

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.03.015

建筑屋面风雨场及突出建筑立面风驱雨的实测研究

王 辉, 吴安超, 吴学健, 吴亚雄

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:文章对某多层建筑屋面区域风驱雨(wind-driven rain, WDR)开展实测,结合 3 类典型降雨事件的分析,揭示大气湍流特征以及风速、风向对雨滴的影响特性,并针对突出屋面建筑,实测分析立面 WDR 分布特性,量化国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)半经验模型对突出屋面建筑 WDR 预测的偏差。结果表明,在 3 类降雨事件中,湍流度、阵风因子和湍流积分尺度的实测值与基于地面实测建立的公式理论值之间存在较大差异;实测的雨滴数量与标准 M-P 谱计算的雨滴数量差值最大为 125 个。在风速和雨强差异较小时,建筑立面 WDR 分布受来流与立面夹角的影响显著。由于 ISO 半经验模型是基于地面实测建立的,其对突出屋面建筑 WDR 的预测存在偏差,在模型适用的降雨条件下实测值约为 ISO 预测值的 2 倍。

关键词:建筑屋面;突出建筑;风驱雨(WDR);现场实测

中图分类号:TU119.22;V211.3

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2024)03-0379-08

Measured research on wind and rain field of building roof and wind-driven rain on prominent building facade

WANG Hui, WU Anchao, WU Xuejian, WU Yaxiong

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper measured wind-driven rain(WDR) in the roof area of a multi-storey building, analyzed three typical rainfall events to reveal the characteristics of atmospheric turbulence and the effects of wind speed and direction on raindrops, explored the distribution characteristics of facade WDR for buildings with protruding roof, and quantified the deviation of the International Organization for Standardization(ISO) semi-empirical model for WDR prediction of buildings with protruding roof. The results show that there are great differences between the measured values of turbulence degree, gust factor and turbulence integral scale and the theoretical values based on ground measurements in the three types of rainfall events. The difference between the measured number of raindrops and that calculated by the standard M-P spectrum is up to 125. When the difference of wind speed and rain intensity is small, the WDR distribution of building facade is significantly affected by the angle between incoming flow and facade. Because the ISO semi-empirical model is built on the ground measurement, its prediction of WDR for buildings with protruding roof is biased, and the measured value is about twice of the ISO predicted value under the rainfall conditions applicable to the model.

Key words: building roof; prominent building; wind-driven rain(WDR); field measurement

收稿日期:2022-07-13;**修回日期:**2022-08-29

基金项目:安徽省自然科学基金资助项目(11040606M116);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目(教外司留[2011]1568号)和亚热带建筑科学国家重点实验室开放课题资助项目(2020ZB24)

作者简介:王 辉(1973—),男,安徽安庆人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

0 引言

城市是建筑最密集的区域,布局内的建筑改变了地表状况,显著影响了区域内近地边界层风场和雨场,形成特有的复杂风驱雨(wind-driven rain, WDR)环境^[1],其能有效减轻由城市效应引发的大气污染、热岛效应等系列现象,同时也是城市雨水绿色收集的根本水源^[2]。另一方面,处于 WDR 环境下的各类建筑,受风雨作用和雨水侵蚀,引发立面渗水、墙材劣化、径流污染、不良温湿环境等一系列工程问题^[3]。

建筑屋面区域是城市典型室外风雨空间,其 WDR 特点代表了城市区域的复杂风雨特征。不同于地面区域 WDR 场,由于来流风碰撞建筑迎风立面后一部分气流将向上爬升,在屋檐转角区因发生气流分离导致风速增大,并在屋面区域形成较多涡旋,从而构成建筑屋面特有的复杂湍流 WDR 场,特别当屋面区域存在突出建筑物时(如退台建筑、突出梯间等),围绕突出屋面建筑的 WDR 场与地面情况必然存在显著差异。

