。目前,设计初期的全局敏感性分析已被应用于各类建筑对重要设计参数的筛选,Hemsath等^[20]对比了住宅建筑早期设计的几何和材料要素,发现建筑的几何特征比材料对建筑负荷具有更高的敏感性;Bre等^[21]模拟并分析了阿根廷沿岸地区独栋住宅设计参数的能耗敏感性,发现外墙类型、外窗渗透率和太阳方位角对能耗影响显著;Yıldız等^[22]发现窗面积、窗传热系数及其太阳得热系数(solar heat gain coefficient, SHGC)对湿热气候下公寓楼的建筑负荷影响最大;Dussault等^[23]分析了与办公建筑智能窗相关设计参数的能耗敏感性,发现智能窗的位置、立面朝向和窗墙面积比(window to wall ratio, WWR)对能耗影响显著;Singh等^[24]通过敏感性分析得出,WWR、玻璃种类、百叶朝向及遮阳角度对办公建筑在干热气候下的能耗具有显著影响。从全局敏感性的研究可知,建筑类型以规模较小且功能单一的住宅和办公类建筑为主,对于具有大规模、多功能特征的购物中心,目前仅考虑到单参数变化下的影响潜力^[25],缺乏从全局考虑的多种设计参数的综合作用影响。因此,有必要通过全局敏感性分析来提高购物中心设计初期方案决策的准确性。

另外,城市环境是建筑师进行初步设计的制约因素,它同样也会影响建筑的用能需求^[6,7,19,26-27]。何成等^[19]以武汉办公建筑为例,发现9个城市环境布局参数会引起制冷、供暖和全年总能耗分别高达15.8%、26.8%和4.4%的波动;Ahn等^[7]研究了3种城市形态要素(水平紧密度、垂直密度和建筑高度)对西雅图住宅能耗的影响力,发现增加周边建筑的水平密度和垂直高度是降低住宅能耗的有效途径。通常来说,购物中心分布于城市的建筑密集地区和建筑空旷地区,以便满足公共出行和自驾出行为主人群的购物需求。其中,城市密集地区的建筑密度较高,周边环境会对购物中心形成遮挡;而空旷地区的建筑密度较低,购物中心几乎不受周边环境的影响。考虑到购物中心在不同城市环境中的差异性,有必要进一步探索不同城市环境下购物中心建筑负荷及参数敏感性的差异。

文中重点通过全局敏感性分析方法,确定不同城市环境下对购物中心冷热负荷影响最大的设计参数,以便让建筑师知晓在不同城市环境下需重点调整哪些参数,从而在设计初期最大限度的减少寒冷地区购物中心的能源消耗。

1 方 法

1.1 模型建立

购物中心建筑模型的几何参数及运行参数以文献[25]的3种购物中心标准模型(长宽比分别为1:1、2:1和3:1)为准。以寒冷地区代表性城市北京为例,选取其典型气象年的数据作为气象参数,数据来源于EnergyPlus自带的气象数据(数据名称:CHN_Beijing, Beijing, 545110_CSWD.epw 来源网站:https://www.energyplus.net/weather)。对于环境模型,考虑到城市密集地区和空旷地区的建筑密度具有明显差异,以最大最小两种极端的城市建筑密度来模拟两种城市环境,如图1所示。对于建筑密集地区,以满足建筑设计防火规范^[28]的最大建筑密度作为城市建筑密集地区的环境模型。具体讲,以典型高层办公建筑为例,在购物中心四周建立长宽高分别为50 m×50 m×100 m的办公建筑群,并参照建筑设计防火规范^[28]的阈值,指定购物中心与高层之间的间距为9 m,高层之间的间距为13 m。对于城市空旷地区,设定其环境模型无任何建筑及构筑物,即购物中心周边无建筑及构筑物的影响。

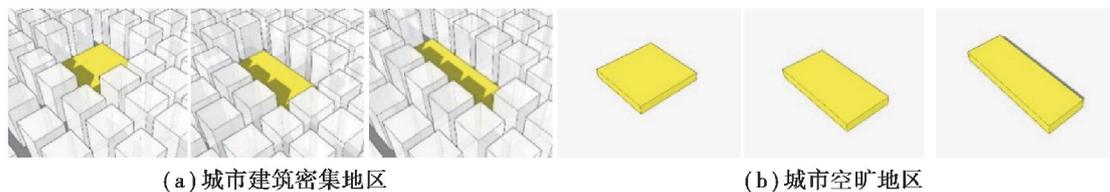


图1 3种购物中心的环境模型

Fig. 1 Environment models of three shopping centers

1.2 全局敏感性分析

在建立的典型建筑及环境模型基础上,通过以下4个步骤进行购物中心建筑的全局敏感性分析。

1) 确定输出参数。作为建筑用能需求的重要指标^[22],文中以供暖季的热负荷、制冷季的冷负荷及全年HVAC负荷作为输出参数。采用EnergyPlus建筑性能模拟软件,计算购物中心的全年冷热负荷值。

2) 确定输入参数。选择了6类设计要素作为影响购物中心建筑负荷的主要变量,即:建筑布局、通风、窗面积、围护结构的热物理特性、窗户气密性和建筑构件。从6类要素中分解出16个详细的建筑参数作为输入参数,如表1所示,分别是购物中心的朝向;入口风速;东、西、南、北侧WWR;天窗屋顶面积比;外墙、屋面、外窗、天窗传热系数;外窗、天窗SHGC;外窗、天窗气密性;天窗遮阳构件。另外,考虑到仿真工具操作的局限性,每个选定的输入参数均可在软件中以具体数值的形式被定义,文中并未额外增加仿真工具中无法定义的设计参数。

表1 建筑参数

Table 1 Building parameters

输入参数	变量类型	变化范围	单位
1-朝向	连续	0~360	(°)
2-入口风速	连续	0.2~2.6 ^[25]	m/s
3-东侧 WWR	连续	0~70%	%
4-西侧 WWR	连续	0~70%	%
5-南侧 WWR	连续	0~70%	%
6-北侧 WWR	连续	0~70%	%

