DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.014

基于风环境模拟的河西地区合院式民居布局优化策略研究

叶明晖[1], 王永昊[2], 闫幼锋[1], 王义合[1], 孟祥武[1]

(1. 兰州理工大学 建筑与艺术设计学院,甘肃 兰州 730050; 2. 酒泉市建设工程招标投标办公室 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 河西地区由于地理气候的因素,大风与沙尘暴频繁,抵御外界环境侵袭的能力较差。本文以模拟河西地区的风环境特性,通过实地调研,以该地区常见的合院式民居为研究对象,分析对比一合院、二合院、三合院、四合院布局的风环境情况,研究表明: 带后院的合院布局模式能有效改善前院风环境,并提高居住舒适度和建筑能效;院门位置对风环境有显著影响,需根据合院类型和风环境分布特征进行优化选择;合院建筑功能空间布局,应考虑风环境分布特性,合理实现能源节约和改善人居环境。

关键词: 合院式民居; 风环境; CFD; 河西地区; 优化策略

中图分类号: TU241.3; TU119 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0598-08

Research on optimization strategy of courtyard-style residential layout in Hexi region based on wind environment simulation

YE Minghui[1], *WANG Yonghao*[2], *YAN Youfeng*[1], *WANG Yihe*[1], *MENG Xiangwu*[1]

(1. School of Design and Art, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. Jiuquan Municipal Construction Project Bidding and Tendering Office, Jiuquan 735000, China)

Abstract: Due to geographical and climatic factors, the Hexi region has frequent strong winds and sandstorms, resulting in poor resistance to external environmental invasion. Combined with field investigations, this study conducts a simulation on the wind environment of the Hexi Region and compares the wind performance among single-wing courtyard, double-wing courtyard, three-sided courtyard and quadrangle courtyard layouts prevalent in the area. The research shows that the courtyard layout with backyard can effectively improve the wind environment of the front yard, and enhance living comfort and building energy efficiency. The location of the courtyard gate has a significant impact on the wind environment and needs to be optimized based on the type of courtyard and the distribution characteristics of the wind environment. The layout of functional spaces in courtyard buildings should consider the characteristics of wind environment distribution, and reasonably achieve energy conservation and improve the living environment.

Key words: courtyard type residence; wind environment; CFD; Hexi region; optimization strategy

河西地区位于我国西北部,属干旱半干旱地区,降水稀少、气候干燥,大风与沙尘暴频繁,当地民居如何适应且预防极端气候天气所带来的影响,同时建设更加健康舒适、环保美观的乡村人居环境[1],成为关键而紧迫的问题。本研究旨在分析对比当风环境发生时不同类型合院的布局模式,包括后院的设置情况及开门位置的选择等,通过降低院落内风速增加静风区,来改善合院内部环境。因此,研究风环境对河西地区乡村民居所带来的影响,对于提高西北干旱半干旱地区的人居环境舒适性具有重要的意义。

目前,国内外建筑相关风环境研究主要从城市及住宅区的角度进行风环境定量分析与优化研究[2-5];探究风环境对于建筑组群等的规划布局影响[6-8];集中在民居外部环境的气候适应性特征研究[9-11];探讨不同因素在建筑环境与构造方面的作

收稿日期: 2024-09-08 **修回日期**: 2026-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(51868043)

第一作者: 叶明晖(1977—),女,硕士,副教授,主要研究方向为建筑历史与理论、建筑遗产保护。E-mail:yemhleaf2008@163.com

通信作者: 王永昊(1998—),男,硕士,主要研究方向为建筑历史与理论、建筑遗产保护。E-mail:1106093466@qq.com

用关系，并综合得出相应的提升改造策略[12-13]。对使用者舒适度影响大体可分为直接和间接两个层面：直接效应为在风力作用下直接侵扰建筑檐下、院落等为主的半开敞空间中使用者的舒适度；间接效应则是通过影响建筑围护等结构的热湿传递改变了室内温湿度等环境参数[14]，进而影响使用者的舒适度。当前，针对中国西北干旱地区乡村民居的建筑环境与布局方面的探讨相对不足，乡村建筑的规模和环境背景与城市地区存在显著差异，对于城市风环境的研究结果和优化策略不能简单地应用至乡村地区。因此，需要对乡村建筑环境进行相对应的研究和分析，在风环境的视角下，针对中国西北干旱区域的乡村民居环境这一领域成为本次研究的重点。本文基于西北干旱地区的风环境特性，以河西地区典型的合院式民居为研究对象，通过实地调研和CFD模拟实验，分析对比不同类型合院的风环境特征，以风速云图及静风区占比作为评价指标，对院落组织、功能布局等提出优化策略，以期为当地乡村民居更新改造，人居环境改善提供参考依据。

