关联·机制·治理： 基于微气候评价的高密度城市步行适宜性环境营造研究

Correlation, Mechanism, Control: Research on High-density Urban Pedestrian Suitability Environment
Construction Based on Micro-climate Assessment

西蒙·马尔温 杨俊宴 郑屹 乔纳森·拉瑟福德
Simon Marvin, Yang Junyan, Zheng Yi, Jonathan Rutherford

摘要：适宜步行的城市环境不仅仅包含连续、优美且尺度宜人的步行空间，适宜的温度、风速同样深刻影响着人们在城市中的行走体验。近年来，受全球气候变化的影响，以伦敦、巴黎、布鲁塞尔、巴塞罗那等为代表的高密度欧洲城市出现了过于炎热、寒冷或强风等不适宜的城市微气候，严重影响甚至迫使人们减少或避免在相关城市空间中的步行等户外活动。同时，针对可步行城市的大量既有研究侧重分析城市步行环境中的物质要素及其内在机制，如景观、步行道宽度、休憩设施等，对影响人们户外活动时生理感受的城市微气候要素的研究较少，如温度和风速等。因此，在具体讨论和衡量人们在城市中的步行体验以及提升城市步行适宜性的过程中，是否存在一种新的微观气候治理逻辑值得探索。针对该问题，本文通过分析城市物质空间与城市微气候之间的交互影响，归纳总结出了两者之间的关联机制。进而提出一种行人尺度和以步行适宜性为导向的城市微气候管控策略及治理逻辑，来提升高密度、高强度城市建成区中人们步行时的生理感受，从另一角度优化高密度城市中的步行适宜性，促进以人为本的城市发展。

Abstract: Walkable urban environment not only contains continuous, beautiful and pleasant walking space, but also has a profound impact on people's walking experience in the city due to the appropriate temperature and wind speed. In recent years, under the influence of global climate change, unsuited urban microclimate including too hot or too cold weather or strong wind has seriously affected outdoor activities in European cities with high density, such as London, Paris, Brussels, Barcelona, which forced people to reduce or avoid activities including walking in related urban spaces with harsh microclimate environment. Simultaneously, a large number of existing studies in walkable research field are focusing on the analysis of the physical elements in the urban pedestrian environment, such as landscape, pedestrian path width, recreation facilities, and their internal mechanisms. However, there are few studies on the urban microclimate elements, such as temperature and wind speed, which affect people's physiological feelings in outdoor activities. Therefore, it is worthwhile to explore whether there is a microclimate governance logic in the specific discussion and measurement of people's walking experience and the improvement of walking suitability in cities. Based on this issue, this paper analyses the interaction between urban material space and urban microclimate, and summarizes the correlation mechanism between urban material environment and microclimate. Then, pedestrian-scaled and pedestrian-oriented urban microclimate control strategy and governance logic are proposed to improve pedestrians' physiological feelings during the walking process in high-density urban built environment. In addition, this is to optimize walking suitability in high-density cities and to promote the development of human-oriented city from another view.

关键词：步行适宜性；城市微气候；高密度建成区环境；城市规划；管控策略

Keywords: Walkability; Urban Microclimate; High-density Built Environment; Urban Planning; Control Strategy

作者：西蒙·马尔温，英国谢菲尔德大学教授，谢菲尔德大学城市研究所主任。s.marvin@sheffield.ac.uk
杨俊宴，东南大学建筑学院，教授。yangjy_seu@163.com
郑屹（通信作者），东南大学建筑学院，博士研究生。zhengyi17_seu@163.com
乔纳森·拉瑟福德，法国高科路桥大学技术、区域与社会研究实验室。jonathan.rutherford@enpc.fr

引言

街道是城市中最重要线性公共空间，也是人们在城市室外活动的重要场所。步行是人本尺度下使用及体验城市街道的主要方式。如何塑造优质、美观的步行空间，如何营造舒适、宜人的步行体验成为当前国内外城市街道研究领域所关注的重要问题。大量的既有研究对街道的景观及环境进行了深度且丰富的论述，提出了提升街道空间品质的有效途径及方法。然而，通过观察人们在城市街道中的步行活动现象可以发现，较高的环境品质和优美的景观只是提升人们步行体验感受的一个方面。在景观、铺地等客观物质要素的基础上，适宜的温度、舒适的风速等影响步行者主观感受的因素，同样对城市街道的步行舒适性有着深刻的影响^[1]。基泽尔等（Kiesel et al.）在对欧洲中部热岛效应的研究中就指出了城市的微气候对于人们步行活动的影响。同时，由于城市街道与建筑环境之间的强关联性，这种影响在高密度、高建成强度的城市建成区中尤其明显。科纳斯塔蒂诺夫（Konstantinov）在北欧城市开展的相关研究也再次证明高密度城市环境对城市微气候有着显著影响^[2]。大都市中高密度的建筑布局、不合理的建筑朝向、封闭的建筑围合和较少的开敞空间，往往导致高密度城市建成区中街道的热环境和风环境舒适度均处于较低水平。欧洲大量的城市现状表明，即使街道拥有优美景观，高密度建成区的热岛效应和过强的风速也同样会降低街道的步行适宜性和舒适性。因此，营造舒适宜人的街道微气候环境是提升街道步行适宜性的关键问题和重要途径。基于此，本文综合运用了 ENVI-met^①等工具以及计算流体动力学（CFD: Computational Fluid Dynamics）的通用流体分析软件 scSTREAM 模拟测度了高密度城市建成区的街道微气候环境，通过分析街道微气候与建筑等物质环境要素之间的关系，找寻影响街道微气候的内在机制及原因，并在此基础上提出微气候调控策略，结合景观塑造等优化街道微气候，进一步提升整体步行适宜性。