续表1

输入参数	变量类型	变化范围	单位
7-天窗屋顶面积比	连续	0~20*	%
8-外墙传热系数	连续	0.1~0.6*	W/m ² K
9-屋面传热系数	连续	0.1~0.55*	W/m ² K
10-外窗传热系数	连续	0.8~3.0*	W/m ² K
11-天窗传热系数	连续	0.8~2.4*	W/m ² K
12-外窗 SHGC	连续	0.15~0.8*	
13-天窗 SHGC	连续	0.15~0.44*	
14-外窗气密性	连续	1.0~4.5*	m ³ /m ² h
15-天窗气密性	连续	1.0~4.5*	m ³ /m ² h
16-天窗遮阳	离散	1 无遮阳/2 百叶遮阳/3 幕布遮阳	

注：* 参考标准 GB50189—2015^[29],GB/T 7106—2008^[30]。

3)生成样本矩阵。使用 Simlab2.2 软件中的拉丁超立方抽样 (Latin hypercube sampling, LHS) 方法^[17],它是建筑性能在敏感性分析中最常用的抽样方法之一^[31]。具体讲,LHS 是将输入参数的阈值区间划分为 N 个间隔,并从该间隔中选择具有相等概率的样本,使抽取的样本更加均匀^[32]。另外,GSA 所需要的样本量通常是变量的 1.5~10 倍^[33]。因此,文中对 16 个变量抽取了 200 组样本,以保证样本量的充足。

4)选择敏感性分析方法。在使用 LHS 方法生成样本时,Simlab 软件中有不同的全局敏感性分析方法,包括偏相关系数 (partial correlation coefficients,PCC),标准回归系数 (standardized regression coefficients, SRC),偏秩相关系数 (partial rank correlation coefficients, PRCC),标准秩回归系数 (standardized rank regression coefficients, SRRC) 等。它们有不同的特征,取决于输入和输出参数之间的关系是否为线性^[22]。首先,选取了 2 种常用的全局敏感性分析方法,即标准回归系数 (SRC) 和偏秩相关系数 (PRCC)。其中, SRC 只适用于输入参数间相互独立,且变量为线性单调关系的模型, PRCC 可以分析输入参数相关联的情形,且适用于非线性单调的模型^[31]。文中对 16 种设计参数的全年 HVAC 负荷在 SRC 和 PRCC 2 种敏感性的排序结果进行 Pearson 相关性分析,发现 3 种比例模型排序结果的相关性较高,相关系数分别为 0.897、0.976、0.921,均为显著相关 ($P < 0.01$),说明 2 种敏感性分析方式的整体排序差异不大。考虑到文中主要探讨不同城市环境下建筑设计参数的影响力及敏感性排序,选取其中一种 GSA 方法——PRCC 为例,开展进一步的敏感性分析。

2 结 果

2.1 负荷不确定性分析

图 2 是 3 种购物中心模型在城市空旷地区及城市建筑密集地区的热负荷概率分布图。结果表明,3 种模型的建筑热负荷均在 20~134 kWh/m² 范围内波动。在城市空旷地区及密集地区,1:1 模型热负荷的均值分别为 75.5 kWh/m² 和 77.4 kWh/m²,极差分别为 90.6 kWh/m² 和 90.0 kWh/m²;2:1 模型的均值分别为 72.0 kWh/m² 和 74.8 kWh/m²,极差为 89.7 kWh/m² 和 88.6 kWh/m²;3:1 模型的均值分别为 84.9 kWh/m² 和 87.7 kWh/m²,极差为 103.9 kWh/m² 和 103.0 kWh/m²。由此可见,设计参数对建筑热负荷的影响变化显著,变化幅度 (极差/均值) 高达 116.3%~124.5%;而热负荷受城市环境影响不明显,虽然城市建筑密集地区的均值略低于空旷地区,但二者的均值差仅在 2.0~2.8 kWh/m² 之间。

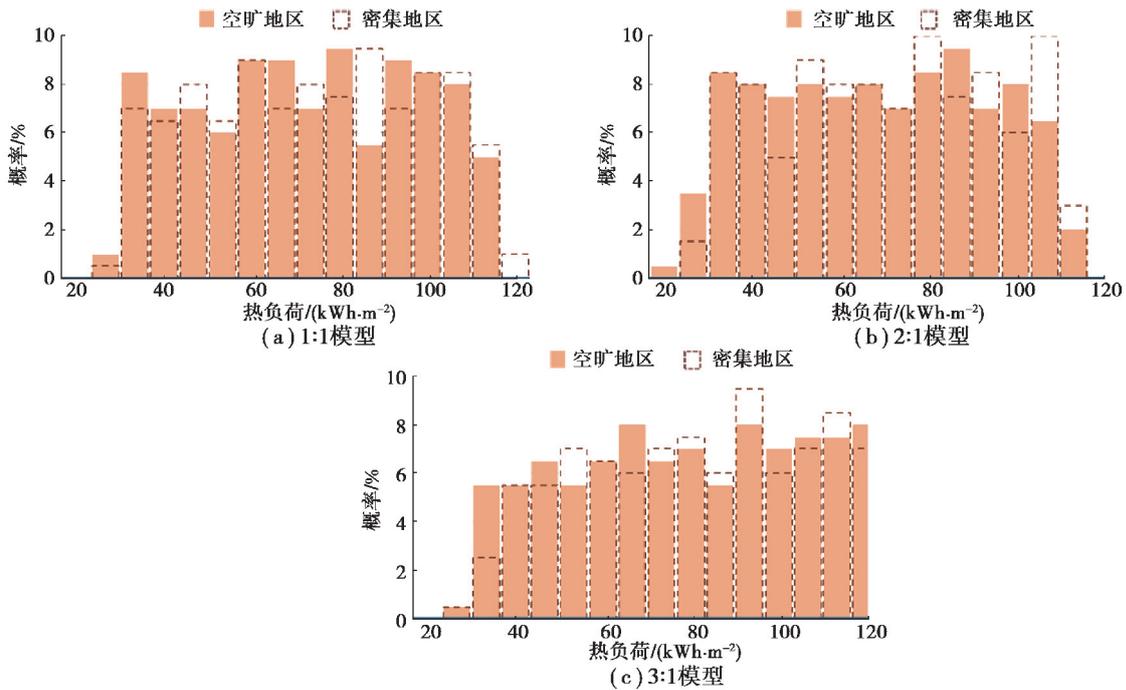


图 2 3 种模型在城市空旷地区/建筑密集地区的热负荷概率分布图

Fig. 2 Probability distribution of heating loads of three models in high-density/ low-density built areas

