

DOI: 10.5846/stxb201901140117

王凯, 梁红, 施鹏, 赵鸣. 基于“风感”的紧凑型城市开放空间风环境实测和 CFD 模拟比对研究. 生态学报, 2019, 39(16): 6051-6057.

Wang K, Liang H, Shi P, Zhao M. A comparative study of wind environment measurement and CFD simulation in a compact urban open space based on wind sense. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6051-6057.

基于“风感”的紧凑型城市开放空间风环境实测和 CFD 模拟比对研究

王 凯¹, 梁 红¹, 施 鹏², 赵 鸣^{3,*}

¹ 青岛农业大学园林与林学院, 青岛 266109

² 棕榈建筑规划设计(北京)有限公司, 北京 100016

³ 北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要: 城市开放空间的风场不仅影响微环境的“风感”舒适度还影响宏观尺度的城市气候。从景观生态学的角度出发, 首先阐述“风感”的定义, 总结了街道峡谷空间风场的基本规律和特点。运用 Kestrel NK4500 手持气象站对城市开放空间的风环境进行实测, 采用 CFD (Computational Fluid Dynamics) 模拟软件 Fluent 14.0 对不含绿地的同一空间进行风环境模拟, 通过两者的数据比对来研究紧凑型城市开放空间内绿地对行人高度风场的实际干扰程度。结果发现, 紧凑型城市开放空间的“风感”受建筑和绿地空间布局的共同影响。当建筑高于绿地时, 风场受建筑的控制; 当林带高于建筑时, 林带对风环境的影响程度受其疏密度影响。疏密度较高的常绿林带对风向和风速影响很大, 而疏密度较低的林带会影响风速, 对风向影响不大。影响风速的主要因素是空间围合所形成的空气域, 相比实体、多孔介质, 空气域对风的阻力要小的多。如铺装、草坪上方的通风廊道是影响行人高度层通风、导风的关键因素。紧凑型空间内的绿地在行人高度应保持通畅以保证通风, 并通过建立平面和竖向上的通风、导风廊道体系, 促进空气循环。

关键词: 景观生态学; 风环境; 开放空间; 风感

A comparative study of wind environment measurement and CFD simulation in a compact urban open space based on wind sense

WANG Kai¹, LIANG Hong¹, SHI Peng², ZHAO Ming^{3,*}

¹ School of Landscape Architecture and Forest, Qingdao Agriculture University, Qingdao 266109, China

² Palm Architecture Planning and Design (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100016, China

³ School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Wind fields in urban open space not only affect the “wind sense” comfort of the micro-environment, but also the urban climate at the macro-scale. From the perspective of Landscape Ecology, this paper first expounds the definition of “wind sense” and summarizes the basic principles and characteristics of street canyon wind fields. Kestrel NK4500 handheld weather stations are used to measure the wind environment of urban open space. The CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation software, Fluent 14.0, is used to simulate the wind environment in the same space without the green space. The measurement and CFD simulation results are compared to study the actual interference of green space on wind fields at pedestrian height in compact urban open space. It has been found that the “wind sense” of compact urban open space is influenced by the spatial layout of both buildings and green space. When the buildings are higher than the green

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(31800448); 青岛农业大学高层次人才科研基金(6631119001)

收稿日期: 2019-01-14; **修订日期:** 2019-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zm0940@126.com

space, the wind field is dominated by the buildings; when the tree belts are higher than the buildings, the degree of influence on the wind environment is affected by of the tree belts' density. An evergreen forest belt with high density has a profound influence on wind direction and wind speed, whereas a forest belt with low density affects wind speed, but has little effect on wind direction. The main factor affecting wind speed is the air domain formed by space enclosure. Compared with solid and porous media, the air domain has considerably lower resistance to the wind. Particularly, ventilation corridors above paving and lawns are the key factors affecting ventilation at pedestrian height level. The compact green space at pedestrian height should be kept open to ensure ground ventilation, and air circulation should be promoted by systematically establishing horizontal and vertical ventilation corridors.

