

风环境视野下高层建筑群朝向 ——以杭州钱江新城四季青路地块为例

应小宇¹, 任 昕¹, 阚 琪², Grace Ding³

(1. 浙江大学城市学院 工程学院, 浙江杭州, 310015; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州, 310002;
3. 悉尼科技大学 建筑环境学院 澳大利亚 悉尼, NSW 2007)

摘要: 由于现在城市建筑呈现高层化和密集化的趋势, 高层建筑对其所处地块内的风环境的影响十分显著, 并且进一步影响到其室外行人的舒适性. 改善高层建筑周边风环境是一个亟待解决的问题. 首先, 通过对杭州市钱江新城四季路地块 6 栋高层建筑群的周边风环境进行实测, 筛选出建筑群体朝向对室外风环境影响较大的部位并确定测点. 其次, 针对所发现的风环境不佳问题, 通过建立地块模型, 不断改变各建筑单体的朝向角度, 得到 8 种典型朝向布局. 最后, 利用 CFD 流体力学数值分析模拟软件 phoenics 对 8 种布局进行模拟, 得到人行高度(1.5 m)上的风速比的分布情况. 对比发现, 通过建筑朝向的改变能够达到优化高层建筑群周围风环境的目的, 通过探求风环境与建筑朝向之间的关系, 研究结果为本地区进行高层建筑群体朝向设计时提供参考.

关键词: 风环境模拟; 高层建筑群; 建筑朝向; 风阴影区; 风速比

中图分类号: TU241; TU98

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)06-0884-06

Design analysis of high-rise buildings in the view of wind environment ——A case study of four seasons green block in Hangzhou Qianjiang new city

YING Xiaoyu¹, REN Xin¹, KAN Qi², GRACE Ding³

(1. Department of Architecture, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310002, China;

3. School of Built Environment, University of Technology Sydney, Sydney NSW 2007, Australia)

Abstract: Due to the trend of high-rise and densification of urban buildings, high-rise buildings have a significant impact on the wind environment in their plots, and further affect the comfort of outdoor pedestrians to improve the wind environment around high-rise buildings, which is an urgent problem to be solved. First of all, in this paper, six high-rise buildings in Qianjiang New Town, Hangzhou City, were measured and the location of the building group towards the outdoor wind environment was selected and the points were determined. Then, by constantly changing the orientation of the building blocks, eight typical layouts were obtained. Finally, the CFD fluid dynamics simulation software phoenics was used to analyze the distribution of the wind speed ratio at the height (1.5 m). It is found that the change of the building orientation can achieve the optimization of the surrounding wind environment of the high-rise buildings. This paper, by exploring the relationship between wind environment and building orientation, provides a reference for the design of high-rise building groups in the region.

Key words: wind environment simulation; high-rise buildings; building orientation; wind shade area; wind speed ratio

随着世界人口剧增, 用地不足的问题已经越发的明显, 而解决用地不足问题的最主要途径就是建造高层建筑或者超高层建筑. 在现有中国设计规范上, 针对高层建筑的规范大多局限于消防规范, 日照间距, 而没有考虑地区范围内建筑分布可能造成对于风环境不佳的问题. 随着此类风环境问题的日益突出^[1-2], 例如相邻高层建筑群产生的强气流在冬季使行人感到不适, 在多风季节

引发危险^[3-4]; 不合理的建筑布局或建筑体型造成室外静风区, 在春秋季节不利于污染物、废气扩散, 夏季不利于散热. 因此, 有必要室外风环境视角出发探讨高层建筑群的平面布局问题^[5-7].

目前, 建筑群周围风环境的相关研究主要通过现场实测、风洞试验和计算机模拟三种方法. Murakami 在 1986 年发文认为采用雷诺时均方法的数值模拟, 能够在确保模拟精度的前提下充分

收稿日期: 2017-11-08

修改稿日期: 2018-11-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308496); 浙江省自然科学基金项目(LY18E080025)

第一作者: 应小宇(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事绿色建筑方面研究. E-mail: yingxiaoyu@zucc.edu.cn