图 3 是 3 种购物中心模型在城市空旷地区及城市建筑密集地区的冷负荷概率分布图。结果表明,3 种模型的建筑冷负荷均在 90~130 kWh/m² 范围内波动。在城市空旷地区及密集地区,1:1 模型冷负荷的均值分别为 112.5 kWh/m² 和 108.2 kWh/m²,极差分别为 27.6 kWh/m² 和 23.5 kWh/m²;2:1 模型的均值分别为 115.1 kWh/m² 和 110.9 kWh/m²,极差为 26.4 kWh/m² 和 22.7 kWh/m²;3:1 模型的均值分别为 116.0 kWh/m² 和 111.4 kWh/m²,极差为 28.2 kWh/m² 和 23.2 kWh/m²。由此可见,设计参数对建筑冷负荷影响较明显,变化幅度在 20.5%~24.6%;冷负荷受城市环境影响显著,2 种环境的均值差在 4.2~4.7 kWh/m² 之间,表现为 3 种模型冷负荷的均值在城市密集地区均低于空旷地区,这是因为建筑在城市建筑密集地区受到周边建筑群遮挡,使夏季可接收的太阳直射光明显减少,进而降低了建筑对冷负荷的需求。

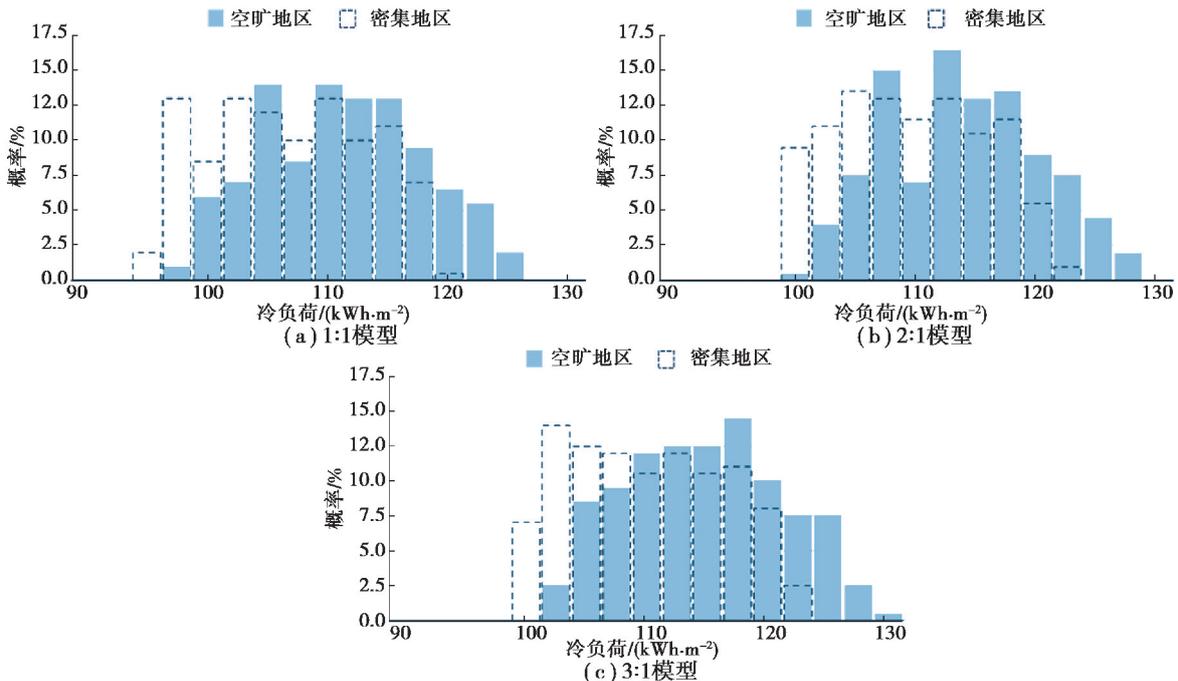


图 3 3 种模型在城市空旷地区/建筑密集地区的冷负荷概率分布图

Fig. 3 Probability distribution of cooling loads of three models in high-density/ low-density built areas

图 4 是 3 种模型在城市空旷地区及密集地区的全年 HVAC 负荷概率分布图。受 16 个设计参数的影响,全年 HVAC 负荷集中在 120~250 kWh/m²。在城市空旷地区及密集地区,1:1 模型全年 HVAC 负荷的均值分别为 188.0 kWh/m² 和 185.6 kWh/m²,极差分别为 111.8 kWh/m² 和 111.7 kWh/m²;2:1 模型的均值分别为 187.1 kWh/m² 和 185.7 kWh/m²,极差为 109.4 kWh/m² 和 109.8 kWh/m²;3:1 模型的均值分别为 200.9 kWh/m² 和 199.1 kWh/m²,极差为 124.0 kWh/m² 和 124.1 kWh/m²。由此可见,设计参数对 HVAC 负荷影响显著,变化幅度在 58.5%~62.3%;城市环境对全年 HVAC 负荷有一定影响,2 种环境的均值差在 1.4~2.4 kWh/m²,并表现为 3 种模型的 HVAC 负荷在城市建筑密集地区略低于空旷地区。