Key Words: Landsenses Ecology; wind environment; open space; wind sense

“风”是城市气候的主要影响因子之一,在微观尺度上,风关系到微气候的优劣和城市景观的动态效果,影响“景感”的形成;在宏观尺度上,风关系到城市气象和生态系统,影响城市热岛效应和空气清洁度^[1]。景感生态学把人对风的感知称作“风感”,“风感”是景感的八个类型之一。景感生态学是指以可持续发展为目标,基于生态学的基本原理,从自然要素、物理感知、心理反应、社会经济、过程与风险等相关方面,研究土地利用规划、建设与管理的科学^[2]。“风感”舒适度是评价风环境优劣的重要标准,是景感生态规划所需要考虑的重要因素^[3-4]。但是,“风”一直是城市气候因子中最难以捉摸和预测的因子。城市规划设计也很难对风速、风向和风压进行有效把控和应用。城市开放空间在建筑实体形成后,风环境受到了很大的影响,紧凑型城市开放空间的风环境问题尤其突出^[5-6]。由于楼间空气流通通道的位置和大小变化导致风场变化。局部空间的风速比较高,增强至正常风速的3—4倍;局部空间风速过小,出现了风速小于1.5 m/s的静微风^[7]。但事实上,复杂的风环境可以通过改变城市开放空间形态和格局来进行调控,在一定程度上改善地面“风感”^[8-10]。

1 紧凑型城市开放空间形态和风场特点

本论文所研究的紧凑型城市开放空间是在风环境研究中观尺度(100—2×10³ m)下的一种绿色开放空间,如居住区绿地、庭院绿地、城市广场绿地和道路绿化等,它们的风环境受街谷空间影响很大^[11]。典型街谷空间的风环境有一定的规律性,根据Oke的相关研究,不受绿地等因素干扰的理想街谷空间按照前后建筑高宽比(H/W)不同,风场有3种不同的表现,分别是独立粗糙流模式(H/W<0.3—0.5)、滑行流模式(H/W>0.65)和尾流干扰模式(0.5<H/W<0.65)^[12]。但是,大多数紧凑型开放空间所在的街谷空间在实际生活中呈非连续状态,所围合的建筑甚至断裂为点状,加上内部绿地的干扰,其风场比较复杂。

2 研究对象和研究方法

2.1 研究对象

为了研究紧凑型城市开放空间中绿地对风场的影响,本文对不同的紧凑型城市开放空间进行测定和模拟对比研究。研究实测地选在青岛,因为青岛的平均风速较大,风环境具有典型性。但本文仅研究风场的受绿地空间干扰的基本规律,不涉及到城市气候的基本内容。研究对象选择青岛市城阳区翰林苑居住小区,小区为高层、多层、别墅等混合型建筑群。以便于研究在同一风场条件下,不同类型建筑组团的室外风环境情况及其影响因素。在测定点选择时,排除区域温差较大的区域,减低局部热力环流对场地的影响。城市开放空间风感舒适度受到风速、风频、风向变化和人活动状态等的综合影响,但是风速和风向的影响最大^[13],所以本次主要关注这两个气候因子,并对其影响因素进行讨论和研究。

2.2 研究方法

本文通过对行人高度的风场的实测数据和Fluent 14.0的模拟结果的比对来判断开放空间风场受建筑物和绿地的影响程度。

2.2.1 测定仪器和测定方法

实测分为 8 组,共 16 人。运用美国 Kestrel NK4500 手持气象站、指南针和风向仪测定整点前后 30 min 内 1.5 m 高处的即时风场数据。由于本次实测场地面积偏大,按照传统的固定气象站的实测方法很难测定全部风场。因此本次测定对传统方法改进创新,借鉴德国斯图加特市的城市尺度风场数据收集采用车载气象站的方法^[14],以移动方式手持便携气象站来快速测定和记录。测定结束后,在矫正后的卫星地图上标注将测量点的风速和风向,形成二维风向、风速流场图,作为风场比对和分析的基础^[15]。

2.2.2 CFD 模拟方法

为了使模拟结果和实测结果具有可比性,本次风环境的模拟工况以距离该点最近气象站的气象数据为参照,取城市整点风速(整点前 10 min 的平均风速为整点风速)、风向数据作为模型进风口 10 m 高度的风速和风向。为确保比对的有效性,整点前、后 30 min 内的测定数据才能和模拟结果进行比对。