1　研究区域及对象

1.1　研究区域

考虑到避免西北中部地区东亚季风和南部南亚季风影响模拟的客观与普遍性，故选取位于我国河西中北部干旱地区具有代表性的甘肃省武威市民勤县合院民居进行相关调查研究。民勤在明洪武年间被设置镇番卫，为抵御蒙古贵族的南侵，同时实现“守边备虏”的政策，朝廷将大量中原人口迁徙至河西地区[15]，此时镇番县域人口激增，人员流动密集，自此成为西北边塞要地。而今民勤县人口约17万人，总面积达1.58万km^2，东靠腾格里沙漠，西邻巴丹吉林沙漠，东、西、北三面均被沙漠包围。不仅是中国四大沙尘暴策源地之一，也是中国干旱和荒漠化最严重的地区之一[16]，绿洲面积仅约1 000 km^2，仅占行政面积的6%左右。

根据《建筑气候区划标准》(GB50178—1993)，民勤地区一半属于严寒ⅦC地区，另一半属于寒冷ⅡB地区，两区气候差异较小。民勤地区建筑基本要求为建筑物应满足冬季防寒、保温、防冻等要求，夏季部分地区应兼顾防热；总体规划、单体设计和构造处理应满足冬季日照并防御寒风的要求，主要房间宜避西晒；应注意防暴雨；建筑物应采取减少外露面积，加强冬季密闭性且兼顾夏季通风和利用太阳能等节能措施；结构上应考虑气温年较差大、多大风的不利影响[17]。

1.2　研究对象

民勤县的村落布局，整体上呈现出一种非规则化的规划特征。村落内的院落布局遵循主要道路的走向，并且沿着道路两侧以组团的形式进行有序排列。

院落布局方面，民居院落空间通常被划分为单进或双进式结构，见图1。双进式院落通常由“前院”和“后院”组成，前院房屋朝向多为坐北朝南，主要承担居住和日常生活功能。而后院则根据居民的具体生活需求和经济条件，形成多种不同的功能空间，例如用于存放农具或养殖家畜等。而院落入口根据道路走向，主要位于院落中部与两端处。建筑与院落围墙之间的高度差异相对较小，而院落的入口位置根据居民的具体需求，可能设置在院落的中央或两端，入口门则通常为木门或铁门。

建筑材料使用方面，除了传统的土坯和夯土结构房屋外，建筑类型主要可分为砖砌平房和混凝土平房两大类。至于屋顶的构造，根据建筑的建造时期和所用材料的不同，屋顶处理方式主要分为传统的夯土压实屋顶和现代的预制混凝土屋顶两种类型。

鉴于民勤地区居民的经济条件、相关政策以及其他限制性因素，合院民居院落的内部布局呈现出显著的多样性。为了便于进行风环境的模拟实验和后续的对比分析，且考虑到篇幅限制，本次将专注于探讨不同类型合院布局的内部风环境影响特征。

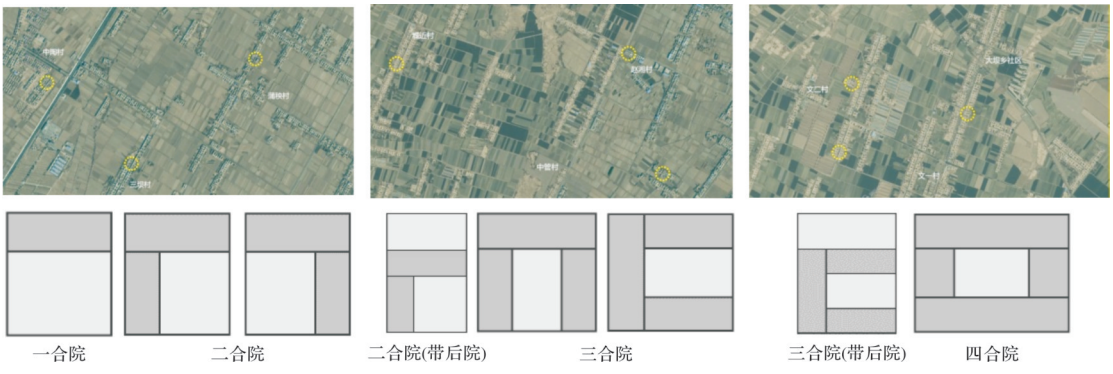


图1　合院类型提取

Fig. 1　Extraction of courtyard types

2　模拟及验证

2.1　风环境模拟理论

鉴于计算流体动力学(CFD)模拟结果的准确度,该技术正日益成为建筑风环境模拟和研究领域的首选工具。根据所在地的地貌特征及国家标准《建筑结构荷载规范》(GB50009—2006)的规定,设置其地貌粗糙度为B类[18];并采用对数风剖面[19]求解风场。选择波动小、精度高,更适合在合院这类建筑风场中低速湍流应用的Realizablek-epsilon模型[20]中建立风相流场控制方程,进行迭代求解至收敛,求解精度为10^{-3}。

通过国家气象科学数据中心公布的中国地面气象观测资料获取统计结果,并选取2023全年的风向风速数据进行分析参考,处理后得到全年风玫瑰图和12个月的风玫瑰图。由图2可知,夏季主导风向为东风,春、冬两季西北寒风表现得更为强烈,且在春季发生了风速最大值且大风频率较高,故选取西北风作为此次模拟分析的主导风向,风速选择2023年春季月份平均风速4.62 m/s。

