

绿植对高层建筑风荷载特性影响研究

王胜德^{1,2}, 沈炼^{1,2}, 韩艳¹, 邓舒文³, 蔡春声⁴, 王培杰¹

(1. 长沙理工大学桥梁工程安全控制技术与装备湖南省工程技术研究中心, 410076 长沙;
2. 长沙学院土木工程学院, 410022 长沙; 3. 湖南农业大学水利与土木工程学院,
410125 长沙; 4. 东南大学交通学院, 211189 南京)

摘 要:第四代高层建筑外墙绿植一定程度改变了建筑原有外形, 结构与绿植在强风作用下的干扰机理更加复杂, 而目前第四代高层建筑结构抗风研究还处于起步阶段, 现有高层结构抗风规范在第四代高层建筑的适用性如何还尚无定论。以长沙市同有大厦为研究背景, 通过刚性测压模型, 分析了0%、6.8%、13.5%和20.3%这4种绿化率下建筑外立面风压系数和体型系数, 揭示了绿植对建筑外立面风荷载特性的影响规律。结果表明: 建筑侧面和背风面脉动风压相干性较低, 绿植减小了迎风面脉动风压相干性; 绿植可以有效降低侧面和背风面极小值风压系数, 对建筑外立面局部强风有较大抑制作用; 规范中迎风面体型系数偏保守, 侧面和背风面体型系数偏不安全; 建筑迎风面与来流呈45°~60°夹角时绿植对迎风面体型系数降低量最大, 最大值为70%。

关键词:高层建筑; 风洞试验; 风压系数; 体型系数; 相关性

中图分类号: TU312.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11776/j.issn.1000-4939.2026.01.016

文章编号: 1000-4939(2026)01-0171-11 **CSTR:** 32414.14.cjam.issn.1000-4939.2026.01.016

Study on the effects of vegetation on wind load characteristics of high-rise buindings

WANG Shengde^{1,2}, SHEN Lian^{1,2}, HAN Yan¹, DENG Shuwen³, CAI Chunsheng⁴, WANG Peijie¹

(1. Hunan Province Research Center for Safety Control Technology and Equipment of Bridge Engineering, Changsha University of Science & Technology, 410076 Changsha, China; 2. College of Civil Engineering, Changsha University, 410022 Changsha, China; 3. College of Water Resources and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, 410125 Changsha, China; 4. School of Transportation, Southeast University, 211189 Nanjing, China)

Abstract: The vegetation plants on the fourth-generation high-rise buildings facade has significantly altered the original aerodynamic appearance of buildings. The interaction between the structure and vegetation under strong wind conditions becomes more complex. Currently, research on wind resistance in fourth-generation high-rise buildings is still in its infancy, and there is no conclusive evidence regarding the applicability of existing wind resistance specifications for these buildings. This study focuses on the Tongyou

收稿日期: 2023-05-20

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(No. 2024JJ5049); 湖南省人才托举工程基金资助项目(No. 2023TJ-N17); 湖湘青年英才科技创新基金资助项目(No. 2023RC3192); 长沙理工大学研究生实践创新与创业能力提升项目(No. CLSJX22034)

通信作者: 沈炼, 教授. E-mail: shenlian.lcz@163.com

引用格式: 王胜德, 沈炼, 韩艳, 等. 绿植对高层建筑风荷载特性影响研究[J]. 应用力学学报, 2026, 43(1): 171-181.

WANG Shengde, SHEN Lian, HAN Yan, et al. Study on the effects of vegetation on wind pressure characteristics of high-rise buildings[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2026, 43(1): 171-181.

Building in Changsha as a research background and utilizes a rigid pressure measurement model to analyze the wind pressure coefficients and body shape coefficients of the buildings facade under four different greening rates: 0%, 6.8%, 13.5%, and 20.3%, the study reveals the influence of vegetation on the wind load characteristics of the buildings facade. The results indicate that the coherence of fluctuating wind pressure is low on the side and leeward surface of the building, and vegetation reduces the coherence of fluctuating wind pressure on the windward surface. Vegetation can effectively reduce the minimum wind pressure coefficients on the side and leeward surface, thus exerting significant inhibitory effects on local strong winds on the buildings facade. The body shape coefficients of the windward surface in the specifications is conservative, while the body shape coefficients of the side and leeward surface is unsafe. When the buildings windward surface forms an angle of 45° to 60° with the incoming flow, vegetation provides the largest reduction in the body shape coefficients, reaching a maximum of 70%.

Key words: high-rise building; wind tunnel test; wind pressure coefficient; shape coefficient; correlation

随着科技的进步,人们对居住条件的舒适性提出了新要求,第四代建筑由于具有绿色、环保、舒适等优点,受到多个国家的青睐。越来越多的第四代建筑相继落成,如瑞士洛桑的雪松塔、成都七一城市森林花园和湖北黄冈的垂直森林。然而,第四代建筑由于覆盖了大量绿植,建筑原有外形发生明显改变,风荷载对建筑作用机理尚不明确,亟需对其进行研究。

经过多年的发展,国内外学者^[1-5]对结构风工程进行了大量工作,取得了许多宝贵经验,针对绿植方面的风工程研究,许多学者也开展了大量的探索性工作。在风洞试验方面,CAO等^[6]测试了3种气动外形的灌木标本,分析不同孔隙度对树木力矩和位移的影响;SANZ等^[7]通过粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)分析了树冠位移和二维森林风场特性;MOLINA-AIZ等^[8]通过风洞试验测试了4种叶面积密度的园艺作物的阻力系数;DUMAN等^[9]通过对松林的现场测量,给出了冠层流场的耗散率模型;WANG等^[10]将树木等效为扩展调谐质量阻尼器(extended tuned mass damper, ETMD),建立了第四代建筑的风致运动方程。于树志^[11]对第四代建筑进行刚性模型测压和测力试验,分析了树木影响下建筑外立面风压变化和基底总气动力分布特征;沈炼等^[12]分析了绿植对小区风场的拖拽作用,试验发现行人高度风速的降低值与树木大小成正比;WANG等^[13]利用风洞试验对绿植影响下建筑外立面的风压进行了研究,发现绿植显著降低了建筑侧面平均风压和极值风压,但该研究绿植布置较为单一。数值模拟方面,杨会等^[14]将树冠等效为多孔介质,采用附加源项法对树木的挡风性能进行模拟,

分析了树木遮挡下低矮房屋的风荷载分布;吴颖等^[15]通过控制树木与建筑的距离、树木高度和树冠透孔率等参数,系统地研究了树木对低矮房屋的挡风效应;KANG等^[16-17]建立了韩国釜庆大学校园的全尺寸网格模型,通过添加源项将树木阻力参数化,比较了有树和无树校园内的风环境;YUAN等^[18]基于城市环境密度、树木参数对城市地区风环境的影响分析,提出了半经验城市冠层模型;文献[19-22]通过不同求解方法对比分析了绿植对小区风场及污染物扩散的影响;文献[23-25]建立了乔木-框架有限元结构模型,分析了风荷载作用下树木对结构动力响应的影响。综上所述,现有研究大多集中在绿植对低矮房屋的挡风作用和绿植对风环境的影响等数值模拟领域,绿植作用下建筑风压的试验研究相对较少,特别是第四代高层建筑的结构风荷载特性还不明确,亟需对其展开研究。