本次模拟运用 Auto CAD 建模,并进行简化和优化,导入 Fluent 14.0 中运用 Solid works 对建筑 3D 模型进行结构化网络划分,并利用 Fluent 14.0 的网格自适应功能加密网格,将建筑的每一边人行区 1.5 m 高度划分 10 个以上的网格等。进行风环境模拟的计算域要求建筑迎风截面堵塞比(建筑面积/迎风面计算区域截面面积)小于 4%;计算域以目标建筑(高度 H)为中心,半径 5H 范围内为建筑计算域,在来流方向上,建筑计算域前方距离外场计算边界要大于 2H,建筑计算域后方距离外场计算边界要大于 6H。墙面、地面的粗糙度长度和粗糙度指数按实际情况设置,其中粗糙度指数为 0.28,参考高度为 10 m。采用标准 k- ϵ 模型进行运算,用指数方程描述气体入口界面的风速变化^[16-17]。

3 研究结果与分析

本研究选择青岛市城阳区翰林苑作为研究对象,主要对高层建筑、多层建筑和别墅区组团的开放空间风环境进行测定和模拟的示意图进行比对,直观再现绿地对风场的干预程度。

3.1 高层建筑开放空间

高层建筑组团 A 区为小区北侧入口。实测的高层分为前后两排,北侧高层高为 50 m,南侧高层高为 39 m。北侧高层 1—2 楼为楼裙,高度约为 9 m。建筑之间的道路宽度为 22 m,路侧建筑间距为 28 m,中间绿化带宽 2.5 m,两侧楼底绿化各为 3 m。按照 15 m×15 m 进行布点实测。测定后,在卫星地图上绘制二维风向、风速实测图(图 1)。风场的 CFD 模拟设定入口风向为 306°(NW),参考风速 U10 为 5.7 m/s,根据模拟结果输出风速矢量图和气流流线示意图(图 2)。

3.1.1 风向比对结果与分析

高层建筑楼间峡谷后方绿地内测定点的风向整体上和 CFD 模拟的风向相同,如测定点 A40、A41、A43、A61、A72、A73、A75、A76。因为绿地植物相对较矮,基本在建筑风场的控制下,且冬天绿地的疏透度较高,所以实测和模拟风场的流向基本保持一致。

右侧后排高层的前方边角处出现了显著的下冲涡旋,并向两侧分流,如 A07、A11、A12、A15、A16、A17、A23;建筑后方的风影区出现了典型的回流涡旋,如 A45、A47—A52,但涡旋并不像 Fluent 14.0 模拟结果一样明显。由此可见,楼间的风场容易受建筑的影响导致风向和风速变化,而出现降低风感舒适度的湍流、涡旋现象。根据实际测定,绿地对高层风形成湍流、漩涡气流具有一定缓解作用,但是总体风向不会发生改变。

后排 A28—A39 测定点风向和 CFD 模拟结果风向差别较大,原因在于该区域左侧道路曲折,道路绿化较多,经过较长距离后风力已经被大大消减,而风向变得不是太明显。

高层后方绿地中的风向除了西北风之外最多的风向为北风,原因在于左侧建筑之间的峡谷来风对中心影响较弱,而受到狭管风力的影响,气流顺着绿地两侧的道路流动,所以测点 A58、A60、A62、A63、A70、A71、A74、A77 的风向为北风。

