文章编号:1674-2869(2024)02-0217-08

街道的空间整合度与风场耦合性及其优化研究——以武汉市为例

尹 杰[1],陈 林[1],宋斯琦[2],许华华[1],向 澄[1]
1. 三峡大学土木与建筑学院,防灾减灾湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学健康医学院,湖北 宜昌 443002

摘 要:为研究街道形态影响行人的步行可达性和通风效能,采用计算流体力学(CFD)模拟与空间句法Depth map模拟相结合的方法,探究街道形态风场特征与空间整合度的耦合性关系,总结耦合性规律,得到结论:(1)中间左右错位式的通风效果最明显,但是整合度明显低于前后对齐并列式;(2)建筑前后错接式的通风效果最明显,但是整合度最低;(3)建筑前后错位式的整合度最高,显著高于前后对齐并列式,但是通风效果最差;(4)长街道界面的通风效果较好,但是整合度最低,短街道界面的整合度最高。通过优化街道空间形态,调整建筑形态、建筑布局、沿街界面等措施,使街道活跃度和通风风场相叠合,为行人的步行环境创造良好的通风气候环境。

关键词:空间句法;计算流体力学模拟;空间整合度;空间优化
中图分类号:TU984 **文献标识码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ. 202310024

Coupling of street space integration and wind field, and its optimization——a case study of Wuhan

YIN Jie[1], *CHEN Lin*[1], *SONG Siqi*[2], *XU Huahua*[1], *XIANG Cheng*[1]
1. Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. College of Medicine and Health Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

Abstract: Street layout affects the pedestrian accessibility and ventilation efficiency. We adopted the method of combining computational fluid dynamics (CFD) simulation and space syntax Depth map simulation to explore the coupling between the characteristics of wind field based on the street layout and space integration index and to summarize the law of coupling. The conclusions are as follows: (1) The ventilation effect of buildings which are staggered left and right in the middle row is the best, but the integration index is significantly lower than that of the aligned ones; (2) The ventilation effect of buildings which are staggered front and back inside is the best, but the integration index is the lowest; (3) The integration index of buildings which are staggered front and back outside is the highest, significantly higher than that of the aligned ones, but the ventilation effect is the worst; (4) The ventilation effect of long streets is better, but the integration index is low, and the integration index of short streets is higher. By optimizing the street space, such as adjusting the building shapes, changing the building layout, and adding interfaces along the streets, the activity in the street and good ventilation can be well correlated, and a better ventilated environment for pedestrians can be created.

Keywords: space syntax; CFD simulation; integration index; space optimization

收稿日期:2023-10-24
基金项目:湖北省自然科学基金(2021CFB034)
作者简介:尹 杰,博士,讲师。Email:64673543@qq.com
引文格式:尹杰,陈林,宋斯琦,等.街道的空间整合度与风场耦合性及其优化研究——以武汉市为例[J].武汉工程大学学报,2024,46(2):217-224.

大规模的城市建设给环境带来严重的城市热岛效应,街道上步行的人们感到炎热、不舒适。良好的室外通风有助于缓解城市热岛效应[1],当空气在街道人行高度流动时,测量温度比城市冠层低5 ℃,热岛效应作用降温效果更明显[2]。对城市街道建成环境进行气候适应性优化设计,非个别的建筑单体,提高城市街道通风能力。

除此之外,城市街道是城市重要的公共场所空间,是人们活跃度最高的区域[3],同时也是城市内部通风的重要廊道。街道上容纳人们的各种社会活动与社会交往,更强调可步行性,适宜的街道空间形态对休闲社交活动具有促进作用[4],如提高街道的步行性可以增加临街商业的销售额近30%[5],空间句法的可达性指标与物业税金和售价密切相关[6],提高街道的步行可达性可以有效恢复疫情对经济的严酷影响。空间句法技术可以帮助我们定位出可达性好、使用频率高的街道可认知空间[7],可以对居民的步行行为进行预测分析,评价街道人流活动布局[8]。采用空间句法几何格网的构型分析,计算出全局整合度,用以挖掘出街道活跃度高和人流密集的空间区域。

街道的空间形态与街道可达性及活跃度密切相关,研究采用空间句法整合度与街道空间形态指标进行相关性分析,比如将街道环境量化为整合度、街道宽度、长度等指标,考察各因素与步行者路径的关联性,结论将为街道的规划设计提供参考[9]。采用城市形态学法和空间句法量化街道可达性、开发建设强度、建筑形态和用地功能混合度,通过数据分析发现功能混合、可达性、建筑强度及形态之间具有较高的重合度[10-12]。街道空间形态是预测行人步行行为的主要参考因素[13]。而街道作为人流的重要公共空间和城市内部的通风廊道,关于街道空间整合度指数与街道通风耦合的研究较少,本文试图通过街道空间形态耦合变量发现街道全局整合度指标以及通风潜力的变化规律。