建筑 WDR 研究集中针对地面建筑的立面雨强,对于屋面风雨的空间分布及相应位置的建筑 WDR 研究仍然缺乏。WDR 研究主要采用 3 种方法:现场实测、半经验方法、数值模拟^[4]。作为 WDR 研究开展最早的现场实测仍然是 WDR 研究的重要基础^[4]。文献[4-7]相继对低层建筑、高

耸塔楼及中高层建筑开展 WDR 雨强实测;针对复杂湍流,文献[8]实测群集布局建筑模型迎风立面 WDR 雨强;文献[9]对台风环境下的低层建筑进行 WDR 现场实测,探讨屋面挑檐、风速、风向和降雨强度对建筑立面 WDR 的影响。

目前,国内外已有的实测研究主要针对地面建筑 WDR,有关建筑屋面风雨场及突出屋面建筑的 WDR 实测比较缺乏,因此对此开展实测,分析揭示空间风雨运动与分布特征,以及场内建筑立面 WDR 雨强分布特性,对于深入城市布局环境下 WDR 研究,推动绿色城市发展具有重要的科学意义。

本文对某多层建筑的屋面 WDR 场及突出屋面建筑的立面 WDR 雨强开展实测,获取多类特征降雨事件下的空间风雨信息,以及突出建筑立面 WDR 雨强,分析掌握不同降雨时屋面空间风雨及建筑立面 WDR 分布特点与规律,为深入研究城市区域的建筑 WDR 提供有效依据。

1 现场实测

1.1 实测建筑

对某 6 层建筑屋面风雨场及突出屋面的建筑 WDR 开展实测。办公楼东西向长约 64.0 m,南北向宽约 54.0 m,高约 30.0 m,屋面为上人屋面,且存在突出屋面建筑物,建筑实测图如图 1 所示。

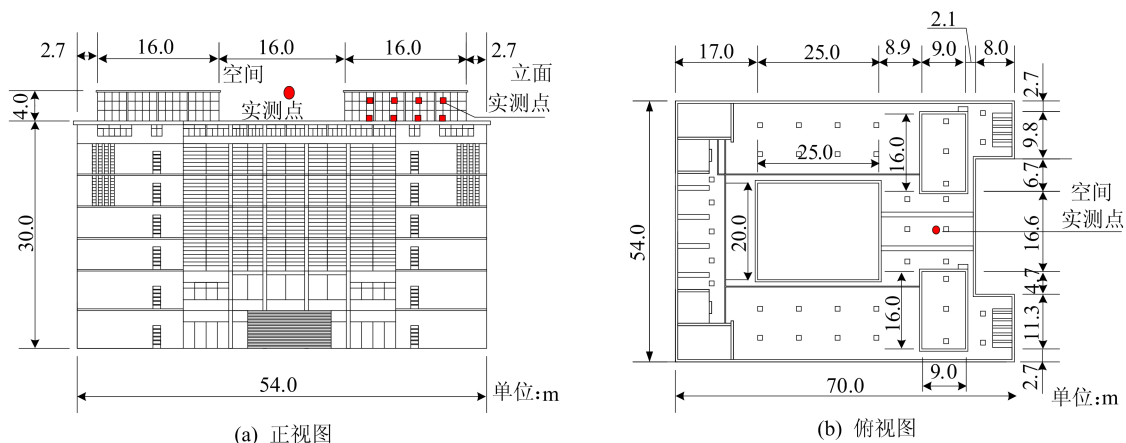


图 1 建筑实测图

1.2 实测设备

屋面设置风雨测量系统包括空间风雨监测气象设备如图 2 所示,监测建筑立面 WDR 雨强的自记式集雨器如图 3 所示,同步实施监测采集降雨时段内的空间风雨场和建筑立面 WDR 雨强

信息。

空间风雨监测气象设备由 Gill windmaster 三维超声波风速风向仪、OTT Parsivel2 激光光学粒子雨滴谱仪、HL-YL1 雨量传感器、CR1000X series 数据采集仪组成。建筑立面自记