到绿地后方,随着狭管风风速的降低,绿地内测定点 A57、A61、A65—A71 的风受到了绿地的约束,风着

实测点小空间的方向流动。

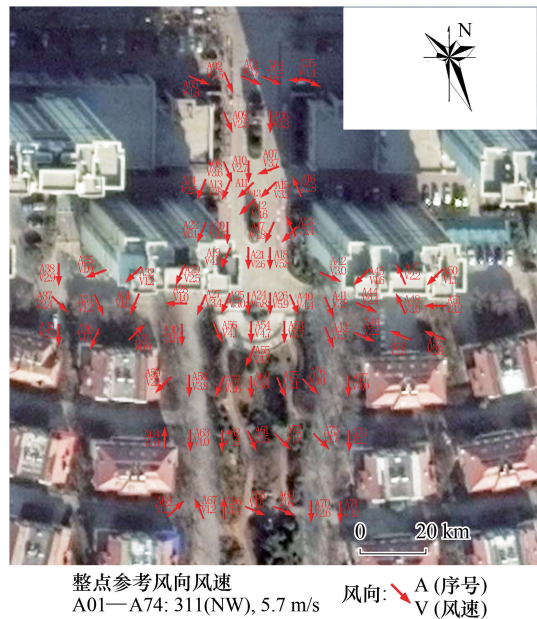


图 1 高层组团二维风向、风速实测图

Fig.1 Two-dimensional wind measurement chart in high building groups

NW:西北向, North west

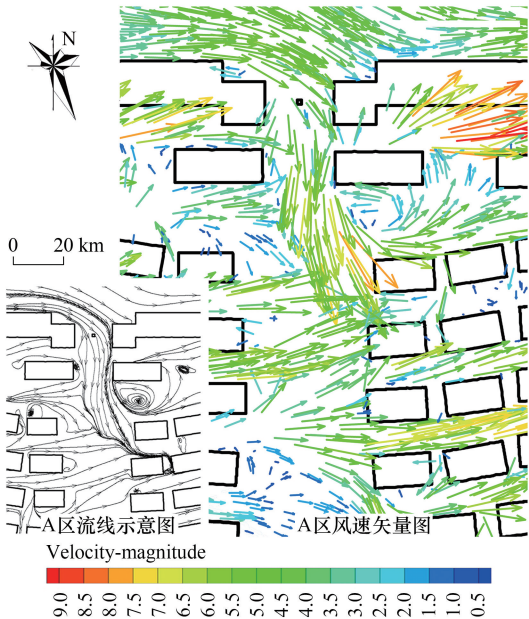


图 2 高层组团风速矢量图、气流流线示意图

Fig.2 Wind speed vector and airflow streamline diagrams in high building groups

3.1.2 风速比对结果与分析

高层之间出现了明显的狭管效应,狭管风增速明显。狭管效应受到后方绿地的干扰,行人高度风速下降明显。A53(6.7 m/s)、A54(4.7 m/s)、A56(4.1 m/s),到 20 m 后 A75(2.1 m/s)、A60(3.8 m/s)、A57(3.6 m/s),挡风绿地宽度约为 10 m,平均风速降低 39%;下一排 20 m 处测定点 A72(1.8 m/s)、A61(1.6 m/s)、A62(1.6 m/s),挡风绿地宽度为 20 m,平均风速降低 49%。而再往后排的测定点 A69(1.6 m/s)、A65(1.5 m/s)、A66(1.4 m/s)的风速平均值维持林间流动的较低风速。由此可知,绿地对风力有削减作用,30 m 宽且疏透度适中的绿地能够有效降低风速,降低峡谷效应产生的不舒适风对人的影响。

对比东侧后排高层四周的测定风速与 CFD 模拟风速,结果发现测定风速小于模拟风速。由此可见,高层下的绿地有助于缓解高层建筑的下冲气流、边角气流和回流涡旋的风力。

3.2 多层建筑开放空间

多层建筑 B 区位于小区的西侧。南北建筑均为 5 层共 16 m,建筑间距为 24 m。建筑间绿化形式简单,前面的带状绿化宽度约为 12 m。建筑西侧有道路,道路外围有宽约 8 m 的疏密度较小的林带,树种为雪松。测定后,绘制二维风向、风速实测图(图 3)。风场的 CFD 模拟设定入口风向为 306°(NW),参考风速 U10 为 3.2 m/s,根据模拟结果输出风速矢量图和气流流线图(图 4)。

3.2.1 风向比对结果与分析

当建筑巷道和风向呈 26°夹角,测定风向和模拟风向轨迹基本相同。风从西侧入口进入后,风向从西北向逐步转变成西南向或者西向。由于绿地影响,实际风流线比模拟的气流流线示意图偏折角度小。