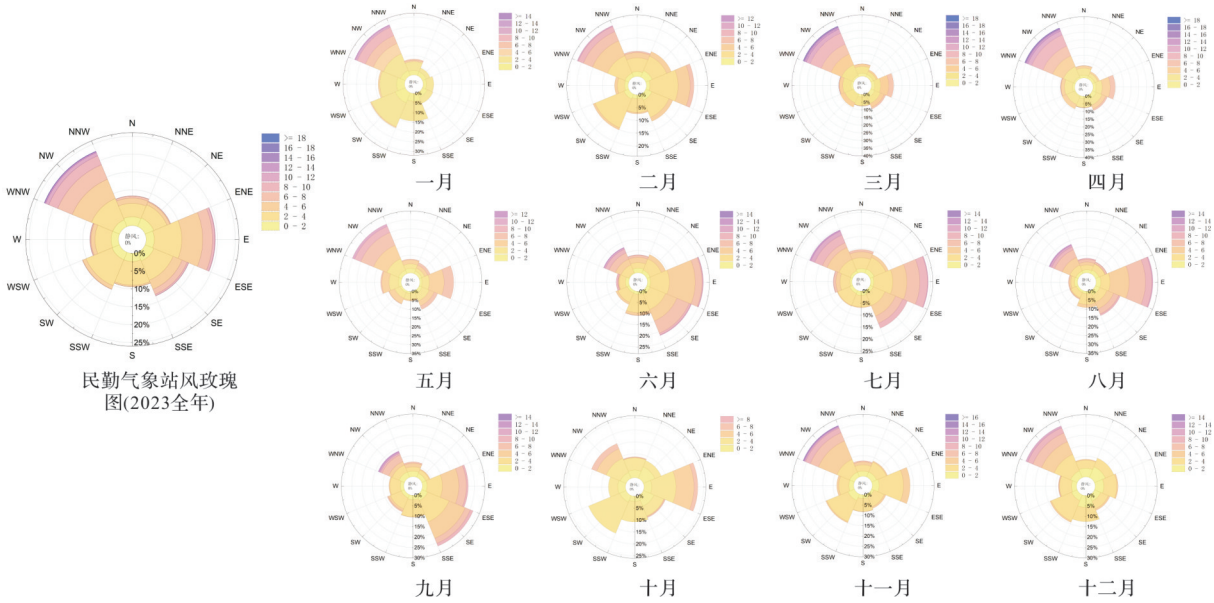


图2　民勤气象站2023年风玫瑰图及月风玫瑰图

Fig. 2　Wind rose chart and monthly wind rose chart of Minqin meteorological station in 2023

2.2　模型构建

通过实地考察和深入分析,本研究选定了位于民勤县三雷镇的某一住户为研究对象见图3,该住户紧邻街道,直接受风影响,并对其院落和街道的风环境进行了实地测量。经测得该地区同一时段风向为西北风,风速为4 m/s。在院落内部,选择了包括院落入口、角落、房屋与院落交接处以及主房与侧房转角的六个测点见图4,在距地面1.5 m处人体直接受风的高度进行风速测量。



图3　实测院落鸟瞰图

Fig. 3　Aerial view of the measured courtyard

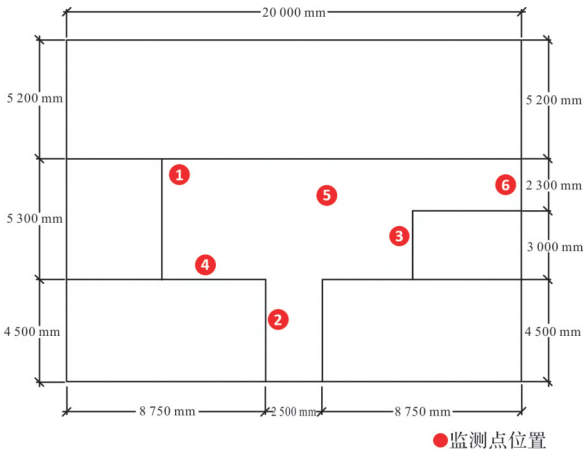


图4　实测院落平面示意

Fig. 4　Schematic plan of the measured courtyard

简化实测合院初始物理模型尺寸为20 m×15 m×3.5 m,将其高度设为h,计算域尺寸在满足最小模拟来流方向5h,去流方向15h,高度5h的情况下,为便于建模计算,将计算域尺寸见图5,设置为180 m×160 m×30 m,阻塞率约为1.04%,满足小于3%的要求[21]。本次针对合院的计算流体力学(CFD)风环境模

拟分析基于 ANSYS 2022R2 平台进行，利用 SCDM 作为几何模型前处理平台，Workbench Meshing 生成计算网格，FLUENT 作为此次模拟的求解器。