利用有限的计算资源,更能适应建筑环境相关研究^[1]。

在风场实验下证明,高层建筑建筑平面分布影响最大的是近地面风,也就是人行高度附近的风场,因此小区域范围内高层建筑分布对于人行高度上的风环境的影响是很明显的,而行人高度的风环境影响着周围道路人群的舒适性与安全性,同时对于建筑周围的污染物扩散与散热也有很大的影响,因此在从风环境层面考虑高层建筑总平面关系是十分的有必要的^[8]。

Michele G. Melaragno 在影响城市建成街区风环境的因素方面做了大量研究,指出建筑高度和宽度,街道的朝向是控制城区街道风环境的主要因素^[9]; Stathopoulos 对某单体建筑和两个并排建筑的风环境进行了研究^[10]; 2008年 Tetsu 实验研究了建筑密度对行人高度平均风速的影响^[11]。O. Coceal 等人的研究关注了小尺度下建筑群布局形态问题,他们以4个交错但匀质分布的建筑立方体为计算模型(建筑密度 $\lambda=0.25$),研究其周边的气流和涡流分布情况;在2008年的研究中,他们将建筑立方体的布局形式拓展到对齐和正交另外两种匀质布局形态,将三种布局对气流的影响进行了对比^[12-13]; 2008年陈飞^[14]从高层建筑平面、剖面、形体设计等几个方面出发,探寻解决高层建筑风环境问题的方法; 2015年段忠诚^[15]等人通过改善建筑外形,达到合理利用高层建筑风能的效果。

总的来看,目前对于中等尺度特定地块内的建筑风环境研究主要侧重于建筑形体、建筑密度以及简单布局的情况下的建筑风环境的分析,在真正进行地块规划设计时,经常由于用地紧张,以及对于日照间距、防火间距的考虑,导致高层建筑群各单体的体型及位置已大致固定,无法做出太大的改动,因此相关研究的成果无法满足城市建设项目的复杂性和多样性需求。这些研究也没有考虑就建筑群在现有大致位置确定的情况下,建筑朝向对于风环境的影响进行较系统的分析与评判。本文通过分析和比较8种在高层建筑群各个单体建筑位置确定的情况下不同朝向对于人行高度上的风速比和风向分析图,得到风环境优劣状况与建筑朝向之间的关系。

1 地区模型的建立以及风环境模拟

1.1 实测过程

通过对日常天气风速数据的研究及实地问卷,发现冬季风速过大问题在钱江新城比较突出。因

此,选择冬季风向频率最高的典型日,安排8个人员分布在该地块内。每人负责一个测点,用风速仪同时记录室外行人高度(1.5 m)的风速。由于实际风速不稳定,因此每人每隔1分钟记录一次,测量总时长为20 min,共获取20个风速测量值。从中得到风速测量最大值和最小值,并将20个风速值的平均值作为测点的实际风速值;与此同时,测量人员记录测点的风向。

1.2 模拟边界条件设定

本文所采用的风环境模拟软件为 Phoenix 是基于雷诺时均方程开发的,在模拟时所需要条件均采用软件自带的功能。初始风的设定如下所述:

由于地表摩擦的作用,越接近地表的风速越小。一般只有离地300 m以上的高度,地表摩擦的作用才逐渐消失,可以在大气梯度的作用下自由流动。因此来流面风速变化规律可以由下述公式来表示。

$$U(z) = U_G \times \left(\frac{z}{Z_G}\right)^\alpha \quad (1)$$

其中: $U(z)$ 为任意高度 z 处的平均风速, U_G 是标准高度 Z_G 处的平均风速,指数 α 为描述地面粗糙度的参数。根据《中国建筑热环境分析专用气象数据》^[16],模拟总标准高度 Z_G 设定为400 m,该高度处 U_G 为13 m/s, α 为0.25。湍流强度假定为地面52 m以上12%^[17]。

1.3 模拟区域大小

目前关于计算机模拟区域大小并没有明确要求。Chang 等人建议建筑模型与模拟区域边缘的距离至少5倍于建筑模型高度^[18]。因此,本文在模拟时采取“试错法”^[19],最终确定的模拟区域大575 m×465 m×250 m(长、宽、高)。