根据 CFD 流场模拟,建筑后方都出现了较为明显的风影区涡旋。根据二维风速、风向实测图(图 3)所示,实测点 B12、B15 形成了明显的风影区涡旋,而南侧楼间绿地相应位置涡旋不明显。建筑西侧和后部的绿化是造成测量点风环境差异的主要原因,风的流线因此产生改变。同时,外围的环境变化也造成了风场的变化。



整点参考风向风速
B01—B44: 306°(NW), 3.2 m/s
风向: A (序号)
V (风速)

图 3 多层组团二维风向、风速实测图

Fig.3 Two-dimensional wind measurement chart in multi-layer building groups

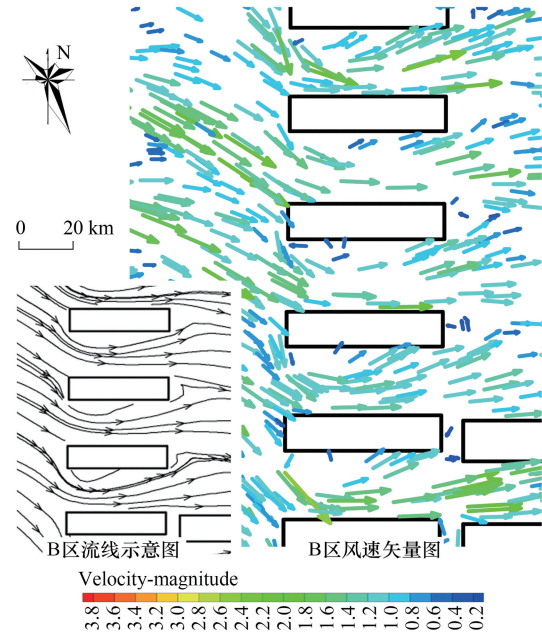


图 4 多层组团风速矢量图、气流流线示意图

Fig.4 Wind speed vector and airflow streamline diagrams in multi-layer building groups

从二维风向、风速实测图(图 4)不难发现,西侧林带和建筑的围合,西侧道路空间形成了空气域,形成了气流通道的,所以 B16、B18—B20、B23 点的风向向南。气流通道上由于建筑阻挡,点 B17、B21 和 B24 的位置出现了小湍流。

3.2.2 风速比对结果与分析

南侧楼间绿地和北侧楼间绿地内的测定点测量风速均小于模拟风速,原因在于绿地对气流的阻滞作用,楼间绿地能够减弱密集型建筑楼间的峡管效应。根据测定风速,建筑周边的密集型常绿林带对风场的影响很大,不仅消弱风速,甚至改变风向。南北楼间绿地的中间测定点的风速较高,接近模拟结果,数据表明下垫面为水泥时,风速相对较高。

通过实测和模拟对比可以看出,西侧密集型常绿林带改变气流方向,减小风速。测定点 B28(1.0 m/s)、B29(1.0 m/s)、B30(1.6 m/s)和 B10(0.9 m/s)、B11(0.7 m/s)、B12(0.6 m/s)及以西的测量点风速均小于模拟风速,也小于它们右侧实测点的风速。再往东侧的测定点 B31(1.9 m/s)、B32(3.1 m/s)、B33(1.9 m/s)和 B07(1.6 m/s)、B08(1.5 m/s)、B09(0.4 m/s),风速逐渐增大。风速变大是因为在距离西侧常绿林的 4H—5H 处,收到了越过西侧林带上方的下冲气流的影响。

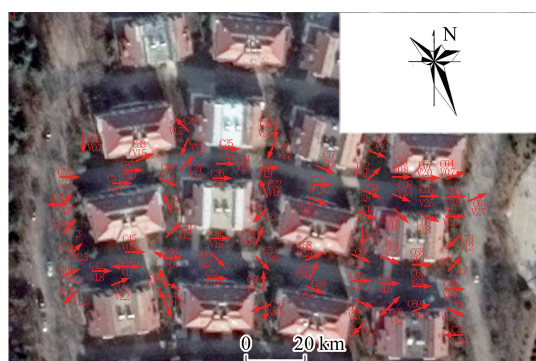
3.3 别墅区开放空间

双拼别墅 C 区位于小区的中部。别墅高度约 9 m,建筑楼间距为 10 m。建筑间道路宽度为 4 m,两侧为绿地。实测后,绘制二维风向、风速实测图(图 5)。风场的 CFD 模拟设定入口风向为 306°(NW),参考风速 U10 为 3.2 m/s。根据模拟结果输出风速矢量图和气流流线图(图 6)。

