

寒地微气候影响下的住区空间形态与碳排放效应协同优化研究*

Research on Synergistic Optimization of Spatial Morphology and Carbon Emission Effects of Settlements under the Influence of Cold Microclimate

李 绥 侯凯怡 周诗文 孙嘉祎 LI Sui, HOU Kaiyi, ZHOU Shiwen, SUN Jiayi

摘 要 城市空间形态与微气候的关联性研究已经广泛应用于城市气候领域,然而由此产生对建筑碳排放效应的影响规律尚有待进一步探讨。以严寒地区沈阳市高层住区为研究对象,建立多种微气候要素影响下的建筑碳排放耦合模型,采用Grasshopper构建参数化平台,集成住区形态几何控制模块、微气候分析模块与碳排放模拟模块,在遗传算法支持下,以碳排放效应最优为目标进行住区空间布局寻优求解。研究结果表明:微气候要素对单体建筑各层碳排放的影响程度为:风速>空气温度>太阳辐射;在容积率一定情况下,形态参数对住区碳排放总量的影响程度为:建筑朝向>建筑间距系数>围合度。根据2023年冬至日气象数据进行优化实验,获得的最优方案与原始方案对比,当日住区的CO₂排放量减少6.53 kg。研究结果可为严寒地区规划建设低碳住区提供一种量化控制设计方法。

Abstract The correlation between urban spatial form and microclimate has been widely used in the field of urban climate, but the influence of the resulting effect on building carbon emissions needs to be further explored. In this paper, we take the high-rise residential area of Shenyang City in the severe cold region as the research object, establish a coupling model of building carbon emissions under the influence of various microclimate factors, use Grasshopper to build a parametric platform, integrate the geometric control module of residential morphology, microclimate analysis module and carbon emission simulation module, and with the support of genetic algorithm, the spatial layout of the settlement is optimized with the goal of optimizing the carbon emission effect. The results show that the influence of microclimate factors on the carbon emissions of each layer of a single building is as follows: wind speed>air temperature>solar radiation. In the case of a certain plot ratio, the influence degree of morphological parameters on the total carbon emissions of residential areas is as follows: building orientation>building spacing coefficient>enclosure degree. According to the optimization experiment of the 2023 winter solstice daily meteorological data, the optimal scheme obtained is compared with the original scheme. The CO₂ emissions of the residential area are reduced by 6.53 kg on that day. The results of this study can provide a quantitative control design method for the planning and construction of low-carbon settlements in severe cold areas.

关键词 微气候;碳排放;住区规划;参数化优化

Key words microclimate; carbon emissions; settlement planning; parametric optimization

文章编号 1673-8985 (2024) 04-0031-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20240405

作者简介

李 绥

东北大学江河建筑学院

教授,博士生导师, lisui0517@126.com

侯凯怡

沈阳建筑大学建筑与规划学院

硕士研究生

周诗文

沈阳建筑大学建筑与规划学院

讲师,博士

孙嘉祎

沈阳建筑大学建筑与规划学院

硕士研究生

0 引言

近年来城市化进程加快,我国碳排放量不断增加,能源与环境之间的矛盾更加严峻^[1]。根据相关报告指出,我国约有85%的碳排放来源于城市^[2],2020年建筑运行阶段碳排放量共计21.6亿tCO₂,占全国碳排放总量的1/5,其

*基金项目:国家自然科学基金面上项目“自然通风下高校新发呼吸道传染病传播风险的设计参数影响机制及建筑环境干预对策”(编号52378027)资助。

中城镇居住建筑占9.0%^[3]。住区作为城市的基本单元,其整体碳排放水平与建筑单体结构以及群体空间形态密切相关。随着双碳政策的提出,加之人们对于舒适生活的追求,住区碳排放已成为当今关注的热点。

现有的住区与碳排放研究,主要将使用者的行为作为碳排放影响因素^[4-5]。除此之外,住区的空间形态也会对住宅能耗产生影响,进而影响碳排放,不同的建筑密度、容积率、体形系数等空间形态参数对住宅能源使用以及碳排放产生不同的效果^[6-7]。近年来,国内学者江海燕^[8]、王伟强^[9]、吴巍^[10]等采用线性回归模型探讨了住区空间形态对碳排放的影响。局地微气候^[11-12]主要包括空气温度、湿度、风速风向、太阳辐射等要素,微气候各要素会通过辐射、对流和传导的形式作用于建筑,从而对建筑室内的环境性能及建筑能耗产生影响^[13]。陈卓伦^[14]基于微气候分析软件ENVI-met和建筑能耗模拟软件EQUEST耦合,以广州地区典型住宅小区为例,阐明了室外微气候通过建筑围护结构传热过程和建筑热平衡过程两种途径对建筑能耗产生影响。齐春玲^[15]基于微气候分析软件PHEONICS与建筑能耗模拟软件EnergyPlus耦合,根据微气候对建筑能耗的影响规律,建立了微气候作用下精确的典型气象月建筑耗模计算方法。HAN S G^[16]将城市微气候软件ENVI-met与建筑能耗模拟软件TRNSYS耦合,对住区景观进行改造使建筑室内温度下降,空调能耗减少了2%。可见,利用微气候分析软件与建筑能耗模拟软件耦合的方法能够精准计算能源的消耗。

关于碳排放影响因素的研究大多关注使用者行为及低碳节能技术,对于住区的局地微气候关注较少,而通过调整建筑空间形态优化住区局地微气候降低碳排放量的研究更加少见。现阶段从规划角度研究住区微气候与碳排放关联性,不仅有利于对城市构建低碳社区提供数据支撑和参考,也有利于我国的低碳城市建设。因此本文以沈阳市荣盛紫提东郡住区为例,依托微气候模拟软件Envi-met与建筑能耗模拟软件EnergyPlus耦合,从

住区空间形态角度作为切入点,建立微气候影响下的建筑碳排放耦合模型,探索微气候影响下建筑空间形态与碳排放之间的关系,最后协同微气候与空间形态之间的变化规律,在住区规划设计阶段进行空间布局的优化。本文的研究方法可为严寒地区居住区低碳节能设计及宏观层面的城市绿色发展方面提供一定的参考价值。