式集雨器采用 3D 打印高性能聚合树脂制作,雨水收集区大小为 0.2 m×0.2 m。为减少雨滴撞击收集区平板后挂壁凝滞造成的误差,对集雨面进行打磨并涂刷超疏水材料。集雨板下水口设置微型倾斗式雨量计,精确测量收集的 WDR 水量,其测量分辨率比标准(水平)雨量计采用的倾斗式雨量计的分辨率高出 6 倍。在数据采集和存储方面,通过内置数采存储模块完成。

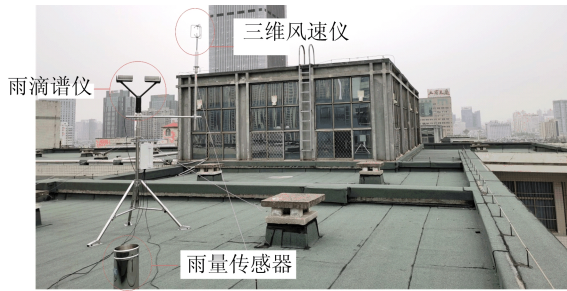


图 2 气象监测设备

突出屋面的建筑尺寸长×宽×高为 16 m×9 m×4 m,气象监测设备设置在屋面建筑的正南方向距离 5 m 位置。对突出屋面建筑的立面布置集雨器时,考虑东南风为实测地区的盛行风向,因此于东立面和南立面分别布置 8 个和 3 个集雨器,其具体分布如图 3c 所示。

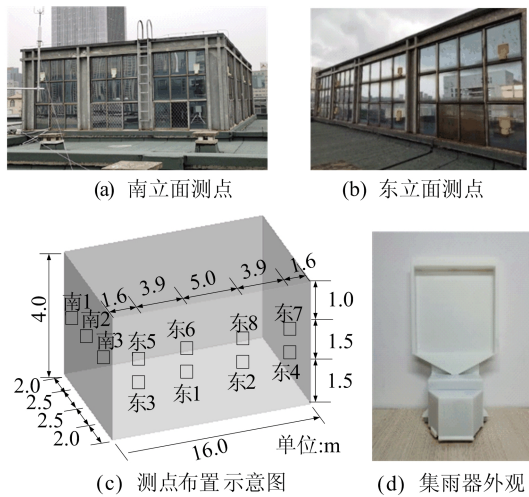


图 3 集雨器及建筑测点布置

1.3 实测分析方法

本次实测周期自 2021 年 6 月 15 日至 10 月 15 日,包括降雨和非降雨时段,由 cr1000x 系统输出测点每日信息总表以及风速仪、雨滴谱仪详细信息报表。

1.3.1 风场数据统计方法

风场包括全程盛行的风向和风速。用风向频率表示某方向风出现的频率,风向频率及其对应

风向的平均风速计算公式为:

$$D_m = \frac{F_m}{\sum_{m=1}^{16} F_m + C} \quad (1)$$

$$\bar{V}_m = \frac{\sum_{i=1}^{F_m} V_{mi}}{F_m} \quad (2)$$

其中: F_m 为在 m 方向上所分析时段内静风观测到的次数; C 为在分析时段内静风观测到的次数; V_{mi} 为在 m 方向上第 i 次观测到的风速。

将数据按照 10 min 的时距分割,同时合成数据形成平均水平风速 V 、平均水平风向 θ 和竖向平均风速 $W^{[10]}$ 为:

$$V = \sqrt{\overline{v_x(t)^2} + \overline{v_y(t)^2}} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{\overline{v_x(t)}}{V} \quad (4)$$

$$W = \overline{v_z(t)} \quad (5)$$

湍流度 I_z 、阵风因子 $G_u(t_g)$ 和 $G_i(t_g)$ 、湍流积分尺度 L_u^x 和脉动风速功率谱 $S_u(z, n)$ 为描述大气湍流特征的 4 个主要参数,表达式^[11]为:

$$I_z = \frac{\sigma_{vf}(z)}{\bar{V}_z} \quad (6)$$

$$G_u(t_g) = 1 + \frac{\max(\bar{u}(t_g))}{V} \quad (7)$$

$$G_i(t_g) = \frac{\max(\bar{i}(t_g))}{V} \quad (8)$$

$$L_u^x = \frac{1}{\sigma_u^2} \int_0^\infty \rho_{uu}(x) dx \quad (9)$$

$$S_u(z, n) = 4\sigma_u^2 \frac{f}{n(1 + 70.8f^2)^{5/6}} \quad (10)$$

$$f = \frac{nL_u(z)}{\bar{V}_z} \quad (11)$$

其中: $\sigma_{vf}(z)$ 为顺风向脉动风速均方根; \bar{V}_z 为高度 z 处平均风速; $\max(\bar{u}(t_g))$ 为 i 向在阵风 t_g 内平均风速的峰值; $\rho_{uu}(x)$ 为空间两点脉动风速的协方差; σ_u 为顺风向脉动风速的均方根; n 为脉动风频率。

1.3.2 雨场数据统计方法

雨场特征量主要涉及雨滴粒径、雨强以及雨滴速度。利用雨滴谱仪的监测数据,可以分析获得雨滴谱分布、雨滴体积占有率、降雨强度、含水量以及质量加权平均粒径等。雨滴谱统计公式如下:

$$N(D_i) = \sum_{j=1}^a \frac{n_{ij}}{S \Delta_i \bar{V}_j \Delta_D} \quad (12)$$

其中: $N(D_i)$ 为尺度为 i 次的雨滴谱浓度; n_{ij} 为处于速度 j 、尺度 i 的雨滴数; S 和 Δ_i 代表面积和时

间; D_i 为雨滴的直径; Δ_D 代表 i 档的直径间隔; V_j 为对应雨滴的末速度。

$$N = \sum_{i=1}^a N(D_i) \Delta_D \quad (13)$$

$$\alpha = \frac{1}{6} \pi D^3 N \quad (14)$$

其中: N 为单位体积内各档雨滴的数量; α 为雨滴体积占有率; a 取 32。

对于建筑风驱雨环境, 引入抓取率 η 描述建筑表面某点 R_{wdr} 相对水平降雨强度 R_h 的大小:

$$\eta = \int f_h(R_h, D) \eta_D(D) dD = \frac{1}{R_h} \int \alpha_D |V_n(D)| dD \quad (15)$$

其中: R_{wdr} 和 $R_h(D)$ 分别表示 R_{wdr} 和 R_h 中粒径为 D 的雨滴所贡献的部分; α_D 表示粒径为 D 的雨滴在该点处的体积分; $|V_n(D)|$ 表示粒径为 D 的雨滴在该点处沿建筑表面法向的速度大小。

2 风雨场分析

实测期间出现不同特征的降雨, 根据风力等级规定^[12], 风速在 1.6~3.3 m/s 的范围内属于轻风, 0.3~1.5 m/s 属于软风, 0~0.2 m/s 属于

无风。整个实测时段内, 风速差异并不明显, 但降雨强度呈现不同强度特征, 根据降雨强度的不同, 分别选择暴雨(24 h 降雨量 50.0~99.9 mm)、强降雨(1 h 雨量 16.0 mm 以上)、大雨(24 h 降雨量 25.0~49.9 mm) 3 类具有代表性的降雨事件进行分析。

2.1 实测点风场特点

降雨时的风速、风向及降雨强度的气象条件如图 4、图 5 所示。

从图 4、图 5 可以看出: 暴雨时风向主要集中于 350°附近, 主要为西北向; 强降雨的风向为偏东北向, 风速基本处于 1.5~2.0 m/s; 大雨风向由早期的南东南方向向东北方向偏移, 0.5~1.0 m/s 范围内的风速占主导地位。