3.3.1 风向比对结果与分析

实地测定和 CFD 模拟的风向基本相同,气流顺着东西向的建筑街谷空间流动,而建筑南北向的巷道的风向并不明显。这是因为别墅两侧的巷道受到绿地的影响,并位形成南北向气流明显的流动。

别墅山墙之间巷道局部出现了湍流,但大部分测定点的风向仍为西北向。由此可知,虽然绿地对风向有一定的影响,但是气流流动的大方向不会改变。



整点参考风向风速
C01—C44: 306°(NW), 3.2 m/s
风向: A (序号)
V (风速)

图5 双拼别墅组团二维风向、风速实测图

Fig. 5 Two-dimensional wind measurement chart in semi-detached house groups

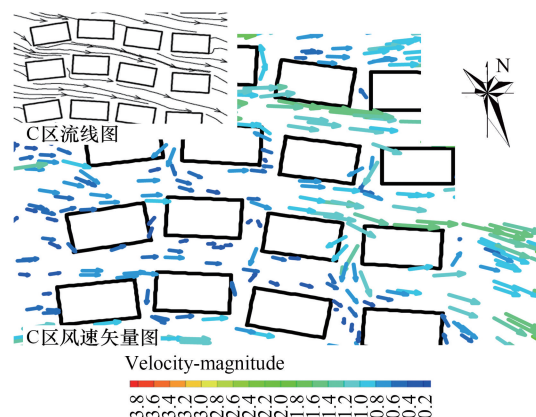


图6 双拼别墅风速矢量图、气流流线示意图

Fig. 6 Wind speed vector and airflow streamline diagrams in semi-detached house groups

3.3.2 风速比对结果与分析

东西走向的建筑峡谷空间的三个平行测点中,中排测点的平均风速最高,上排和下排受到绿地和建筑立面的影响,风速相对较低。

CFD 模拟结果显示后排建筑楼间的狭管效应较强,前排的狭管效应相对较弱。但实际测定结果表明,前后排狭管效应差异不明显。原因测定地点在居住区内部,上风向的建筑和绿地,尤其是西侧的绿化带对横向气流的干扰而使风场均匀化。

4 结论

本文对传统研究方法进行创新,利用实测和比对的方法对行人高度的风场进行研究,紧凑型开放城市空间由于建筑、林带、草地和铺装等上方的通风区域的综合影响,风速风向呈现一定的复杂性,其规律和特征如下:

(1) 紧凑型城市开放空间的“风感”受建筑和绿地空间布局的共同影响。当建筑高于绿地时,风场主要受建筑的控制;当植物高于建筑时,行人高度的风场除了考虑建筑的影响之外,植物对风场的影响较大,林带对风环境的影响程度受林带疏密度影响。

(2) 绿化带的疏密度会影响紧凑型开放空间的风环境,疏密度较高的常绿林带对风向和风速影响很大,而疏密度较低的林带会影响风速,对风向影响不大。一般来说中等疏透度,宽 20—30m 的林带就能有效的降低风速。植物绿化会扰乱建筑间隙的高速气流,使得风场均匀化,有效避免局部强风的出现。

(3) 影响风速的主要因素是空间围合所形成的空气域,相比不透风建筑实体、多孔介质,空气域对风的阻力要小的多。如铺装、草坪上方的通风廊道是行人高度层通风、导风的关键。

(4) 紧凑型开放空间的建筑风影区、边角隅流、下冲气流,狭管风效应同样存在。但是其表现程度强度受绿化带疏密度的影响。疏密度越小,风向无变化或风速略减小;疏密度越大风向会发生偏转,风速减小。