1 研究对象与方法

1.1 研究区概况

本文选取沈阳市荣盛紫提东郡为实验对象(见图1),建筑群位于辽宁省沈阳市浑南区。建筑群南侧、西侧和北侧毗邻社区,东侧无建筑遮挡。场地长320 m,宽270 m,占地面积为86 400 m²。研究区内共11栋高层建筑,其中4栋18层、4栋30层、3栋24层,层高为3 m,场地上建筑朝向各不相同,建筑群呈混合式布局。



图1 研究对象
Fig.1 Subjects of the study

资料来源:笔者根据<https://m.anjuke.com/shen/community/944092/>绘制。

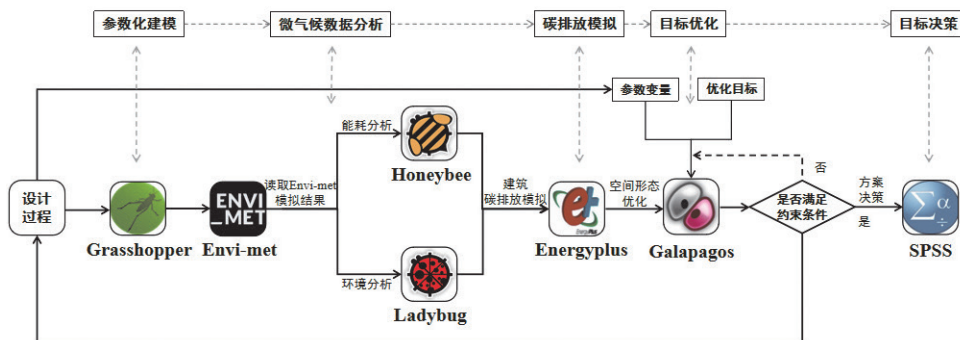


图2 技术研究框架
Fig.2 Technical research framework

资料来源:笔者自绘。

1.2 研究方法

本文建立的微气候影响下住区空间形态与碳排放相关性研究框架如图2所示。

首先,获取住区建筑群体的具体信息,利用微气候分析模块中Envi-met对场地的室外空气温度、风速、太阳辐射等微气候进行模拟分析,并提取精确的结果;其次,利用碳排放模拟模块中EnergyPlus的运算功能,将Envi-met模拟结果作为气候边界条件,构建微气候影响下的建筑碳排放耦合模型;再次,通过调整住区形态几何控制模块中建筑朝向、建筑间距系数、围合度等空间形态参数,改变住区室外微气候环境,优化住区空间形态,探讨室外温度、风速、太阳辐射等微气候要素对建筑单体碳排放的影响;最后,探讨微气候影响下空间形态对住区碳排放的影响规律,结合建筑低碳节能设计,提出住区设计阶段调整建筑空间形态营造良好室外微气候的节能方法,从而实现住区低碳节能设计。

1.3 微气候影响下的建筑碳排放耦合模型构建

根据生命周期理论,住区住宅在建材生产、材料运送、建造施工、运营维护和拆除回收5个阶段,一直都在产生能源的消耗,也在不断地向外界排放CO₂。熊宝玉^[17]以普通住宅为例,计算各个阶段碳排放量,发现建筑运行阶段碳排放量最大,占总排放量的81.54%。城镇住区住宅使用年限一般为70年,其运营阶段会有大量的碳排放,打造低碳城市需对住宅的运营阶段给予足够重视。碳排放的计算方法主要包括排放因子法、质量平衡法和实测法3种,其中碳排放因子法应用广泛^[18],根据《建筑碳排放计算标准 GB/T51366-2019》中的公式进行计算,见公式(1)。

$$C_M = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i \cdot EF_i \cdot C_p)}{A} \cdot y \quad (1)$$

式中:C_M是建筑运行阶段单位面积产生的碳排放量(kgCO₂/m²);E_i是建筑第i类能源的年消耗量(单位/a);EF_i是建筑第i类能源的碳排放因子;i是建筑消耗的能源类型,主

要为电力、煤炭、石油、市政热力等;C_p是建筑绿地碳汇系统年减碳量(kgCO₂/a);y是建筑设计寿命(a);A是建筑面积(m²)。

微气候主要通过影响建筑围护结构热平衡和室内外的空气交换两种途径影响建筑能耗^[19],进而造成能源消耗,产生碳排放,建筑能耗具体计算方法见公式(2)^[20]。

$$E = \frac{q_{int} + q_{conv,int} + q_{vent} + q_{inf} + \Delta E_{air}}{COP} \quad (2)$$

式中:E是建筑运行期间产生的总能耗(kWh);q_{int}是建筑内人员、设备等产生的热量(W);q_{conv,int}是建筑围护结构与空气之间的对流换热热量(W),主要受到室内外空气温度、太阳辐射和围护结构换热系数的影响;q_{vent}是机械通风形成的热量(W)、q_{inf}为空气渗透形成的热量(W),二者均受到室外风速、温度的影响;ΔE_{air}是室内空气能量变化,当室内温度恒定时ΔE_{air}=0(W);COP是空调机组性能系数。将局地微气候数据带入建筑能耗计算公式,结果如下:

$$E_m = \frac{h_{c0}(T_{x,0} - T_0) + \sum_{j=1}^n h_{r,j}(T_{x,0} - T_n) + L(T)m_{v,x,0} + 0.224WF_{sch}(I+V) + q_{sw}}{COP} \quad (3)$$

式中:E_m为微气候作用下运行期间的建筑能耗(kWh);h_{m0}、h_{c0}为围护结构内、外表面对流换热系数(W/m²·°C);h_{r,j}为室内各表面之间辐射换热系数(W/m²·°C);T_{x,0}为围护结构外表面温度(°C)与建筑表面接收太阳辐射量ψ有关;T_n、T₀为室内外空气温度(°C);m_{v,x,0}为围护结构内表面水蒸气迁移量(kg);L(T)为蒸发潜热(J/kg);W为室外风

速(m/s);V为设计室内新风量(Vm³/h);I为设计室内空气渗透量(Vm³/h);F_{sch}为空气渗透时间变化率(%);q_{int}为房间内人员、设备产生的热量(W)。