1 高密度城市建成环境下的街道微气候与步行适宜性

1.1 高密度城市建成环境下的街道微气候问题

世界范围内资本、资源及人口在大城市的聚集，以及城市化进程的推进，使得世界范围内出现了越来越多的以英国伦敦的金融城（图1）、金丝雀中心区、巴黎的拉德芳斯商务区等为代表的城市高密度空间。城市高密度建设及其背后所

反映的城市资源、设施、人口活动的集聚，一方面为所在城市区域提供了更加便利、丰富和高效的生活；另一方面，紧凑高密度的城市空间也产生了一系列的城市环境问题。城市中的街道作为城市中最主要的活动场所，承载着人们日常生活中通勤、游憩、交流、休闲、购物等诸多行为。街道的环境与其周边的建筑有着直接且紧密的关联，建筑的围合形式、形态、密度等要素直接影响着街道的微气候环境，进而影响街道上人们活动时的生理感受^[3]。步行作为城市中人们使用街道的主要方式，步行者的舒适性直接受到街道微气候的影响，微气候也是衡量街道步行适宜性的重要因素^[4-5]。高密度城市建成区中影响步行适宜性的微气候问题主要体现在风舒适性和热舒适性两个方面。

（1）风环境问题

街道空间的风舒适性与周边建筑布局、密度、高度、围合度以及建筑形态密切相关。在高密度城市空间中，高度和密度过大的建筑形态以及不注意朝向的建筑布局，往往导致静风区和强风区的形成，进而影响街道中步行者的风环境物理舒适性^[6]。高密度城市空间中，影响步行舒适性的风环境问题具体表现为，一方面当街道高宽比过大时，近地面气流将直接掠过建筑上方，难以下沉到街道内部，从而形成静风区；另一方面，高密度建成区中不合理的建筑朝向和布局也容易形成“风墙”，进而导致城市空间中静风区的大量且高频出现（图2）^[7]。静风区在夏季对街道的步行适宜性存在较大的负面影响。夏季在处于静风区的街道中步行，会感到闷热和不适，有诱发行人中暑等危害健康的潜在风险。另一方面，高密度建成环境中所形成的狭窄封闭通道，会形成与静风区相反的强风区。在处于强风区的街道中活动，风速过大造成的风压迫会引起行人不适^[8]。同时，街道两侧的外挂

图1 伦敦金融城的高密度城市空间形态

① 由德国美国茨大学（University of Mainz Germany）的迈克尔·布鲁斯（Michael Bruse）开发的多功能城市微气候仿真系统软件，目前被应用于模拟住区室外风环境、城市热岛效应及室内自然通风等方面的研究。

物等有在强风中掉落的风险,也对步行安全造成威胁。另外,由于通风与城市内部散热具有较强的关联性,高密度城市空间中的风环境问题会衍生出影响步行舒适性的热环境问题。

(2) 热环境问题

高密度、窄通道、高高度的城市形态,使得城市密度进一步增加,城市绿化空间逐步被挤占,进而打破了城市空间内的热辐射平衡,高密度城市空间上空的热对流和城市散热受到严重影响,产生了城市热岛效应(UHI: Urban Heat Islands),直接影响人们步行时的舒适性^[9]。夏季时,由于高密度城市区域中普遍存在的硬质地表,以及绿地及开放空间的缺少,来自太阳的热辐射难以被地表吸收,使得高密度城市空间中的地表温度往往比其他区域高出2~5℃。同时,高密度建成环境中建筑形态及组合所导致的无风或静风区,使得热量在静风区内的街道中进一步堆积,来自日照的热辐射难以消散,进而造成街道的空气温度升高。通常人体热舒适度的中性范围是18~23℃^[10],过高或过低的温度都将影响人们在街道步行时的舒适性。过于炎热的温度环境,甚至对城市中行人的健康及生命安全构成潜在的威胁。城市街道的微气候是直接影响人们户外活动等日常生活生理感受的重要因子。因此,在提升城市景观等物质要素的基础上,关注城市街道微气候对提升城市步行适宜性有着深刻的意义。可通过分析影响街道步行适宜性的要素,以及高密度城市空间形态与微气候形成之间的关联机制,探索营造舒适宜人城市微气候的途径和措施,从而提升高密度城市中街道的步行适宜性。

1.2 微气候与步行适宜性

从进行城市户外活动时的人体舒适性角度出发,街道中的景观及环境品质会影响人们使用街道时的美观感受,却不会一定影响人体的舒适性并决定人们是否于此开展活动。例如,位于伦敦的牛津街没有任何绿色植物,但仍然是步行舒适性和休闲适宜性评价较高的城市街道。而影响人们身体舒适度的微气候环境,在一定程度上直接作用于人们步行过程中的客观身体感受,进而决定人们是否在城市中的某一区域

进行户外活动^[11]。城市微气候构成因素主要包括温度、湿度、风速、日照等,这些要素之间相互影响,并共同作用于人们步行时的生理感受^[12]。根据城市微气候主要构成要素的性质和影响人体舒适度的形式,我们可从风环境和热环境两个方面研究微气候与步行舒适度的关联。

(1) 风环境与步行舒适度

作为城市空间与风环境相互作用的结果,风速是影响人体步行舒适度的主要因素。当前对风速的分级主要根据蒲福风级(Beaufort Scale)将风力按强弱划为“0~12”共13个等级。蒲福风级目前仍是世界气象组织所建议的风级标准,其风速相当于地面上10 m高度处风速水平。当风速达到6级时,表现为撑伞有困难,说明人在户外的行为活动已经受到影响;而当风速达到8级以上时则极有可能危害人的生命财产安全。蒲福风级对于确定影响人活动以及风安全的风速标准具有一定的指导意义,但由于其反映的是地面上10 m高度处的风速水平,并不能完全等同于步行尺度下的风速感受,因此需要换算为行人高度1.5 m处的风速值。达文波特等(Davenport et al.)基于蒲福风级对行人高度处人的风舒适度感觉进行了研究,并探讨了行人尺度下不同风速等级对人体舒适度的影响^[13]。