5 紧凑型开放空间“风感”的改善方法与对策

紧凑型开放空间的楼间距是按照最低日照间距标准进行规划,而未考虑迎风建筑后方 5H 的风影区对后方建筑的影响,不合理的规划方式埋下了城市通风不良的“天生”缺陷,所以绿地的“后天”调节措施就显得极为重要。根据紧凑型开放空间风感舒适度相关标准^[13],绿地改善风感舒适度主要方法如下:

(1) 针对目前的紧凑型城市开放空间的通风现状。紧凑型开放空间的绿地空间设计,应以通风为主,减

少不舒适静微风,促进空气流通。在通风不良的区域,尽量减少“乔-灌-草”多层绿化,改为“乔-草”结构。

(2)应建立有效的挡风、导风绿地体系。通过不同空间形态的绿地,利用疏密度不同的常绿或落叶林带进行挡风或者导风,以改善紧凑型开放空间近地面层的风感舒适度,如加快风影区的气流流动,减小峡谷风风速等。尤其是低矮建筑周边的绿地是影响建筑区域室外空间的关键性因素。

(3)开放空间中通风最好的区域是没有任何遮挡的空气域。利用道路,草坪铺装空间所形成的空气域加强通风是改善人行高度风环境,提高风感舒适度最直接也是重要的方法。

(4)绿地建设时,应该预留平面上和竖向上的导风路径,促进气流在平面和竖向上的流动交换,提高空气质量和风感的健康度。

参考文献(References):

- [1] 洪亮平,余庄,李鹏. 夏热冬冷地区城市广义通风道规划探析——以武汉四新地区城市设计为例. 中国园林, 2011, 27(2): 39-43.
- [2] Zhao J Z, Liu X, Dong R C, Shao G F. Landsenses ecology and ecological planning toward sustainable development. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2015, 23(4): 293-297.
- [3] Dong R C, Liu X, Liu M L, Feng Q Y, Su X D, Wu G. Landsenses ecological planning for the Xianghe Segment of China's Grand Canal. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2016, 23(4): 298-304.
- [4] 石龙宇,赵会兵,郑拴宁,于天舒,董仁才. 城乡交错带景观生态规划的基本思路与实现. 生态学报, 2017, 37(6): 2126-2133.
- [5] Givoni B. Climate Consideration in Building and Urban Design. New York: A Division of International Thomson Publishing Inc., 1998: 440.
- [6] 陈士凌. 适于山地城市规划的近地层风环境研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- [7] 冯娴慧. 城市近地面层的风场特征与导风体系构建的研究——以广州、江门为例[D]. 广州:中山大学, 2007.
- [8] 冯娴慧,魏清泉. 城市绿地的导风布局研究. 湖南城市学院学报:自然科学版, 2009, 18(4): 19-21.
- [9] 张琳,刘滨谊,林俊. 城市滨水带风景园林小气候适应性设计初探. 中国城市林业, 2014, 12(4): 36-39.
- [10] Erell E, Pearlmuter D, Williamson T J. Urban Microclimate: Designing the Spaces between Buildings. London and Washington, D. C.: Earthscan, 2011.
- [11] Mills G. Urban climatology and urban design//Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology and the International Conference on Urban Climatology. Sydney, Australia: Macquarie University, 1999: 8-12.
- [12] Oke T R. Boundary Layer Climates. 2nd ed. London: Methuen, 1987.
- [13] 王凯. 城市绿色开放空间风环境设计和风造景策略研究[D]. 北京:北京林业大学, 2016.
- [14] 任超,吴恩融. 城市环境气候图——可持续城市规划辅助信息系统工具. 北京:中国建筑工业出版社, 2012: 37-49.
- [15] 张博. 西安城市街道空间形态夏季小气候适应性实测初探——以雁塔北路和雁南一路为例[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2015.
- [16] 王旭,孙炳楠,陈勇,楼文娟. 基于 CFD 的住宅小区风环境研究. 土木建筑工程信息技术, 2009, 1(1): 35-39.
- [17] Zhang W J, Qi J, Li X. CFD simulation for urban environment planning//Proceedings of 2009 International Conference on Management and Service Science. Wuhan, China: IEEE, 2009: 1-4.