根据住区的微气候作用下的建筑能耗与碳排放的公式耦合,构建微气候影响下的建筑碳排放耦合模型。将住区碳排放量与室外风环境、室外空气温度及太阳辐射等微气候要素进行联动,见公式(4)。

$$C = \sum_{m=1}^n (E_m \cdot EF - C_p) \times y \quad (4)$$

式中:C是建筑运行阶段产生的碳排放量(kgCO₂);E_m为微气候作用下运行期间的建筑能耗(kWh),气象边界条件采用局地微气候数据;EF是建筑电力能源的碳排放因子;C_p是建筑绿地碳汇系统年减碳量(kgCO₂/a);y是建筑设计寿命(a)。

2 住区空间形态优化实验

2.1 基准信息模型建立

严寒地区受地理条件影响冬季占全年时间的1/3,维持冬季室内的良好环境成为住区碳排放的主要来源。为节约算力成本,本文选取冬至日代表冬季进行下文的模拟实验。利用ENVI-met建立微气候模拟模型,模拟区域为240 m×300 m,水平网格数量为80×100,分辨率为3 m。表1为ENVI-met模拟的主要参数,气象文件数据来源于中国气象局的CSWD的典型年实测气象数据,场地内的道路材质根据实际情况进行建模。模拟时间为2023年12月22日00:00—23:00。

表1 ENVI-met主要模拟参数

Tab.1 Main simulation parameters of ENVI-met

结构类型	详细参数
气象数据	2023年12月22日中国气象局的沈阳市的太阳光辐射、空气温度、相对湿度和风向风速
建筑单体	墙体结构:K=0.24(W/m ² ·K),α=0.45 屋顶结构:K=0.34(W/m ² ·K),α=0.35 沥青路面:λ=1.30(W/m·K),α=0.40,ρ=2 100(kg/m ³)
道路	构造层次:20 cm沥青,20 cm沙砾,土壤 混凝土路面:λ=1.50(W/m·K),α=0.30,ρ=2 300(kg/m ³) 构造层次:8 cm水泥砖,15 cm沙砾,土壤 0—15 cm:300 K/30%;
土地	15—45 cm:302 K/35%; 45 cm以下:301 K/40%

资料来源:笔者自制。

表2 建筑围护结构热工性能参数技术指标



Tab.2 Technical indicators of thermal performance parameters of building envelope structure

部位	K值/(W/m ² ·K)	R值/(m ² ·K/W)
屋顶	0.34	2.94
外墙	0.24	4.17
楼板	0.16	6.25
外窗	1.60	0.63

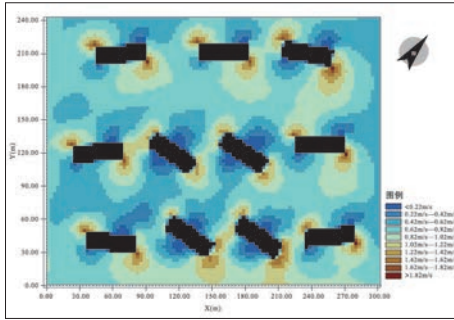
资料来源:笔者自制。

表3 测试仪器详细参数

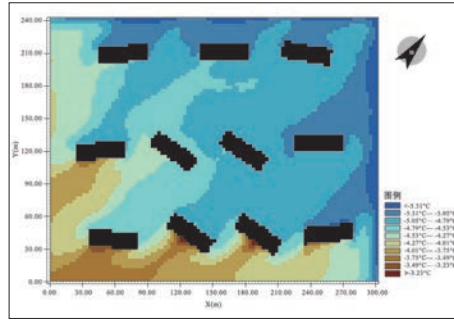
Tab.3 Detailed parameters of the test instrument

测量参数	仪器型号	仪器参数	采集频率	仪器图片
空气温度	空气检测仪 型号:CGS1	仪表分辨率:0.1 °C 仪表量程:-30—50 °C 仪器精度:±0.5 °C	5 min	
风速	便携式数字风速仪 型号:TA8161	仪表分辨率:0.1 m/s 仪表量程:0—20 m/s 仪器精度:±0.015 m/s	5 min	

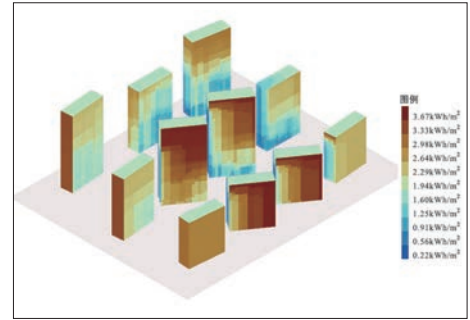
资料来源:笔者自制。



a 室外风速图



b 室外温度图



c 建筑太阳辐射得热图

图3 建筑室外微气候可视化

Fig.3 Visualization of the microclimate of the building outdoors

资料来源:笔者自绘。

利用Grasshopper参数化平台对住区进行建模,将ENVI-met模拟的微气候结果作为住区碳排放的计算边界。首先,根据GB55015-2021《建筑节能与可再生能源利用通用规范》中的相关要求,对建筑外墙、外窗、屋面、楼板等热工参数进行赋值(见表2)。其次,根据JGJ26-2018《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》对运营技术指标进行赋值,设置人员活动率为0.15人/m²、照明功率密度为6 W/m²、设备功率密度为10 W/m²。至此,基准信息模型可以反映建筑的形体、构造、能耗等重要信息,可以进行下一步能耗和碳排放的模拟计算。

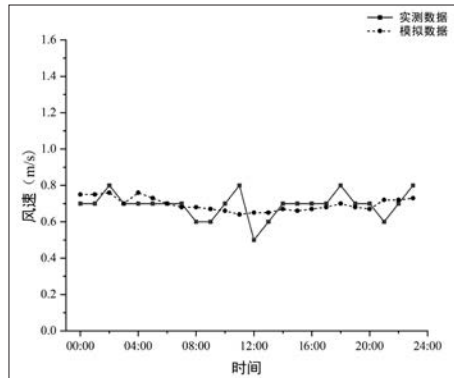
2.2 模型验证

2.2.1 研究对象实测

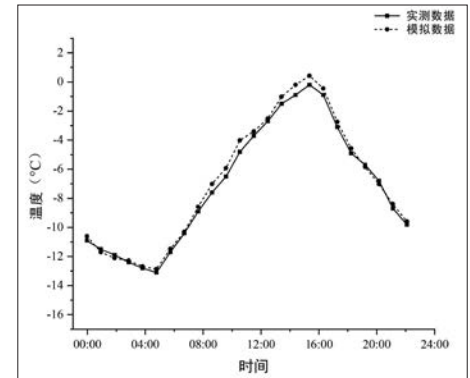
选取4号楼周围环境作为局地微气候分析对象,室外实测数据包括风速、空气温度。具体的实验使用的设备仪器详细参数如表3所示。实验时间为2023年12月22日,测试时间段为0:00—23:00。在4号楼周围3 m范围内进行测量,保持仪器距离地面1.5 m,每隔1 h记录一次数据。