在此基础上,西米乌和斯坎伦(Simiu & Scanlan)提出了一套基于不同行为的临界风速及其频率的评价标准,来评价行人高度处的风舒适度^[14]。如表1所示,当行人高度的风速超过5 m/s时,步行活动时的舒适度将开始下降。索利戈等(Soligo et al.)的研究同样证实了80%的城市户外行走活动发生在平均风速为0~5 m/s区间内^[15]。

综上所述,合理的风速对于提升步行舒适性具有直接作用。其不仅直接影响人体对于风速本身的舒适感受,同时,由于风速与散热之间的强关联性,合理的风速同样有利于提升行人尺度下的温度舒适度。

(2) 热环境与步行舒适度

除了风环境,步行时的热舒适度对于评价街道的步行适宜性同样重要。对热舒适性的评价,主要通过生理等效温度(PET: Physiological Equivalent Temperature)进行热舒适计算,生理等效温度包含热环境中的温度和湿度两个主要因素。

图2 气流受到建筑物遮挡后的分布情况

资料来源:作者根据参考文献[7]绘制

表1 行人高度处风速与风舒适度的评价标准

风速	人的感觉
$V \leq 5 \text{ m/s}$	舒适
$5 \text{ m/s} < V \leq 10 \text{ m/s}$	不舒适, 行动受影响
$10 \text{ m/s} < V \leq 15 \text{ m/s}$	很不舒适, 行动受到严重影响
$15 \text{ m/s} < V \leq 20 \text{ m/s}$	不能忍受
$20 \text{ m/s} < V$	危险

资料来源:作者整理绘制

在风速为 0.1 m/s、水蒸气分压^①为 1 200 kPa（相当于空气温度为 20℃、相对湿度为 50% 时）的普通等温室内环境中，一个着装 0.9 clo^② 从事轻度活动的人，其核心温度和皮肤温度与其所在的实际环境相同，且保持相同的热平衡状态，该等温环境的空气温度就是生理等效温度。通常情况下，PET 值越大表示天气越热，人体舒适性越差。

高密度城市建成环境中，由于地表植被覆盖面积较小，且城市下垫面深色硬质材质及不透水面面积较多，使得城市中通过蒸腾带走的潜热较少；同时，在高密度城市建成区空间及建筑形态的影响下所形成的低风速或静风环境同样会造成不舒适的城市热环境，进而影响人们在户外步行时的舒适性。

综上所述，微气候作为城市生态环境中重要的组成部分，其与城市空间及形态之间的相互关系及作用结果将直接影响城市中人们的步行舒适性。因此，研究步行尺度下城市微气候与城市空间形态、肌理等要素之间的关联机制，探索优化城市微气候的途径和方法，对提升城市步行适宜性具有重要意义。

2 步行尺度下的城市微气候分析

城市中心区是城市各项功能及资源集聚的空间，吸引了大量人群在此进行休息、购物等活动。但由于城市中心区高密度、高强度的建设和发展特征，不合理的建筑布局及空间形态也使得城市中心区成为热岛效应影响最显著的城市空间；同时，高密度建设所形成的建筑间的窄通道和建筑围合等也使得中心区存在大量的强风及静风区，严重影响人们步行和户外活动时的感受。伦敦的金融城、巴黎的老城和拉德芳斯商务区等作为世界范围内知名的商务、商业中心区，其巨型化和多样化的空间形态、建筑高度不断上升的高密度开发和建设模式导致相应的区域出现了愈发不宜人的微气候现状。同时，由于上述中心区内部集聚了大量商业、商务、休闲、文化、娱乐功能及场所，也使其成为当地市民日常活动的重要场所。因此，本文截取典型的高密度城市街区形态单元，分析高密度城市空间中步行尺度下的城市微气候特征以及微气候与城市形态之间的关联机制，并结合国外相关的研

究成果对提升步行适宜性导向下的城市微气候提出相应的优化策略和途径。

2.1 步行尺度下的风环境分析

（1）步行尺度下高密度城市空间风环境测度方法

从 1990 年代起，基于计算机数值模拟的城市风环境研究逐渐成为测度风环境的主要技术方法。穆拉卡姆等人（Murakam et al.）运用计算流体动力学（CFD）计算机数值模拟技术，对从人可感尺度到城市尺度的风环境进行了预测研究，指出城市内部风场的复杂性^[16]。scSTREAM 是目前处于世界领先地位的 CFD 软件之一，近年来被广泛应用于城市风环境的研究中。埃因霍温大学的布劳肯（Blocken）、奥克兰大学的理查兹（Richards）、东京理工大学的义江（Yoshie）均基于 scSTREAM 的模拟软件对欧洲及东亚的城市风环境进行了测度，并证明了使用 scSTREAM 进行风环境研究的可行性与可靠性^[17]。因此，本文首先通过 GIS 平台截取了具有代表性的高密度空间单元，并进行建模，进而将建模完成的三维空间形态单元模型导入 scSTREAM 软件对行人高度（近地面 1.5 m 处）的风环境进行了计算。同时，为了分析在步行尺度下不同的城市空间形态特征对于风环境的影响，本文选择了行人尺度下对风环境具有直接影响作用的建筑密度^③、建筑平均高度^④和建筑围合度^⑤作为评价因子并进行对应的建模（图 3），以分析行人尺度下空间形态对于风环境的影响。

同时，综合索利戈等人的研究结论以及金和鲍伊克（Kim & Baik）针对东亚及欧洲等的高密度城市开展的研究中对于步行风环境舒适度的建议，热舒适性测评一般是在以夏季为代表季节，通过构建不同的风速条件来模拟行人在城市中步行的感受^[15,18]（表 2）。