1.4 建筑模型设定

建筑模型中的6幢等高建筑均按照实际地块(图1)上的建筑平面面积建立,分别标记为A、A'、B、B'、C和C'。中国建筑防火规范对于高层建筑之间的建筑间隔距离有着明确的规定。本文从实际角度出发,在不违反防火规范的前提下,同时,根据Xie与Yang在文献[20]中,高层建筑群体设计时应该尽量避免形成“风漏斗效应”以及“狭管效应”^[21]。另外由于A、A'与其他四幢建筑相隔距离较远,且有马路贯穿,因此在建筑朝向布局设计时暂时不考虑。利用穷举法,在原有平面(图2)的基础上,列举了8中不同的建筑朝向布局,根据旋转角度不同,分别命名为10°-0°型、10°-5°型、15°-0°型、15°-5°型、20°-0°型、20°-5°

型、25°-0°型、25°-5°型(图3)。

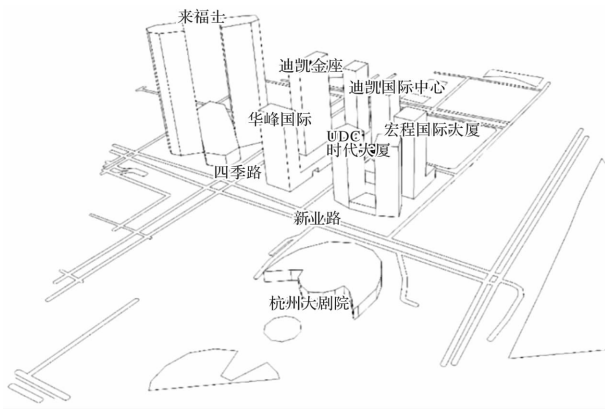


图1 实际地块建筑群

Fig. 1 The actual block building isometric

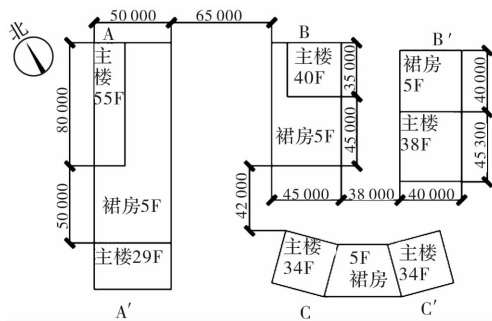


图2 原建筑群平面布局

Fig. 2 The original building group layout

1.4 风环境评价标准

本文研究的是典型的中国东部季风气候区的建筑风环境。在真实环境中的风速、风向处于不稳定状态,同时建筑实地周围并没有地形影响的情况,结合在实地测量的数据,同时根据《中国建筑热环境分析专用气象数据》中的数据,在模拟建筑周围风环境时,设定NNW为主要风向^[16]。

在实际室外环境中,通过比较风速绝对值来比较不同建筑群布局是比较困难的,因为每个布局的初始来风的风速就已经不同。因此,研究人员大都用风速比来衡量建筑布局对风环境的影响程度。风速比是测点(行人高度1.5 m)风速的绝对值与同高度下初始来风风速绝对值的比值。计算公式为

$$R = \frac{V_s}{v} \quad (2)$$

式中: R 为风速比, V_s 为测点风速, v 为初始来风风速^[10]。

Tetsu的研究表明当某区域的风速比大于2.0时,行人会感觉风过于强烈;风速比小于0.5时,该区域风速过低,不利于空气流动^[22]。因此,本文中评价风环境标准为风速比介于0.5~2.0之间。