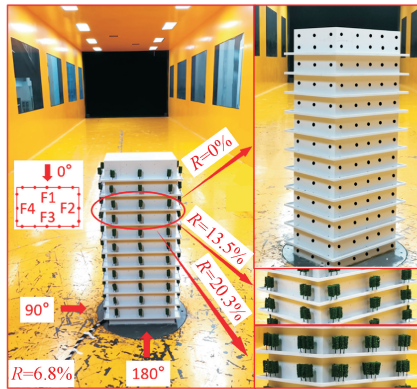
因此,基于上述研究的不足,本研究以长沙市同有大厦为研究背景,通过风洞试验对不同绿化率下建筑外立面风压系数和体型系数进行了精细化分析,揭示了不同绿化率的绿植布置对建筑外立面风荷载特性的影响规律,研究结果可为类似高层建筑抗风设计提供参考。

1 试验概况

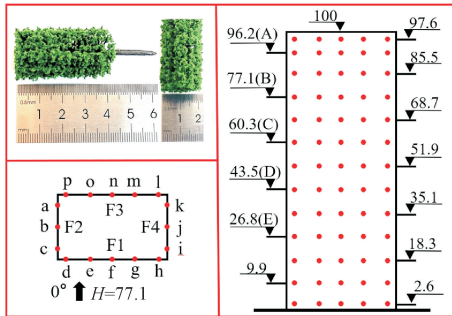
1.1 模型介绍

研究采用刚性模型测压风洞试验,试验在长沙理工大学风工程与风环境研究中心高速试验段进行,风洞断面宽4 m,高3 m,风速调节范围1.0~

45.0 m/s。结构尺寸为45.2 m×32 m×100 m,试验缩尺比为1:100,模型阻塞比小于5%,如图1(a)所示。其中,阳台外伸3 m,阳台围墙高1 m。在建筑外墙立面共布置了13层测点,如图1(b)所示,宽面F1、F3每层布置了5个测点,窄面F2、F4每层布置了3个测点。试验采用的圆柱体绿植高6 m,其中树冠高4 m、直径为2 m,缩尺后见图1(b)。试验风向角范围0°~180°,间隔15°,共13个风向角。均匀来流风速为10 m/s,风压测量采用美国PSI DTC Initium型电子压力扫描阀,采样频率331.5 Hz,采样时间为60 s。



(a) 风洞试验示意图



(b) 测点布置图

单位: cm

图1 风洞试验模型

Fig. 1 Wind tunnel test model

1.2 参数定义

为分析结构在不同绿植覆盖面积作用下表面风压特性的变化规律,定义绿化率 R

$$R = A_1/A_0 \quad (1)$$

式中: A_1 为绿植在外墙立面的投影面积; A_0 为建筑外立面面积。

风压系数是结构风压的无量纲表现形式,平均风压系数 C_{pmean} 定义如下

$$C_{pmean} = \frac{\sum_{i=1}^N C_{pi}}{N} \quad (2)$$

$$C_{pi} = \frac{P_i - P_{\infty}}{0.5\rho U_H^2} \quad (3)$$

式中: C_{pi} 为测点 i 处的无量纲风压系数; P_i 为测点 i 处的风压值; P_{∞} 为参考点的静压值; ρ 为空气密度,取 1.225 kg/m^3 ; U_H 为参考高度处的风速; $H = 1 \text{ m}$; N 为风压时程数据总数。

极值风压系数 $C_{pi,max/min}$ 定义如下

$$C_{pi,max/min} = C_{pi,mean} \pm g \times C_{pi,rms} \quad (4)$$

式中: $C_{pi,max/min}$ 为极大/小值风压系数; $C_{pi,mean}$ 为测点 i 的平均风压系数; $C_{pi,rms}$ 为脉动风压系数; g 为峰值因子,取 $g = 3.5$ 。

为研究局部风荷载,将建筑外立面进行分块处理,各分块风荷载体型系数 μ_s 定义如下

$$\mu_s = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{si} A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (5)$$

式中: μ_{si} 为测点体型系数,试验为均匀来流,令 $\mu_{si} = C_{pi,mean}$; A_i 为测点 i 的从属面积; n 为块内测点总数。

2 绿植对高层建筑风压的影响

2.1 极值风压分布

图2(a)给出了0°到90°各绿化率下F1面极大值风压系数包络云图。随着 R 的增加,F1面下部区域被分割成左右两部分,左上角的最小值由0.4降至0.1,说明绿植的存在降低了F1面极大风压系数的下限值,并且改变了极大值风压分布。

F1面极小值风压系数包络云图如图2(b)所示。可以发现,随着 R 的增加,风压系数的最小值出现在右侧,其数值从-1.9增大到-1.6,负压(-0.9)区域面积逐渐扩大到整个立面面积的1/3以上,其中 $R = 13.5\%$ 和 20.3% 的极小值风压系数云图基本相同,说明绿植对建筑的遮挡效果与绿化率 R 的大小呈非线性关系;总体而言,绿植在降低最大负压的同时改善了建筑外立面局部强风的影响。

F2面极大值风压系数包络云图如图3(a)所示。从整体上看,各绿化率下的极大值风压系数云图分为上中下3个部分,上部区域数值来自0°风向角,此时F2面属于侧面,下部区域数值来自90°风向角,此时F2面是背风面。因此,建筑背风面下部极大值风压随绿化率增大而减小,而建筑侧面上部极大值风压受绿植影响较小。

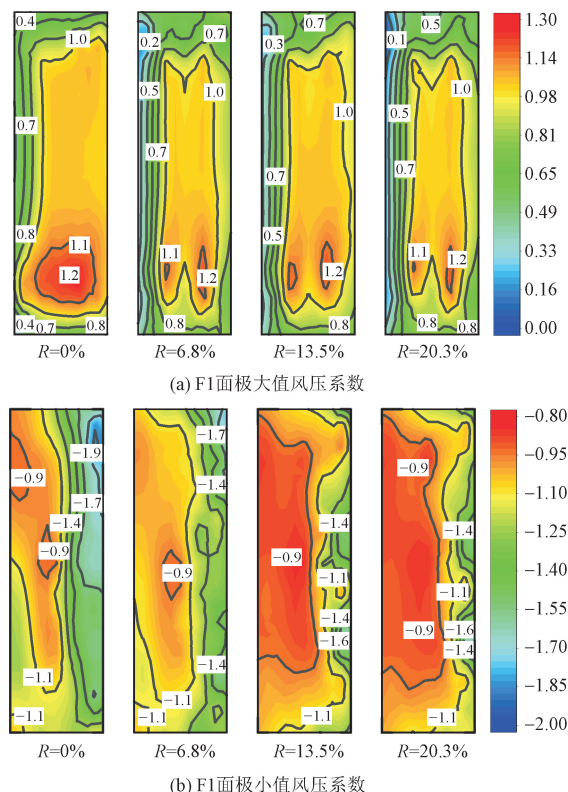


图2 不同绿化率下 F1 面极值风压系数包络云图
Fig. 2 Envelope nephogram of extreme wind pressure coefficient of F1 surface under different greening rates