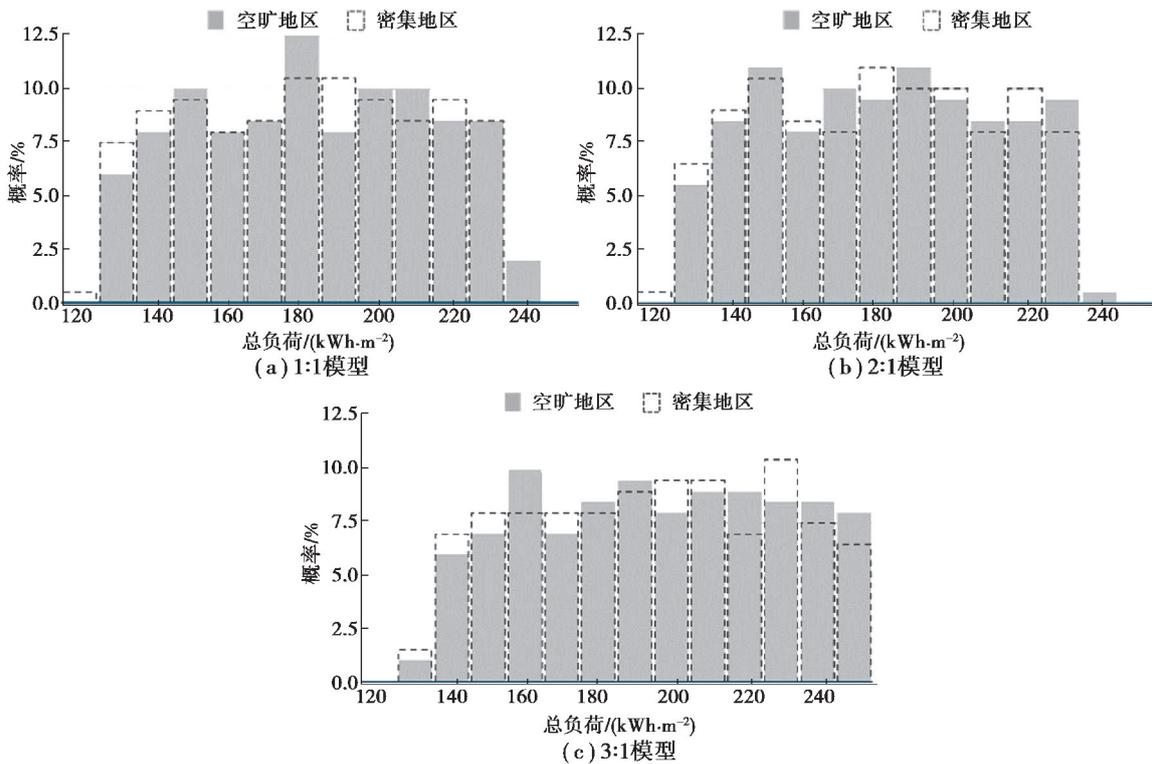


图 4 3 种模型在城市空旷地区/建筑密集地区的全年 HVAC 负荷概率分布图

Fig. 4 Probability distribution of HVAC loads of three models in high-density/low-density built areas

综上所述,16 个设计参数会引起热负荷、冷负荷和全年 HVAC 负荷分别高达 124.5%、24.6% 和 62.3% 的波动,其中对热负荷的波动最为显著,表现为热负荷的变化幅度是冷负荷的 5 倍左右。而城市环境对冷负荷影响更显著,表现为购物中心夏季对冷负荷的需求在建筑密集地区明显低于空旷地区。

2.2 负荷敏感性分析

图 5 是 3 种模型在城市空旷地区及建筑密集地区 2 种环境下,16 个设计参数的热负荷敏感性结果。由热负荷 PRCC 的正负可知,无论是外窗还是天窗,其 SHGC 值在空旷地区与热负荷均呈负相关。由 PRCC 绝对值在城市环境中的变化可知,城市建筑密集地区提高了东、西、南侧 WWR、天窗屋顶面积比、外墙传热系数和天窗遮阳的热负荷敏感性,降低了外窗 SHGC 的热负荷敏感性。

图 6 是 3 种模型在城市空旷地区及城市建筑密集地区 2 种环境下,16 个设计参数的冷负荷敏感性结果。由冷负荷 PRCC 的正负可知,东、西、南侧 WWR 在不同城市环境下对冷负荷的影响趋势相反,在城市空旷地区与冷负荷呈正相关,在城市建筑密集地区呈负相关。由 PRCC 绝对值在城市环境中的变化可知,城市建筑密集地区提高了天窗屋顶面积比、屋面传热系数和天窗 SHGC 的冷负荷敏感性,降低了北侧 WWR 和外窗 SHGC 的冷负荷敏感性。