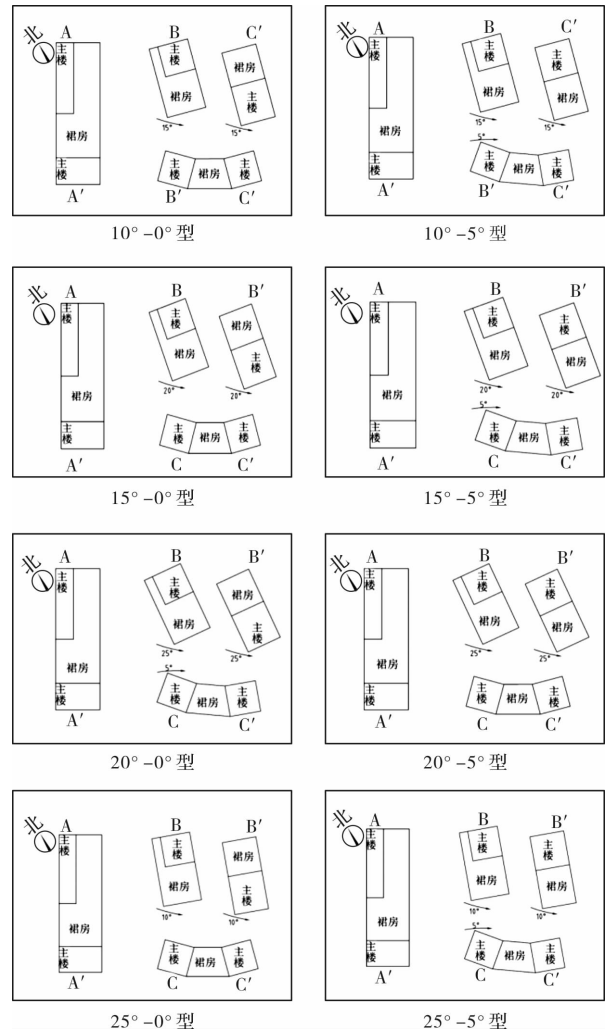


图3 原八种建筑朝向布局(主楼A、A'保持不变,不断改变主楼B、B'、C、C'朝向)

Fig. 3 Eight typical buildings face the layout (Main building A, A' remain unchanged, changing the main building B, B', C, C' orientation)

2 对于 phoenics 模拟结果分析

2.1 风速测点的选取

在实地风速测量的中,针对主要行人通道及人流量,选取了8个测量点进行风速测量(图4),对于实地测量的大量数据方差计算(图5)和风速平均值计算,进行风速大小和风速离散比分析,同时根据 phoenics 模拟风环境的结果(图6)测点3的风速离散程度比高于其他测量点,可以发现同实际测得风速所发现的一样,测点2和测点3的风速较为紊乱,而测点4风速比较低,因此本文选取测点2、3、4作为风速测点,通过改变建筑朝向来优化该地区的风环境(图7)。