2.2.2 模拟结果对比验证

由Envi-met模拟的中午12:00时的住区局地微气候结果如图3所示:场地室外1.5 m处的风速、空气温度以及建筑表面单位面积的太阳辐射值的范围分别为0.22—1.83 m/s、-3.23—5.31 °C、0.22—3.67 kWh/m²。从模拟结果上看,住区室外尤其是沿建筑进深方向风速较



a 风速模拟结果验证



b 温度模拟结果验证

图4 模拟结果验证
Fig.4 Verification of simulation results

资料来源:笔者自绘。

大;住区南侧建筑的室外空气温度较高,而内部和北侧建筑附近的温度较低;住区南侧建筑获得的太阳辐射较多,而北侧建筑相对较少。

将住区全天逐时室外微气候数据进行统计整理,平均风速为1.34 m/s,平均空气温度为-8.73 °C,全天平均建筑表面单位面积的太阳辐射值为1.29 kWh/m²。经微气候影响下的建筑碳排放耦合模型计算,住区全天碳排放量为2 549.45 kgCO₂。

为验证模拟数据的准确性,将4号楼室外局地微气候的实测数据与模拟数据进行对比分析(见图4)。将实测数据进行筛选整理,选取空气温度、风速为对比验证的数据。局地微气候数据与实测数据对比结果如图4所示。利用SPSS中的平均绝对误差MAE进行模型误差检验,结果表明,经计算MAE值为0.93 m/s、2.24 °C,模拟数据与实测数据的误差在5%以内,为可接受的范围。

2.3 住区形态参数化优化

根据《沈阳市城乡规划条例》规定,场地东、南、西侧建筑控制线应后退10 m,北侧建筑控制线应后退20 m。为减小计算成本,将建筑单体简化为42 m×15 m的矩形。场地内建筑的生成与位置移动依靠底面基准点的生成与调整。首先以基准点生成11栋建筑,再赋予建筑不同层数和层数,从而建立起参数化建筑单体模型。由于研究区的建筑密度和容积率确定,本文选择建筑朝向、建筑间距系数和住区围合度作为空间形态参数。以正南为0°,南偏东为正,南偏西为负,朝向变化角度为-15°—15°,步长为5°。建筑间距系数指遮挡阳光建筑与被遮挡阳光建筑之间的距离与遮挡阳光建筑高度的倍数,见公式(5)。

$$p = L / (H - h) \quad (5)$$

式中:p为建筑间距系数;L为前后两栋建

筑的间距; H 为前一个建筑的高度; h 为前一个建筑底层窗口到地面的距离,而建筑间距是通过改变前后相邻建筑基准点的位置实现的。住区围合度是指居住区场地内所有朝向外侧的建筑表面边长总和与整个场地总边长的比值,见公式(6)。

$$ED = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n}{X} \quad (6)$$

式中: ED 为住区围合度; $a_1、a_2、\dots、a_n$ 为所有朝向外侧的建筑表面的边长; X 为地块边线总长,住区围合度是通过各建筑基准点移动实现的。

规划布局须同时满足用地红线与建筑控制线的相关规范,为保证建筑单体不超出建筑控制线,需要根据设定的建筑朝向变化范围确定底面基准点的范围。根据计算,西侧控制线内移15 m,南侧与东侧控制线内移42 m,即可获得控制建筑单体生成的基准点控制线(见图5a)。然后在基准点控制线进行正交网格划

分,单元网格大小设置为7.5 m×7.5 m,共获得891个点(见图5b),由西向东沿X轴依次编号。

为防止生成的住区出现重合现象,综合《建筑设计防火规范》和《辽宁省各市居住建筑间距和住宅日照管理规定》中的相关规定,对建筑间距进行条件约束。具体内容为高层住宅建筑平行布置时最小间距不应小于60 m,山墙面最小间距不小于15 m。将该约束条件转换为参数化语言,以基准点为中心向周围拓展出一个前后各67.5 m,左右各52.5 m的禁止选择区域,即下一个建筑不可在该区域内生成(见图5c)。只有同时满足生成数量与约束条件的布局方案,并被视为有效方案,才能进行下一步模拟实验。

调用Galapagos工具中的内置遗传算法,以建筑朝向、建筑间距系数和住区围合度作为变量,住区碳排放作为优化目标,对住区的空间形态进行优化,寻求住区碳排放总量

的最小值。算法将在迭代运算20代后停止并结束运算,通过TT Toolbox插件,把每代空间形态的参数变量、碳排放模拟值等相关数据依次同步记录到Excel表中。

3 模拟结果及分析

3.1 微气候要素对单体建筑逐层碳排放影响分析

由于建筑之间的遮挡会对建筑周边的微气候环境产生影响,所以本文选取1、4、8号楼分别代表30层、24层、18层高层建筑,统计每栋楼逐层全天建筑室外微气候环境与碳排放数据。不同高度的高层住宅与室外微气候的变化趋势如图6所示。室外微气候随着建筑高度的增加,温度逐渐减小,风速增大,单位面积太阳辐射也同时增大;而各层碳排放量随着建筑高度的增加先减小后增大,3种楼层室外微气候环境与建筑碳排放的趋势一致。