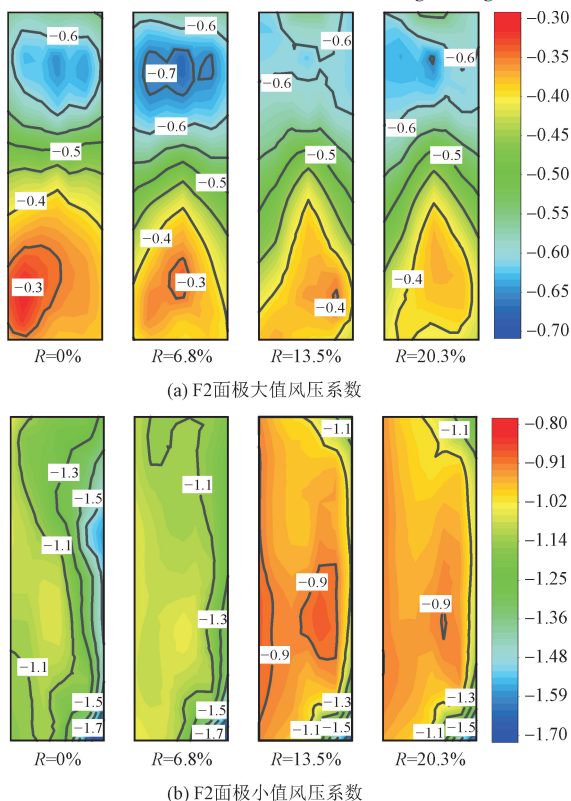


图3 不同绿化率下 F2 面极值风压系数包络云图
Fig. 3 Envelope nephogram of extreme wind pressure coefficient of F2 surface under different greening rates

图3(b)给出了 F2 面极小值风压系数包络云图。随着 R 的增大,风压系数最小值由 -1.7 增加到 -1.5 ,最大值由 -1.1 增加到 -0.9 ,且 $R=13.5\%$ 时值为 -0.9 的负压区域达到最大,此时风向角介于 $0^\circ \sim 60^\circ$,因此,迎风面与来流有一定夹角时,阳台上布置的绿植对漩涡脱落区风压的降低作用最大。

2.2 平均风压变化

将建筑外立面竖直方向的测点所在轴依次编号为轴 1~9,如图 4 所示。试验过程中,研究绿植对建筑外立面轴 1~9 平均风压系数的影响,鉴于试验对象为轴对称结构,文中只给出了轴 1~9 在典型风向角 0° 、 45° 时平均风压系数的变化规律。

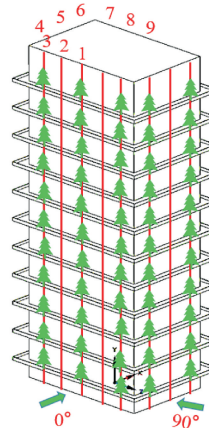


图4 监测轴编号图

Fig. 4 Numbering diagram of monitoring shaft

图5显示了 0° 风向角各轴平均风压系数变化曲线。可以发现, 0° 风向角时轴 1 平均风压系数随着高度的增加呈先增大后减小趋势,整体呈横 U 型分布。迎风面边缘轴 3 平均风压系数随着 R 的增大单调递减,有绿植比无绿植的平均风压系数小,说明绿植对向边缘扩散的气流起到了强遮挡作用。

从图5轴 4~轴 9 可以看出建筑侧面 F2 和背风面 F3 平均风压系数在高度方向上呈先增大后减小分布,且随着绿化率 R 的增大呈先增大后减小趋势,整体上 $R=13.5\%$ 的平均风压系数值最大。因此, $R=13.5\%$ 时绿植对建筑侧面及背风面负压的降低作用最大。

图6为建筑外立面各轴 45° 风向角时的平均风压系数变化曲线。从轴 1 到轴 3,迎风面平均风压系数值逐渐减小,最终在外立面边缘位置出现负压。从图6轴 3 可发现 $R=0\%$ 比其他绿化率工况的平均风压系数大,说明绿植增大了外墙立面漩涡脱落区的负压。

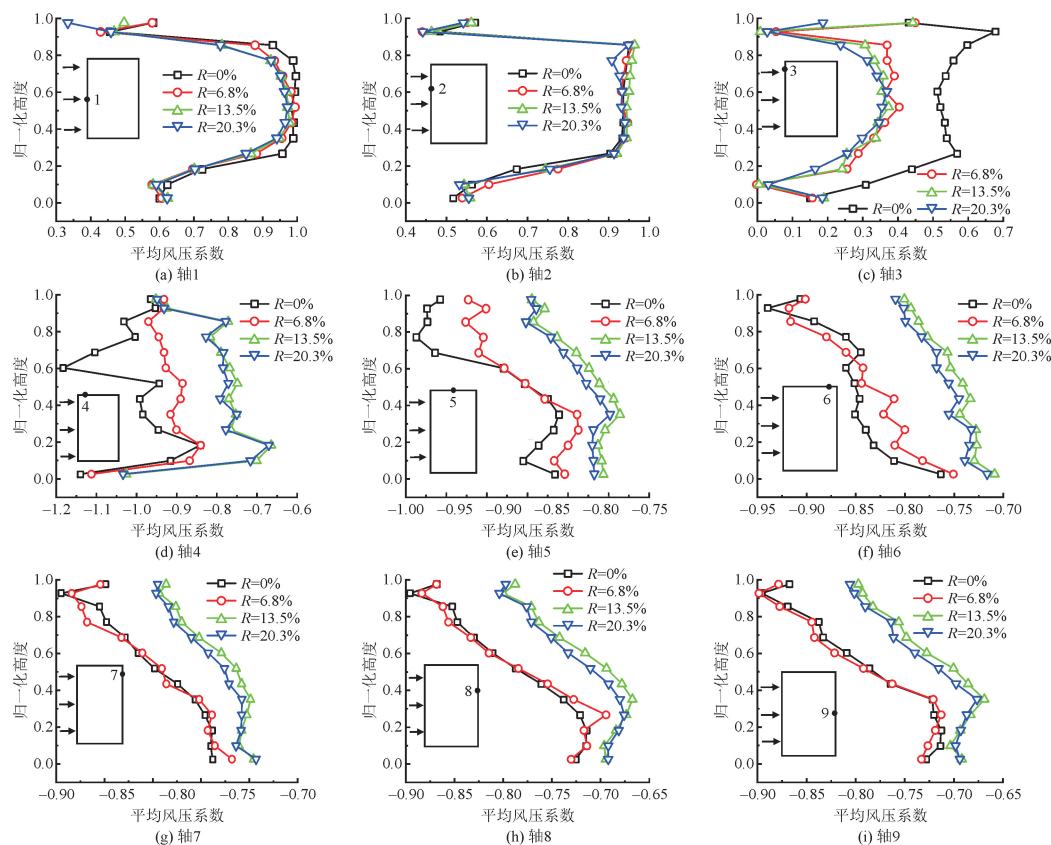


图5 0°风向角各轴线平均风压系数变化曲线

Fig. 5 Variation curve of average wind pressure coefficient of each axis at 0° wind direction angle