3 类降雨时顺风向(U 方向)、横风向(V 方向)和竖风向(W 方向)湍流度如图 6 所示。总体而言, 随平均风速增加, 三向湍流度均呈下降趋势, 竖向湍流度普遍较小, 基本处于 0.4~0.8 范围。3 类降雨时实测点顺风向湍流度平均值分别为 0.64、0.52、0.51, 暴雨时的湍流度明显大于强降雨和大雨, 由日本规范计算获得的顺风向湍流度为 0.24, 与实测存在明显偏差。

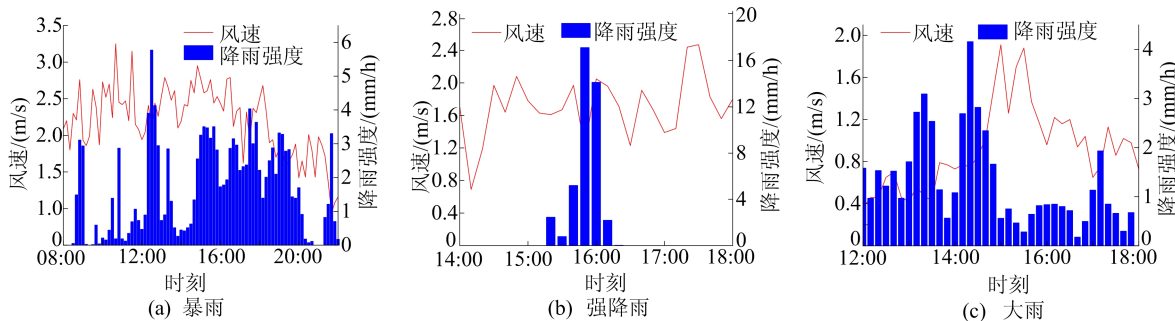


图 4 降雨强度和风速

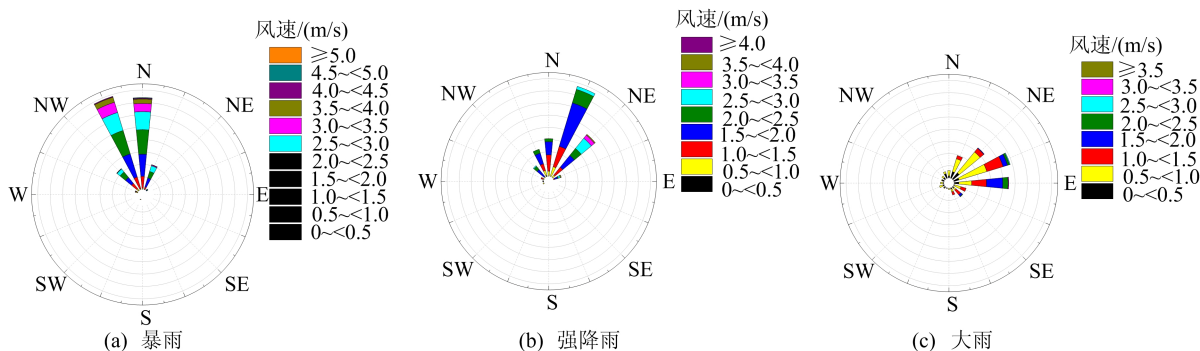


图 5 风玫瑰图

3 类降雨事件下降风因子随平均风速的变化

如图 7 所示。由图 7 可知, 阵风因子随平均风速

的增大而减小。强降雨时风场脉动相对较为剧烈,其顺风向、横风向、竖风向阵风因子均值分别为 2.17、2.05、0.89。由经验公式^[13-14]获得的顺风向阵风因子为 1.64,与 3 类情况下其平均值比