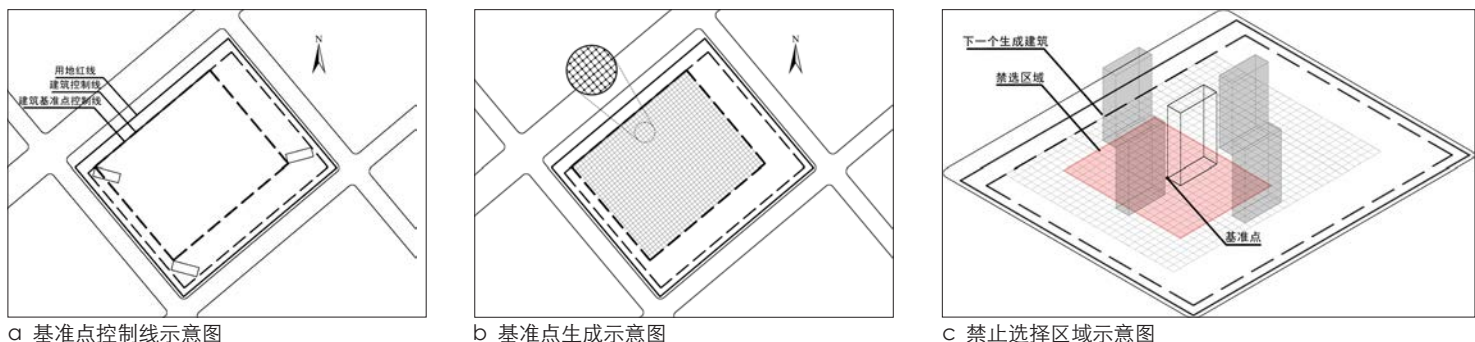


图5 住区生成步骤
Fig.5 Settlement generation steps

资料来源:笔者自绘。

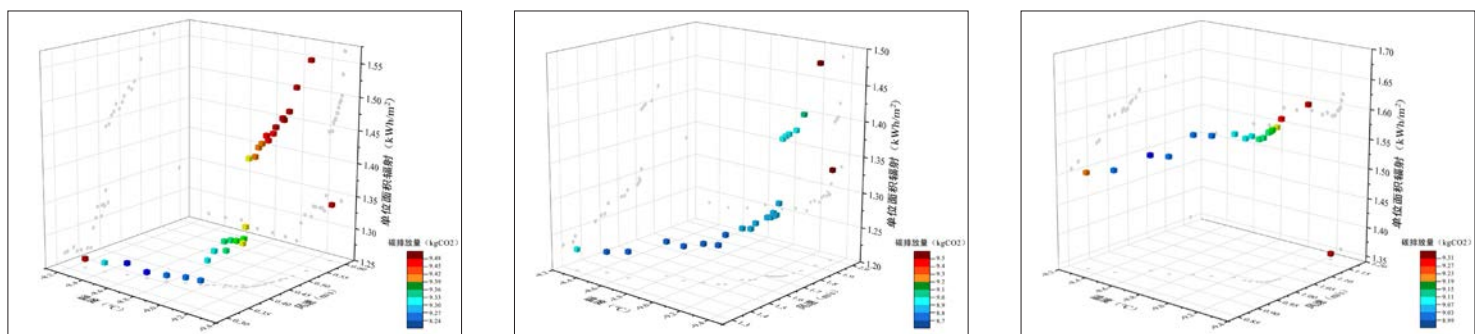


图6 微气候与建筑碳排放变化趋势
Fig.6 Microclimate and building carbon emissions change trends

资料来源:笔者自绘。

利用统计学软件SPSS对建筑单体碳排放强度与风速、空气温度、建筑单位面积辐射分别进行Person相关性分析,由于首层和顶层的围护结构层次与标准层存在较大的差异,本文选取标准层进行分析(见表4)。结果显示,3种建筑高度的高层建筑的建筑单位面积太阳辐射、空气温度、风速等微气候要素均与建筑单体碳排放存在较强的相关性,且三者与建筑单体碳排放的显著性均小于0.05,相关性分析具有统计学意义。从相关系数的正负上来看,风速、建筑单位面积太阳辐射量与建筑单体碳排放成正相关,而空气温度与建筑单体碳排放成负相关关系。从系数的数值上来看,建筑单位面积太阳辐射量、风速与建筑单体碳排放量呈现较强的相关性,而空气温度与建筑单体碳排放量的相关性较弱。

相较于单一要素分析,多因素分析可以更好地反映因变量与自变量之间的影响关系和规律特征。本文采用多元线性回归模型揭示住区各层碳排放量与建筑单位面积太阳辐射、空气温度、风速等微气候要素之间的线性关系(见表5)。住区中间层碳排放量与微气候要素之间的多元线性回归方程如公式(7)所示。

$$C_f = 12.5029 - 0.441S + 0.545T + 5.904W \quad (7)$$

式中: C_f 为住区各层碳排放量(kgCO₂); S 为住区任意中间层全天平均建筑单位面积太阳辐射(kWh/m²); T 为住区任意中间层全天平均空气温度(°C); W 为住区任意中间层全天平均风速(m/s)。

排除各单位大小差异,建筑单位面积太阳辐射、空气温度、风速的标准化系数Beta分别为-0.258、0.742、1.726,故微气候要素对碳排放的影响程度为:风速>空气温度>太阳辐射,风速的权重分别为单位面积太阳辐射与空气温度的6.69倍和2.33倍。根据垂直方向逐层微气候和碳排放的变化规律,计算建筑整体的碳排放总量,见公式(8)。经验证误差在5%范围内,可用于设计初期通过微气

候环境计算建筑碳排放。

$$C_{all} = \frac{(n-2) C_{n/2} + C_1 + C_n}{2} \quad (8)$$

式中: C_{all} 为建筑碳排放量(kgCO₂); n 为建筑层数; C_1 为首层碳排放量; $C_{n/2}$ 为中间层碳排放量(kgCO₂); C_n 为顶层碳排放量(kgCO₂)。

表4 微气候与单体建筑碳排放之间的Person相关性

Tab.4 Person correlation between microclimate and carbon emissions of individual buildings

相关性	风速	空气温度	建筑单位面积太阳辐射量
30层高层建筑Person相关性	0.840**	-0.558**	0.781**
30层高层建筑显著性(双尾)	0.000	0.002	0.000
24层高层建筑Person相关性	0.835**	-0.513*	0.735**
24层高层建筑显著性(双尾)	0.000	0.015	0.000
18层高层建筑Person相关性	0.790**	-0.508*	0.651**
18层高层建筑显著性(双尾)	0.000	0.015	0.006