（2）步行尺度下不同空间形态因子对风环境的影响特征

基于 scSTREAM 对不同空间形态下风环境的计算结果，可以发现步行尺度下建筑密度、建筑平均高度及建筑围合度与风环境具有以下关联特征（表 3）。

① 水蒸气分压：是指空气中，水蒸气单独占有的湿空气的容积，并具有与湿空气相同的温度时，所产生的压力。

② clo，即克罗，是一种计量单位，指在温度为 21℃ 时，一个人在静止的状态下，以生理舒适为标准时所需衣服的保温值。

③ 建筑密度是指所有建筑基底面积与总用地面积的百分比，基于建筑密度的实验模型为：在 200 m×200 m 的方形用地内，建筑单体的基底面积为 20 m×20 m，依次按照 4×4、5×5、6×6、7×7、8×8 的组合等距排列，建筑高度均为 20 m，则其建筑密度依次应为 16%、25%、36%、49%、64%，基本能够反映城市内常见的建筑密度的水平。

④ 平均高度指一定范围的地块内所有建筑高度的平均值，用所有建筑高度的总和除以建筑个数所得值来表示。基于平均高度的实验模型为：建筑按照 5×5 的组合等距排列，建筑密度均为 25%，建筑高度依次为 20 m、40 m、60 m 和 80 m。

⑤ 围合度是指一定范围的地块内所有外侧建筑沿路的边长之和与整个地块边线长的比值。街区的围合度是一个街区建筑空间开放程度的重要表征，能够反映街区内部空间的视线可达性和公众可达性的综合程度，围合度越小表明该街区的开放程度越高，反之亦然。基于围合度的实验模型为：建筑高度保持 20 m 不变，外围建筑采用 4×4、5×5、6×6、7×7 的建筑等距布局，内部同样布局 4 个等距建筑，控制内部建筑空间环境不变，外侧的建筑围合度变化。

首先，通过观察表 3 中不同建筑密度条件下风环境变化的计算结果及特征，可以发现随着建筑密度的增大以及建筑个数的逐渐增多，建筑间距逐渐缩小，地块内风速较大的区域面积大大缩小，外部风难以深入到地块内部。当建筑密度到达 64% 时，在测度模型中形成了大片风速小于 0.3 m/s 的区域。根据表 3 中不同风速所对应步行舒适度的特征，可以发现当风速小于 0.6 m/s 后，将对步行舒适性产生负面的影响^[19]。因此，单从建筑密度方面来看，过高的密度容易在城

市空间中形成无风区域，进而导致闷热和不利于空气流通的空间，对人们的步行舒适性构成负面影响。

其次，建筑高度同样对风环境的形成具有不可忽视的作用，从而影响步行的舒适性。通过对比表 3 中不同建筑平均高度的测度结果，可以发现随着建筑高度的升高，与来风方向平行的建筑间的通道空间内的风速呈现了明显的增大趋势，而建筑背风面空间内的风速却逐渐降低，主要原因是与来风方向平行通道空间高宽比的增大致使“狭管效

图 3 不同密度、平均高度及围合度的空间形态测度模型

表 2 夏季步行尺度下风环境的风速数值评价标准

类型	风速标准（单位：m/s）	特征
1	$V < 0.3$	静风，热舒适性很差
2	$0.3 \leq V < 0.6$	较差的热舒适性
3	$0.6 \leq V < 1.0$	较低热舒适性，可以忍受
4	$1.0 \leq V < 1.3$	基本满意的热舒适性
5	$1.3 \leq V < 5.0$	较好的热舒适性
6	$5.0 \leq V < 5.2$	可以忍受，正常活动受影响，不产生扬尘
7	$5.2 \leq V < 7.1$	可以忍受，正常活动受影响，产生扬尘
8	$7.1 \leq V < 14.0$	不舒适，严重影响正常活动，可能造成危险
9	$14.0 \leq V$	风环境严峻，无法忍受，可能造成危险

资料来源：作者根据参考文献 [15,18] 绘制

表 3 夏季步行尺度下风环境的风速数值评价标准

空间形态因子	测度结果对比	说明
建筑密度		在城市街区内部，行人高度处总体风速水平与建筑密度呈负相关关联，步行舒适度受风速影响，密度越大，步行舒适度越低
建筑平均高度		在城市街区内部，行人高度处总体风速水平与建筑平均高度呈正相关关联，步行舒适度受风速影响，高度越高，风速越强，步行舒适度越低
建筑围合度		在城市街区内部，行人高度处总体风速水平与建筑围合度呈负相关关联，步行舒适度受风速影响，围合度越大，越容易形成静风区，因此步行舒适度越低

应”^①更为突出，同时建筑升高使背风方向风影的影响范围也有所扩大。因此，当密度达到25%时，随着建筑高度的升高，风速在行人尺度上会逐步增大。因此，在具有高密度、高高度的城市CBD中，容易形成强风区和瞬时的湍流^[20]；另外，过大的风速也会使得在城市街道中步行变得愈发困难，从而对步行的舒适性及安全性构成威胁。

同时，在建筑密度与建筑高度的基础上，建筑的围合形式及围合度同样通过风环境对步行的舒适性产生影响。基于scSTREAM对不同建筑围合度条件下风环境的模拟结果可以发现（表3），当建筑高度固定在20m不变时，随着围合度的逐渐增大，地块内部的风速明显减小，迎风面建筑排列得愈加紧密，风就越难以渗透到地块内部，难以形成有效的通风道，进而在城市空间中形成步行舒适性较低的小尺度热岛。