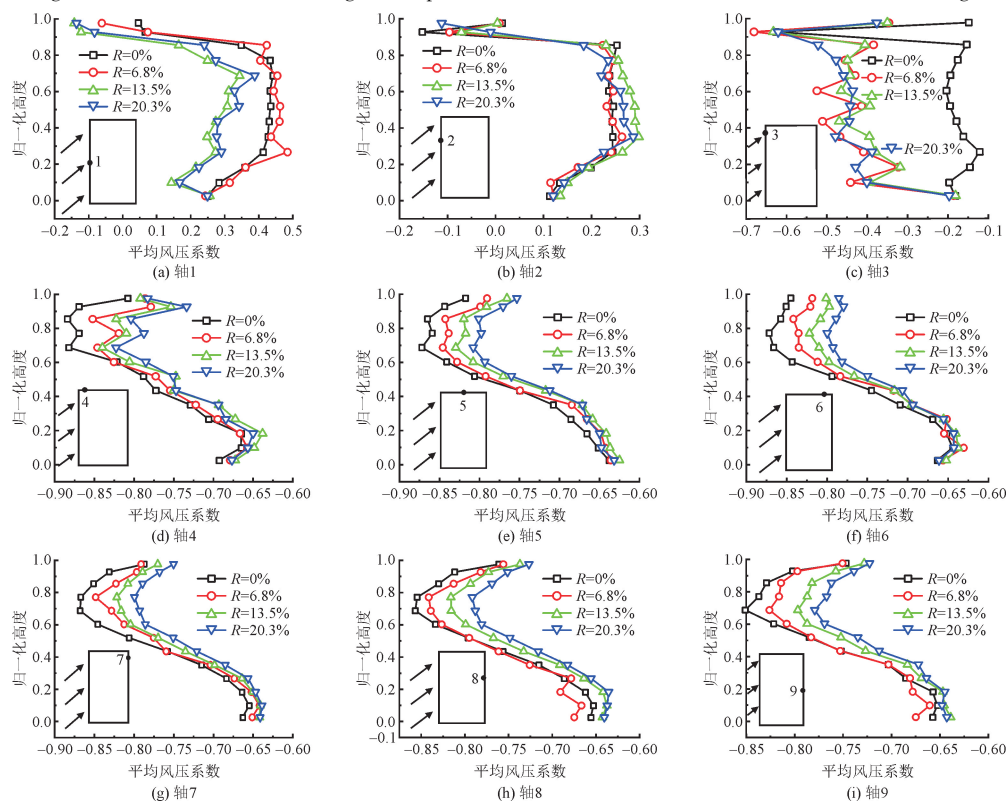


图6 45°风向角各轴线平均风压系数变化曲线

Fig. 6 Variation curve of average wind pressure coefficient of each axis at 45° wind direction angle

从图6轴4~轴9可知F2面和F3面各轴平均风压系随高度的增加先减小后增大;高度0.4以下,平均风压系数基本相同,高度0.4以上,随着 R 的增大,平均风压系数单调递增,说明绿植对侧面和背风面平均风压的降低作用随着绿化率的增加呈梯度增大趋势。

2.3 脉动风压相关特性

对于空间建筑结构,在确定风荷载时需要考虑脉动风压的空间相关性,可采用随距离和频率变化的相干函数表示脉动风压在频域上的相关程度,即

$$\text{coh}_{xy}^2(f) = |S_{xy}(f)|^2 / [S_x(f) \times S_y(f)] \quad (6)$$

式中: coh 为相干函数;测点 x 、 y 为脉动风压的互功率谱密度; $S_x(f)$ 、 $S_y(f)$ 分别为 x 、 y 的自功率谱密度; f 为脉动风压频率; $|\cdot|$ 表示取模。

无绿植时,迎风面 $3/4H$ 高度处水平方向不同测点间的相干函数如图7(a)所示。

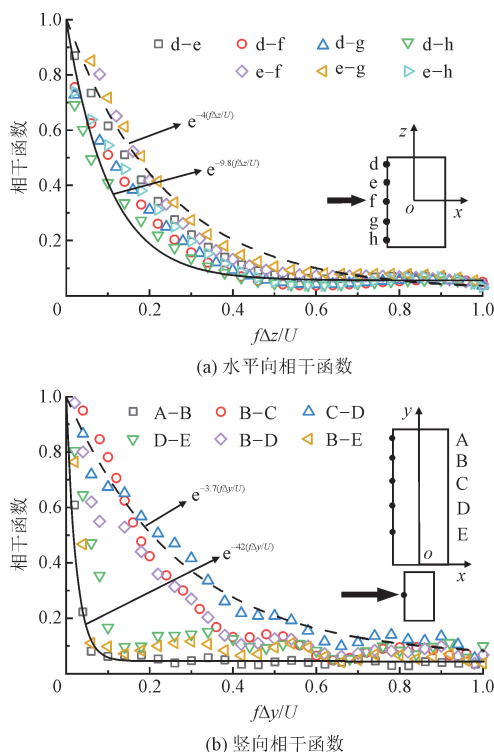


图7 迎风面风压系数相干函数

Fig. 7 Coherent function of windward pressure coefficient

图7中, Δz 为水平测点间距, U 为来流风速,脉动风压相干函数随无量纲频率 $f\Delta z/U$ 呈指数衰减,水平向衰减指数为4~9.8,与文献[26]中方柱研究结果基本相同。水平测点用小写字母标记,竖向测点用大写字母标记,迎风面不同高度测点相干函数随无量纲频率 $f\Delta y/U$ 变化曲线如图7(b)所示, Δy

为竖向测点间距。其中,A、B层与D、E层测点相干函数衰减速率大于其他相邻层,A层测点处在建筑顶部,受大尺寸阳台和气流分离影响较大,而E层测点位于建筑下部区域,在下沉气流影响下风压变化复杂。

图8(a)为侧风面 $3/4H$ 高度处水平向相干函数变化曲线,不同测点间相干函数衰减趋势相同,在无量纲频率0.1之后不再明显变化,侧风面受分离流影响较大,相干性较低;由图8(b)可看出在竖向上,建筑下部D、E层测点衰减指数最小为16,在折减频率0.2处衰减结束,其他不同高度测点相干函数在折减频率0.1处衰减结束,前者衰减频率滞后0.1。整体上,水平向相干函数低于竖向,建筑侧风面脉动风压系数相干性较低。

