

窗墙比对传统民居能耗与天然采光影响的探讨



田侨, 郭晓阳*

苏州科技大学建筑与城市规划学院, 江苏苏州 215009

摘要: 苏州民居作为中国江南地区传统民居, 由于数量繁多、建造年代久远等原因, 室内舒适度差, 建筑能耗高, 目前对于这些传统民居建筑的节能改造和利用仍有不足。窗户作为建筑外立面一部分, 窗墙比不仅影响室内天然采光, 也关系到建筑室内的能耗。本文以苏州市过云楼陈列馆的南向窗为研究对象, 采用参数化模拟工具 ladybug, 探讨两种形制的窗户在不同窗墙比条件下对建筑能耗与天然采光的影响。结果表明: 1) 形制二的窗户能耗略大于形制一, 且二者窗墙比在接近 50% 时, 室内能耗变化趋于不变或减少; 2) 两种形制的窗户在窗墙比达到 25% 时已经达到采光要求。考虑到原民居改造后做陈列馆之用, 并无特别的采光需求, 南向窗墙比采用 25% 为宜。

关键词: 窗墙比; Ladybug; 能耗; 天然采光; 苏州民居

DOI: [10.57237/j.cear.2023.02.004](https://doi.org/10.57237/j.cear.2023.02.004)

Discussion on the Influence of Window-wall Comparison on Energy Consumption and Natural Lighting of Traditional Houses

Tian Qiao, Guo Xiaoyang*

School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China

Abstract: As a traditional residence in the Jiangnan region of China, Suzhou houses are still insufficient for energy-saving transformation and utilization of these traditional residential buildings due to a large number and a long period of construction, poor indoor comfort and high building energy consumption. As a part of the façade of the building, the window-to-wall ratio not only affects the natural lighting of the interior, but also relates to the energy consumption of the building. This paper takes the south-facing window of Suzhou Guoyunlou Exhibition Hall as the research object, and uses the parametric simulation tool ladybug to discuss the effects of the two types of windows on building energy consumption and natural lighting under different window-to-wall ratios. The results show that: 1) the energy consumption of the window of shape 2 is slightly greater than that of shape 1, and the window-to-wall ratio of the two is close to 50%, the change of indoor energy consumption tends to remain unchanged or decrease; 2) The windows of the two shapes have reached the lighting requirements when the window-to-wall ratio reaches 25%. Considering that the original house is used as a showroom after renovation, there is no special lighting demand, and the south-facing window wall is 25% more appropriate.

*通信作者: 郭晓阳, 359834709@qq.com

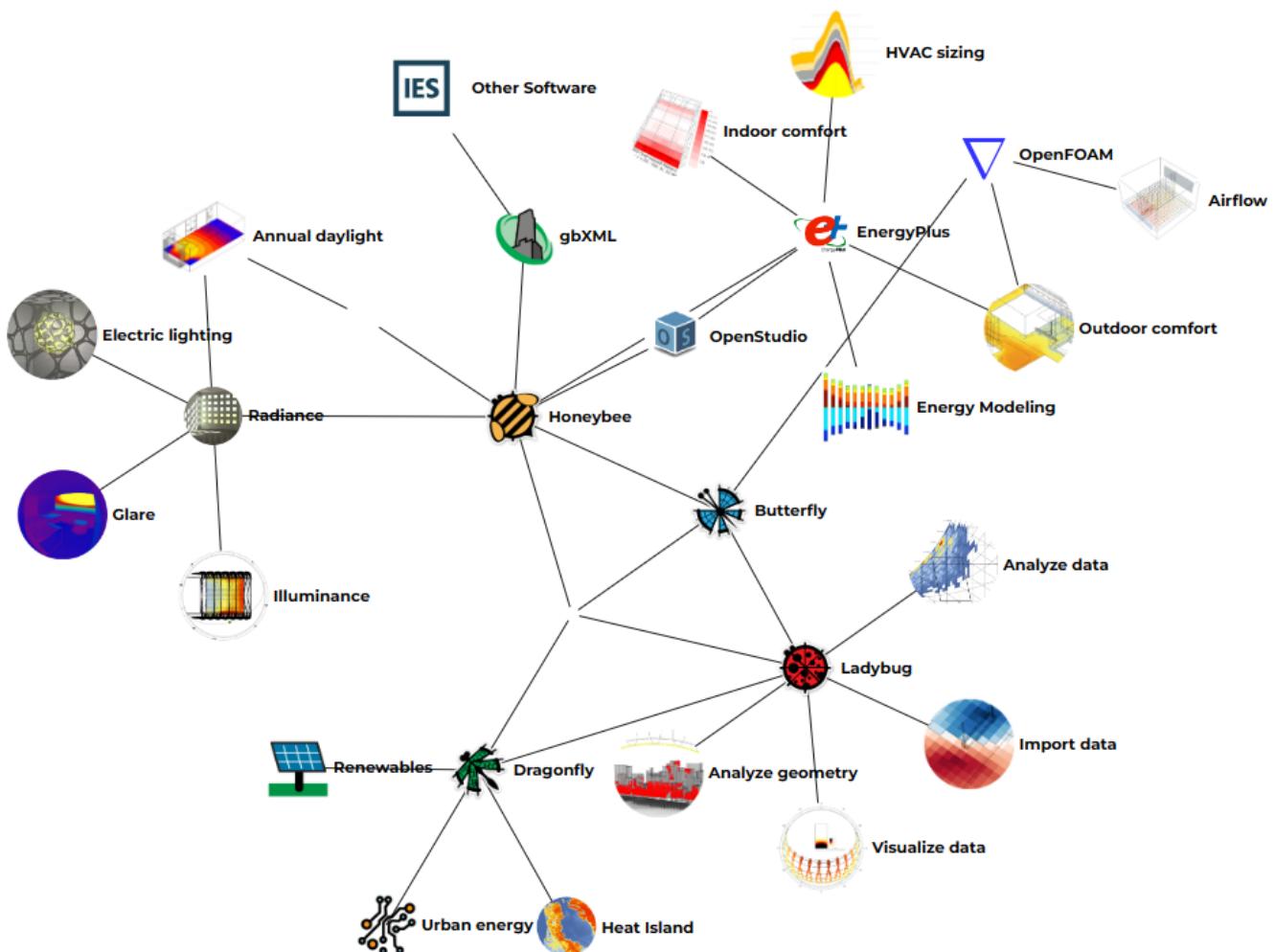
Keywords: Window-to-wall Ratio; Ladybug; Energy Consumption; Natural Lighting; Suzhou Residence