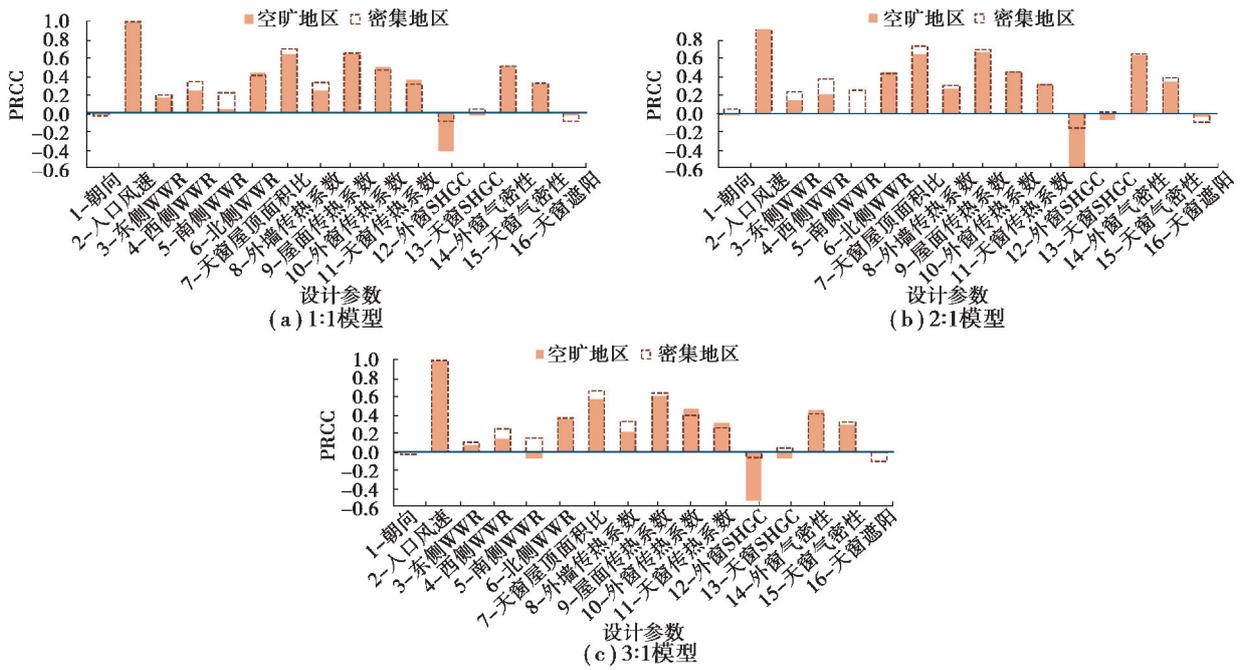


图 5 3 种模型在城市空旷地区/建筑密集地区的热负荷敏感性分析

Fig. 5 Heating sensitivity analysis of three models in high-density/ low-density built areas

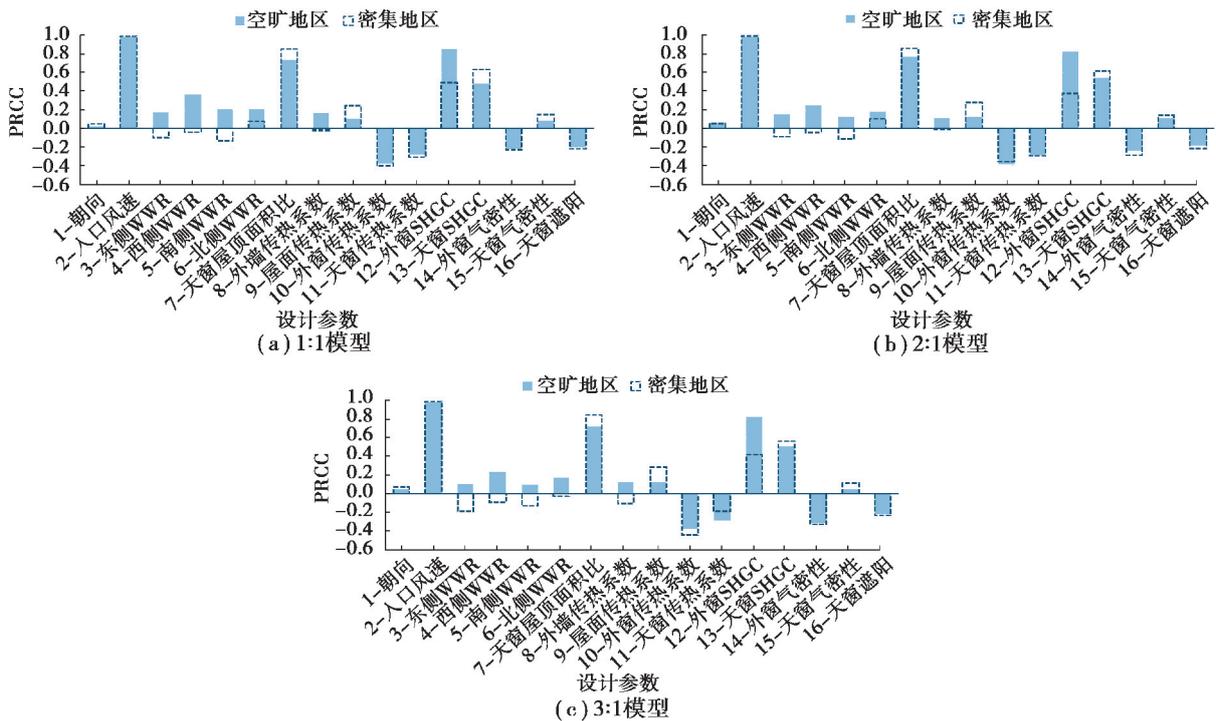


图 6 3 种模型在城市空旷地区/建筑密集地区的冷负荷敏感性分析

Fig. 6 Cooling sensitivity analysis of three models in high-density/ low-density built areas

图 7 是 3 种模型在城市空旷地区及城市建筑密集地区 2 种环境下,16 个设计参数的全年 HVAC 负荷敏感性结果。由 PRCC 绝对值在城市环境中的变化可知,城市建筑密集地区提高了外窗传热系数和外窗气密性的 HVAC 负荷敏感性,降低了西侧 WWR 和外窗 SHGC 的 HVAC 负荷敏感性。