注:**在0.01级别(双尾),相关性显著;*在0.05级别(双尾),相关性显著。

资料来源:笔者自制。

表5 室外微气候与住区各层碳排放多元线性回归系数

Tab.5 Multiple linear regression coefficients of outdoor microclimate and carbon emissions at each layer of settlements

最终解释模型		未标准化系数		标准化系数	t	显著性	共线性诊断
自变量	因变量	B	标准错误	Beta			VIF
	(常量)	12.509	1.008	—	12.408	0.000	—
住区各层碳排放	单位面积太阳辐射	-0.441	0.392	-0.258	-1.125	0.272	7.821
	空气温度	0.545	0.124	0.742	4.386	0.000	4.275
	风速	5.904	1.018	1.726	5.798	0.000	13.218

资料来源:笔者自制。

表6 不同空间形态方案对比

Tab.6 Comparison of different spatial morphological schemes

对比内容	方案一	方案二	方案三	方案四
空间形态布局				
风速/(m/s)	 1.21	 1.17	 1.19	 1.21
空气温度/°C	 -8.43	 -8.45	 -8.43	 -8.41
建筑单位面积太阳辐射量/(kWh/m ²)	 1.55	 1.50	 1.56	 1.52
碳排放/kgCO ₂	2 542.92	2 543.24	2 543.05	2 543.71

资料来源:笔者自制。

排放最小的情况,住区全天的平均风速、室外温度、建筑单位面积辐射量相较于其他方案,均处于中等范围;方案二为场地风速最小的情况,由于建筑群体为阻挡冬季盛行风导致建筑朝向较差,使建筑的太阳辐射量减小;方案三为建筑单位面积辐射量最大的情况,可见室外空气温度相对较好,但是建筑群体分布较为分散,导致场地风速较大;方案四为场地空气温度最大的情况,场地北侧布局较为密集导致场地北侧风速较大、太阳辐射量相对较少。

从4种住区空间形态布局可见,以单一微气候作为节能低碳优化目标进行空间形态布局是无法得到最为节能的方案,可见微气候之间相互作用和影响,并共同作用于建筑群

体,对建筑碳排放产生影响。所以在住区规划布局时要同时考虑风速、空气温度、太阳辐射等要素,才能实现住区的低碳节能设计。获得的最优方案与原始方案对比,平均风速减小0.13 m/s,空气温度增加0.3 °C,建筑单位面积太阳辐射增加0.26 kWh/m²,当日住区的CO₂排放量减少6.53 kg。

3.3 微气候影响下住区空间形态对碳排放影响分析

住区的空间形态布局会影响住区的局地微气候,进而使风速、空气温度、太阳辐射等微气候要素对建筑碳排放造成影响。由于场地的容积率和建筑密度已经确定,所以本文将选取

建筑朝向、建筑间距系数、住区围合度对住区碳排放量进行探讨。

在容积率、建筑密度一定的情况下,调整建筑朝向、建筑间距系数、住区围合度,住区碳排放量情况如图7所示。建筑朝向在-20°—20°的区间内,住区碳排放总量随着建筑朝向的改变先减小后增大;建筑间距系数在1.375—1.575的范围内,随着建筑间距的不断增大,住区碳排放总量不断减少;住区围合度在0.40—0.65的范围内,住区总碳排放随着住区围合度的增大整体呈现增大的趋势。

利用SPSS对住区碳排放强度与建筑朝向、建筑间距系数、住区围合度进行Person相关性分析(见表7),为满足变量存在线性相关要求,将建筑朝向设置为朝向(南偏西)和朝向(南偏东)进行相关性分析。结果显示,建筑朝向、建筑间距系数、住区围合度等空间形态参数均与建筑碳排放存在较强的相关性,住区围合度、建筑朝向、建筑间距系数与建筑单体碳排放显著性均小于0.01,说明在0.01水平上显著,相关性分析具有统计学意义。从相关系数正负上来看,朝向(南偏东)、建筑间距系数与住区碳排放成正相关,而朝向(南偏西)、住区围合度与住区碳排放成负相关关系。

通过多元线性回归模型分析住区碳排放总量与建筑朝向、建筑间距系数、住区围合度等空间形态参数之间的线性关系。表8展示了住区空间形态参数与住区碳排放多元线性回

表7 空间形态与住区碳排放之间的Person相关性
Tab.7 Person correlation between spatial morphology and residential carbon emissions

相关性	朝向(南偏西)	朝向(南偏东)	建筑间距系数	住区围合度
Person相关性	-0.934**	0.878**	0.786**	-0.548**
显著性(双尾)	0.000	0.000	0.000	0.005

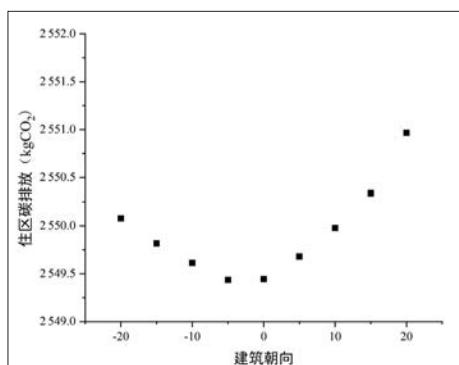
注:**在0.01级别(双尾),相关性显著。

资料来源:笔者自制。

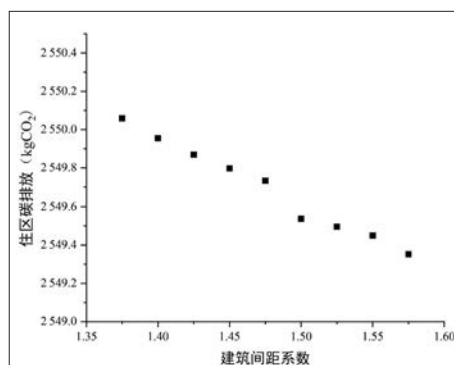
表8 空间形态参数与住区碳排放多元线性回归系数
Tab.8 Multiple linear regression coefficients of spatial morphological parameters and residential carbon emissions