1 引言

作为世界上的第二大能源消耗国，建筑能耗、工业能耗和交通能耗成为了中国三大主体能耗，其中建筑能耗占社会总能耗的 28%以上，并且还在呈现上升的趋势。降低建筑能耗的同时保证室内环境的舒适性对于建筑的可持续发展很有必要[1]。其中，窗户作为建筑外墙的重要组成部分，具有潜在的影响能耗和热舒适性的能力。苏州地区作为一个典型的地区性气候区域，其特定的气候条件和建筑特征使得研究窗墙比对能耗和天然采光的影响具有重要的实践意义。

Ladybug 绿色建筑性能分析工具集是基于 Rhinoceros & Grasshopper 为平台的参数化设计平台插

件（图 1）。它集成了 Radiance、Daysim、Therm、EnergyPlus、Open CFD-Open FOAM 等多个性能模拟计算内核，实现了核心系统之间的数据交互控制，在短时间内能够根据计算机设置的控制逻辑自动完成复杂计算和优化过程并获得最佳结果[2]。因此，近两年在绿色建筑设计性能分析中应用的越来越多，基于 Grasshopper 的可视化、动态可修改的特点，利用 Ladybug 工具组进行建筑物理环境模拟可有利于设计者的整体把控和实时修改。本文聚焦在特定地区如何利用 Ladybug 工具组综合模拟能耗与室内光环境舒适情况以获得最适宜的窗墙比范围。



图片来源: <https://www.ladybug.tools/>

图 1 Ladybug 相关工具组

2 背景介绍

2.1 Ladybug Tools 工具组介绍

Rhino 是一款建模软件，Grasshopper 是一款运行于 Rhino 上的节点可视化编程插件，是一种参数化设计工具。Ladybug Tools 工具组是基于 Grasshopper 的性能分析插件。工具集的主要开发者是美国宾夕法尼亚大学教授 Mostapha Sadeghipour Roudsari 和建筑师 Chris Mackey。

基于 Grasshopper 的 Ladybug 工具组相比与传统的设计与性能模拟有很大优势，首先设计的过程都是可视的，并且通过电池组的形式保留下来，设计的过程通过电池组之间的连接表现，可视化强。其次整个设计过程都是可修改的，在性能模拟的过程中，可以观察电池组是否报错来判断模拟过程的正确与否来进行修改前面的参数与建模。

2.2 研究现状

窗面积与能耗、室内舒适性的关系：作为建筑外墙的重要组成部分，窗面积对能耗和室内舒适性具有显著的影响。首先，窗户是建筑外部热量传递的关键路径之一，其尺寸和位置直接影响建筑的热损失和热收益。较大的窗面积可以提供更多的自然采光和太阳能热量，但也可能导致额外的热损失。其次，窗户的尺寸和位置还会影响室内空间的热辐射、对流和湿度等方面，从而对舒适度产生影响。

过去的研究中，许多学者和研究机构关注了窗面积对能耗和舒适性的影响。室内热环境的研究方法主要包括现场实验与软件模拟的方法，例如加州大学的 Stefano Schiavonyanj 通过对 86 名参与者进行了随机交叉实验室实验，调查测量了在不同窗户面积条件下参与者的热感知与主观情绪[3]。研究者 Kontoleon 针对地中海气候下南向窗墙比对建筑能耗的影响进行了研究，主要采用了理想模型的方法，并得出在采用不同的玻璃类型和保温结构时下，建筑能耗随窗墙比的变化规律[4]。在国内也有许多学者关于这方面的相关研究，例如天津大学的田一辛以天津大学建筑环境实验舱为实验场所，采用现场实测和软件模拟的方法，研究稳态热环境条件下，窗面积对使用者热舒适的影响[5]。北京工业大学的薛鹏以低纬度地区拟建宾馆建筑为对象，利用 Radiance 和 EnergyPlus 软件对室内采光效果

与建筑能耗进行综合模拟，提出既满足采光需求又实现节能的窗墙比范围，为低纬度地区的建筑设计方法提供了参考[6]。

尽管已有一些研究探讨了窗面积对能耗和室内舒适度的影响，但在特定地区和特点建筑类型上的研究仍相对有限。特别是针对苏州地区的研究较少，缺乏针对该地区气候特征和建筑风格的具体分析。同时关于窗户的节能设计主要从窗户热工性能来优化，很少考虑窗墙比能耗的影响，综合考虑对能耗与舒适度的影响则更少，因此，本研究旨在填补这一研究空白，在基于能耗与室内热舒适的多目标优化下，并且为苏州地区的民居改造利用提供参考。

3 研究对象与过程

3.1 研究过程

本研究旨在探讨窗面积对能耗和热舒适性的影响，并以苏州地区过云楼为研究对象。通过模拟实验，我们将研究不同窗墙比以及不同窗户形式对建筑能源使用和室内光环境舒适度的影响，以揭示窗面积在能源效率和居住舒适性方面的潜在优化策略。研究结果将为苏州地区建筑设计和改善现有传统民居建筑的决策提供科学依据。

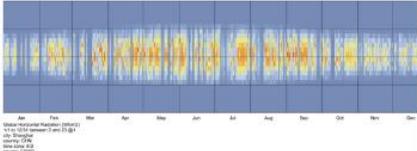
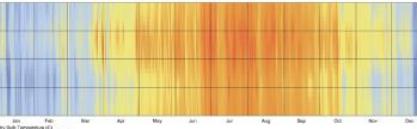
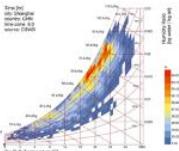
本文首先回顾了建筑能耗和光环境舒适性的重要性，并介绍了窗面积作为影响因素之一的背景知识。接下来，本文将综述相关研究的进展和发现，指出当前研究的缺口和本文的研究价值。然后，我们将详细描述所采用的研究方法，包括研究区域的选择、数据收集、模拟参数的设定等。在得出模拟结果后，我们将对能耗和热舒适性的影响进行分析和讨论，探讨窗面积对建筑性能的机制和潜在优化方向。最后，我们将总结研究结果，并提出研究的局限性和未来研究的建议。