2.2 测点2、3、4结果分析

图8给出了在各建筑朝向下室外人行高度(1.5 m)出的风速比等值线图。

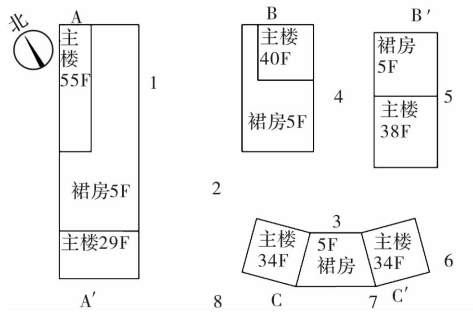


图4 测点分布

Fig. 4 Measuring point distribution

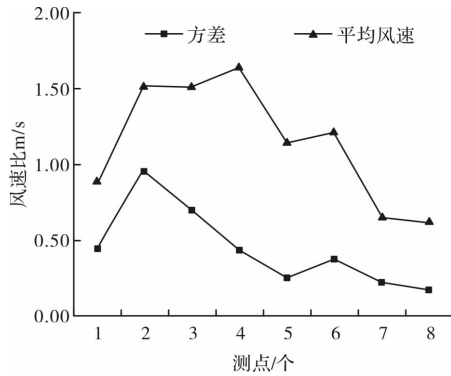


图5 实际测量平均风速与离散程度

Fig. 5 The actual measurement of average wind speed and degree of dispersion map

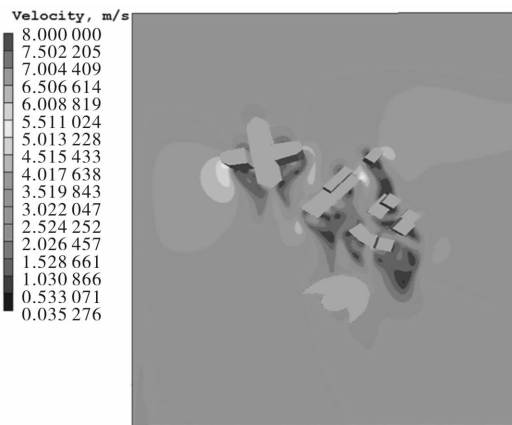


图6 原建筑布局风环境模拟图

Fig. 6 The original building layout of the wind environment simulation

从图2中可以直观的看到随着建筑朝向的改变,由于建筑物对于风的遮挡,测点4的风速比明显增大了.以 $10^{\circ}-0^{\circ}$ 型、 $15^{\circ}-0^{\circ}$ 型、 $20^{\circ}-0^{\circ}$ 型、 $25^{\circ}-0^{\circ}$ 型为例,在C、C'固定的情况下,测点4的风速比大小为 $10^{\circ}-0^{\circ}$ 型 $<15^{\circ}-0^{\circ}$ 型 $<20^{\circ}-0^{\circ}$ 型 $<25^{\circ}-0^{\circ}$ 型.风速比增大的程度,随着建筑旋转角度的增大而增大,而测点2、3在随着建筑朝向的改变时,并没有按照此规律,测点2是在 $15^{\circ}-5^{\circ}$ 型时,风速比达到了最大,测点3在 $20^{\circ}-5^{\circ}$ 型时达到了最大.同时进行横向观察可以发现,C、C'在进行建筑朝向

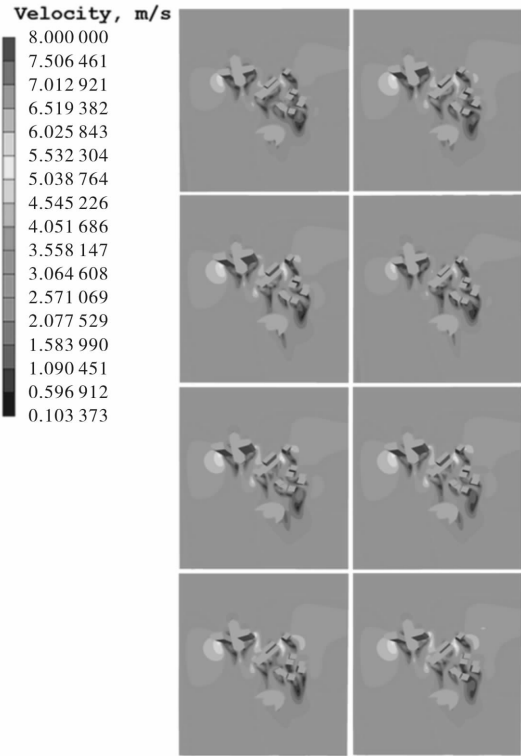


图7 测八种典型布局的风速分布图

Fig. 7 Eight typical layout of the wind environment simulation

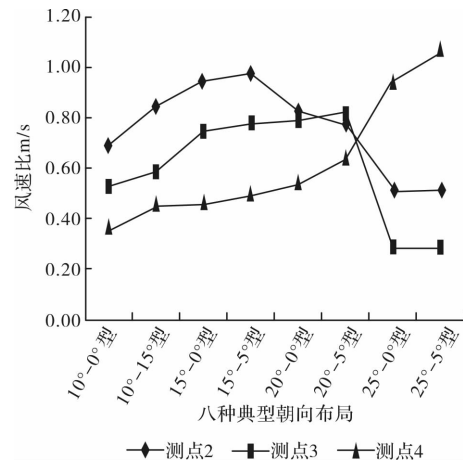


图8 八种朝向布局中测点2、3、4风速比

Fig. 8 Eight kinds of orientation measuring points 2, 3, 4 wind speed ratio

改变后,测点2、3、4的风环境略优.