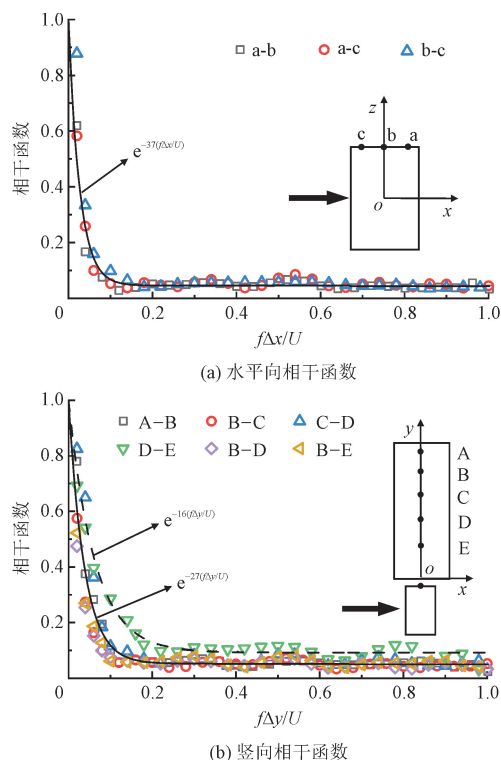


图8 侧风面风压系数相干函数

Fig. 8 Coherent function of crosswind pressure coefficient

在背风面,水平向中轴线附近测点相干函数(图9a)衰减指数绝对值最小为14,其他不同间距测点相干函数衰减速率基本相同,衰减指数约为40。由图9(b)可知,在竖向上不同测层高度中轴线相干函数变化曲线相同,与迎风面水平向衰减指数一致,背风面处在漩涡脱落区,脉动风压变化复杂,水平向与竖向相干性较低。

图10给出了不同绿化率影响下建筑外立面不同间距测点间相干函数包络值。由图10(a)可知水

平向相干函数衰减指数绝对值随着绿化率增大先增大后减小, $R=6.8\%$ 时衰减指数最大为 8.3, 此时绿植对迎风面水平向测点脉动风压扰动最大; 竖向衰减指数随绿化率增大单调递增, 衰减速率整体上小于水平向。

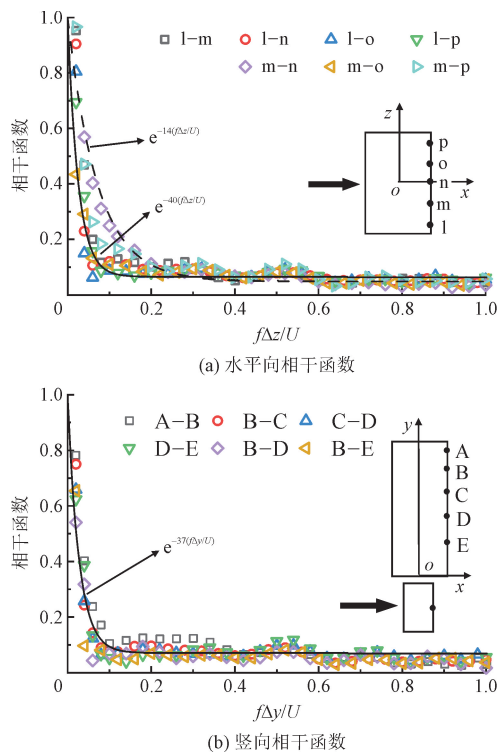


图9 背风面风压系数相干函数

Fig. 9 Coherent function of leeward wind pressure coefficient

由图 10(b) 可看出侧风面水平向衰减指数受绿植影响有较大波动, 无绿植时测点间相干性最低, $R=20.3\%$ 时衰减指数最小; 绿植对竖向影响较小, 衰减指数在 15 附近变化。如图 10(c) 所示, 背风面水平向衰减指数均小于竖向, 且随绿化率增大单调递增。总之, 绿植对迎风面、侧风面水平向荷载相干性影响最大, 设计时应引起关注。

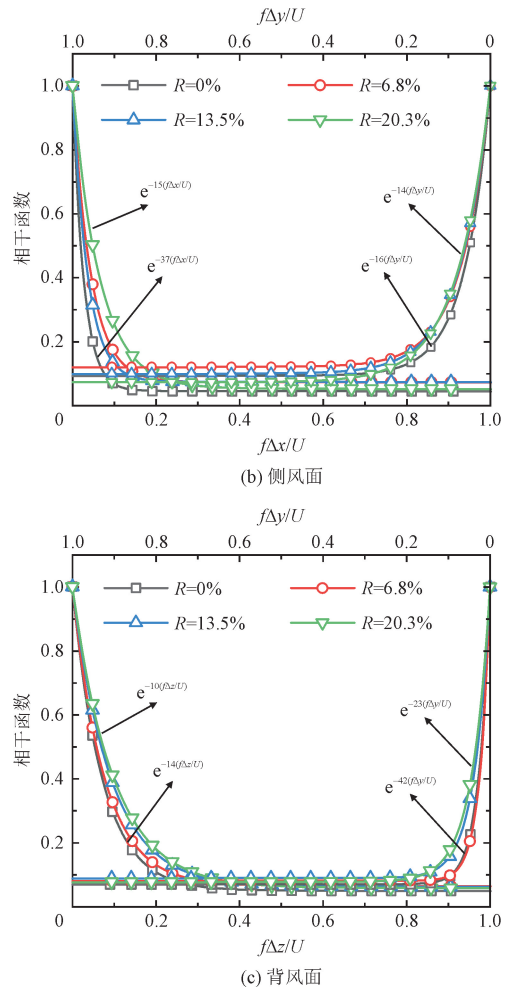
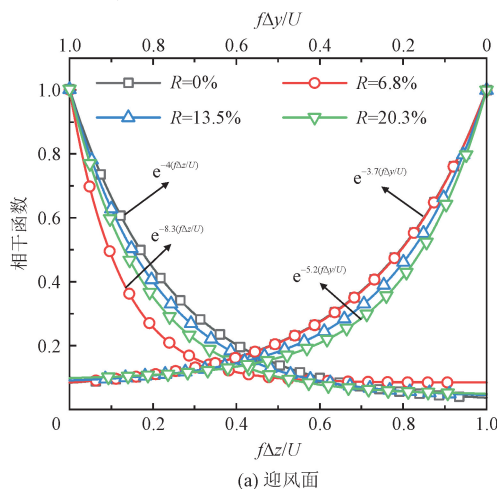


图10 绿植影响下相干函数变化

Fig. 10 Coherence function changes under the influence of green plants

3 绿植对建筑体型系数的影响

如图 11 所示, 将建筑迎风面上、中、下部位进行编号, 分别为块 A1、A2 和 A3, 在两侧面同样高度位置依次编号为块 B1、B2、B3 和 C1、C2、C3。