3.2 研究区域

本研究选择苏州地区的民居建筑作为研究对象。苏州地区以其典型的地区性气候和建筑特征而被选为研究区域。苏州市地区地处长江三角洲，太湖流域，是长三角重要经济中心之一，同时是重要的历史文化名城，具有深刻的研究意义。姑苏区位于东经 $120^{\circ}37'$ ，北纬 $31^{\circ}19'$ ，属于北亚热带南缘湿润季风气候区，温暖

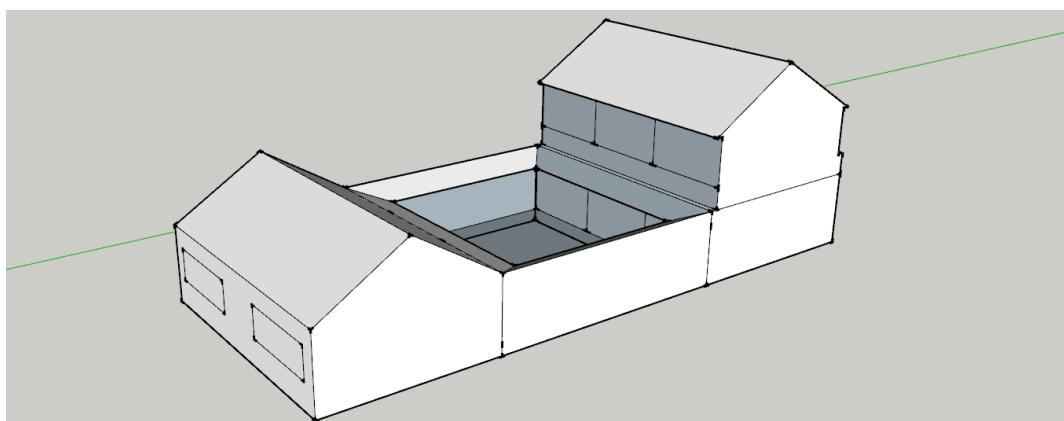
潮湿多雨，四季分明，冬夏季长，春秋两季较短。冬至日正午太阳高度角为 $35^{\circ}34'$ ，夏至日正午太阳高度角为 $82^{\circ}26'$ 。为了进行模拟实验，我们需要收集相关的数据。首先，我们获取了该地区的气象数据，包括气温、

湿度、太阳辐射等参数（图 2），以代表苏州地区的气候特征。其次，我们采集了研究对象的建筑模型数据，包括层数、房间数、立面尺寸和窗户尺寸等（图 3）。

图名	Ladybug工具的可视化呈现	呈现结果
全年水平辐射		全年上午十点左右至下午四点左右水平辐射较高。
全年干球温度		全年最高温度达到37度，6-9月属于高温期。
焓湿图		全年温度在-5度到37度之间，湿值比跨度在5kj/kg-105kj/kg。

图片来源：作者自制

图 2 苏州全年气候分析



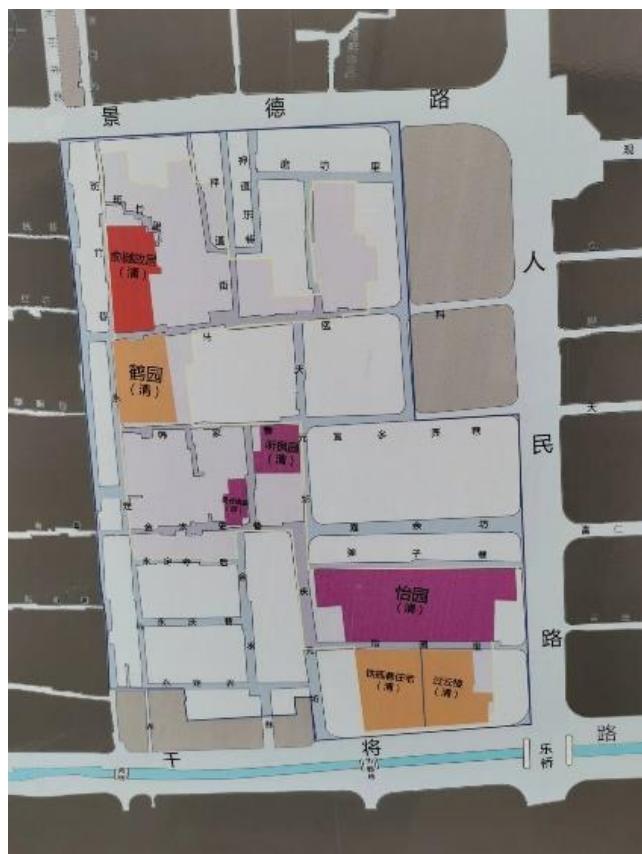
图片来源：作者自制

图 3 过云楼模型

3.3 研究对象

本文研究对象是位于苏州地区的过云楼陈列馆。相传苏州阊门内铁瓶巷，曾有一所大宅院，名曰过云楼。过云楼是清代怡园主人顾文彬收藏文物书画、古

董的地方。在 1993 年干将路建设工程中，过云楼得到了照原样全面的复原和修缮。楼前庭院除叠筑假山花坛外，还种植名贵花木，保持了硬山重檐，门窗古雅、雕刻精细的建筑风貌。



图片来源：作者自制

图 4 过云楼区位图

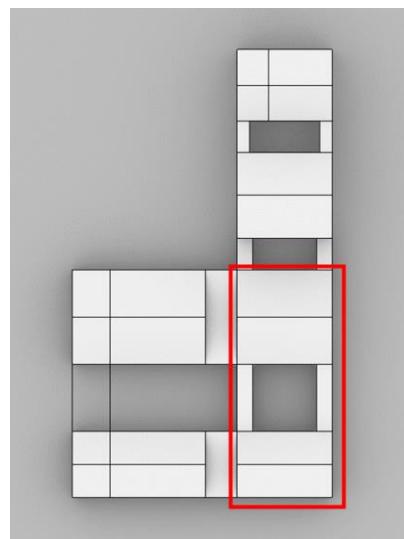
研究对象位于苏州姑苏区干将路与人民路交界处，其北为清代怡园旧址，其南是乐桥，周边西北角有吴云故居，听风园（图 4）。整体上顾宅用地呈正方形与长方形组合的 L 形（图 5），内部房屋与庭院总用地面积共达到 1200 m^2 。