同时,街道的空间形态与街道通风效能具有较强的相关关系,在城市街道空间通风研究方面,主要关注于街道峡谷的通风环境研究,街道的高宽比影响街道上的通风效能,街道峡谷两翼建筑的高度变化将导致通风量的显著增加[14],建筑物之间的距离、建筑物的布局、街道旁建筑高度变化和风向是改善通风的重要因素[15-16]。除此之外,街道峡谷的通风水平由盛行风向与街道轴线的夹角和街道长度所决定[17-18]。空间句法主要关注街道空间的步行可达性和活跃度,计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)数值模拟主要关注街道空间的风场分布,本文选取街道空间形态的理想模型和现实城市街道,探寻街道空间形态的步行性与街道空间风场的耦合关系。

其中,整合度是空间句法模型的核心指标,它消除了系统元素数量不等和结构不对称引起的差异空间系统[19-20]。整合度的值越高,越容易吸引到视线的关注,越容易达到,也是全局最活跃的部分。城市街道是城市中活跃度最高的公共活动空间,有必要研究街道活跃度分布与风速分布的耦合关系。本文的目的是通过街道空间形态的优化,提高街道空间的活跃度和通风效能,将步行活跃区域与通风顺畅的区域进行空间叠合,为街道空间中人流密集区域创造舒适的室外通风环境。

1 实验部分

不同街道空间形态主要是比较不同的沿街建筑布局、沿街建筑界面形式和街道沿街建筑迎风面长度下街道步行可达性与通风效能的变化和耦合度。沿街建筑布局包括并列式、斜列式和错位式;沿街建筑界面形式包括界面连续的并列式,界面后退的前后错位式和错接式;街道沿街建筑迎风面长度是比较不同建筑长度所引起的全局整合度和风速的变化。全局整合度与风速耦合度大小的评判标准主要是较高全局整合度区域(Depth map图中红色区域的面积)与高风速区(Fluent模拟图中风速高于1.5 m/s的区域)重叠的面积和长度大小,重叠长度和面积越大,耦合度越高。

为了进一步揭示街道空间形态与步行可达性和通风的耦合关系,需要分别对步行可达性和通风进行量化。因此,本文采用空间句法Depth map软件计算9个理想街道案例的全局整合度。理想模型街道长度为500 m,街道两旁街区的建筑面宽60 m,进深15 m,建筑层数均为6层,建筑高度为18 m,街道宽度为60 m,软件中网格大小设定为5 m,计算全局整合度[21-22]。通风数值模拟采用Fluent软件,网格大小为20 m,建筑细部网格设定为5 m,迭代1 000次。风场模拟的边界条件中,盛行风向为正南风,风速为5 m/s。模拟计算的湍流模型为RNG K-epsilon模型,重力加速度为g = 9.81 m/s,地表粗糙度系数为α= 0.16,地表粗糙高度Z_0 = 0.05 m。

1.1 基于沿街建筑的布局

街道沿街建筑布局形态主要是比较街道两侧街区建筑群由于空间布局所引起的全局集成度和

通风风速变化（见图1），其中，街道布局形态的理想模型选取前后对齐并列式（案例1）、中间左右错位式（案例2）和斜列式（案例3）。通过空间句法全局整合度的计算，案例1街道上的全局整合度值最高，密度高的区域面积狭小而细长，最高值达到18.49，主要分布于相邻建筑的出入口处；案例2和案例3街道上的整合度值相等，但是明显低于案例1，案例2和案例3全局整合度值高的区域形状近似圆形，面积较大，但相对强度不高，最高值为8.99。案例1全局整合度平均值为9.94，明显高于案例2和案例3（5.84）（见图1，表1）。可见，街道如果要创造高可达性和活跃性高的街道，应该采用前后对齐并列的布局形式，因为前后对齐并列减少了空间的步深，提高了步行可达性，相反前后左右错位式和斜列式的布局增加了街道的空间深度值。

表1　不同街道布局模式的全局整合度和风速分布

Tab. 1　Global integration index and wind speed of different street layout patterns

	全局整合度			风速 / (m/s)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
案例1	5.73	18.49	9.94	0.79	1.68	1.52
案例2	2.12	8.98	5.84	1.55	1.77	1.7
案例3	2.12	8.99	5.84	1.32	1.75	1.59