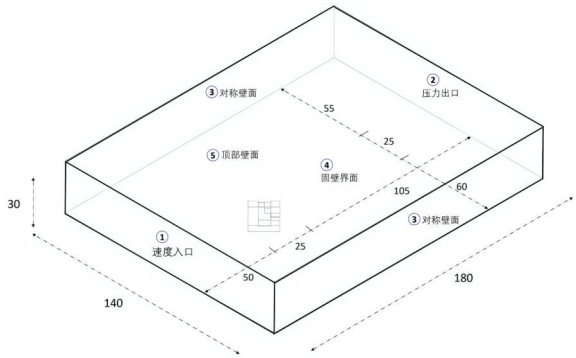


图 5　计算域尺寸

Fig. 5　Dimensions of computational domain

由于模拟的物理模型较为复杂，因此采用以六面体网格为主的划分策略（Hex Dominant Method）见图 6。为提升模拟的准确性，取实测合院模型为代表进行网格敏感性分析，以网格满足在精细化过程中相对数量比值≥1.5 倍的原则[22]，构建了三种不同精度级别的网格模型：粗糙级（5 m×5 m）、基础级（1 m×1 m）和精细级（0.1 m×0.1 m），比较分析院内 6 处实测点的风速比，发现基础级网格与精细级网格的模拟结果具有较高的一致性见图 7。这一结果表明，基础级网格不仅能够满足模拟精度的要求，而且能够有效节省计算成本，同时确保模拟结果的准确性。

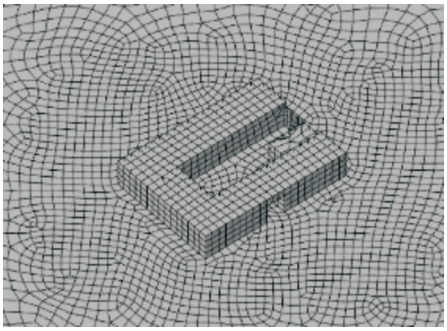


图 6　六面体为主的网格划分

Fig. 6　Grid division dominated by hexahedrons

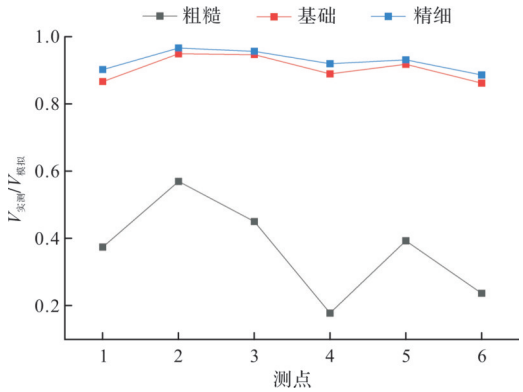


图 7　网格无关性验证

Fig. 7　Grid independence verification

3　结果与分析

3.1　CFD 模拟验证

风环境的实地测量与在相似条件下通过软件模拟得到的风环境之间的匹配程度，是评估后续实验可信度的关键因素。基于上述环境设置此次模拟分析的边界条件，并通过 FLUENT 2022R2 进行合院风场求解后，导入 CFD Post 2022R2 进行合院风速的可视化处理见图 8，并提取院落静风区（风速小于 1 m/s）[23]占比进行分析对比。

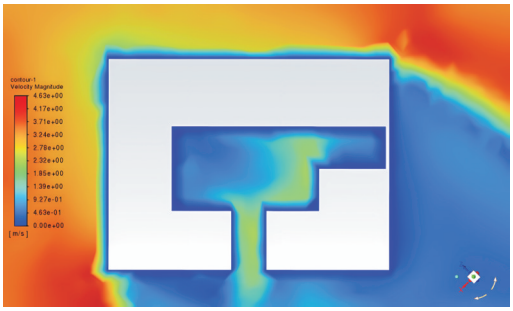


图 8　实测院落风环境模拟

Fig. 8　Wind environment simulation of the measured courtyard

为了便于观察和记录数据，本次模拟验证选取了风速平均最大值出现的时间段，将其作为与软件模拟结果进行比较的基准时段，验证模拟结果与实际结果的吻合性，采取国家气象科学数据中心公布的数据进行数值分析后与合院实测数据进行比较验证，两者变化趋势趋于一致，吻合性较好[24]，且模拟数据与监测数据误差在 10% 以内见图 9，说明本次数值模拟具有较高的可靠性。

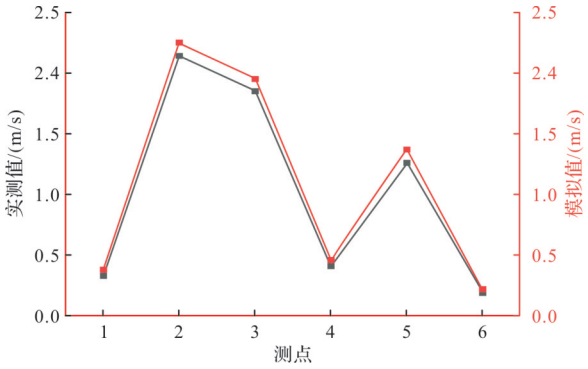


图 9　实测与模拟拟合度曲线

Fig. 9　Fitting curve of measured and simulated data

3.2　一合院式院落

由图 10 得，西北方向的来风在正房两侧以及院落东南角附近形成了风速较高的区域。东侧的山墙与南侧围墙之间，风的流动会形成风循环，导致山墙南侧的角落区域风速较高，而在其邻近区域则形成了相对温和的风环境。