较,经验值明显小于实测值。上述参数实测值与理论值之间的差异,主要由于屋面风场构成以来流风碰撞立面爬升并在檐口转角产生分离后的湍流为主,湍流脉动特征更为显著。

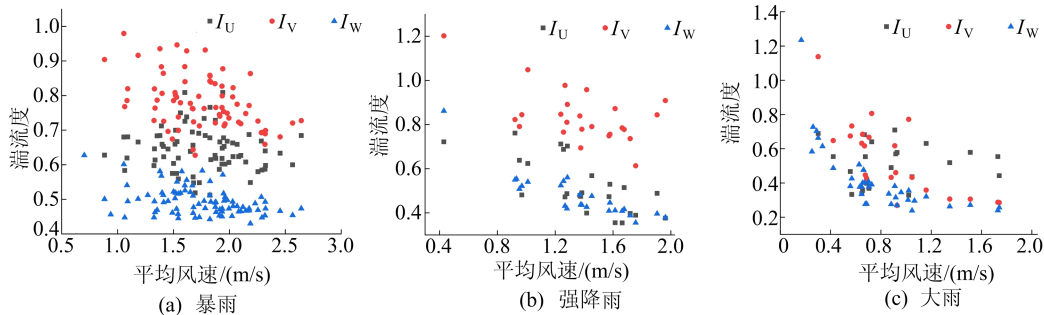


图 6 空间测点三向湍流度分布

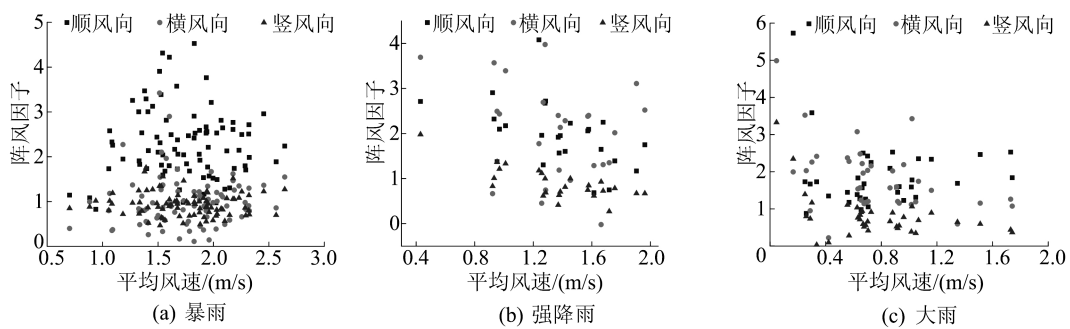


图 7 空间测点三向阵风因子分布

三向阵风因子随湍流度的变化规律及线性拟合结果如图 8 所示。

子基本呈上升趋势,强降雨和大雨时拟合直线的斜率更大,阵风因子与湍流度之间的正相关性更强。

从图 8 可以看出,随着湍流度的增大,阵风因

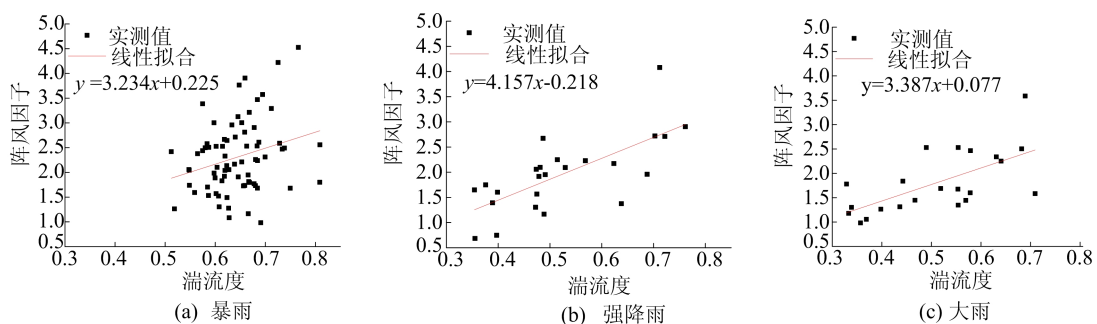


图 8 空间测点顺向阵风因子与湍流度关系

实测湍流积分尺度分布如图 9 所示,从图 9 可以看出,竖风向的积分尺度普遍较小,接近于 1.0。随着平均风速增大,三向湍流积分尺度均有所增大。暴雨、强降雨、大雨条件下实测点顺风向积分尺度均值分别为 3.77、2.14、2.91 m,横风向积分尺度均值分别为 3.09、2.93、2.09 m,竖风向积分尺度均值为 1.08、1.08、0.96 m。暴雨时顺