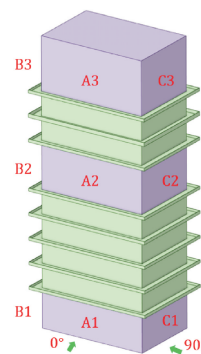


图11 建筑分块图

Fig. 11 Building block diagram

对上述分块的体型系数进行分析,如图12所示,通过对比F1面与F3面体型系数变化规律,验证了试验数据的可靠性。从图12(a)~图12(c)可以看出,块A1、A2和A3的体型系数最大值依次介于 $0.4\sim 0.5$ 、 $0.7\sim 0.8$ 、 $0.5\sim 0.7$ 之间,最小值依次介于 $-0.8\sim -0.6$ 、 $-0.8\sim -0.7$ 、 $-1.0\sim -0.7$ 之间,即随着高度的增加,迎风面的体型系数先增大后减小,背风面的体型系数逐渐减小。

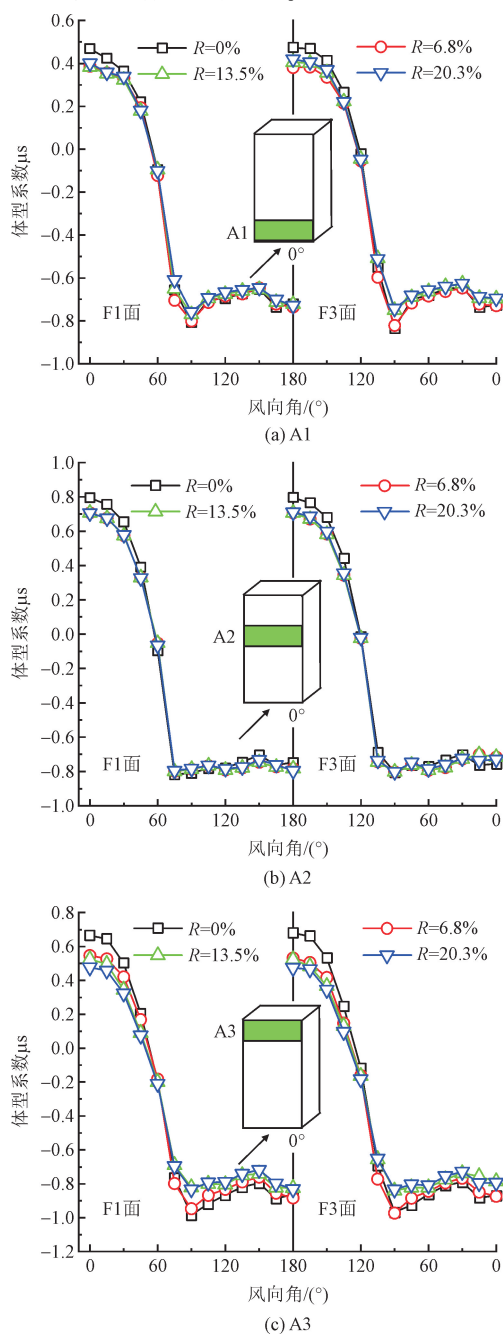


图12 F1和F3面内块体型系数随风向角变化
Fig. 12 F1 and F3 in-plane block shape coefficient changes with wind direction angle

由图12可知,0°风向角时建筑F1面有绿植比

无绿植的体型系数小,90°风向角时块A3体型系数随绿化率 R 的增加单调递增,说明绿植可以有效地降低建筑迎风面和侧面的风荷载,且在建筑上部区域降低作用随绿化率增加呈梯度增大趋势。

如图13(a)所示,块B1体型系数随着风向角的增加先增大后减小,在75°时出现最大值 -0.62 , $R=13.5\%$ 和 $R=20.3\%$ 的体型系数整体上相同,在0°风向角时远大于规范[27]值 -0.7 ,因此,绿植显著降低了建筑侧面下部的吸力。

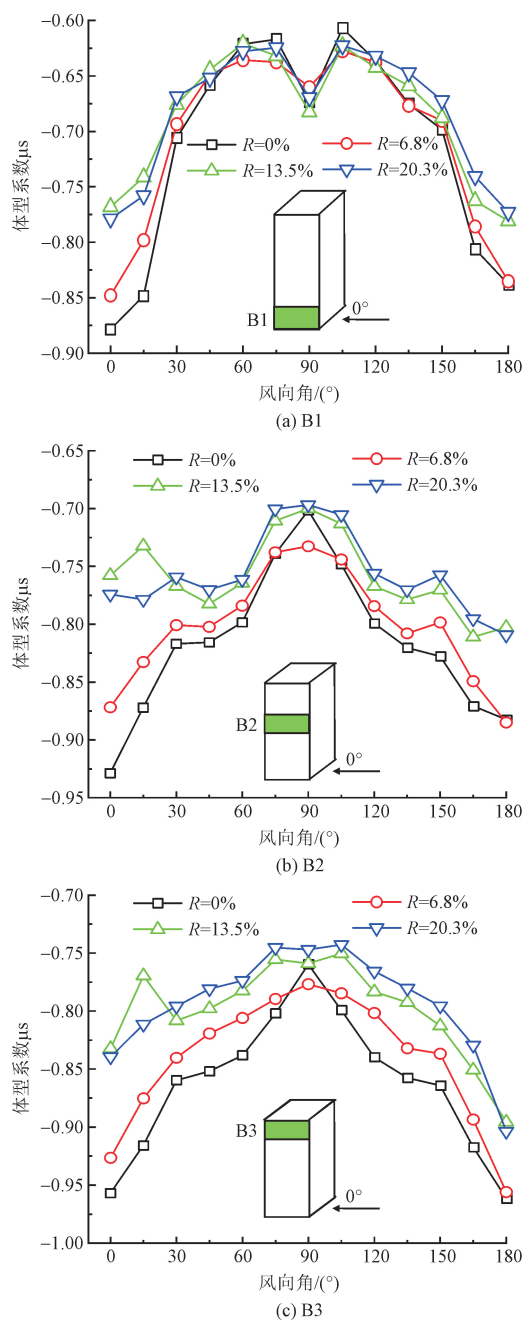


图13 F2面内块体型系数随风向角变化
Fig. 13 F2 in-plane block shape coefficient changes with wind direction angle

从图 13(b)~图 13(c)可以发现 $R=13.5\%$ 时,块 B2 和 B3 的体型系数在 15° 风向角处都出现了突变,此时块 B2 和 B3 竖直方向上处在来流驻点的尾流区,外立面较其他工况“粗糙”,对风速的降低作用更强,造成负压更小。整体上,绿植对建筑侧面风荷载的降低作用随绿化率增大而增大。

从图 14(a)~图 14(c)可以看出在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 风向角之间,绿植显著降低了建筑迎风面 F4 的正压。