综上所述，当行人在城市中步行时，其生理感受并不会直接源于其所在的城市空间要素，风环境可以被认为是城市空间与步行舒适性之间的传导介质，风环境直接受到空间形态要素的影响，并表现为不同城市空间中的风速状态。根据不同的风速，一方面步行活动直接受到机械风速的影响^[21]。这种影响主要体现在风速过强的情况下，人们的步行活动受到负面影响，甚至存在潜在的安全威胁。以英国为例，受海洋性气候的影响，伦敦市内部分地区在个别天气情况下可以出现风速80 km/h（约22.3 m/s）的极端情况，直接导致人们无法在强风中户外步行；同时，强风吹落的物体也对街道上的行人造成安全威胁。另一方面，风作为城市散热的有效途径，不同的风速同样也会影响城市的热环境，并影响步行时的舒适性。

2.2 步行尺度下的热环境分析

（1）步行尺度下高密度城市空间热环境测度方法

与风环境测度方法相似，步行尺度下高密度城市空间热环境的测度同样是基于计算机模拟软件进行的。对不同空间形态类型的城市单元的热环境进行测度，并比对不同空间形态的测度结果，分析高密度城市空间中不同形态下的热环境特征，进而讨论其对步行舒适性的影响。ENVI-met作为目前被广泛使用的热环境计算机模拟软件，在本文中被用于模拟不同空间形态类型的热环境。在该模拟过程中，在建模时会对城市建筑做少量简化，但保证整体建模结果与现实形态指标的一致。ENVI-met模拟中并不考虑人为致热（指由城市中人类活动所产生的热量）等因素对热环境的影响，其

模拟的是城市空间形态影响下的单纯热环境，并探寻空间形态指标与该热环境的相关性。近些年在城市气候学领域出现了大量基于ENVI-met软件的中微观尺度城市热环境模拟研究^[22]。厄兹凯雷斯特奇（Özkeresteci）模拟线性公园的热环境影响；胡特纳（Huttner）对欧洲城市中心区的热环境进行了模拟，并基于模拟的结果探讨和分析了欧洲不同中心区的热环境特征及形成原因；多米尼克（Dominik）模拟了欧洲不同城市广场设计下的热环境，并进一步分析了不同的广场设计对热舒适度的影响；阿娜·克劳迪娅·卡凡（Ana Claudia Carfan）则研究了巴西圣保罗市的热舒适度。

（2）步行尺度下不同空间形态因子对热环境的影响特征

基于上述热环境模拟测度软件及技术方法，本文对中高、高强度空间形态的热环境进行了模拟分析。由于建筑的布局、高度、密度等既是影响整体空间形态强度的指标，也会对热环境产生影响，因此，在对中高、高强度空间形态进行整体分析的基础上，本文对相关强度空间形态内不同的建筑高度、布局形式及密度等作了进一步对比，讨论不同空间形态对热环境的影响。

高强度空间形态是当下国际大都市普遍存在的形态特征，根据形态组合方式不同，本文将高强度空间形态根据强度的高低特征依次分为高层大体量建筑群、高层围合式建筑群和高层散点式建筑群三类，对各自空间形态影响下的热环境进行模拟测度。

首先，根据测度结果可以发现（图4），由于一般高层大体量建筑四周硬质铺地率高、植被覆盖率低，使得大体量建筑周边阴影覆盖面积较少，不利于地表降温。同时，此类型空间形态中大体量的裙房造成了不利的风环境，在实际情况中，建筑周边的交通产热和建筑空调产热都非常高，导致散热不利，受建筑本身产生的热量影响，沿建筑的步行道舒适性相对较低。

与高层大体量建筑一样，高层围合式建筑群的热环境同样不舒适。通过软件模拟后发现，高层围合式建筑群的较高围合度，容易导致大面积阴影区域以及静风或强风区域出现，不利于内部场地通风散热（图5）。同时，此类型地块一般容纳大量人口和车辆，场地基本被用于地面停车，植被绿化率较低，更加不利于降温。因此，该类型地块的步行热环境舒适性同样较低。

相对前两者，高强度城市空间形态中的高层散点式建筑群形态因其建筑密度低、平均高度高的特点，相较其他中心区高强度空间形态更加有利于风环境的改善和街区内热环境

① 城市风环境的“狭管效应”是由于高密度城市中道路两旁的建筑之间相邻较近，且道路两旁建筑高度较高所形成的街道峡谷，当风进入或遇到这类相对狭窄的街谷时，由于下沉风受建筑及狭窄的通道的阻挡，造成气流的挤压，从而形成湍流、涡流及瞬时强风等不良风环境效应。

图4 高层大体量建筑热环境模拟结果

图5 高层围合式建筑群热环境模拟结果

的优化^[23]。同时，由于散点式建筑群周边存在大量的空间可用于绿化，植物对于热环境的消解作用同样优于其他两种建筑形态，也更加有助于形成舒适的步行环境。

不同于高强度城市空间形态中以高层建筑为主的形态特征，中强度空间形态多由高层和多层建筑混合形成。参照高强度空间形态中不同建筑群的分类方法，根据强度不同，中强度空间形态可由高至低依次分为中高层行列式建筑群、中高层院落式建筑群、多层大体量建筑群和多层围合式建筑群四类。

首先，对中高层行列式建筑热环境的模拟可以发现（图6），该建筑群在特定朝向下可以产生较好的风环境，以利于散热。但是，由于中高层行列式建筑群产生的建筑阴影面积较大，植被覆盖率及不透水地面比成为影响此类型热环境和步行舒适性的主要因素。

相对于中高层行列式建筑群的空间形态，热环境模拟结果（图7）显示，中高层院落式建筑群对太阳辐射利用率高，内部空间通过植被绿化即可有效改善热环境。通过局部增加

建筑高度来提高街区的开放程度即街区空间开敞度，是一种有利于形成较好热环境的建筑形态模式。

多层大体量建筑群的热环境测度结果与高层大体量建筑群的结果类似，因此不再赘述。多层围合式建筑群是在相对完整的独立地块内由多个多层建筑组合形成的较为紧凑的布局方式，是欧洲城市最为典型且大量存在的空间形态，里昂和巴塞罗那等城市均以此形态为主。通过对此类建筑群形态进行热环境分析后发现（图8），具有紧凑形态的多层围合式建筑群，虽然层数不高，但密度较大。其围合的形态导致地块内部相对闭塞，对场地通风散热都产生不利影响，进而降低户外活动时的舒适性。