中部开门会在院落内部产生多个风速较高的区域。当在院落的西南侧或东南侧设置入口，会在东侧和南侧的围墙附近形成风速较高的区域。院门封闭时，则整体降低了院落内部的高风速区域，但院落内部静风区区域与占比均变化不大。

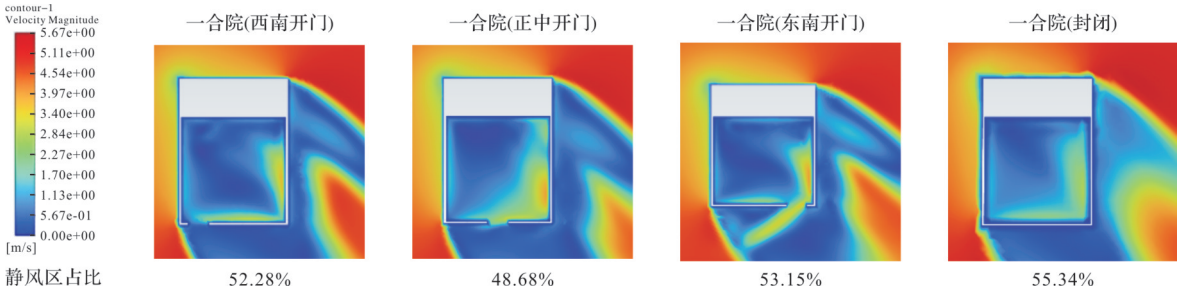


图 10　一合院风速云图及静风区占比

Fig. 10　Wind speed cloud map and proportion of calm wind zone for single-wing courtyards

3.3　二合院式院落

由图 11 得，相较于西厢房，东厢房的二合院院落中静风区的面积有所减少，这表明院落内的整体风速有所增加。说明西侧厢房在一定程度上能够阻挡西北方向的寒风，减少其对院落内部的影响。院门设置在东南侧时，会加速院落内部的湍流运动，导致风环境的不稳定性增加，而封闭的院门则有助于降低院落内部的风速。与一合院式院落相比，二合院的风环境得到了一定程度的改善。

当带有后院时，前院内部风速被进一步削弱，静风区增加的同时，北端堂屋南北两侧区域均降低了风流带动的热量交换，有利于堂屋主体的保温。当院门设置于西南侧时，静风区均占比最大，此时院落内风环境最温和。

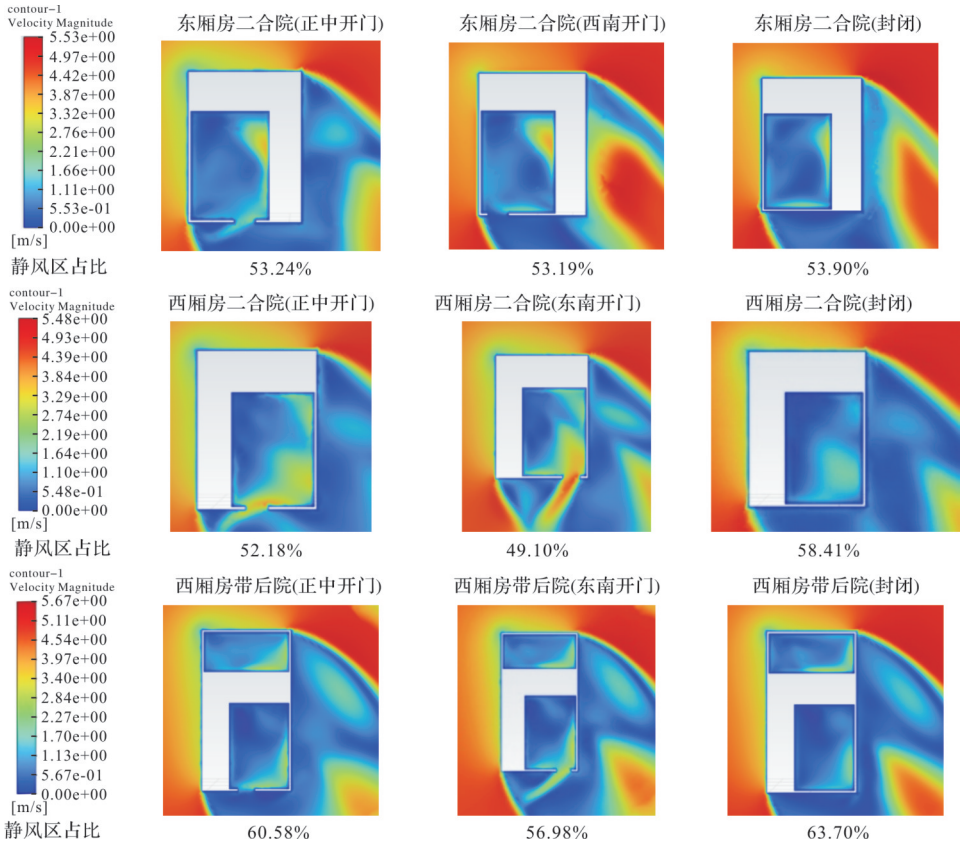


图 11　二合院风速云图及静风区占比

Fig. 11　Wind speed cloud map and proportion of calm wind zone for double-wing courtyards