图片来源：作者自制

图 5 顾宅用地

顾宅共三进四落，靠南两处宅屋为一层，作接待大堂之用处。东起第二进三落开始即为过云楼，两座建筑都为传统中式小楼，靠连廊相接，是宅主顾文彬收藏书画、读书写作之处，也是本次软件模拟的主体建筑（图 6）。宅院房屋东西侧墙体为风火山墙，实心青砖筑砌而成，主要开窗处为庭院处的南侧长窗，建筑采光主要依靠内部庭院采光（图 7）。



图片来源：作者自制

图 6 过云楼主体建筑



图片来源：作者自制

图 7 内部庭院

过云楼经过修缮重建，目前作为博物陈列馆使用，内部配置中央空调，门窗立面保持了苏州传统形制，窗户主要为单层玻璃，墙体为传统做法，内部经过现代装修呈简约风格，并且设立多座隔墙以作陈列物品

之用。可测试建筑在全空调环境下的能耗与室内光环境数据, 得出其最优窗墙比范围, 以期对重要民居建筑的改善利用提供参考价值。

3.4 参数的设定

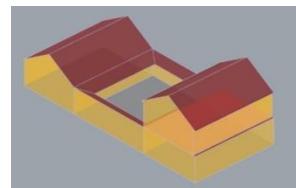
本研究使用 Rhino 软件的 Ladybug 和 Honeybee 插件进行模拟实验。Ladybug 插件用于获取和处理气象数据, 如太阳辐射、风速等。Honeybee 插件则用于构建建筑模型、定义模拟参数和进行能耗和光环及舒适度分析。我们将详细介绍这些插件的使用方法, 并解释如何将模型和参数输入模拟软件中进行模拟实验。

在模拟实验中, 我们将设置不同的窗墙比与窗户形式作为独立变量, 以探究其对能耗和热舒适性的影响。在模拟实验结束后, 我们将收集并分析模拟结果。针对能耗方面, 我们将比较不同窗面积条件下的建筑能源使用情况, 包括制冷能耗、制热能耗与照明能耗, 并通过 Ladybug + Honeybee 工具组中的可视化分析工具进行相应的呈现。针对光环境舒适度方面, 我们根据相应规范评估全年动态条件下室内主要区域达到自然采光要求的时间, 并应用相应的评价标准和指标进行分析。我们将使用图表和统计方法对数据进行展示和解释, 以揭示窗墙比对能耗和光环境舒适度的影响。

4 基于 Ladybug 工具组的模拟实践

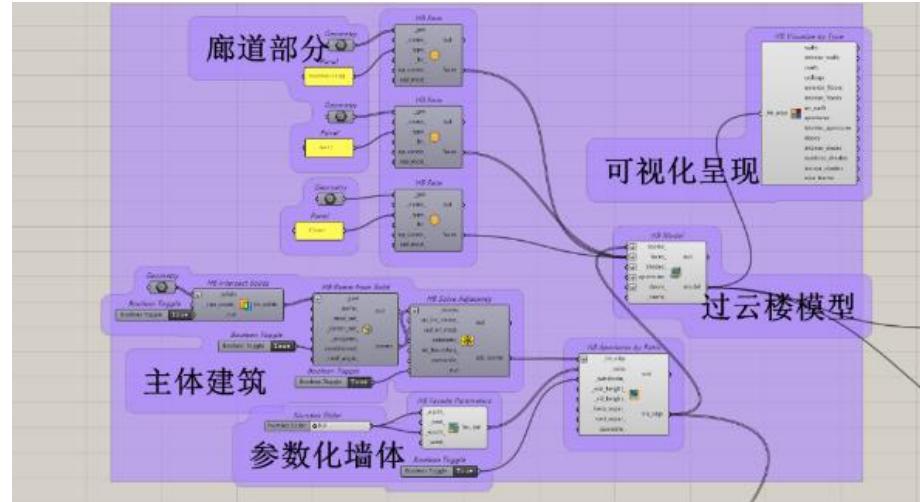
4.1 Honeybee 建模

收集建筑物的相关数据, 包括建筑基本形状、房间个数、窗户朝向、开窗房间等, 通过收集到的基本数据在建模软件 (Rhino) 中创建建筑物的几何模型 (图 8)。使用 Honeybee 中的电池组来拾取模型建立标准模型 Honeybee Model, 通过参数化开窗相关的电池组 (图 9), 利用参数化的建模方式控制窗户样式, 模拟窗墙比对建筑能耗的影响。整个模拟过程中标准模型变量只有不同形制的窗墙比, 其余部分如墙体材料, 模型大小依据 ladybug 默认设置, 以此保证实验模拟的变量只有窗墙比, 建筑能耗与室内光环境舒适变化也只和窗墙比的变化相关, 从而更直观的反应窗墙比对房间的能耗与室内舒适度的影响。



图片来源: 作者自制

图 8 Rhino 模型

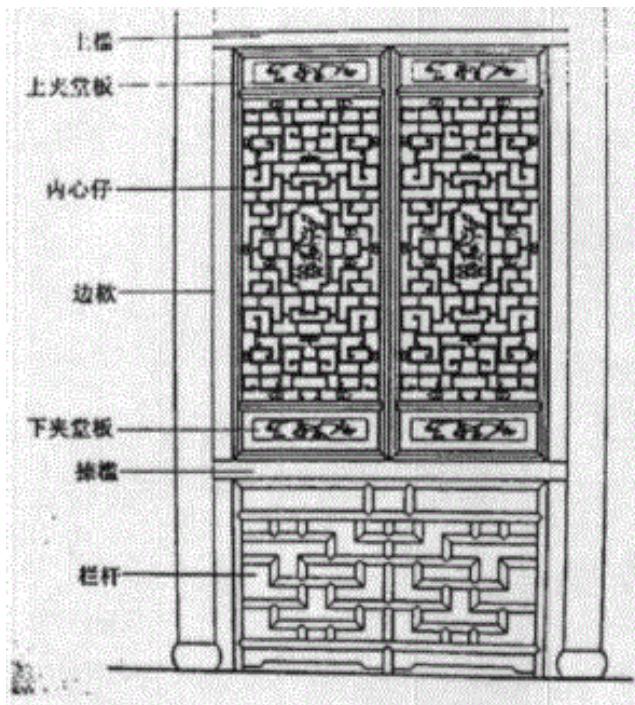


图片来源: 作者自制

图 9 Honeybee 模型相关电池组

窗墙比指建筑窗洞口与建筑单元立面面积的比值。依据《建筑节能与可再生能源利用通用规范[附条文说明] GB55015-2021》中规定, 在夏热冬冷地区, 每套住宅应允许一个房间在一个朝向上的窗墙面积比不大于