自变量	最终解释模型 因变量	未标准化系数		标准化系数 Beta	t	显著性	共线性诊断 VIF
		B	标准错误				
住区 碳排放	(常量)	2548.464	1.153	—	2209.401	0.000	—
	朝向(θ<0)	-0.237	0.009	-1.454	-25.740	0.000	6.522
	建筑间距系数	-5.670	0.915	-0.368	-6.197	0.000	6.460
	住区围合度	11.309	0.839	0.361	13.480	0.000	1.467
	(常量)	2553.343	0.397	—	6436.638	0.000	—
	朝向(θ≥0)	0.115	0.004	1.615	28.386	0.000	4.156
	建筑间距系数	-5.135	0.311	-0.923	-16.520	0.000	4.011
	住区围合度	-1.146	0.461	-0.092	-2.486	0.021	1.740

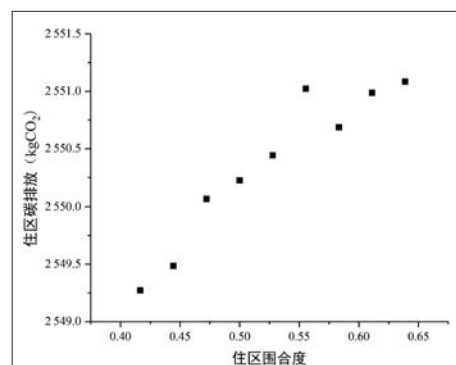
资料来源:笔者自制。



a 建筑朝向与住区碳排放强度关系



b 建筑间距与住区碳排放强度关系



c 住区围合度与住区碳排放强度关系

图7 住区空间形态与住区碳排放强度的关系

Fig.7 Relationship between spatial morphology of settlements and carbon emission intensity of settlements

资料来源:笔者自绘。

归系数与拟合优度,住区碳排放量与建筑空间形态参数之间的多元线性回归方程如公式(9)所示。

$$C = 2548.464 - 0.237\theta - 5.67p + 11.309ED(\theta < 0)$$

$$C = 2553.343 + 0.115\theta - 5.135p - 1.146ED(\theta \geq 0)$$

(9)

式中:C是建筑运行阶段产生的碳排放量(kgCO₂); θ 为建筑朝向;p为建筑间距系数;ED为住区围合度。

排除各单位大小差异对住区碳排放的影响,当建筑朝向 $\theta < 0$ 时,建筑朝向、建筑间距系数、住区围合度的标准化系数Beta分别为-1.454、-0.368、0.361,故微气候要素对碳排放的影响程度为:建筑朝向>建筑间距系数>住区围合度,建筑朝向的权重分别为建筑间距系数和住区围合度的3.95倍和4.03倍;当建筑朝向 $\theta \geq 0$ 时,建筑朝向、建筑间距系数、住区围合度的标准化系数Beta分别为-1.615、-0.923、-0.092,故建筑朝向对住区碳排放总量的影响程度较大,权重分别为建筑间距系数和住区围合度的1.75倍和17.55倍。

4 讨论与结论

4.1 讨论

通过室外微气候对建筑碳排放影响以及微气候影响下的空间形态对碳排放的影响研究,得出严寒地区微气候要素对单体建筑碳排放的影响程度为:风速>空气温度>太阳辐射,所以寒地住区微气候营造时应优先考虑风速的影响,对于严寒地区冬季时间较长的特点,应做到建筑布局阻挡冬季场地空气流动,减少风对建筑造成的影响。其次是太阳辐射与空气温度的营造,建筑单体朝向应在正南至南偏西5°范围内,确保建筑单体及场地能够得到充足的太阳辐射,从而提升建筑单体太阳辐射接收量及场地的空气温度。在容积率一定的情况下,形态参数对住区碳排放总量的影响程度为:建筑朝向>建筑间距系数>住区围合度,在严寒地区住区规划设计阶段,应优先考虑建筑朝向,再适当地增大建筑间距系数、减小住区围合度,通过调控建筑空间布局营造良好的

室外微气候环境,合理的住区空间形态协同良好的室外微气候共同作用于建筑群体,从而实现住区的低碳节能效果。

不同气候分区下住区室外局地微气候环境存在差异,同样也可以运用本文构建的微气候影响下的住区碳排放耦合模型探讨室外微气候对建筑碳排放的影响程度。若场地环境或是规范要求不同时,也可将本文构建的空间形态寻优的工作流应用到住区规划阶段,在住区容积率、单体配比明确的情况下使用上述优化流程,从而更好地实现住区的低碳发展。

本文实验案例的优化结果表明,住区的空间形态确实能够影响局地微气候,进而表现在住区碳排放量上,在城市街区层面优化空间形态能够取得明显的节能减排效果。该策略不同于传统的节能手段,而是通过遗传算法快速设计最佳的建筑群空间形态布局,具有高效、快速、精准等优势。未来的节能低碳设计须建立从宏观到微观的设计理念,从建筑群体到单体局部统筹考虑。本文的研究方法为量化研究微气候下住区空间形态对碳排放的影响提供了一定的参考价值。

4.2 结论

本文基于Grasshopper参数化平台,探索了微气候影响下的住区空间形态与碳排放效应协同优化研究,并以沈阳市荣盛紫棠东郡为例进行模拟验证,结果表明:

(1) 构建的微气候影响下的建筑碳排放耦合模型,能够为真实设计场景提供规划层面较为准确的碳排放预测,更加高效、科学地研究微气候与碳排放之间的相关性,对住区设计阶段节能减排优化设计具有一定的参考价值。

(2) 根据3种不同住宅高度的室外微气候与碳排放研究,发现微气候对建筑单体各层碳排放的影响程度。同时通过调整住区空间形态参数,得出其对住区总碳排放量的影响程度。根据微气候、形态参数对住区碳排放的影响程度,通过优化住区空间形态降低

碳排放,最优方案较初始方案平均风速减小0.13 m/s,空气温度增加0.3°C,建筑单位面积太阳辐射增加0.26 kWh/m²,当日住区的CO₂排放量减少6.53 kg,节能效果较为显著。由于本文模拟实验的运营技术指标是根据相关规范进行设定的,并未充分考虑居民个体生活方式和使用习惯等问题,所以模拟结果会和住区真实碳排放数据存在一定偏差。