3.4　三/四合院式院落

由图 12 得，在此类模拟研究中，设置后院能够有效减缓前院的风速，并降低热量散失。南部增加的倒座房，由于西北风向会在倒座主体北部及过道形成高速的湍流区，同时在南端形成了面积较大的静风区。倒座房的功能不仅限于居住用途，还可被用来满足不同居民的使用需求，通常被设置为具有储藏、养殖等多样化功能的特定空间。

小结：在以上模拟，蓝色区域风速 $v<1$ m/s 的区域产生静风区的概率会增加，而静风区内可能形

成垃圾和沙尘堆聚。在春季，当风速达到6级以上(10.8 m/s～13.8 m/s)的天数超过30 d时，静风区对建筑物的保温作用是有益的。然而，在权衡这两种情况的不利影响时，河西地区在考虑合院风环境设计时，主要应关注春季寒风的侵袭问题。在此基础上对结果进行分析，静风区占比越多，则意味着在寒风的侵袭下院落内风舒适性越高，热交换越慢，热损失越少，越有利于能源节约。

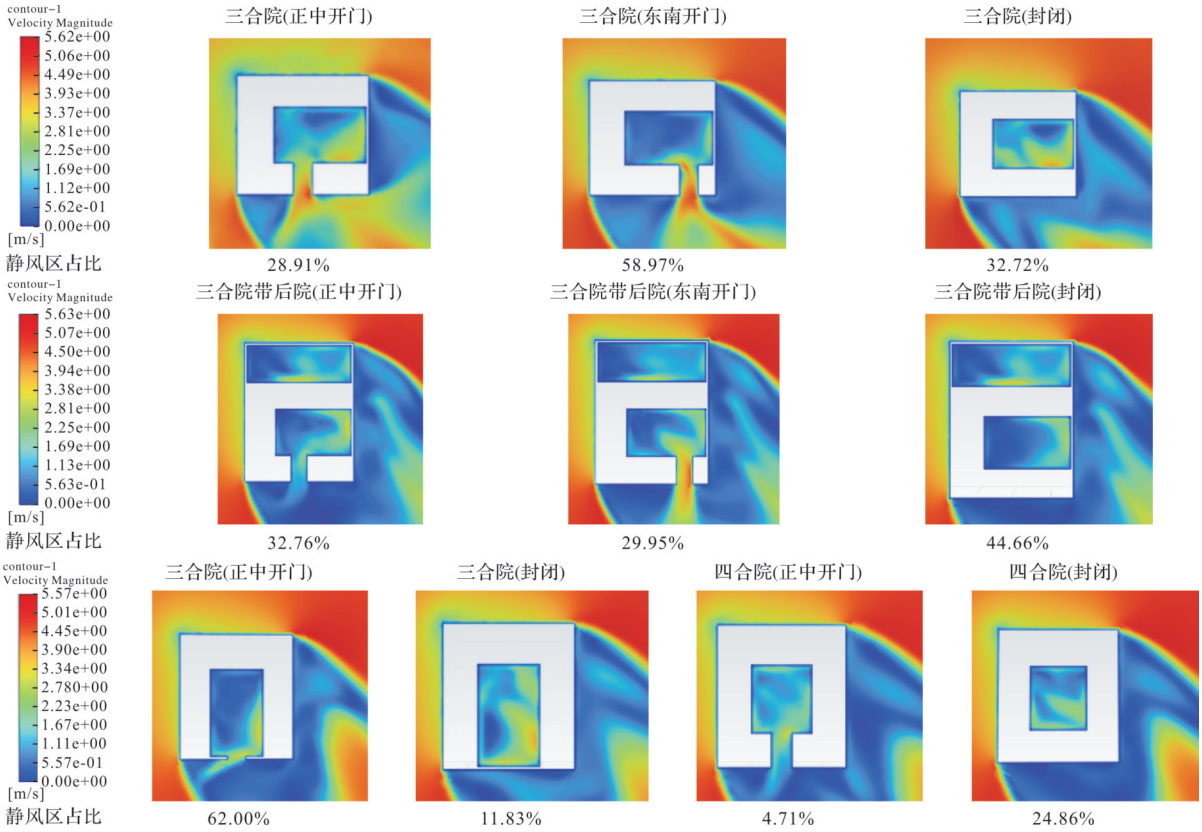


图 12　三/四合院风速云图及静风区占比

Fig. 12　Wind speed cloud map and proportion of calm wind zone for three-sided and four-sided courtyards

4　设计优化建议

随着人们对生活品质和环境质量要求的不断提高，居住环境的舒适度已成为一个日益受到关注的话题。然而，当前学术界的研究重点多集中在城市开放空间的舒适度提升策略上[25]。风速是影响人体热舒适度的关键因素之一，特别是在室外温度较低时，风速的增加会降低居民的体感舒适度，也相应增加了建筑物的供暖需求，因此通过合理的布局与设计可以提高居住舒适度并减少能源消耗。

根据该地区主导风向和风速分布特点，首先可合理规划院门位置，以减少风速对院落内部环境的影响；其次通过调整院落内部建筑的布局和方位，增加静风区占比，提高居住舒适度；最后根据建筑功能需求，合理布置建筑空间，如将居住、活动区域布置在静风区，储藏、养殖等功能布置在风速较高的区域等，见表1。