风向和横风向积分尺度均明显大于其他两类降雨事件。根据文献[15]的理论公式,实测顺风向尺度值为 7.23 m,约为实测值 2 倍,与文献[16]认为 Counihan 提出的纵向积分尺度理论公式对实测值存在高估的结论基本一致,分析原因为除周围建筑的干扰影响,主要由于测点处于屋面与屋面突出建筑之间,该区域因建筑干扰及气流分离

效应, 漩涡破碎后以小尺度涡为主。

3 类降雨顺风向风速实测谱和卡门 (Karman) 谱如图 10 所示。暴雨时实测谱与卡门谱的

吻合程度较另两类降雨高, 因暴雨时的实测风速和雨强均较大, 表明对于风雨耦合效应更强的暴雨风场, 卡门谱也能较好地再现脉动风特征。

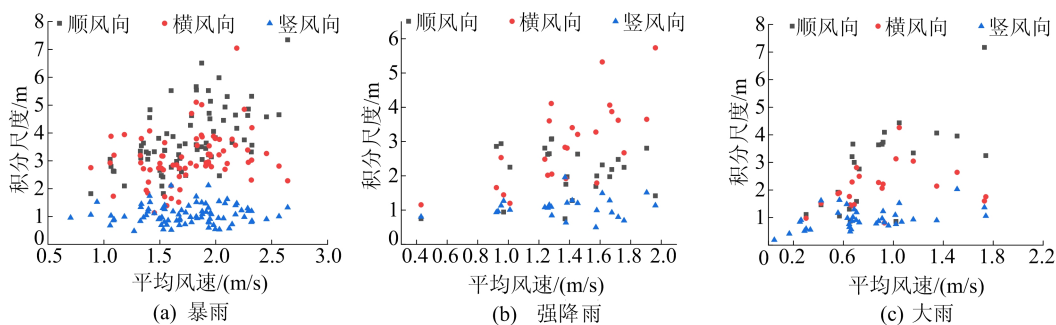


图 9 空间测点湍流积分尺度分布

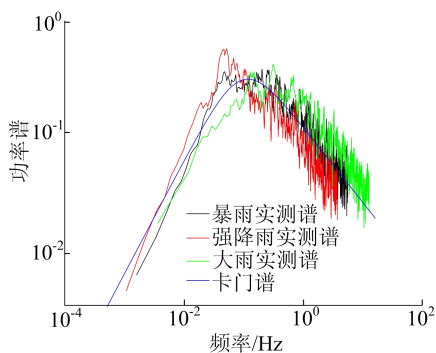


图 10 空间测点顺风向脉动功率谱

2.2 实测点雨场特点

实测点的雨滴谱浓度和雨滴数量如图 11 所示。从图 11 可以看出, 处于较小粒径范围的雨滴数量和雨滴谱浓度的实测结果与 M-P 谱计算结果差距较大, 雨滴数量的最大差值可到 125 个, 但随着粒径的增大, 两者之间的差距越来越小, 小粒径雨滴不论是雨滴数量还是雨滴谱浓度在总体上均较大, 而大粒径雨滴则接近于 0, 表明雨滴的分布函数对大粒径雨滴的估计值比较符合实际。

实测时雨滴谱仪均未测出粒径小于 0.312 mm 的雨滴, 可以推测实际降雨未出现极小粒径的雨滴; 此外未捕捉到粒径超过 5 mm 的雨滴, 原因可能是屋面区域风雨场因环境影响, 爬坡风的显著增速易导致大粒径雨滴破碎成更小粒径。对同场降雨, 雨滴谱浓度和雨滴数量最大值所对应的雨滴粒径均相同, 大雨对应的粒径明显大于其他两类降雨, 但数量却远小于其他两类。