0.6 [7]。目前经过改造后的顾宅的窗墙比达到 50% 左右。综合以上, 本文研究的窗墙比变化范围设计 10%、15%、20%、25%、30%、35%、40% 和 45% 八个变化值。

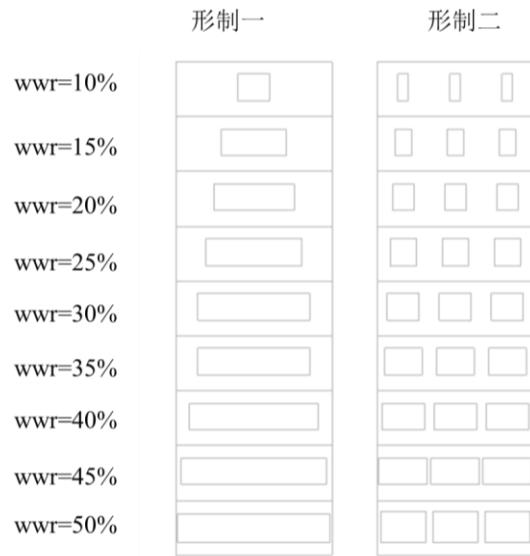


图片来源：石红超《苏南浙南传统建筑小木作匠艺研究》

图 10 地坪窗

窗户的基本形状和窗台也会影响建筑的采光效果，从而影响照明能耗与室内舒适环境，基于对苏州过云楼的调研实测，过云楼建筑以传统地坪窗或半窗为主，与现代窗不同，视觉上窗户成排并列，实际上窗户之间又以边梃相隔并没有实际相连（图 10），因此基于 ladybug 基础设置便于实验模拟，本文对窗户设计两种基本形制，即连排小窗与单一长窗两种形制，两种形制的窗户、窗台高与现状一致，窗台高都为 1m，窗户

高达到 1.7m。形制一通过控制窗户到墙角的距离来控制窗墙比，形制二通过控制窗户之间的距离变化来控制窗墙比的变化（图 11）。

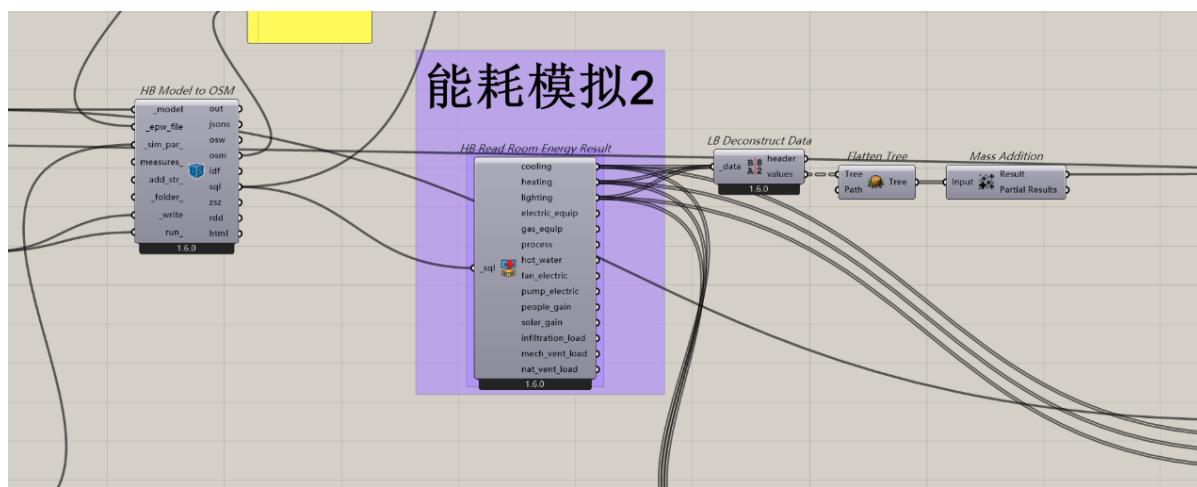


图片来源：作者自制

图 11 窗墙比变量

4.2 能耗模拟

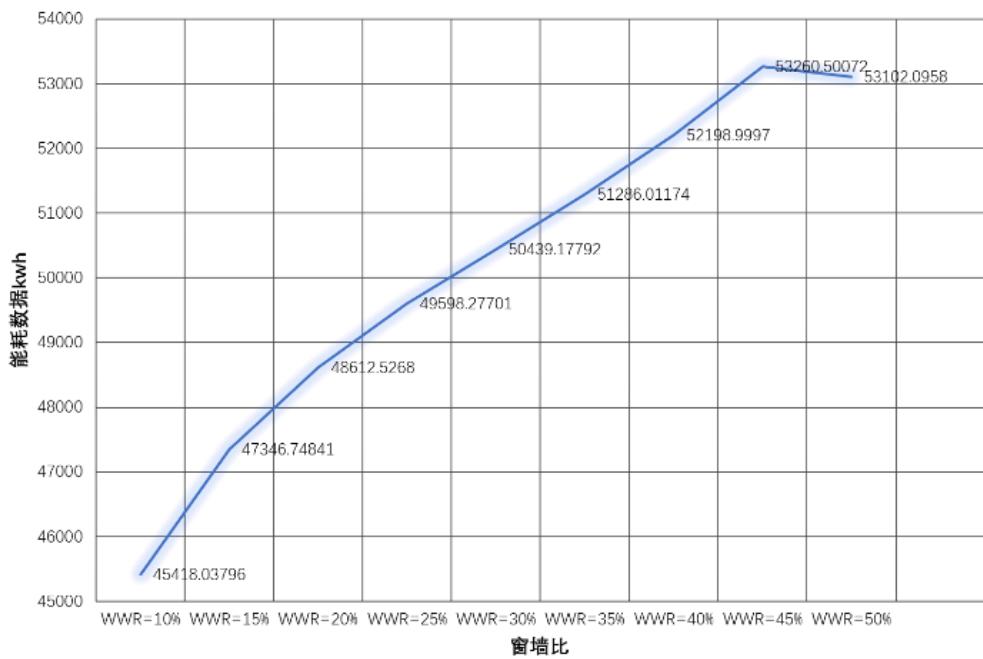
本节调用 Ladybug+Honeybee 工具组中的 OpenStudio 电池组（图 12），模拟在南朝向改变窗户形制与窗墙比，北面维持建筑原始小窗的条件下得到的总能耗，制成对应图表。在电池组的输入端输入当地 EPW 气候文件和 Honeybee 模型，在电池组输出端可以得到的数据有采暖能耗、制冷能耗、照明能耗。