街道风速分布状况与全局整合度分布状况截然不同，其中案例2的通风状况最好，其次为案例3和案例1。主导风向的风可以穿越建筑的空隙吹向后排建筑，因此案例2的通风效果最好，平均风速为1.7 m/s，案例3和案例1的平均风速分别为1.59和1.52 m/s。假设街道横断面低于1.5 m/s的平均风速为弱风区，高于1.5 m/s的平均风速为强风区。其中，图2中，案例1街道上0~110 m为弱风区，110~500 m为强风区；案例2中街道均为强风区；案例3中0~160 m为弱风区，160~500 m为强风区。因此，图1（a、c、e）中红色区域中（全局整合度相对较高的区域）高风速（强风区平均风速在1.5 m/s以上）面积和长度最高的为案例2，其次为案例3和案例1。因此，中间左右错位式的全局整合度与风速耦合度最高，其次为斜列式和前后对齐并列式。

1.2　基于沿街建筑界面的布局

街道沿街建筑界面主要是比较临街建筑的界面连续形态所引起的全局整合度和风速变化，其中，图3中街道界面形态的理想模型包括建筑前后对齐并列式（案例4）、建筑前后错位式（案例5）和建筑前后错接式（案例6）。其中，案例5街道上的全局整合度值最高，整合度值高的区域部分连片。案例4和案例6显著低于案例5，案例5的整合度平均值为13.02，明显高于案例4（9.94）和案例6（9.28）（见表2）。可见，街道如果要创造高可达性和活跃度高的街道，应该采用建筑前后错位式，缩短建筑后排空间达到街道的空间步深，而建筑前后错接的布局增加了建筑后排达到街道的空间步深。

表2　不同街道界面形态全局整合度和风速分布

Tab. 2　Global integration index and wind speed of different street interface patterns

	全局整合度			风速 / (m/s)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
案例4	5.73	18.49	9.94	0.79	1.68	1.52
案例5	4.47	20.62	13.01	1.06	1.57	1.37
案例6	3.45	15.41	9.28	1.48	1.82	1.74

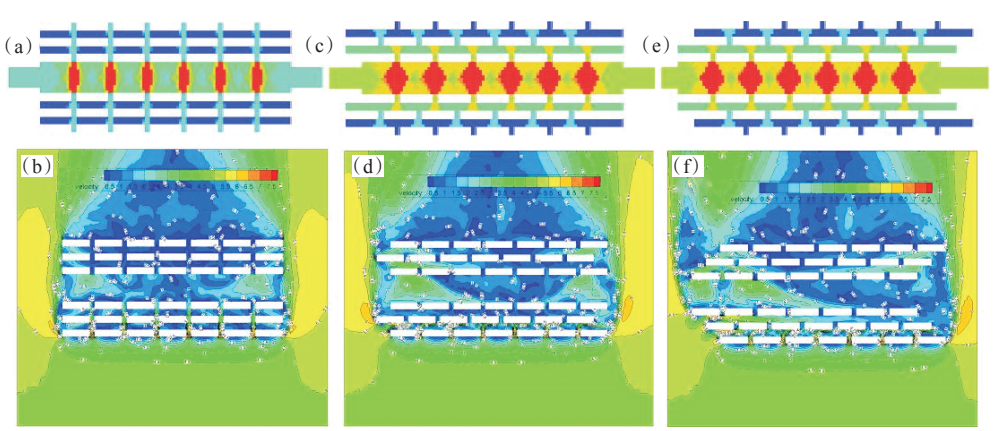


图1　不同街区形态的空间全局整合度和风速分布：（a、c、e）全局整合度分布，（b、d、f）为风速分布

Fig. 1　Global integration index and wind speed of different street layout: (a, c, e) global integration index, (b, d, f) wind speed