在 $10^{\circ}-0^{\circ}$ 型和 $10^{\circ}-5^{\circ}$ 型中,建筑物旋转 10° 度,相比原有建筑朝向来看,测点2、3的风环境分布,明显得到了一定的改善,测点周围的风速变化降低,由测点周围的风速变化的减少,来优化测点2、3的风速紊乱问题.而测点4的风速比相比于原有布局的0.38提高到了0.36和0.45,有了略微的提升,但是仍然存在风速比过低的问题,对于风环境有了一定的优化,但是在建筑间距允许的情况下,仍然可以进一步优化.在 $15^{\circ}-0^{\circ}$ 型、

15°-5°型中,测点2的风环境分布有了一定的提升,测点3的东西侧的风环境也得到了进一步的优化,但是测点4上下两端的风阴影区却扩大了,风速比为0.46和0.49几乎没有发生改变.在20°-0°型、20°-5°型中,测点2、3的风速比与前4中布局形式几乎相同只有了略微的降低,但是测点4上下两端的风阴影区达到了最小,风速比也有了明显的提升,同时20°-0°型与20°-5°型相比,20°-5°型的风环境更优,同时在B建筑下靠南一侧种植绿色植物,可以更进一步解决由于风速比较低造成的空气不流通的问题^[5].在25°-0°型、25°-5°型中,测点2的风速比为1.03和1.08,测点4的风速比到达最高值1.02和1.07,风阴影区基本消失,但是却在测点3形成了大范围的风阴影区,而测点3位于该建筑的主要人流通道,对于该地区的实际使用人群形成了负优化.

纵向来看对于测点2而言,建筑朝向改变的同时,对于测点2改变的幅度并不大,但是对于测点2南北两侧的风环境分布有着明显的提升,在10°-5°型和20°-5°型时,风环境分布最为适宜.对于测点3而言,随着建筑旋转角度的逐步增大,该点风速比逐渐减小,但是过低的风速比,会导致建筑物周围的空气不流通,无法起到优化的作用,因此可以得出,测点3的风环境在15°-0°型、15°-5°型和20°-5°型最为适宜.对于测点4,其主要的问题为由于建筑物的遮挡所形成的风阴影区,通过建筑朝向的改变,增加空气的流通,在20°-5°型、25°-0°型和25°-5°型时达到最优.因此对于该地区建筑的朝向的优化应该遵循20°-5°型.

在进行该地区模拟时,我们可以发现在建筑C、C'相同的情况下,关于测点2、3、4、B、B'旋转角度与风速比是呈现抛物线变化的.通过计算散点图分布情况,然后进行曲线拟合,可以得到一个在成“U”型建筑群平面上关于旋转角度 x (取值范围为-90°~90°)与人行高度风速比 y 的变化的曲线(图9).测点2、3、4的公式分别为

$$\text{测点2: } y = -0.0057x^2 + 0.1854x - 0.5887 \quad (3)$$

$$\text{测点3: } y = -0.0072x^2 + 0.2387x - 1.1583 \quad (4)$$

$$\text{测点4: } y = 0.0031x^2 - 0.0716x + 0.7873 \quad (5)$$

曲线公式表明,对于测点2、3, y 随着 x 的值先增大后减小,当 x 取值为16.3和16.6时 y 值达到最大.随后随着 x 值的增大而减小,而测点4在 x 取值为11.4时, y 值达到最小值,在 $x > 11.4$ 时随着 x 值的增大而增大.

利用该公式,我们可以发现在B、B'旋转20~

25°时,C、C'旋转0~5°的情况下,该地区的风环境会有一个比较合理的风速比.

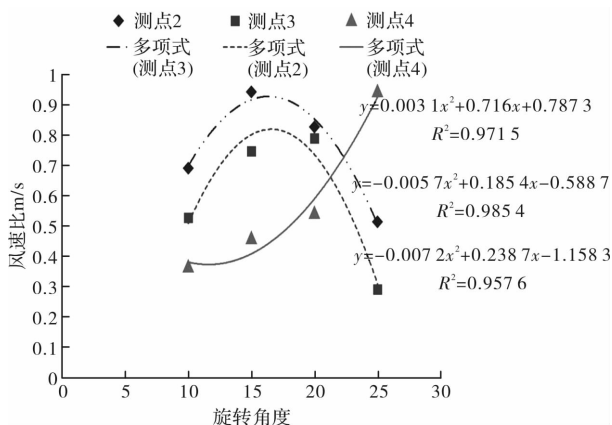


图9 旋转角度与平均风速比曲线关系

Fig. 9 Relationship between rotation angle and average wind speed ratio curve

3 结论

通过改变建筑群中单体建筑的朝向,得到8种不同的建筑朝向布局类型.通过对比在行人高度(1.5 m)处的风速比和测点周围的风环境分布情况,得到在仅改变建筑朝向下对于该地区风环境优化的最优解.具体如下:

(1) 对于该地区,在20°-5°型时对于建筑群周围的风环境有较大的改善.