综上所述，一方面，城市的空间形态对于风、热环境均有较大的影响，并通过微气候进一步影响人们在城市中行走的步行舒适性。同时植被、景观对于改善微气候、提升步行舒适性具有一定的积极作用^[24]。在城市环境中，相对于整体城市空间形态对于中观或整体尺度下城市微气候的影响，依靠植物、景观等改善措施能够在微观城市尺度中更加有效地

图6 中高层行列式建筑群热环境模拟结果

图7 中高层院落式建筑群热环境模拟结果

图8 多层围合式建筑群热环境模拟结果

改善城市物理环境舒适性。因而需要通过环境的控制和空间形态的优化来对城市微气候进行更加深入的改善，从而营造更加适宜的城市步行环境和户外空间。另一方面，通过对风、热环境各自的测度发现，热环境与风环境是紧密关联的。热

环境在某种程度上可以被认为是风环境影响下的结果，因此在以步行适宜性为导向的优化过程中，作为组成城市微气候的主要部分，风、热环境需要被看作一个整体来进行提升。

3 面向步行适宜性的城市微气候优化与环境营造策略

基于上述对步行尺度下城市微气候的分析,文章认为对城市微气候的优化需要结合构成微气候的风、热环境及其相互之间的作用关系,并对两者与城市空间形态之间的关联特征进行具体探讨,来营造具有较高步行适宜性的空间。根据微气候测度的结果,风环境在与空间形态相互作用的同时也在一定程度上影响并决定了城市的热环境。为营造适宜步行的风环境,可以通过主动性的优化策略进行提升,即可以在城市规划、设计及建设过程中对空间密度等指标以及建筑形态因素进行约束和管控,从而营造适宜步行的城市风环境,并进而影响和优化热环境;而对于热环境而言,其作为微气候的现状结果,在实际中很难通过主动性的优化策略单独对其进行提升。因此在塑造适宜步行的热环境时,更多的则是在人为环境控制(control environment)逻辑下的被动优化。

3.1 主动性优化策略

提升适宜步行的微气候主动性优化策略主要是指在城市规划和发展过程中,提出相应的微气候优化策略。比如,悉尼的环境管理法规《环境行动计划 2016—2021》中明确要求新建建筑物应满足地面附近安全性和风舒适性要求,规定所有区域风速不能超过 16 m/s,其中主要人行道、公园和其他公共区域风速不应超过 13 m/s,小路风速不应超过 10 m/s;高层建筑间应设置足够的间距,避免产生“风墙效应”^①,保证适当的风速能吹过市中心。旧金山的总体规划总则中要求公共休闲区及步行区域的风速不超过 5 m/s;美国国家规划管理部门所提出的对于新建建筑进行评估和控制的方法中,要求一年中由新建建筑造成的有效阵风速度超过 13.35 m/s 的时间不能超过总天数的 1%。结合微环境的评价结果、行人尺度下微气候与城市形态的关联机制,在城市规划过程中具体可以通过以下策略优化适宜步行的微气候环境。

图9 斯图加特风廊道规划示意
资料来源:作者根据参考文献[25]绘制

(1) 优化适宜步行的街谷断面

在城市中心区内,高层建筑往往集中布局在主要道路的两侧,形成了较大的街道高宽比,会对街道空间内的空气流通产生较大的影响,合理地优化街道峡谷的断面,对于改善适宜步行的风环境具有积极的作用。其中,顺风街道的断面应向天空逐渐开敞,两侧建筑物应以逐步退入的方式建设,呈现类似“倒梯形”的街道断面,建议高层建筑从其沿街裙房界面后退足够的距离,采用阶梯型的裙房设计则更佳。顺风街道断面从近地面逐渐变得开敞,不仅能够加大街道峡谷的进风量,还有利于街道内的热量和空气污染物向天空逸散,同时在一定程度上也能缓解可能产生的促使风速增大的“狭管效应”^②的强度,使街道环境向有益的方向发展,避免形成强风区。背风的街谷断面可采用街道两侧建筑沿夏季盛行风向呈阶梯型高度变化的设计,引导气流下沉到地面,利于街道近地面空间的气流流动,保持步行尺度下街道的通风,避免静风区的形成。

(2) 优化适宜步行的街区形态

基于对微气候的模拟测度结果,可以发现街区的密度、围合度及街区内建筑的平均高度对步行的适宜性具有重要的影响。因此,通过对街区形态进行有效且合理的规划,从而优化街区内部的微气候对提升街区内部的步行舒适性具有重要意义(图9)。德国斯图加特市的规划为此提供了很有意义的借鉴——规划师利用地形设置了夜间的空气通风廊道,从而在夜间将温度较低的冷空气引入街区内部,优化热环境,以此营造舒适的步行环境。结合规划过程中的管控要素,规划中对适宜步行的街区形态优化策略主要有以下几点:首先,在街区整体设计中,应碎化大体量裙房,街区的迎风面应考虑预留通风间隙,最大限度地外界气流引入街区内部,以促进内部空间散热(图10)。同时,由于城市环境中建筑物的高密度形态会影响步行体验中的风环境,因此合理地控制街区的建筑密度显得尤为重要。作为东亚高密度城市代表的香港,在其《都市气候图及风环境评估标准——可行性研究》报告中提出了关于城市通风性能的说明性方法,规定的缓和性设计措施中要求建筑密度应不超过 65%。针对建筑密度较高的区域,可通过鼓励狭窄街道两旁的建筑物后退、划定“非建筑用地”和创