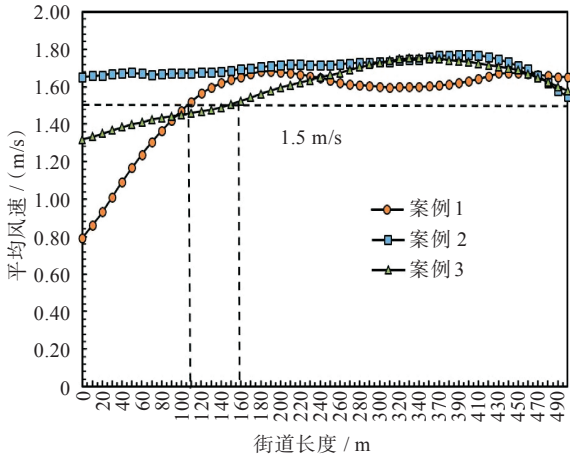


图 2 街道中心线轴向上风速分布曲线

Fig. 2 Wind speed values at different distances of the street

街道界面形态下全局整合度分布与街道风速分布存在较大差异，案例6的通风状况最好，其次为案例4，最差为案例5。建筑前后错接的凹凸面可以产生湍流风，从而提高风速，因此案例6的通风效果最好，平均风速为1.74 m/s，而建筑前后错位降低了风速，平均风速为1.37 m/s。假设平均风速低于1.5 m/s为弱风区，高于1.5 m/s为强风区。其中（见图4），案例4街道上0~110 m为弱风区，110~500 m为强风区；案例5中街道上0~330 m为弱风区，330~500 m为强风区；案例6中0~15 m为弱风区，15~500 m为强风区。因此，图3(a、c、e)中较高全局整合度的红色区域高风速（强风区平均风速在1.5 m/s以上）区域面积和长度最大的为案

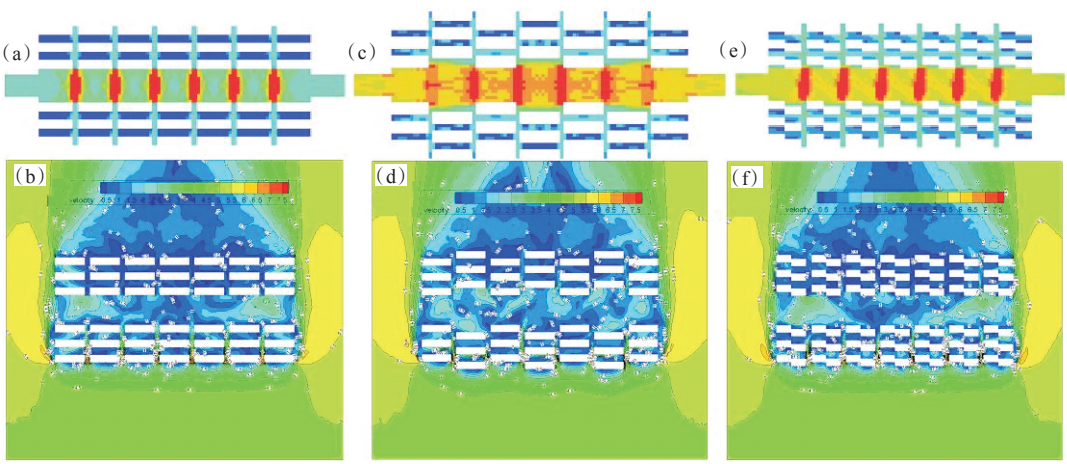


图 3 不同街道界面形态全局整合度和风速分布：(a、c、e)为全局整合度分布，(b、d、f)为风速分布

Fig. 3 Global integration index and wind speed of different street interface: (a), (c), (e) global integration index, (b, d, f) wind speed