图片来源：作者自制

图 12 能耗模拟电池组

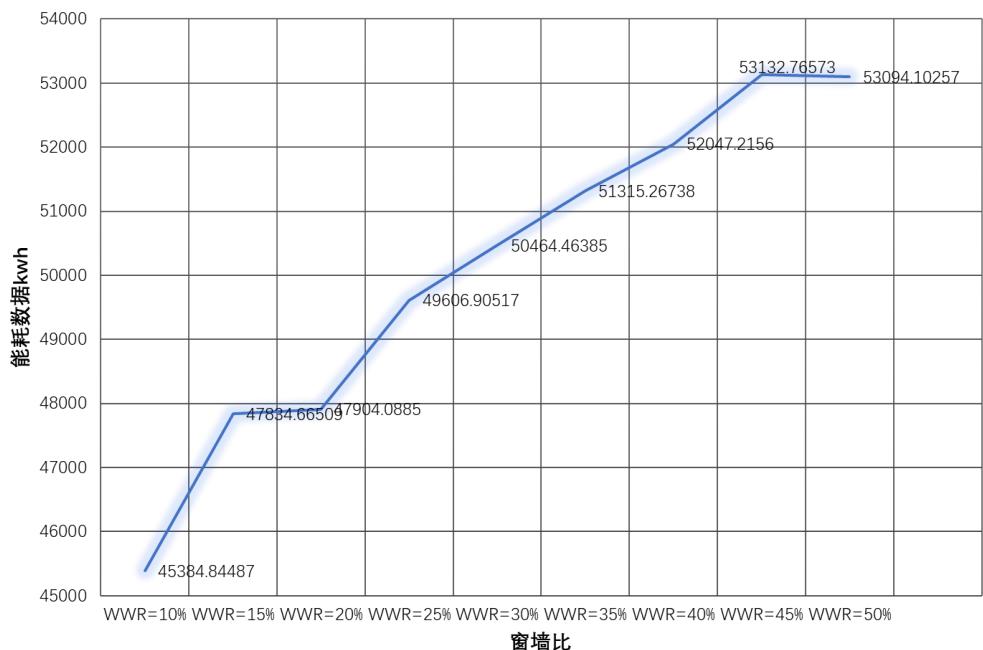
4.2.1 形制一模拟



图片来源: 作者自制

图 13 形制一能耗模拟

如图 13 所示, 在形制一开窗的情况下, 在窗墙比从 10% 到 45% 变化时, 总能耗随着建筑窗墙比增大而增大, 能耗最小时在窗墙比 10% 时达到最低, 总能耗值为 45418kwh, 之后随着窗墙比从 10% 到 45% 增加而增加, 且增加幅度总体呈现先平稳的态势, 在窗墙比从最终在窗墙比达到 45% 时达到最大值 24880kwh, 之后随着窗墙比从 45% 到 59% 的增加而缓慢的减少。



图片来源: 作者自制

图 14 形制二能耗模拟

4.2.2 形制二模拟

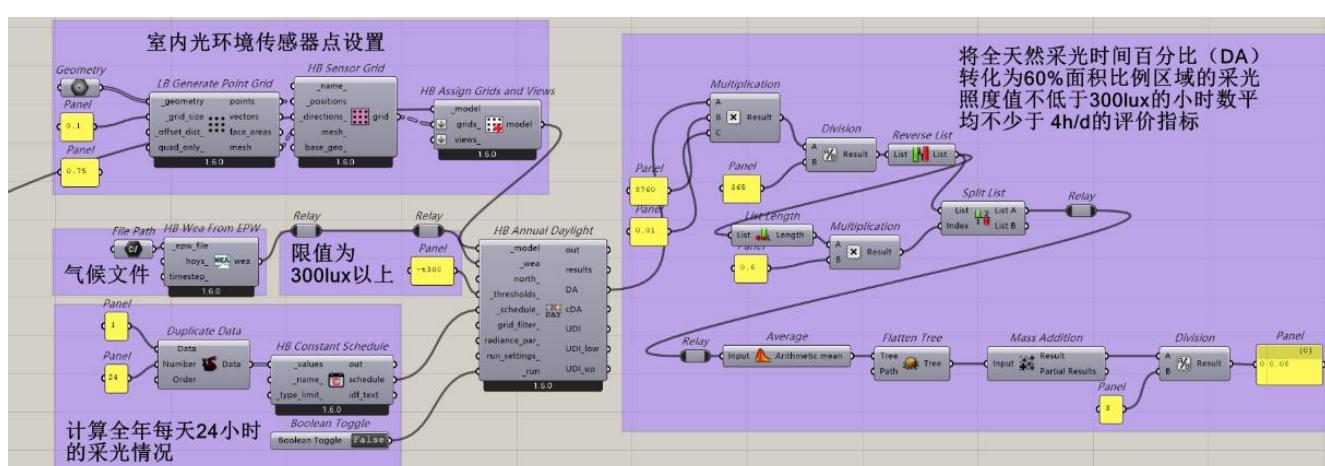
如图 14 所示, 在形制二开窗的情况下, 在窗墙比从 10% 到 25% 变化时, 总能耗随着建筑窗墙比增大而增大, 在 25% 时达到最低, 总能耗值为 49606kwh, 在这个变化过程中, 变化幅度先大后小, 在窗墙比从 15% 到 20% 的变化过程中能耗变化不大。在窗墙比达到 25% 之后, 随着建筑窗墙比的增加变化幅度变小, 当窗墙比达到 45% 时, 能耗值增加达到了 53132kwh, 之后随着窗墙比的增加而缓慢产生波动, 最终当建筑窗墙比达到 50% 时, 建筑能耗维持平稳, 变化不大。