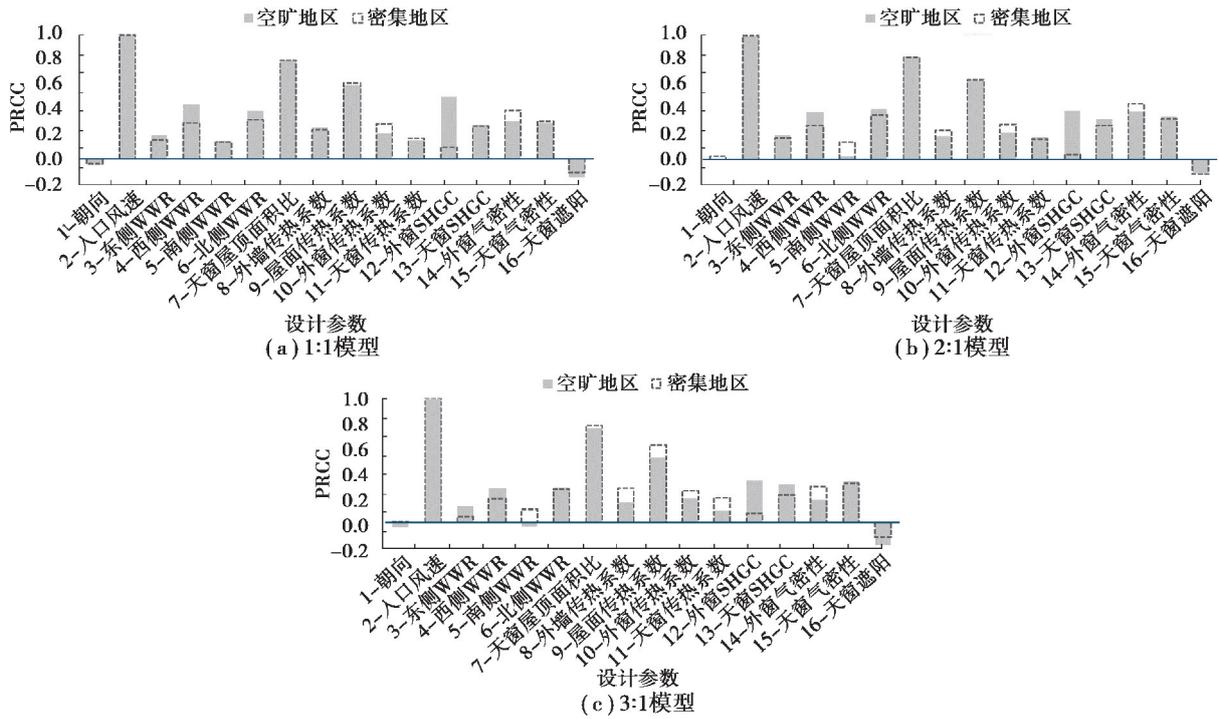


图 7 3 种模型在城市空旷地区/建筑密集地区的全年 HVAC 负荷敏感性分析

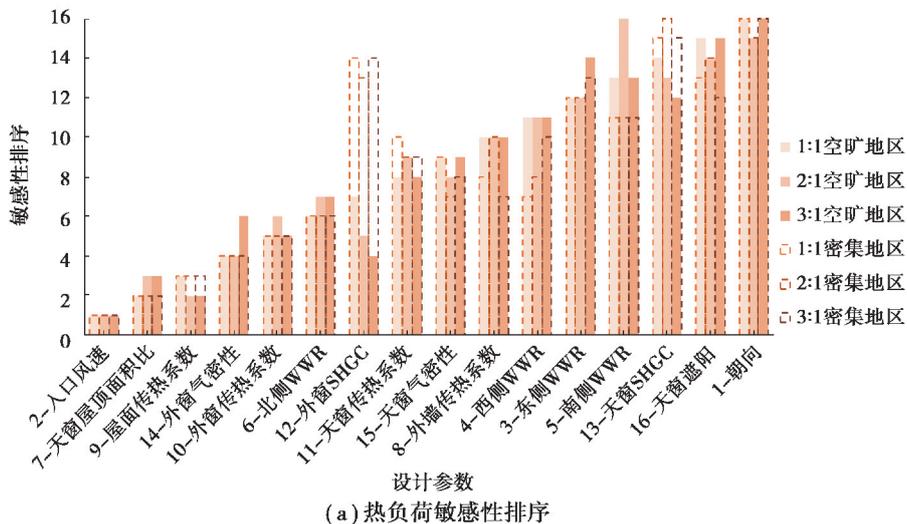
Fig. 7 HVAC loads sensitivity analysis of three models in high-density/ low-density built areas

2.3 负荷敏感性排序

根据设计参数敏感性大小,图 8 是 3 种模型在 2 种城市环境下热负荷、冷负荷及 HVAC 负荷的 PRCC 排序,以 1:1 模型在空旷地区的敏感性由大到小排序为基准。

从设计参数对热负荷 PRCC 的排序来看(见图 8(a)), 2 种城市环境下均表现为入口风速的影响最大,天窗屋顶面积比和屋面传热系数紧随其后,朝向影响最小。不同的是,外窗 SHGC 对热负荷敏感性影响在城市空旷地区明显大于密集地区,排序在城市空旷地区为 4~7 名,在密集地区则降至 13~14 名。

从设计参数对冷负荷 PRCC 的排序来看(见图 8(b)), 2 种城市环境下均表现为入口风速的影响最大,外窗 SHGC、天窗屋顶面积比、天窗 SHGC 和外窗传热系数的影响排序均位于前 5 名。不同的是,外窗 SHGC 和西侧 WWR 对冷负荷敏感性影响在城市空旷地区明显大于密集地区,外窗 SHGC 的排序在空旷地区均为第 2,密集地区降为 4~5 名,西侧 WWR 在空旷地区为 6~8 名,密集地区降至 14~15 名;屋面传热系数对冷负荷敏感性影响则表现为建筑密集地区大于空旷地区,排序在空旷地区为 11~14 名,而密集地区上升至 7~8 名。