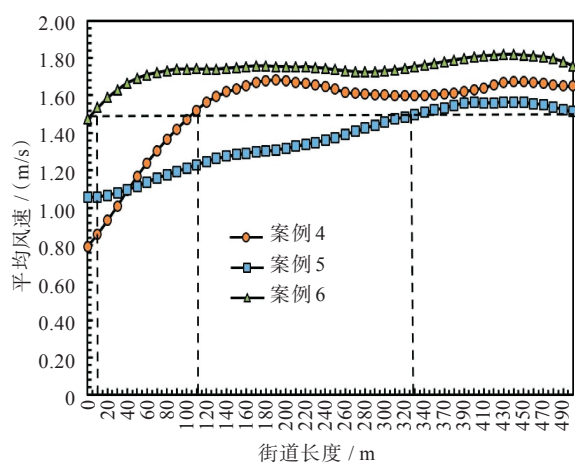


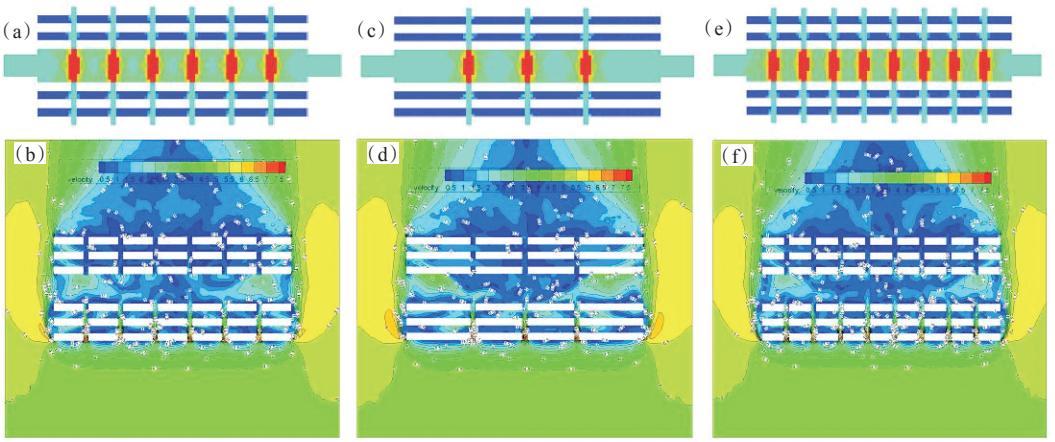
图 4 街道中心线轴向上风速分布曲线

Fig. 4 Wind speed values at different distances of the street

例6，而案例4要高于案例5。因此，建筑前后错接式的全局整合度与风速耦合度最高，建筑前后对齐并列式的耦合度要强于建筑前后错位式。

1.3 基于沿街建筑迎风面长度的布局

街道沿街建筑迎风面长度主要是比较街道沿街不同迎风面的建筑长度所引起的全局整合度和风速变化，其中，街道依据沿街不同迎风面的建筑长度选择理想模型。通过空间句法全局整合度计算，较短长度迎风面的街道（案例9）全局整合度值最高，平均值为10.42；中等长度迎风面的街道（案例7）全局整合度平均值要高于较长长度迎风面的街道（案例8），分别为9.94和9.81（见图5，表3）。可见，街道沿街建筑迎风面变长，增加了后排建筑空间达到街道的空间步深，随着街道临街迎风面长度的增加，全局整合度在减小，同时减少出口，全局整合度较高的红色区域面积也在减少，而缩短沿街迎风面的建筑长度，增加临街建筑出口数量，可以提高街道可达性和活跃度。



案例 7(a-b)　　案例 8(c-d)　　案例 9(e-f)

图 5　不同街道迎风面的全局整合度和风速分布：(a、c、e)为全局整合度分布，(b、d、f)为风速分布

Fig. 5　Global integration index and wind speed of different street frontal area: (a, c, e) global integration index, (b, d, f) wind speed

表 3　不同街道迎风面形态的全局整合度和风速分布

Tab. 3　Global integration index and wind speed of different street frontal area patterns

	全局整合度			风速 / (m/s)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
案例 7	5.73	18.49	9.94	0.79	1.68	1.52
案例 8	4.41	15.33	9.81	0.93	1.90	1.63
案例 9	6.00	18.05	10.42	0.70	1.48	1.27

沿街迎风面的建筑长度理想模型中，风速分布和全局整合度分布明显相反。其中，案例 8 的通风状况最好，其次为案例 7，案例 9 的通风状况不理想。沿街建筑长度较长的迎风面对风产生了峡谷效应，加速风通过街道，提高风速，因此案例 8 的通风效果最好，平均风速为 1.63 m/s。假设平均风速低于 1.5 m/s 为弱风区，高于 1.5 m/s 为强风区。其中(见图 6)，案例 7 街道上 0~110 m 为弱风区，110~500 m 为强风区；案例 8 中街道上 0~390 m 为强风区，390~500 m 为弱风区；案例 9 中均为弱风区，最低风速为 0.7 m/s。图 5(a、c、e)中较高全局整合度红色区域高风速(强风区平均风速在 1.5 m/s 以上)区域长度和面积最大为案例 7 和案例 8，其中，案例 7 的全局整合度红色区域与高风速区域重合面积要大于案例 8，重合面积最小的为案例 9。因此，中等长度的沿街迎风面的全局整合度与风速耦合度最高，较短长度的沿街迎风面的耦合度最低。