(2) 在建筑群存在“U”型平面时,对于本文所选取的2、3、4个测点,竖排建筑旋转角度与测点的风速比存在二次函数关系分别为

$$\text{测点2: } y = -0.0057x^2 + 0.1854x - 0.5887 \quad (3)$$

$$\text{测点3: } y = -0.0072x^2 + 0.2387x - 1.1583 \quad (4)$$

$$\text{测点4: } y = 0.0031x^2 - 0.0716x + 0.7873 \quad (5)$$

(3) 在建筑旋转角度过程中,建筑的背风面始终会形成风阴影区,结合周围建筑,适当的旋转角度会形成最小的风阴影区.

本文对于现有国家用地紧张的情况进行了一定的考虑,在不改变建筑分布的情况下,达到对于中等尺度内高层建筑群周围人行高度上风环境的优化.以上结论为高层建筑群布局规划提供了明确的参考意见.

本文尚有一些不足之处,实测数据只测得了冬季时的数据,并没有对其他3个季节进行实测;同时并未考虑地块3倍大小以外高层建筑对于该地块风环境的影响;模拟中用地面粗糙系数代替了绿化对风速的影响.以上这些不足将在下一步研究中解决.

参考文献 References

- [1] MURAKAMI S. Current status and future trends in computational wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1986, 1: 3-34.
- [2] PING H. Numerical simulation of air flow in a urban area with regularly aligned blocks[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1997, 67/68: 281-291.
- [3] 牛海燕, 刘敏, 陆敏, 等. 中国沿海地区近 20 年台风灾害风险评价[J]. 地理科学, 2011, 31(6): 764-768.
NIU Haiyan, LIU Min, LU Min, et al. Risk assessment of typhoon disasters in China's coastal areas in recent 20 years[J]. Geographical Science, 2011, 31(6): 764-768.
- [4] 温家洪, 黄蕙, 陈珂, 等. 基于社区的台风灾害概率风险评估——以上海市杨浦区富禄里居委地区为例[J]. 地理学, 2012, 32(3): 348-355.
WEN Jiahong, HUANG Hui, CHEN Ke, et al. Probabilistic risk assessment of typhoon-based disasters in communities—a case study of Fululi Juwei Committee in Yangpu District, Shanghai [J]. Geographical Science, 2012, 32(3): 348-355.
- [5] 应小宇, 朱炜, 外尾一刚. 高层建筑群平面布局类型对室外风环境影响的对比研究[J]. 地理科学, 2013, 33(9): 97-101.
YING Xiaoyu, ZHU Wei, HOKAO K. A comparative study on the impact of plane layout types of high-rise buildings on outdoor wind environment [J]. Geographical Science, 2013, 33(9): 97-101.
- [6] 香港中文大学. 香港中文大学风环境评估报告[R]. 香港: 香港中文大学建筑工程学院, 2009.
Hongkong Chinese University. Hongkong Chinese University College Wind Reporting[R]. Hongkong: The Chinese University of Hongkong Faculty of Engineering, 2009.
- [7] 江亿. 中国绿色建筑报告[R]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
JIANG Yi. China green building report [R]. Beijing: China Construction Engineering Works, Inc. 2006.
- [8] TSANG C. W, KWOK K. C. S, HITCHCOCK P. A. Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium[J]. Building and Environment 2012(49): 167-181.
- [9] MICHELE G Melaragno. Wind in architectural and environmental design[M]. New york: Van Nostrand Reinhold Print, 1982.
- [10] STATHOPOULOS T, BASKARAN A. Computer simulation of wind environment conditions around buildings[J]. Engineering Structures, 1996, 18(11): 876-885.
- [11] 马剑, 陈水福. 平面布局对高层建筑群封环境影响的数值研究[J]. 浙江大学学报, 2007, 41(9): 1477-1481.
MA Jian, CHEN Shuifu. Numerical study of the influence of layout on the environmental impact of high buildings [J]. Journal of Zhejiang University, 2007, 41(9): 1477-1481.
- [12] COCEAL O, THOMAS T G, CASTRO I P, et al. Spatial variability of flow statistics within regular building arrays [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2007, 125(3): 537-552.
- [13] COCEAL O, THOMAS T G, CASTRO I P, et al. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 121(4): 49-519.
- [14] 陈飞. 高层建筑风环境研究[J]. 建筑学报, 2008(2): 72-77.
CHEN Fei. Study on wind environment of high-rise buildings [J]. Architectural Journal, 2008(2): 72-77.
- [15] 段忠诚, 高山兴, 李佳珩. 浅析高层建筑风环境的控制与利用[J]. 建筑技艺, 2015(1): 131-133.
DUAN Zhongcheng, GAO Shanxing, LI Jiajun. Analysis on the control and use of wind in tall buildings [J]. Architecture Technique, 2015(1): 131-133.
- [16] 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
China Building Thermal Environment Analysis Special. Meteorological data set [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2005.
- [17] 李雪铭, 晋培育. 中国城市人居环境质量特征与时空差异分析[J]. 地理科学, 2012, 32(5): 521-529.
LI Xueming, JIN Peiyu. Analysis on the quality characteristics and space-time differences of urban residential environment in China [J]. Geographical Science, 2012, 32(5): 521-529.
- [18] CHANG C H, MERONEY R N. Concentration and flow distribution sin urban street canyons: wind-tunnel and computational data[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(9): 1141-1154.