(a) 热负荷敏感性排序

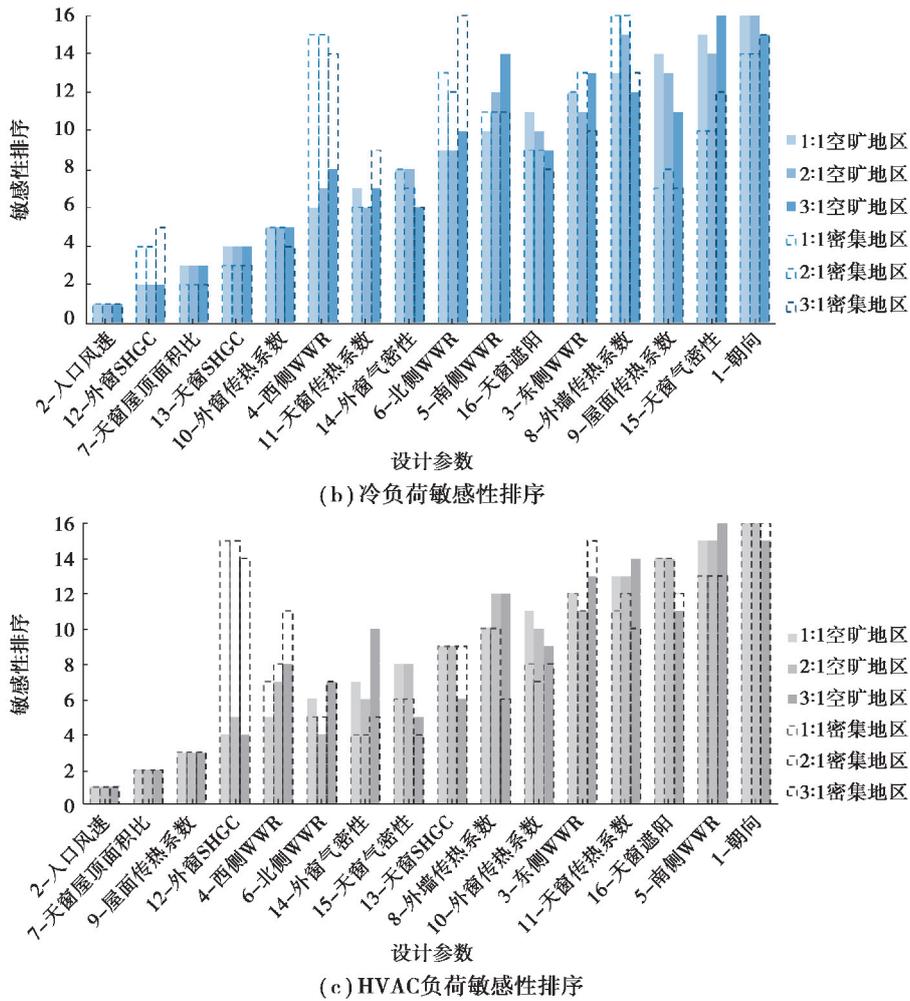


图 8 3 种模型在城市空旷地区/建筑密集地区的建筑负荷敏感性排序

Fig. 8 Building loads sensitivity ranking of three models in high-density/ low-density built areas

从设计参数对全年 HVAC 负荷 PRCC 的排序来看(见图 8(c)), 2 种城市环境均表现为入口风速对全年 HVAC 负荷的影响最大,天窗屋顶面积比和屋面传热系数紧随其后,朝向影响最小。不同的是,外窗 SHGC 对 HVAC 负荷敏感性影响在城市空旷地区明显大于密集地区,排序在空旷地区为 4~5 名,密集地区降至 14~15 名。排序结果表明,外窗 SHGC 受太阳辐射影响显著,当建筑不受遮挡时,直射阳光增强了透明围护结构 SHGC 对建筑负荷的影响力,因此,2 种城市环境下外窗 SHGC 的敏感性排序呈现出明显差异。

3 结 论

文中系统性分析了寒冷地区购物中心设计初期各个设计参数对全年冷热负荷的影响,得到冷、热及 HVAC 负荷在 16 个设计参数影响下的波动情况、敏感性排序及不同城市环境下负荷与敏感性的变化情况,最终结论如下:

1) 不确定性分析表明,设计参数对全年 HVAC 负荷变动的影响为 58.5%~62.3%,其中对热负荷的影响力显著,热负荷的极差可高达 103.9 kWh/m²,变化幅度是冷负荷的 5 倍。另外,虽然城市环境对全年 HVAC 负荷的影响不明显,均值的波动差仅在 1.4~2.4 kWh/m² 之间,但受周边建筑的遮挡,冷负荷在密集地区的比空旷地区更低,均值差可达 4.7 kWh/m²。

2) 敏感性分析表明,大多设计参数与建筑负荷呈正相关,城市环境也会改变设计参数的敏感性大小及变化趋势。从变化大小来看,相比城市空旷地区,密集地区提高了东、西、南侧 WWR、天窗屋顶面积比、外墙传热系数和天窗遮阳的热负荷敏感性,提高了天窗屋顶面积比、屋面传热系数和天窗 SHGC 的冷负荷敏感性以及外窗传热系数和外窗气密性的 HVAC 负荷敏感性;同时,降低了外窗 SHGC 的热负荷、冷负荷及 HVAC

负荷敏感性。从变化趋势来看,东、西、南侧 WWR 在空旷地区与冷负荷呈正相关,而在城市建筑密集地区呈负相关。

3) 敏感性排序表明,冷负荷敏感性排序位于前 5 名的设计参数均为入口风速、外窗 SHGC、天窗屋顶面积比、天窗 SHGC 和外窗传热系数;热负荷和全年 HVAC 负荷敏感性排序位于前 3 名的均为入口风速、天窗屋顶面积比和屋面传热系数。另外,不同城市环境改变了部分设计参数对建筑负荷的影响力,其中,外窗 SHGC 的热负荷、冷负荷及全年 HVAC 负荷在空旷地区均具有更高的敏感性,排名分别为 4~7、2 及 4~5 名,而在城市建筑密集地区排名分别下降至 13~14、4~5 及 14~15 名。