2　应用与分析

针对建成区道路网络系统的通风潜力评价，采用地理信息系统空间分析技术对街道走向进行

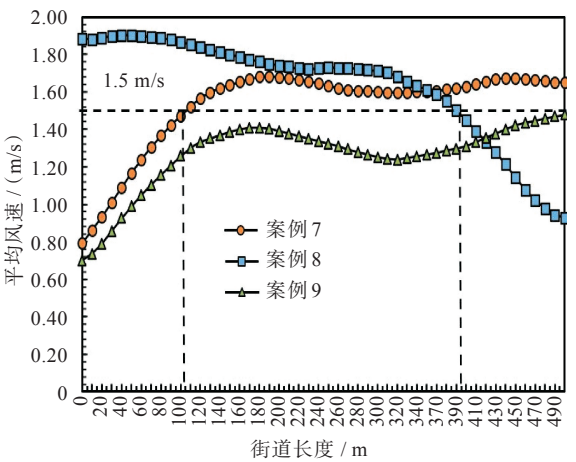


图 6　街道中心线轴向上风速分布曲线

Fig.6　Wind speed values at different distances of the street

通风潜力分析，定义街道朝向与盛行风向夹角阈值，区分通风好与通风差[23]。武汉市常年盛行风向为南、西南和东南，以盛行风向为评价标准对街道朝向进行通风潜力评价。通过评价发现武汉市汉口老城区有通风潜力较好的城市道路。案例研究选择了武汉市汉口市花园小区周围的通风潜力良好的两条次干道(见图 7)，选择依据在于花园小区位于武汉市通风不畅和急迫需要改善的汉口城区中心位置，通过花园小区街道的规划改善，对于汉口中心城区通风效能和活跃度提高具有重要现实意义。除此之外，花园小区街道朝向近似为东西和南北朝向，主导风向为南风，该街区为居住用地，居住住宅符合理想模型的模拟优化对象，因此，该小区的通风边界条件和建成环境接近于前文模拟的理想模型。

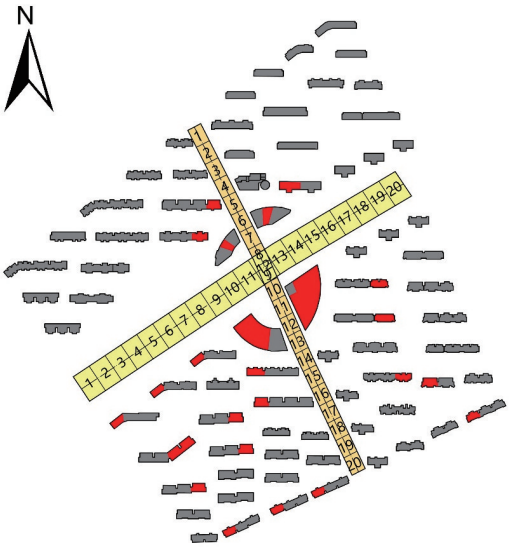


图7 武汉市主城区街道通风潜力GIS评价图与花园社区街道规划前后

Fig. 7 GIS evaluation map of the main urban area in Wuhan and Hankou Garden Community before and after planning

将东西向街道和南北向街道划分为单位格宽度为26 m的20个单元，通过CFD数值模拟和空间句法分别计算出20个单元的风速和全局整合度值，空间句法Depth map和CFD数值模拟设定的初始条件与前文相同（见图7）。结合前文的整合度与风速的耦合分析，对花园小区进行规划改造，目的在于不降低通风风速的情况下，提高街道的全局整合度。其中红色为删除的建筑，灰色为保留的建筑（见图7）：（1）规划后仍保持建筑的前后对齐并列；（2）规划后仍保持建筑单体的矩形形状，不增加建筑前后错接的建筑形态；（3）规划保留建筑前后错位布置，不增加建筑的前后错位布置；（4）增加沿街建筑的出口大小，缩短沿街建筑的长度，街区内部缩减建筑的长度，尽可能使建筑前后对齐并列，为通风开辟通风路径；（5）将围合式交叉口设置为半开敞式。

图8中，街道上通风良好的区段为东西向街道的1–11单元，和南北向街道1–6单位以及14–20单元，但是全局整合度分布不密集，可达性和通风不耦合。通过规划措施着重提高该区段的全局整合度，同时风速不降低或略有增加。全局整合度值较高的区域主要位于东西向街道的交叉口，最高值达到15.23，东西向街道上非交叉口区域的全局整合度值范围为11.5~12.6。通风良好的东西向街道单元为1–11，其风速保持在2.0~3.0 m/s。南北向街道1–6单元和14–20单元风速保持在1.5~2.5 m/s，南北向街道1–6单元的全局整合度平均值为11.81，14–20单元全局整合度的平均值为

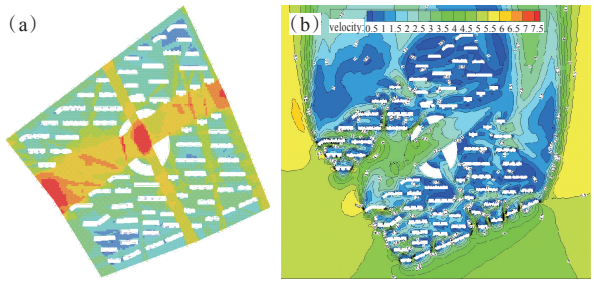


图8 汉口花园小区规划前全局整合度和风速分布：（a）全局整合度，（b）通风风速

Fig. 8 Global integration index and wind speed distribution map of Hankou Garden Community before planning: (a) The global integration index, (b) The wind speed