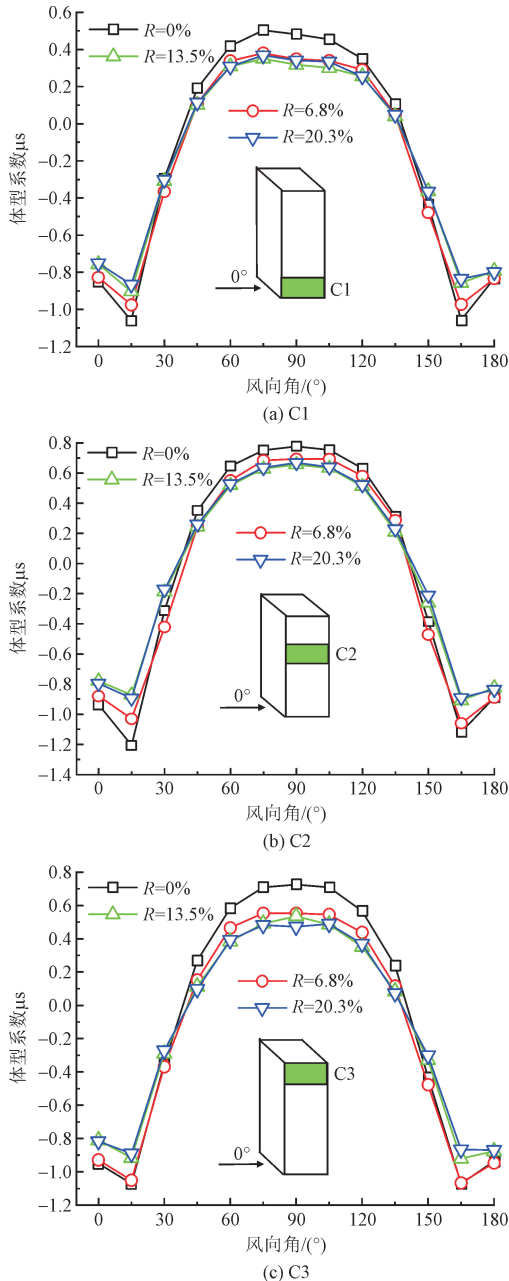


图 14 F4 面内块体型系数随风向角变化

Fig. 14 F4 in-plane block shape coefficient changes with wind direction angle

图 14 中,块 C1、C2 和 C3 体型系数最大值依次介于 $0.3 \sim 0.5$ 、 $0.7 \sim 0.8$ 和 $0.5 \sim 0.7$ 之间,最小值

依次介于 $-0.7 \sim -1.1$ 、 $-0.8 \sim -1.2$ 、 $-0.8 \sim -1.1$ 之间,即随着高度的增加,体型系数的绝对值先增大后减小,在建筑抗风设计时,建筑中上高度区域风荷载需要重点考虑。

在不考虑绿植传给结构风荷载的前提下,图 15 给出了不同绿化率影响下第四代高层建筑外立面体型系数的调整系数。迎风面体型系数的调整系数均小于 1,说明绿植降低了迎风面的风荷载,且随着绿化率增大而增大。当绿化率由 6.8% 提高到 13.5% 时,建筑侧面调整系数降低量最大,而背风面调整系数基本无变化。因此,当来流正对建筑时,绿植可以有效降低建筑迎风面和侧面的风荷载,背风面风荷载受绿植影响较小。

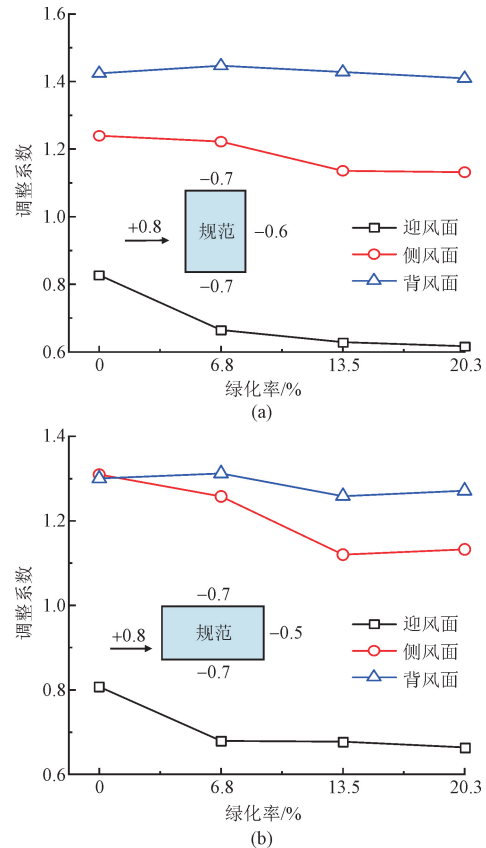


图 15 不同绿化率影响下体型系数调整值

Fig. 15 Adjustment value of body shape coefficient under the influence of different greening rates

为分析不同绿化率的绿植对建筑外立面风荷载的降低值大小,定义体型系数降低量 β

$$\beta = \frac{\mu_{sR} - \mu_{s0}}{\mu_{s0}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: μ_{sR} 为绿化率 R ($R=6.8\%$ 、 13.5% 、 20.3%) 时的体型系数; μ_{s0} 为绿化率 $R=0\%$ 时的体型系数。

表 1 给出了块 A1~C3 在 0° 到 180° 体型系数最

大降低量及对应的风向角,可以发现 $R=13.5\%$ 时体型系数降低量最为突出,块 C3 最大为 64.6%,块 B1 最小为 12.6%,整体上块 C、A、B 体型系数最大降低量呈依次减小的趋势。对比块 C 与块 A 体型系数最大降低量可知,绿植对块 C 所在窄面的风荷载降

低作用更明显,且建筑迎风面与来流呈 $45^\circ \sim 60^\circ$ 夹角时迎风面体型系数降低量最大。块 B 体型系数最大降低量出现在 0° 风向角,当来流与迎风面垂直时,绿植对建筑侧面风荷载降低量最大,因此,建筑所受风荷载大小与风向角密切相关。

表 1 各分块体型系数最大降低量及对应风向角分布

Tab. 1 Maximum reduction of each block shape coefficient and corresponding wind direction angle distribution

参数		块编号								
		A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
体型系数最大降低量/%	$R=6.8\%$	17.3	10.3	18.3	3.5	6.1	4.5	54.1	29.1	51.5
	$R=13.5\%$	19.1	44.7	56.1	12.6	18.4	16.0	61.5	39.7	64.6
	$R=20.3\%$	18.8	30.7	63.0	11.3	16.6	12.2	54.3	44.9	69.9
对应风向角/ $(^\circ)$	$R=6.8\%$	0	45	15	0	0	120	135	45	135
	$R=13.5\%$	45	60	45	15	0	15	135	30	135
	$R=20.3\%$	45	60	45	0	0	0	135	150	135