(3) 调控住区空间形态营造良好的室外微气候、减少碳排放这一研究方法展现出较强的节能减排潜力。由于计算平台算力有限,本文选取3个形态参数进行优化。在未来的设计方案中,设计师可根据自身需求及设备条件,合理加入更多形态参数进行住区布局的自动寻优,从而实现更为可观的节能减排效果。我国城市化进程不断发展,在严寒地区未来一段时间内住宅建筑建设量依然会维持在高位,优化空间形态作为宏观层面的城市节能手段具有广阔的应用前景。

参考文献 References

- [1] WANG S, FANG C, GUAN X, et al. Urbanisation, energy consumption, and carbon dioxide emissions in China: a panel data analysis of China's provinces[J]. *Applied Energy*, 2014, 136: 738-749.
- [2] 蒋秀娟,唐婷.《中国建筑节能年度发展研究报告2011》发布[N]. *科技日报*, 2011-03-28 (003). JIANG Xiujuan, TANG Ting. *China Building Energy Efficiency Annual Development Research Report 2011* published[N]. *Science and Technology Daily*, 2011-03-28(003).
- [3] 侯恩哲.《中国建筑节能年度发展研究报告2022(公共建筑专题)》发行[J]. *建筑节能(中英文)*, 2022, 50 (4): 146. HOU Enzhe. *China Building Energy Efficiency Annual Development Research Report 2022 (Special Topic on Public Buildings)* published[J]. *Building Energy Efficiency*, 2022, 50(4): 146.
- [4] 沈良峰,张巍巍,张婧,等.基于离散选择模型的城市住区居民低碳行为影响因素研究[J]. *工程管理学报*, 2021, 35 (1): 95-100.

- SHEN Liangfeng, ZHANG Weiwei, ZHANG Jing, et al. Study on the influencing factors of low-carbon behavior in urban residential areas based on the discrete selection model[J]. *Engineering Management Journal*, 2021, 35(1): 95-100.
- [5] 秦波, 戚斌. 城市形态对家庭建筑碳排放的影响——以北京为例[J]. *国际城市规划*, 2013, 28 (2) :42-46.
- QIN Bo, QI Bin. The impact of urban form on carbon emissions from household buildings: a case study of Beijing[J]. *Urban Planning International*, 2013, 28(2): 42-46.
- [6] RODE P, KEIM C, ROBAZZA G, et al. Cities and energy: urban morphology and residential heat-energy demand[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2014, 41(1): 138-162.
- [7] WILSON B. Urban form and residential electricity consumption: evidence from Illinois, USA[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 115: 62-71.
- [8] 江海燕, 肖荣波, 吴婕. 城市家庭碳排放的影响模式及对低碳居住社区规划设计的启示——以广州为例[J]. *现代城市研究*, 2013, 28 (2) : 100-106.
- JIANG Haiyan, XIAO Rongbo, WU Jie. The impact model of urban household carbon emissions and its implications for the planning and design of low-carbon residential communities: a case study of Guangzhou[J]. *Modern Urban Studies*, 2013, 28(2): 100-106.
- [9] 王伟强, 李建. 住区密度与家庭能耗碳排放相关性研究——以上海曹杨新村为例[J]. *城市规划*, 2017, 41 (6) :83-91.
- WANG Weiqiang, LI Jian. Correlation between residential area density and household energy consumption and carbon emissions: a case study of Caoyang New Village in Shanghai[J]. *City Planning Review*, 2017, 41(6): 83-91.
- [10] 吴巍, 宋彦, 洪再生, 等. 居住社区形态对住宅能耗影响研究——以宁波市为例[J]. *城市发展研究*, 2018, 25 (1) :15-20.
- WU Wei, SONG Yan, HONG Zaisheng, et al. Research on the influence of residential community form on residential energy consumption: a case study of Ningbo City[J]. *Urban Development Studies*, 2018, 25(1): 15-20.
- [11] 李绥, 李晨熙, 周诗文. 城市局地气候区空间划分与适应性提升途径——以沈阳市为例[J]. *城市发展研究*, 2022, 29 (11) :33-41.
- LI Sui, LI Chenxi, ZHOU Shiwen. Spatial division and adaptability improvement of urban local climate zones: a case study of Shenyang City[J]. *Urban Development Studies*, 2022, 29(11): 33-41.
- [12] ZHOU S, SHI T, LI S, et al. The impact of urban morphology on multiple ecological effects: coupling relationships and collaborative optimization strategies[C]//*Building Simulation*. Beijing: Tsinghua University Press, 2023: 1539-1557.
- [13] 肖姝龄. 拉萨市院落空间形态对微气候的影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- XIAO Shuling. Study on the influence of courtyard spatial morphology on microclimate in Lhasa[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [14] 陈卓伦. 绿化体系对湿热地区建筑组团室外热环境影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
- CHEN Zhuolun. Study on the impact of greening system on the outdoor thermal environment of building groups in hot and humid areas[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [15] 齐春玲. 城市区域微气候环境对单栋建筑能耗影响模拟分析[D]. 济南: 山东建筑大学, 2018.
- QI Chunling. Simulation analysis of the influence of microclimate environment on the energy consumption of a single building in urban areas[D]. Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2018.
- [16] HAN S, MUN S H, HUH J H. Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea[C]//*The 10th International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition: proceedings of building simulation*. 2007: 1131-1138.
- [17] 熊宝玉. 住宅建筑全生命周期碳排放量测算研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2015.
- XIONG Baoyu. Research on the measurement of carbon emissions in the whole life cycle of residential buildings[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2015.
- [18] 孙嘉祎, 李绥, 董轶欣. 碳中和导向下寒地近零能耗建筑形态多目标优化研究[J]. *西部人居环境学刊*, 2024, 39 (1) :87-95.
- SUN Jiayi, LI Sui, DONG Yixin. Research on multi-objective optimization of near-zero energy building forms in cold regions under the guidance of carbon neutrality[J]. *Journal of Western Human Settlements*, 2024, 39(1): 87-95.
- [19] 杨小山. 室外微气候对建筑空调能耗影响的模拟方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- YANG Xiaoshan. Research on the influence of outdoor microclimate on building air conditioning energy consumption simulation method[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [20] The Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory. EnergyPlus engineering reference: the reference to EnergyPlus calculations[EB/OL]. (2022-03-29) [2024-02-20]. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/engineeringreference.pdf>.