图10 街区形态优化策略示意

① 风墙效应是由于高密度的城市建筑布局模式,或大体量的建筑形态所导致的对于城市中风流通的阻挡效应。

建更多的开敞空间来降低地区的平均建筑密度，以增加城市街区的透风度，营造适宜步行的微气候环境。另外，街道、广场、公园、绿地等步行及室外活动的主要集中区域是优化微环境、提升步行适宜性的主要城市空间。因此，在规划中一般要求将街区内开敞的广场、公园及绿地等休憩空间布局在夏季盛行风向的迎风位置，以保障公共开敞空间内形成良好的通风环境，同时避免将其布局在冬季盛行风向的迎风位置，防止冬季风的直接灌入，避免为行人带来不适的风环境。另外，广场、公园及绿地等休憩空间应散布于高密度的城市中心区，以提供空气流通的舒缓空间，能够形成顺应夏季盛行风向的连续开敞空间则更佳。

(3) 优化高层建筑裙房与主要行人区的关系

为调节优化高层建筑对周边主要行人区风环境的影响，针对不同的风环境情况可采取不同的设计方法。当主要行人区处于高层建筑两侧的角流区覆盖范围时，此时的高层建筑（尤其是超高层建筑）应避免直接紧邻主要行人区，可利用裙房平台形成沿高层建筑下沉气流的缓冲空间，避免下沉气流进一步增大角流区的风速；当主要行人区与夏季盛行风成直角关系处于背风环境时，可将面向主要行人区的高层建筑与裙房平台边缘贴齐，将风引导向下吹至地面，避免气流下沉至裙房屋顶而无法到达地面。通过对于高层建筑裙房的设计及优化，可以主动避免城市建设过程中因不合理的建筑形态而导致的强风区和无风区，以及由此形成的较低热舒适度的街道，有助于将行人尺度上的风速控制在合理的范围内，进而提升和优化街道的步行适宜性。

3.2 被动性优化策略

被动性优化策略是在既有的微气候现状条件下，以营造步行适宜性的空间为导向，通过人为介入和借助相关基础设施等途径对步行尺度下的微气候进行的优化，被动性的优化策略更像是在人为创造适宜步行的微气候条件^[25]。这种人为的环境控制策略已经通过大量的人为微气候营造实验得到了充分的验证，英国康沃尔郡的伊甸园以及谢菲尔德冬季花园（图 11）等均通过人为的环境管控措施，营造了具有适宜步行风速和温度的城市公共空间。另外，结合步行空间景观的微气候优化策略同样对提升步行适宜性具有一定的意义^[25-26]。

(1) 微气候人为控制系统作为城市基础设施

根据被动性优化城市步行尺度微气候途径的特征，被动性的微气候优化策略被认为是城市基础设施的组成部分，通过设置对微气候具有优化作用的基础设施可以在一定程度上改善微气候，进而提高步行的适宜性。相对于主动性的优化策略，城市基础设施层面的微气候人为控制途径更加具象且

往往是通过系统的微环境调节设施实现的。在南欧及东南亚等亚热带及热带区域，为了营造具有较好步行舒适性的城市空间，往往会在主要街道及节点设置自动喷雾装置及大功率电扇用于降温 and 促进街道的通风。相对于主动性的微气候优化策略，对微气候的人为控制系统尽管很难影响或改变宏观或中观尺度下的城市街区整体微气候，但是由于其直接作用于行人的机制和特征，人为控制微气候的设施能在步行者尺度上创造更加舒适和宜人的感受。因此，对于存在过热或通风较差的现状城市空间，可以在城市基础设施层面，通过构建微气候人为控制系统来直接改善和提升行人尺度下的步行舒适性。

(2) 结合景观的舒适微气候人为营造策略

除了在基础设施层面通过人为控制来营造步行适宜性的微气候，结合城市中现有的建筑形态和条件，通过景观手段对微气候进行优化同样是被动性营造步行适宜性的有效途径。通过增加街道上绿化植被的覆盖以及提供遮阴的软硬质空间，能够有效改善步行过程中的人体热舒适度，同时绿化空间也能够为区域提供新鲜、凉爽的空气。另外，对于高密度城市中大量的既有建筑，利用屋顶绿化和垂直绿化来拓展城市绿化空间是十分有效的途径。在各类建筑物和构筑物等的屋顶、露台、天台以及立面上进行立体绿化改造、树木花卉种植等，可以大大增加城市的绿化面积。在建筑物或附属构筑物上利用攀爬植物进行垂直绿化的应用已经十分广泛，意大利米兰的“垂直森林”、巴黎的凯布朗利博物馆（Musée du Quai Branly）、伦敦的雅典娜酒店以及阿姆斯特丹的杜巴罗斯（De Baarsjes）社区，都通过立体化的植物铺设创造出舒适、宜人的生活空间，对人的热舒适度的改善作用较为明显。同时垂直绿化的营造较为简便，兼具较好的景观价值。

4 结语

当前，可持续发展理念对城市建设过程中的宜居性提出了更高的要求。能否在城市街道上安全、舒适地行走是衡量城市宜居性的重要因素。城市的步行适宜性不仅仅受到步行

图 11 谢菲尔德冬季花园步行廊道设计图

资料来源：参考文献 [27]