4 结 论

本研究通过刚性测压模型风洞试验获得了不同绿化率下建筑外立面的风压,研究了典型风向角下外立面风压系数和体型系数的变化规律,得到了以下结论。

1) 绿植对迎风面平均风压影响较小,对侧面影响较大,随着绿化率的提升,建筑迎风面边缘和侧面的风压受到绿植的强抑制作用。总体而言,绿植在降低最大负压的同时改善了建筑外立面局部强风的影响。

2) 建筑侧风面和背风面脉动风压相干性较低,迎风面相干函数呈指数衰减,绿植降低了迎风面脉动风压的相干性。

3) 规范中迎风面体型系数偏保守,第四代高层建筑侧面和背风面体型系数调整后远大于规范值。

4) 建筑所受风荷载大小与风向角密切相关,迎风面与来流呈 $45^\circ \sim 60^\circ$ 夹角时绿植对建筑迎风面风荷载的降低量最大,最大值为 70%。

参考文献:

- [1] 沈国辉, 余杭聪, 李懿鹏, 等. 不同长宽比高层建筑沿高度分布的风荷载[J]. 土木工程学报, 2022, 55(11): 26-37.
SHEN Guohui, YU Hangcong, LI Yipeng, et al. Wind load along building height for high-rise buildings with different length-width ratios[J]. China civil engineering journal, 2022, 55(11): 26-37 (in Chinese).

- [2] LIN N, LETCHFORD C, TAMURA Y, et al. Characteristics of wind forces acting on tall buildings[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2005, 93(3): 217-242.
- [3] 李寿科, 毛丹, 刘敏, 等. 高层建筑围护结构风压系数的概率特征及其极值 POT 估计[J]. 振动与冲击, 2023, 42(1): 224-231.
LI Shouke, MAO Dan, LIU Min, et al. Probability characteristics and extreme POT estimation of wind pressure coefficient of high-rise building envelope[J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(1): 224-231 (in Chinese).
- [4] FENG C D, GU M. Numerical simulation of wind veering effects on square-section super high-rise buildings under various wind directions[J]. Journal of building engineering, 2021, 44: 102954.
- [5] LI Y G, ZHANG M Y, LI Y, et al. Experimental study on wind load characteristics of high-rise buildings with opening[J]. The structural design of tall and special buildings, 2020, 29(9): e1734.
- [6] CAO J X, TAMURA Y, YOSHIDA A. Wind tunnel study on aerodynamic characteristics of shrubby specimens of three tree species[J]. Urban forestry & urban greening, 2012, 11(4): 465-476.
- [7] SANZ RODRIGO J, VAN BEECK J, DEZSÖ-WEIDINGER G. Wind tunnel simulation of the wind conditions inside bidimensional forest clear-cuts. Application to wind turbine siting[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2007, 95(7): 609-634.
- [8] MOLINA-AIZ F D, VALERA D L, ÁLVAREZ A J, et al. A wind tunnel study of airflow through horticultural crops: determination of the drag coefficient[J]. Biosystems engineering, 2006, 93(4): 447-457.
- [9] DUMAN T, KATUL G G, SIQUEIRA M B, et al. A velocity-dissipation lagrangian stochastic model for turbulent dispersion in atmospheric boundary-layer and canopy flows[J]. Boundary-layer

- meteorology, 2014, 152(1): 1-18.
- [10] WANG Q H, FU W D, YU S Z, et al. Mathematical model and case study of wind-induced responses for a vertical forest[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 179: 260-272.
- [11] 于树志. 垂直森林建筑风荷载特性风洞试验研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2018.
- [12] 沈炼, 韩艳, 唐春朝, 等. 多因素作用下小区风环境风洞试验研究[J]. 工程力学, 2021, 38(5): 88-97.
SHEN Lian, HAN Yan, TANG Chunzhao, et al. Study on wind tunnel test of wind environment under the influence of multiple factors[J]. Engineering mechanics, 2021, 38(5): 88-97 (in Chinese).
- [13] WANG Q H, CHENG Y F, GARG A, et al. Characteristics of local wind pressure distribution and global aerodynamic forces on a vertical forest[J]. Ecological engineering, 2019, 138: 61-70.
- [14] 杨会, 付海明. 树冠流动阻力特性数值模拟与实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(12): 4291-4299.
YANG Hui, FU Haiming. Numerical simulation and experimental study of canopy flow resistance characteristics[J]. Journal of Central South University (science and technology), 2016, 47(12): 4291-4299 (in Chinese).
- [15] 吴颖, 李秋胜, 陈伏彬. 复杂树状结构 CFD 数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(6): 87-91.
WU Ying, LI Qiusheng, CHEN Fubin. Numerical simulation study on complex tree-shaped structures based computational fluid dynamics method[J]. Building structure, 2018, 48(6): 87-91 (in Chinese).
- [16] KANG G, KIM J J, CHOI W. Computational fluid dynamics simulation of tree effects on pedestrian wind comfort in an urban area[J]. Sustainable cities and society, 2020, 56: 102086.
- [17] KANG G, KIM J J, KIM D J, et al. Development of a computational fluid dynamics model with tree drag parameterizations: application to pedestrian wind comfort in an urban area[J]. Building and environment, 2017, 124: 209-218.
- [18] YUAN C, NORFORD L, NG E. A semi-empirical model for the effect of trees on the urban wind environment[J]. Landscape and urban planning, 2017, 168: 84-93.
- [19] QI Y H, ISHIHARA T. Numerical study of turbulent flow fields around a row of trees and an isolated building by using modified $k-\varepsilon$ model and LES model[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2018, 177: 293-305.
- [20] HEFNY SALIM M, HEINKE SCHLÜNZEN K, GRAWE D. Including trees in the numerical simulations of the wind flow in urban areas: should we care? [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2015, 144: 84-95.
- [21] BALCZÓ M, GROMKE C, RUCK B. Numerical modeling of flow and pollutant dispersion in street canyons with tree planting[J]. Meteorologische zeitschrift, 2009, 18(2): 197-206.
- [22] KANG G, KIM J J. Effects of trees on flow and scalar dispersion in an urban street canyon [J]. Atmosphere, 2015, 25(4): 685-692.
- [23] 黎良辉. 白云机场扩建交通中心大型乔木-树池节点风振动力响应分析[D]. 广州: 广州大学, 2018.
- [24] 王辉. 大型乔木-框架结构风致耦合振动分析[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- [25] 聂竹林, 区彤, 辛志勇, 等. 屋面绿植乔木的建筑结构风振响应的优化分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(3): 121-127.
NIE Zhulin, OU Tong, XIN Zhiyong, et al. Optimization of wind vibration responses of building structures planted arbors on roofs [J]. Industrial construction, 2021, 51(3): 121-127 (in Chinese).
- [26] 杨庆山, 单文姗, 田村幸雄, 等. 高层建筑脉动风荷载特性[J]. 土木工程学报, 2023, 56(5): 1-17.
YANG Qingshan, SHAN Wenshan, TAMURA Y, et al. Characteristics of fluctuating wind loads on high-rise buildings[J]. China civil engineering journal, 2023, 56(5): 1-17 (in Chinese).
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

(编辑 吕茵)