11.87。街道其余部分风速较低，部分街道位于风影区。由此可见，规划措施的目的是提高街道单元的全局整合度，同时具有良好的通风效率，使通风良好的区域与活跃度高的区域重叠。通过规划措施的改造后（见图9），东西向道路1–11单元的整合度得到明显增强，东西向交叉口的整合度达到了17.54，1–11单元的整合度平均值达到了16.10，南北向街道的1–6单元和14-20单元的整合度得到一定程度的增强，南北向街道的1–6单元的整合度平均值达到了13.21，南北向街道的14–20单元的平均值达到了12.81。东西向街道1–11单元、南北向街道1–6单元和14–20单元通过建筑形态布局的规划措施成为全局整合度相对较高区域。

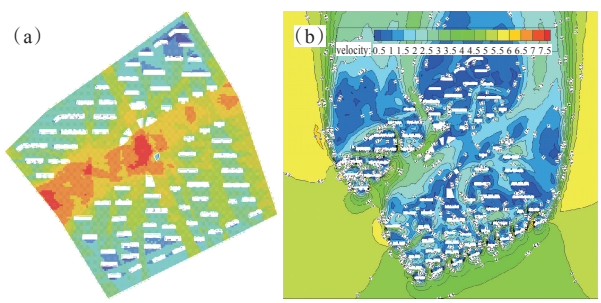


图9 汉口花园小区规划后全局整合度和风速分布：（a）全局整合度，（b）通风风速

Fig. 9 Global integration index and wind speed distribution map of Hankou Garden Community after planning: (a) The global integration index, (b) The wind speed

采用TECPLOT对街道风速进行统计，发现东西向街道1–11单元的平均风速高于2.0 m/s，属于强风区，规划后的风速曲线要明显高于规划前的风速曲线（见图10，图11），其中，规划后最高风速为4.8 m/s，规划前最高风速为3.2 m/s，风速得到了显著增强，同时，通过对沿街建筑群空间形态进行改善后，全局整合度平均提高了3.0；南北向街道

1–6单元中，规划后平均风速高于2.0 m/s，属于强风区，而在没有改善沿街建筑群空间形态之前街道3–6单元为弱风区；规划前和规划后14–20单元基本属于强风区，同时，南北向街道1–6单元和14–20单位的全局整合平均增加了1.5。通过规划措施的改造，规划前强风区的风速和全局整合度都得到了进一步增强，街道空间中强风区与活跃度高的区域基本重合，耦合度得到很大程度的提升。

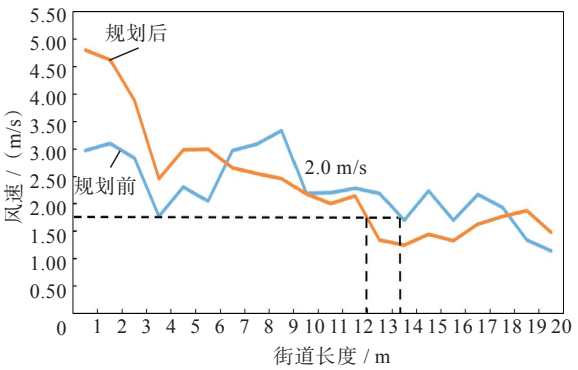


图 10　规划前和规划后东西向街道单元风速分布曲线

Fig. 10　The wind speed distribution map of the horizontal street before and after planning

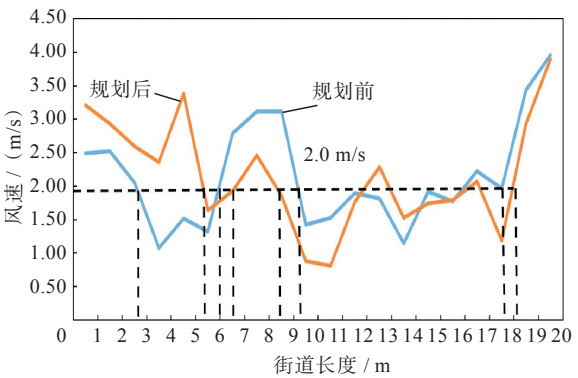


图 11　规划前和规划后南北向街道单元风速分布曲线

Fig. 11　The wind speed distribution map of the vertical street before and after planning

3　结　论

本文结合空间句法和CFD技术对街道可达性和通风效率进行了定量分析，得出结论：(1)沿街建筑群中间左右错位布局的通风效果最明显，但全局整合度最低，前后对齐并列式全局整合度指标最高；(2)沿街建筑群前后错接式的形态通风效果明显最高，但全局整合度最低；(3)沿街建筑群前后错位布局的全局整合度最高，显著高于前后对齐并列布局，但通风效果明显低于前后对齐并列布局；(4)沿街迎风面较长的通风效果较好，但全局整合度最低，沿街迎风面较短的全局整合度最高，但通风效果不理想。