随着CFD模拟实验的应用日趋成熟，我们能够更精确、更高效地预测和模拟自然环境可能引发的

表 1　不同合院类型风环境特性和设计优化建议

Tab. 1　Wind environment characteristics and design optimization suggestions for different types of courtyards

合院类型	风速分布特性	设计优化建议
一合院	院落东南侧风速较高	1. 调整院门位置位于西南侧 2. 增加后院改善前院风环境
二合院	带后院院落，前院风速降低；东厢房院落东北侧风速较高；西厢房院落东南侧风速较高；	1. 增加后院改善前院风环境 2. 调整院门位置增加静风区 （东厢房院门位置位于西南侧） （西厢房院门正中开门）
三/四合院	带后院院落，前院风速降低；倒座房北端及过道风速较高；院落东侧及南侧风速较高；	1. 增加后院改善前院风环境 2. 灵活排布相应区域功能空间 3. 根据合院类型调整院门位置 （不带后院院门位置位于东南侧） （带后院院门正中开门）

问题。在中国乡村人居环境的建设与发展中,可针对不同地区的特定问题进行详尽的测试模拟实验。通过模拟,我们可以准确评估目标对象的风环境,进而发现内在规律并提出最佳应对措施,以创造更加适宜的人居环境。

5 结论

本文基于计算流体动力学(CFD)模拟,对河西地区合院式民居的典型类型及院落内风环境进行分析预测。在模拟西北风向4.62 m/s的风速下,得到的院落风速云图及静风区占比为指标评估了不同类型合院的风环境特性,进而从增加静风区的角度提供河西地区合院式民居布局的优化思路与方法:

(1)带有后院的合院布局模式能够有效降低前院风速,增加静风区占比,改善前院风环境,提高人体舒适度,更加有利于主屋空间的保温隔热。

(2)院门的分布位置及开闭状态对合院风环境具有重要影响。对于一合院,风速较高的区域主要位于东南侧,建议将院门调整至西南侧;二合院中,东厢房和西厢房的风速分布特性不同,需要根据具体位置调整院门位置;三/四合院院落东侧及南侧风速较高,需要根据是否带有后院来调整院门位置,以降低风速影响。

(3)根据现有院落布局的风环境特性,一合院、二合院、三/四合院应灵活调整院门位置,同时考虑适当增加后院;三/四合院更应注重建筑功能空间的灵活布置,相对应的减少能源消耗并提高河西地区人居环境舒适性。

参考文献 References

[1] 中共中央国务院关于做好2023年全面推进乡村振兴重点工作的意见. 国务院公报发[2023]6号[A/OL]. (2023-1-2).
CPC Central Committee and State Council. Opinions on Doing a Good Job in the Key Work of Comprehensively Promoting Rural Revitalization in 2023 [A/OL]. State Council Gazette, No. 6, 2023-01-02.

[2] 方云皓,赵丽元. 供需视角下老城区通风空间识别与匹配研究[J]. 地理科学进展,2024,43(2):346-360.
FANG Yunhao, ZHAO Liyuan. Identifying and m5atching ventilation spaces in old urban areas from the perspective of supply and demand [J]. Progress in Geography,2024,43(2):346-360.

[3] KU C A, TSAI H K. Evaluating the Influence of Urban Morphology on Urban Wind Environment Based on Computational Fluid Dynamics Simulation[J/OL]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2020, 9(6): 399.

[4] 张进,聂子川,罗康,等. 居住区迎风面积比对室外风环境影响研究[J]. 建筑科学,2023,39(10):176-184,192.
ZHANG Jin, NIE Zichuan, LUO Kang, et al. Study on the influence of windward area ratio on outdoor wind environment in residential areas[J]. BuildingScience, 2023,39(10):176-184,192.

[5] HONG Bo, LIN Borong , LIN Jiangyi . Quantification of residential design parameters′ effects on the outdoor wind environment using orthogonal experimental design (OED) and numerical simulation [J]. Procedia Engineering,2017,205:137-144.

[6] 曹象明,王超. 基于风环境的西安市高层建筑区规划布局策略——以曲江新区为例[J]. 城市发展研究,2017,24(8):20-26.
CAO Xiangming, WANG Chao. The planning strategy of the high-rise buildingslayout in Xi′an city based on the wind environment improvement: A case of Qujiang New District[J]. Urban Development Studies, 2017,24(8):20-26.

[7] 赵志青,章思懿,彭亦展. 建筑遗产中的生态智慧——以白鹿洞书院建筑群的风环境为例[J]. 南方建筑,2023(12):49-57.
ZHAO Zhiging, ZHANG Siyi, PENG Yizhan. The role of ecological wisdom in architectural heritage: A case study based on wind environment of architectural complex in Bailudong Academy[J]. South Architecture, 2023(12):49-57.

[8] YAO Xingbo, HAN Shou, DEWANCKER B. Wind environment simulation accuracy in traditional villages with complex layouts based on CFD[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021,18(16):8644.