文中量化分析了不同城市环境下寒冷地区购物中心设计参数建筑负荷的不确定性及全局敏感性,说明购物中心设计参数对负荷的影响力会因城市环境而改变。以上结论可为建筑师在方案初期的低能耗设计决策提供量化参考依据,通过前期方案的优化设计,一方面,可减少暖通空调设备的投入成本;另一方面,可最大化降低暖通空调的运行成本。另外,文中仅考虑设计参数对冷热负荷的影响,而建筑师在设计初期还需考虑其他建筑性能,例如:采光、舒适等。因此,未来研究将进一步考虑设计参数对建筑性能的综合影响,充分挖掘建筑本体设计对绿色建筑发展的贡献。

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 2020——农村住宅[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. 2020 annual report on China building energy efficiency[R]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese)
- [2] 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 2014——公共建筑[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. 2014 annual report on China building energy efficiency[R]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014. (in Chinese)
- [3] Samuelson H, Claussnitzer S, Goyal A, et al. Parametric energy simulation in early design: high-rise residential buildings in urban contexts[J]. *Building and Environment*, 2016, 101:19-31.
- [4] Østergård T, Jensen R L, Maagaard S E. Building simulations supporting decision making in early design - A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 61: 187-201.
- [5] Østergård T, Jensen R L, Maagaard S E. Early Building Design: informed decision-making by exploring multidimensional design space using sensitivity analysis[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 142: 8-22.
- [6] Strømman-Andersen J, Sattrup P A. The urban canyon and building energy use: urban density versus daylight and passive solar gains[J]. *Energy and Buildings*, 2011, 43(8): 2011-2020.
- [7] Ahn Y, Sohn D W. The effect of neighbourhood-level urban form on residential building energy use: a GIS-based model using building energy benchmarking data in Seattle[J]. *Energy and Buildings*, 2019, 196: 124-133.
- [8] Tang M F. Solar control for buildings[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(7): 659-664.
- [9] Wang W M, Rivard H, Zmeureanu R. Floor shape optimization for green building design[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2006, 20(4): 363-378.
- [10] Kheiri F. A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 92: 897-920.
- [11] 罗建河, 石刚, 覃思源, 等. 被动节能技术对岭南高层住宅生态性的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(7): 58-67.
Luo J H, Shi G, Qin S Y, et al. Impact of passive energy-saving technology on ecology of Lingnan high-rise residential buildings[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(7): 58-67. (in Chinese)
- [12] Yong S G, Kim J H, Gim Y, et al. Impacts of building envelope design factors upon energy loads and their optimization in US standard climate zones using experimental design[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 141: 1-15.
- [13] Friess W A, Rakhshan K. A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72: 485-496.
- [14] Hou D, Liu G, Zhang Q, et al. Integrated building envelope design process combining parametric modelling and multi-objective optimization[J]. *Transactions of Tianjin University*, 2017, 23(2): 138-146.

- [15] Hachem-Vermette C. Multistory building envelope: creative design and enhanced performance[J]. *Solar Energy*, 2018, 159: 710-721.
- [16] Heiselberg P, Brohus H, Hesselholt A, et al. Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings [J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(9): 2030-2036.
- [17] Tian W. A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 20: 411-419.
- [18] Kristensen M H, Petersen S. Choosing the appropriate sensitivity analysis method for building energy model-based investigations[J]. *Energy and Buildings*, 2016, 130: 166-176.
- [19] 何成, 朱丽, 田玮. 城市建筑布局的能耗敏感性分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(4): 174-180.
He C, Zhu L, Tian W. Sensitivity analysis of urban building layout on energy consumption[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(4): 174-180.(in Chinese)
- [20] Hemsath T L, Alagheband Bandhosseini K. Sensitivity analysis evaluating basic building geometry's effect on energy use [J]. *Renewable Energy*, 2015, 76: 526-538.
- [21] Bre F, Silva A S, Ghisi E, et al. Residential building design optimisation using sensitivity analysis and genetic algorithm [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 133: 853-866.
- [22] Yıldız Y, Arsan Z D. Identification of the building parameters that influence heating and cooling energy loads for apartment buildings in hot-humid climates[J]. *Energy*, 2011, 36(7): 4287-4296.
- [23] Dussault J M, Gosselin L. Office buildings with electrochromic windows: a sensitivity analysis of design parameters on energy performance, and thermal and visual comfort[J]. *Energy and Buildings*, 2017, 153: 50-62.
- [24] Singh R, Lazarus I J, Kishore V V N. Uncertainty and sensitivity analyses of energy and visual performances of office building with external Venetian blind shading in hot-dry climate[J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 155-170.
- [25] 魏莱, 党睿, 刘刚, 等. 购物中心被动设计节能潜力的标准化模拟[J]. *重庆大学学报*, 2022, 45(5): 67-78.
Wei L, Dang R, Liu G, et al. Standardization simulation of energy saving potential of passive design in shopping centers [J]. *Journal of Chongqing University*, 2022, 45(5): 67-78.(in Chinese)
- [26] Bueno B, Norford L, Pigeon G, et al. A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate[J]. *Building and Environment*, 2012, 54: 116-125.
- [27] Gracik S, Heidarinejad M, Liu J Y, et al. Effect of urban neighborhoods on the performance of building cooling systems [J]. *Building and Environment*, 2015, 90: 15-29.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范: GB 50016—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire protection design of buildings: GB 50016—2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.(in Chinese)
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 公共建筑节能设计标准: GB 50189—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design standard for energy efficiency of public buildings: GB 50189—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [30] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑外门窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法: GB/T 7106—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Graduations and test methods of air permeability watertightness wind load resistance performance for building external windows and doors: GB/T 7106—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [31] Pang Z H, O'Neill Z, Li Y F, et al. The role of sensitivity analysis in the building performance analysis: a critical review [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 209: 109659.
- [32] Helton J C, Davis F J, Johnson J D. A comparison of uncertainty and sensitivity analysis results obtained with random and Latin hypercube sampling[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2005, 89(3): 305-330.
- [33] Nguyen A T, Reiter S. A performance comparison of sensitivity analysis methods for building energy models[J]. *Building Simulation*, 2015, 8(6): 651-664.