4.3 光环境舒适度模拟

针对天然光的模拟方法包括静态光环境模拟与动态光环境模拟, 静态光环境模拟是针对在单一天空模型下某一时刻的光环境模拟分析, 这类软件有 radiance 和 ecotect 等。动态光环境模拟是针对具体地区的天气环境参数下建筑内部某一点在全年 8760 小时内部的天

然采光情况。相较于静态模拟, 动态模拟更加整体考虑全年的天气状况[8], 本文使用 ladybug 工具组中的光环境模拟相关电池组模拟苏州市全年下过云楼的内部采光情况。

评价指标采用全天然采光时间百分比 (Daylight Autonomy, DA), 全天然采光时间百分比指的是建筑中某一点仅单独依靠天然采光就可以满足最小照度的要求。相对于采光系数, 全天然采光时间百分比更具意义。依据《绿色建筑评价标准 (GBT50378-2019)》中对于建筑室内光环境的评价标准, 住宅建筑室内主要功能空间至少 60% 面积比例区域, 其采光照度值不低于 300lux 的小时数平均不少于 8h/d, 得 9 分。公共建筑的内区采光系数和室内主要功能空间至少 60% 面积比例区域的采光照度值不低于采光要求的小时数平均不少于 4h/d, 得 6 分[9], 过云楼是作为传统民居改造为陈列馆之用, 以公共建筑的光环境要求为评价标准, 并设置好相关电池组 (图 15)。



图片来源: 作者自制

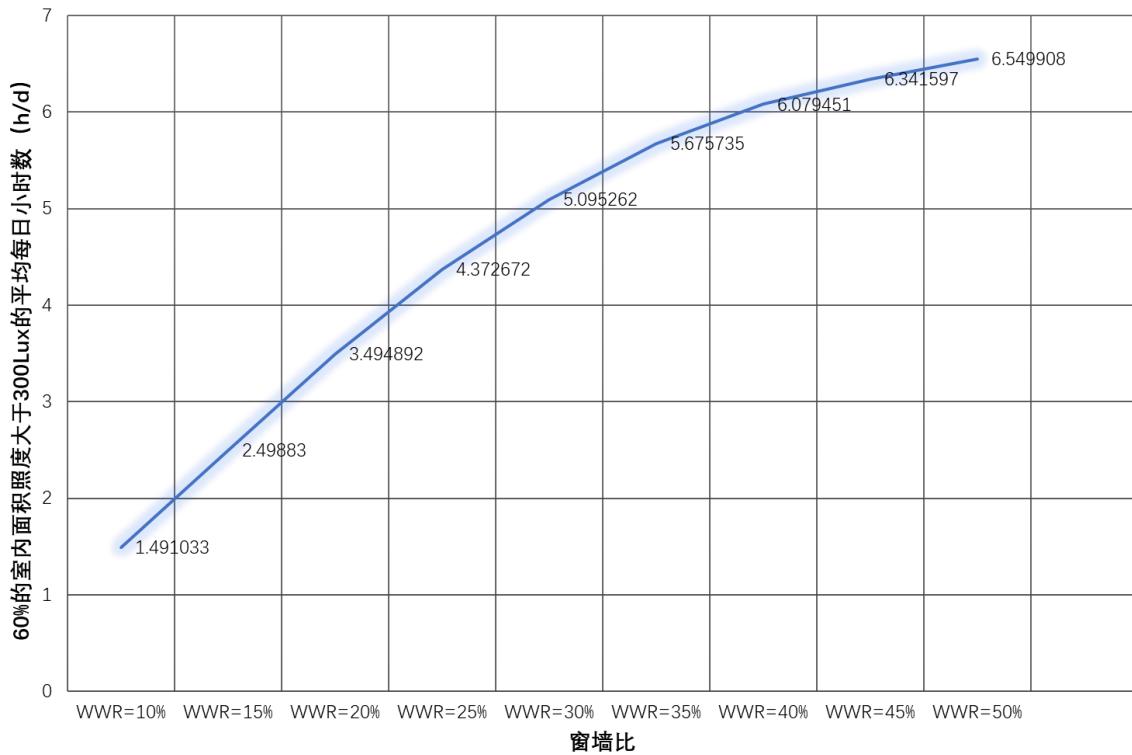
图 15 采光计算电池组

4.3.1 形制一模拟

如图 16 所示, 形制一的窗户形式达到 300Lux 的平均每日采光小时数随着建筑的窗墙比的数值增大而增大, 且增加速度逐渐放缓, 总体呈现先快后慢的变化趋势。随着窗墙比从 10% 到 50% 增加, 过云楼陈列馆内部至少 60% 面积的室内区域照度大于 300lux 的平均日小时数从 1.49h/d 增加到 6.55h/d。在窗墙比超过 20% 的时候可以达到光环境评价要求, 即达到 4h/d。