[9] 刘启波,杨雯婷. 基于气候特征的居住区室外热舒适多目标优化布局研究——以西安地区为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(1):54-60.
LIU Qibo, YANG Wenting. Study on multi-objective optimization layout of outdoor thermal comfort in residential areas based on climate characteristics:Taking Xi′an as an example[J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition),2022,54(1):54-60.

[10] 王薇,潘璐冉. 徽州地区宗祠建筑的规划选址与绿色营建技术[J]. 工业建筑,2022,52(4):23-34.
WANG wei, PAN luran. Planning and site selection of ancestral temple buildings in the Huizhou area and their green technology[J]. Industrial Construction, 2022, 52

(4)：23-34.

[11] 董晓，刘加平．秦岭山地传统民居院落地域适应性及传承研究[J]．建筑科学，2022，38(6)：79-87，96.
DONG Xiao，LIU Jiaping. Research on regional adaptability and inheritance of traditional residential courtyards in Qinling mountains[J]. Building Science，2022，38(6)：79-87，96.

[12] 郑志元，汤铭，刘欣慰，等．徽州传统民居天井平面几何参数对室内风环境的影响研究[J]．家具与室内装饰，2023，30(7)：115-123.
ZHENG Zhiyuan，TANG Ming，LIU Xinwei，et al. Study the influence of geometric paraneters of the plane of huizhou traditional residential patio form on indoor wind environment[J]. Furniture & Interior Design，2023，30(7)：115-123.

[13] 赵娟，周波涛，白艺飞，等．高原寒冷地区既有建筑节能改造适宜性及经济性分析[J]．西安建筑科技大学学报(自然科学版)，2023，55(5)：774-782.
ZHAO Juan，ZHOU Botao，BAI Yifei，et al. Suitability and economic analysisof existing building energy saving reconstruction in cold plateau region[J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech.(Natural Science Edition)，2023，55(5)：774-782.

[14] 郑伟花，宋朝．冬冷干燥地区整体建筑热湿耦合传递对室内温湿度的影响[J]．科学技术与工程，2022，22(20)：8781-8788.
ZHENG Weihua，SONG Chao. Influence of coupled heat and moisture transfer of whole building on indoor temperature and humidity in cold and dry winter area[J]. Science Technology and Engineering，2022，22(20)：8781-8788.

[15] 刘畅，吴葱．明朝河西地区移民背景下的民勤圣容寺建筑研究[J]．古建园林技术，2015(4)：56-60.
LIU Chang，WU Cong. The study of Shengrong temple in Mingin county under the background of the immigration of the Ming dynasty in the Hexi corridor[J]. Traditional Chinese Architecture and Gardens，2015(4)：56-60.

[16] 杨艳，王杰，田明中，等．中国沙尘暴分布规律及研究方法分析[J]．中国沙漠，2012，32(2)：465-472.
YANG Yan，WANG Jie，TIAN Mingzhong，et al. Distribution characteristics and research method of sandstorms in China[J]. Journal of Desert Research，2012，32(2)：465-472.

[17] 中华人民共和国建设部．建筑气候区划标准：GB 50178—1993[S]．北京：中国建筑工业出版社，1994.
Ministry of Construction of the People′s Republic of China. Standard for building climate regionalization：GB 50178—1993[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，1994.

[18] 中华人民共和国建设部．建筑结构荷载规范：GB 50009—2001[S]．北京：中国建筑工业出版社，2007.
Ministry of Construction of the People′s Republic of China. Load code for the design of building structures：GB 50009—2001[S]. Beijing：China Architecture & Building Press，2007.

[19] TOMINAGA Y，MOCHIDA A，YOSHIE R，et al. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2008，96：1749-1761.

[20] MITTAL H，SHARMA A，GAIROLA A. Numerical simulation of pedestrian level wind conditions：Effect of building shape and orientation[J]. Environmental Fluid Mechanics，2020，20(4)：663-688.

[21] RICHARDS P J，QUINN A D，PARKER S. A 6 m cube in an atmospheric boundary layer flow -Part 2. Computational solutions[J]. Wind & Structures An International Journal，2002，5(2/3/4)：177-192.

[22] FERZIGER J H，PERIC M. Computational methods for fluid dynamics[M]. 3rd ed. Berlin：Springer，2002.

[23] 王伟武，王頔，黎菲楠．建筑形态参数对街道型风道通风潜力影响分析[J]．西部人居环境学刊，2020，35(3)：69-76.
WANG Weiwu，WANG Di，LI Feinan. Studies on the influence of building shape parameters on ventilation potential of the street-type ventilated corridor[J]. Journal of Human Settlements in West China，2020，35(3)：69-76.

[24] YAN Zhenguo，LIU Huayong，MAO Meiliang，et al. New nonlinear weights for improving accuracy and resolution of weighted compact nonlinear scheme[J]. Computers & Fluids，2016，127：226-240.

[25] 周迪，冯祯，刘仪，等．人居环境舒适度研究进展[J]．环境生态学，2023，5(8)：65-74，94.
ZHOU Di，FENG Zhen，LIU Yi，et al. Research progress on the comfort of human settlements.[J]. Environmental Ecology，2023，5(8)：65-74，94.

(编辑　吴海西)