- DUAN Gongli. Gradation optimization of crumb rubber modified asphalt mixture based on bailey design method[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.
- [9] 周启伟, 吴雪柳, 杨波. 温拌剂对橡胶沥青及沥青混合料路用性能影响分析[J]. 中外公路, 2016, 36(4): 302-306.
- ZHOU Qiwei, WU Xueliu, YANG bo. Analysis of the influence in warm mixing agent on road performance of rubber asphalt and asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(4): 302-306.
- [10] YU H, LENG Z, DONG Z, et al. Workability and mechanical property characterization of asphalt rubber mixtures modified with various warm mix asphalt additives[J]. Construction & Building Materials, 2018, 175: 392-401.
- [11] KIM H H, MAZUMDER M, LEE S J, et al. Characterization of recycled crumb rubber modified binders containing wax warm additives[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2018, 5(3).
- [12] FARSHAD S K, FAKHRI M, AZAMI A. Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165.
- [13] YANG X, YOU Z, HASAN M R M, et al. Environmental and mechanical performance of crumb rubber modified warm mix asphalt using evotherm[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 159.
- [14] 徐慧宁, 谭忆秋, 李晓民, 等. 级配曲线走向与沥青混凝土空隙率关系的研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2012, 36(3): 458-462.
- XU Huining, TAN Yiqiu, LI Xiaomin. Research on the relationship between grading curve trend and air voids in asphalt mixtures[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(3): 458-462.
- [15] 邢明亮, 陈拴发, 陈华鑫, 王秉纲. 级配组成对排水性混合料空隙率影响研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(17): 62-65.
- XING Mingliang, CHENG Shuanfa, CHENG Huaxin, Wang Binggang. Research on influence of gradation to air void of porous asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(17): 62-65.
- (编辑 吴海西)

(上接第 889 页)

- [19] 周莉, 席光. 高层建筑群风场的数值分析[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(5): 471-474.
- ZHOU Li, XI Guang. Numerical analysis of wind field in high-rise buildings[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(5): 471-474.
- [20] XIE Zhenyu, YANG Ne. Optimization design tactics for high-rise building shape on improvement of outdoor wind environment[J]. Architectural Journal, 2013, 4(1): 76-81.
- [22] BIAO Li, JING Liu, MEI Lingli. Wind tunnel study on the morphological parameterization of building nonuniformity [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013, 121: 60-69.
- [23] TETSU Kubotaa, MASAO Miurab, YOSHIHIDE Tominagac, et al. Wind tunnel tests on the relationship between building density and pedestrian-level wind velocity: Development of guidelines for realizing acceptable wind environment in residential neighborhoods[J]. Building and Environment, 2008, 43(10): 1699-1708.
- (编辑 吴海西)