道连续性、街道界面、铺地、休憩设施等物质要素的影响,作为直接影响人们步行过程中生理舒适性的城市微气候,同样对步行适宜性有着深刻影响。高密度、高强度的城市空间中,不合理的建筑布局、密度和围合度等导致了该城市空间中不宜人微气候环境的出现,进而对城市步行适宜性产生负面影响。因此,本文从微气候评价角度出发,综合分析了高密度城市空间中城市微气候与空间形态的影响特征和机制,以及与步行适宜性的关联性。在此基础上,从主动性和被动性两个方面提出了步行适宜性导向下的城市微气候优化策略,以期营造具有较好步行舒适度的城市空间。然而,由于高层高密度的城市空间是一个非常复杂的系统,对于步行适宜性的影响也是相对复杂的。因此,微气候作为影响步行适宜性的指标之一,其对于步行舒适度的改善仍然存在一定的局限性。街道的高宽比、街道上的业态、机动车对步行的干扰度等因素同样是影响步行适宜性的重要因子,因此,对于步行适宜性的改善仍然需要对其他影响因子进行大量深度和综合的研究。UPI

注:文中未注明资料来源的图表均为作者绘制。

参考文献

- [1] KIESEL K, OREHOUNIG K, SHOSHTARI S, et al. Urban heat island phenomenon in Central Europe[C]. International Conference on Architecture & Urban Design, 2012: 821-828.
- [2] KONSTANTINOV P, VARENTSOV M, ESAU I. A high-density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic[J]. Environmental research letters, 2018, 13(7): 1-12.
- [3] DAVENPORT A G. An approach to human comfort criteria for environmental wind conditions[C]. Stockholm: Colloquium on Building Climatology, 1972.
- [4] LAI X, TANG Y, LI L, et al. Study on microclimate observation network for urban unit: a case study in a campus of Shenzhen, China[J]. Physics and chemistry of the earth, parts a/b/c, 2019, 110: 117-124.
- [5] GAITANI N, SPANOU A, SALIARI M, et al. Improving the microclimate in urban areas: a case study in the centre of Athens[J]. Building services engineering research and technology, 2011, 32(1): 53-71.
- [6] KUBOTA T, MIURA M, TOMINAGA Y, et al. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: development of guidelines for realizing an acceptable wind environment in residential neighborhoods[J]. Building and environment, 2008, 43(10): 1699-1708.
- [7] WONG M, NICHOL J, NG E. A study of the "wall effect" caused by proliferation of high-rise buildings using GIS techniques[J]. Landscape and urban planning, 2011, 102(4): 245-253.
- [8] WHITE B R. Analysis and wind tunnel simulation of pedestrian-level winds in San Francisco[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1992, 44(1-3): 2353-2364.
- [9] ALI-TOUDERT F, MAYER H. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate[J]. Building and environment, 2006, 41(2): 94-108.
- [10] GAGO E J, ROLDAN J, PACHECO-TORRES R, et al. The city and urban heat islands: a review of strategies to mitigate adverse effects[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2013, 25: 749-758.
- [11] KRÜGER E L, MINELLA F O, RASIA F. Impact of urban geometry on outdoor thermal comfort and air quality from field measurements in Curitiba, Brazil[J]. Building and environment, 2011, 46(3): 621-634.
- [12] CHEN L, NG E, AN X, et al. Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach[J]. International journal of climatology, 2012, 32(1): 121-136.
- [13] DAVENPORT A G, GRIMMOND C S B, OKE T R, et al. Estimating the roughness of cities and sheltered country[C]. The 15th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, Ashville, NC: American Meteorological Society, 2000: 96-99.
- [14] SIMIU E, SCANLAN R H, SACHS P. Wind effects on structures: an introduction to wind engineering[M]. New York: A Wiley Interscience Publication, 1978.
- [15] SOLIGO M J, IRWIN P A, WILLIAMS C J, et al. A comprehensive assessment of pedestrian comfort including thermal effects[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1998: 753-766.
- [16] MURAKAMI S, OOKA R, MOCHIDA A, et al. CFD analysis of wind climate from human scale to urban scale[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1999, 81(1): 57-81.
- [17] YANG Y, GATTO E, GAO Z, et al. The "plant evaluation model" for the assessment of the impact of vegetation on outdoor microclimate in the urban environment[J]. Building and environment, 2019, 159: 106-151.
- [18] KIM Y H, BAIK J J. Maximum urban heat island intensity in Seoul[J]. Journal of applied meteorology, 2002, 41(6): 651-659.
- [19] MAO J, FU Y, AFSHARI A, et al. Optimization-aided calibration of an urban microclimate model under uncertainty[J]. Building and environment, 2018, 143: 390-403.
- [20] WANG Y, NI Z, CHEN S, et al. Microclimate regulation and energy saving potential from different urban green infrastructures in a subtropical city[J]. Journal of cleaner production, 2019: 913-927.
- [21] RATTI C, RICHENS P. Raster analysis of urban form[J]. Environment and planning b, 2004, 31(2): 297-310.
- [22] TOPARLAR Y, BLOCKEN B, MAIHEU B, et al. A review on the CFD analysis of urban microclimate[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2017, 80: 1613-1640.
- [23] WONG G K L, JIM C Y. Urban-microclimate effect on vector mosquito abundance of tropical green roofs[J]. Building and environment, 2017, 112: 63-76.
- [24] DIMOUDI A, KANTZIOURA A, ZORAS C, et al. Investigation of urban microclimate parameters in an urban center[J]. Energy and buildings, 2013, 64: 1-9.
- [25] MAO J, YANG J H, AFSHARI A, et al. Global sensitivity analysis of an urban microclimate system under uncertainty: design and case study[J]. Building and environment, 2017, 124: 153-170.
- [26] SHIRZADI M, NAGHASHADEGAN M, MIRZAEI P A. Developing a framework for improvement of building thermal performance modeling under urban microclimate interactions[J]. Sustainable cities and society, 2019, 44: 27-39.
- [27] ADDIS B, CRIPPS A. Assessing the environmental impact of innovative Glulam timber construction used at Sheffield Winter Gardens[R]. London: Department for Trade & Industry Fast Track Programme, 2002.

(本文编辑: 顾春雪)