将结论应用于武汉汉口花园社区，规划措施增强了街道的可达性和活跃性，强风区与高活动区明显重合，但也存在以下不足：(1)沿街建筑物的长度缩短，街道的可达性在很大程度上得到改善，但街道失去了通风的峡谷效应，风速增强不显著；(2)改变路口建筑造型，将围合布局改为半开放式，在路口东南角增加塔楼地标建筑，旨在提高风速。但是，塔楼的迎风面太小，无法将上层高速空气引入地面层，风速增加不明显。十字路口西南部的半圆形建筑改为开放式建筑，形成通风路径，由于前排建筑密集遮挡，通风效果不佳。

参考文献

[1] WONG M S, NICHOL J E, TO P H, et al. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis[J]. Building and Environment, 2010, 45: 1880–1889.

[2] GHIAUS C, ALLARD F, SANTAMOURIS M, et al. Urban environment influence on natural ventilation potential[J]. Building and Environment, 2006, 41: 395–406.

[3] 罗文静，方可，吴啸，等. 以活力为导向的第三空间城市设计模式研究——以武汉为例[J]. 城市规划，2023，47(7)：64–74.

[4] 韩瑞娜，杨东峰，魏越. 街道可步行性对老年人活动能力的影响研究——以大连主城区为例[J]. 新建筑，2023(3)：135–141.

[5] NAG D, SEN J, GOSWAMI A K. Measuring connectivity of pedestrian street networks in the built environment for walking a space syntax approach[J]. Transportation in Developing Economies, 2022, 8: 1–19.

[6] CHIARADIA A, HILLIER B, BARNES Y, et al. Residential property value patterns in London: space syntax spatial analysis[C]. Stockholm: KTH, 2009.

[7] 郭华贵，詹庆明. 基于句法和数值模拟的可认知空间风环境优化[J]. 规划师，2015，31（增刊1）：300–305.

[8] 林博，赵璋. 城市街道空间集成度与人流量的关联性分析研究——以牛津为例[J]. 中国水运，2018，18(3)：60–62.

[9] 胡扬，王雷. 街道空间平面指标对步行者路径的影响——四个步行街区的比较分析[J]. 新建筑，2021(2)：31–36.

[10] 王肖惠，叶宇，杨兰，等. 基于格网尺度的新城区可持续空间形态要素测度研究——以宁波鄞州新城区为例[J]. 热带地理，2023，43(10)：1929–1939.

[11] MAFFINI A L, MARASCHIN C. Urban segregation

and socio-spatial interactions: a configurational approach[J]. Urban Science, 2018, 2(3):55-67.

[12] HEYMAN A V, SOMMERVOLL D. House prices and relative location [J]. Cities, 2019, 95 (3): 102373-102387.

[13] SAYED K A, TURNER A, HILLIER B, et al. Space Syntax methodology[M]. London:University College London Press, 2014.

[14] 甘月朗,陈宏.空间形态指标对于板式街区通风的适用性分析[J].城市规划,2018,42(12):97-108.

[15] BADY M, KATO S, TAKAHASHI T, et al. An experimental investigation of the wind environment and air quality within a densely populated urban street canyon[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2011, 99: 857-867.

[16] HU C H, WANG F. Using a CFD approach for the study of street-level winds in a built-up area [J]. Building and Environment, 2005, 40: 617-631.

[17] MOONEN P, DORER V, CARMELIET J. Evaluation of the ventilation potential of courtyards and urban street canyons using RANS and LES[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99: 414-423.

[18] CHAN A, WILLIAM T W A, ELLEN S P S. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality—part II: multiple canopies and canyons[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 2761-2772.

[19] KIM H K, SOHN D W. An analysis of the relationship between land use density of office buildings and urban street configuration: case studies of two areas in Seoul by Space Syntax analysis[J]. Cities, 2002, 19(6): 409-418.

[20] HILLIER B, HANSON J. The social logic of space [M]. Cambridge:Cambridge University Press, 1984.

[21] LI R, MAO L. Spatial characteristics of suburban villages based on Spatial Syntax [J]. Sustainability, 2022, 14: 14195.

[22] YE Y, NES A V. Quantitative tools in urban morphology: combining Space Syntax, space matrix and mixed-use index in a GIS framework[J]. Urban Morphology, 2014, 18(2): 97-118.

[23] YIN J, ZHAN Q M, TAYYAB M. The Ventilation Path assessment of urban street in Wuhan[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021, 30 (3): 2877-2889.

本文编辑:张 瑞