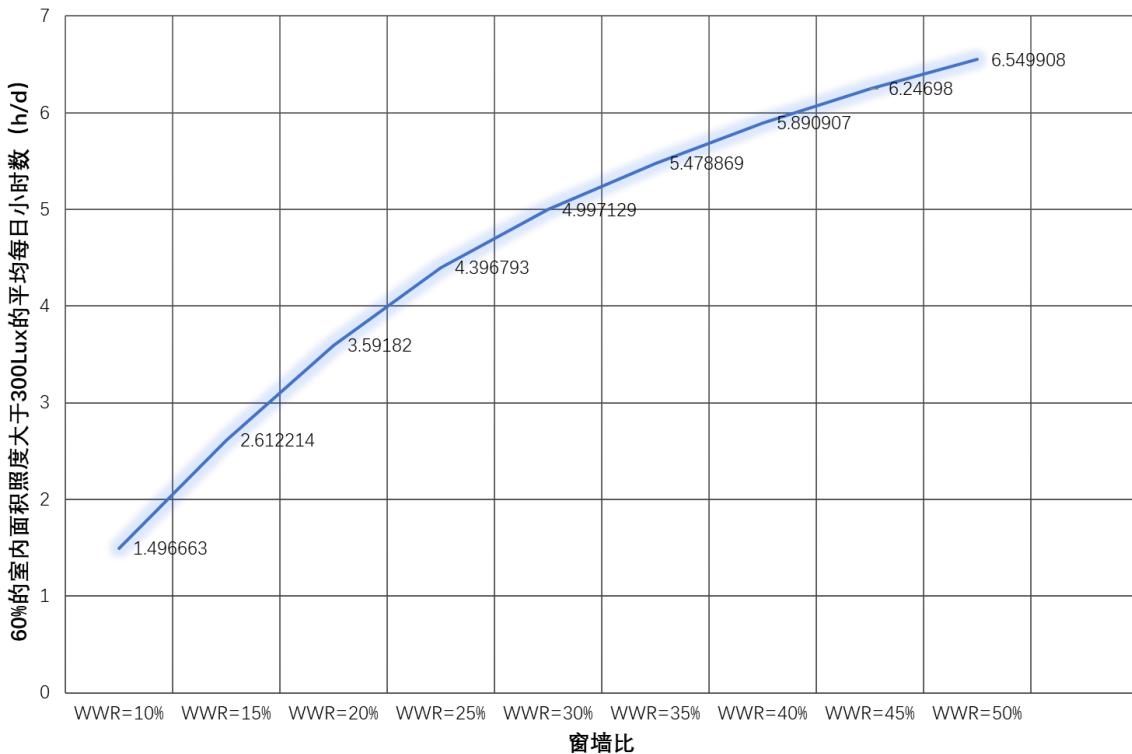
4.3.2 形制二模拟

如图 17 所示, 和形制一相同, 形制二的窗户形式达到 300Lux 的平均每日采光小时数随着建筑的窗墙比的数值增大而增大, 且增加速度同样逐渐放缓, 总体呈现先快后慢的变化趋势。总体来看两种窗户形制对建筑室内采光影响相同。同样的在窗墙比超过 20% 的时候就可以达到光环境评价要求, 即达到 4h/d。



图片来源: 作者自制

图 16 形制一光环境模拟



图片来源: 作者自制

图 17 形制二光环境模拟

5 结论与展望

5.1 结论

本文从苏州的实际民居建筑出发，通过使用参数化建筑环境分析工具，来实现相应的前期分析、能耗模拟与光环境模拟。在软件模拟前我们考察了原有建筑现状、窗户形式等，其次根据情况我们确定了相应的能耗评价指标与光环境舒适度评价指标并最终得出结果。

根据能耗模拟情况我们发现形制一与形制二窗户根据窗墙比变化时，相应的能耗变化趋势差异不大，相同窗墙比条件下，形制二能耗微大于形制一，且都在接近于 50% 时，室内能耗变化趋于不变或减少。可以发现过云楼在窗墙比现状接近于 50% 时的能耗已经接近于最大。

根据光环境模拟情况，可以观察到两种形制的窗户在窗墙比在达到 25% 时已经达到相应的采光要求，即至少 60% 面积的室内区域照度大于 300lux 的平均每日小时数达到 4h/d，考虑到建筑目前作为陈列馆之用，部分展品光敏感度较大，并无特别大的采光需求。因此，南向窗墙比达到 20%-25% 时为宜，注意本文考虑到过云楼的现有风貌，仅在南侧通过参数化方式改变窗墙比，北侧保持小窗，东西两侧并不开窗，以保持民居改造的原真性。实际改造中为了达到保护民居风貌，可采用设置带有百叶的窗户增加遮阳或者增加窗户上下夹板的宽度改变窗墙比，在视觉效果上保持原有建筑风貌。

5.2 展望

传统民居的保护利用方式有很多种，冀晶娟根据改造后的功能将传统民居的改造模式分为五类：传统文化展演、村落公共服务、商业旅游服务、办公及认养[10]。本文研究的过云楼属于文化展演这一类，从发展趋势来看，中国现存文化价值较高的传统民居的保护利用类似于过云楼这种功能置换的保护方式，通过功能置换将原有民居改造成展览馆或博物馆等，以此提高传统民居的使用价值与经济价值[11]。当然也有大量的普通民居，通过翻新与改造后作为办公、民宿、公共服务和维持原用等。根据改造的类型不同，相关的节能与室内舒适度要求也不相同。

本文在节能与光环境优化的多目标角度下调整窗户的形式与比例，在实际改造利用时务必要根据传统民居建筑改造后的具体建筑功能去调整窗墙比，来满

足改造后建筑功能对采光的要求。其中顾宅大部分被改造为陈列馆之用，对于采光要求低于住宅建筑，两种形制的窗户在南向窗墙比超过 20% 左右时，即可满足相关光环境评价要求。而如果做居住建筑用途，则窗墙比达到 50% 时，依然不能满足相应的绿色建筑评价要求，必须考虑其他面向的开窗形式和增大窗墙比。

在民居的改造利用中也是必然要考虑到建筑保护的原真性与原有形制，本文中就要考虑顾宅原有窗户不同于现代窗户、北侧小窗现状与建筑整体形象等，节能改造的策略不能背离建筑保护的初衷，盲目的堆砌节能技术并不有利于古民居的改造利用，必须统筹考虑节能、室内舒适度与民居风貌三者之间的关系。

参考文献

- [1] 中国城市科学研究院. 中国绿色建筑 2015 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [2] 罗小华. 基于 Ladybug 工具集的绿色建筑性能分析方法及应用研究 [J]. 苏州科技大学学报, 2020 (01): 40-44.
- [3] Ko W H, Schiavon S, Zhang H, et al. The impact of a view from a window on thermal comfort, emotion, and cognitive performance [J]. Building and Environment, 2020, 175: 106779.
- [4] Kontoleon K J, Bikas D K. Modeling the influence of glazed openings percentage and type of glazing on the thermal zone behavior [J]. Energy and Buildings, 2002, 34 (4): 389-399.
- [5] 田一辛, 黄琼, 王韬. 窗面积影响室内热舒适的实测与模拟对比研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38 (10): 84-91.
- [6] 薛鹏, 李倩, 谢静超等. 基于采光和节能需求的低纬度地区宾馆建筑窗墙比优化设计 [J]. 建筑科学, 2019, 35 (08): 69-75.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑节能与可再生能源利用通用规范: GB 55015-2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021. 9.
- [8] 罗涛, 燕达, 赵建平等. 天然光光环境模拟软件的对比研究 [J]. 建筑科学, 2011, 27 (10): 1-6+12.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 绿色建筑评价标准: GB 50378-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019. 3.
- [10] 冀晶娟, 肖大威. 传统村落民居再利用类型分析 [J]. 南方建筑, 2015, No. 168 (04): 48-51.
- [11] 杨丽娟, 吴志宏. 我国传统民居保护和再利用的研究现状与展望 [J]. 城市建筑, 2020, 17 (32): 57-58+102.