在 3 类降雨中雨滴数量实测值和理论值最大差值所对应的雨滴粒径与雨滴谱浓度差距不大, 粒径小于 1.5 mm 时实测与理论获得的粒子分布差异较大, 随着粒径增大, 两者之间的差值趋于

0, 由此推断, 对于屋面风雨场, 在雨强较小时, 如仍采用基于地面实测建立的 M-P 谱预测小粒径雨滴, 理论值小于实测值; 对于大粒径雨滴, M-P 谱理论值与实测值更接近, 表明小粒径雨滴受屋面湍流风作用产生了重分布。

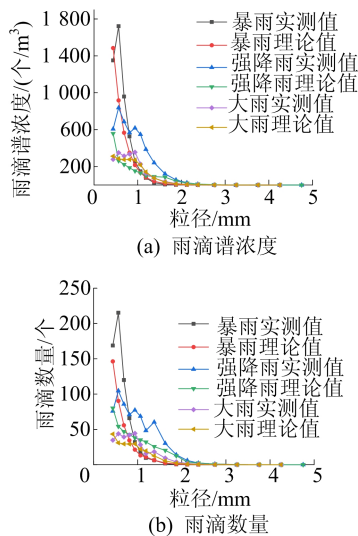


图 11 雨滴谱浓度和雨滴数量

突出屋面建筑立面各测点 WDR 量如图 12 所示, WDR 抓取率见表 1 所列。整体上看, 东立面抓取率从上至下递减。

由图 12 可知, 暴雨时 WDR 总量在 20:00 之后均达到最大值, 与东立面相比, 南立面收集到的 WDR 量较少; 强降雨时 WDR 总量在 16:30 之后均达到最大值, 与东立面相比, 南立面采集到的雨量较少。因抓取率受风速、风向角以及降雨强度影响, 对于风速较大、入射角 (风向与建筑立面垂直线之间的夹角) 较小的降水事件, 其抓取率相对

较高。由于大雨时的入射角较小,其抓取率高于前两次降雨事件。暴雨、强降雨和大雨的抓取率

均在南立面影响较小,而东立面则在顶部拐角部位较大。

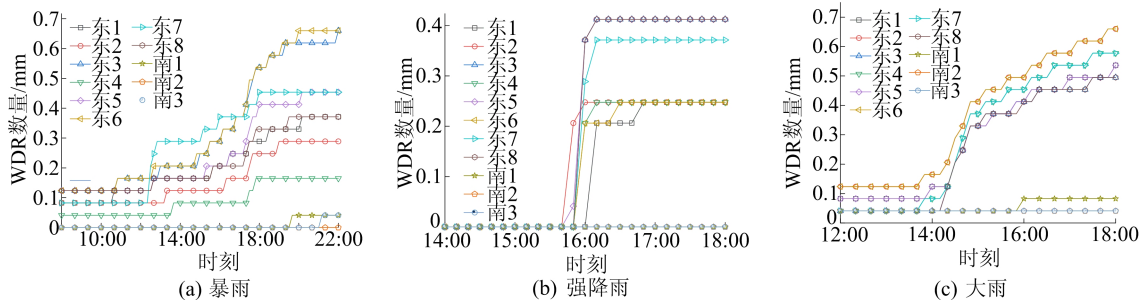


图 12 突出屋面建筑立面各测点 WDR 量

表 1 建筑立面 WDR 抓取率

集雨器	暴雨	强降雨	大雨
东 1	0.013	0.030	0.063
东 2	0.011	0.030	0.077
东 3	0.026	0.050	0.058
东 4	0.007	0.030	0.067
东 5	0.018	0.050	0.063
东 6	0.026	0.077	0.077
东 7	0.018	0.045	0.067
东 8	0.015	0.050	0.058
南 1	0.002	0	0.010
南 2	0	0	0.005
南 3	0.001	0	0.005

选取建筑东立面的东 6 和南立面的南 1 这两个具有代表性的测点,对 3 类降雨时的抓取率进行分析。在主导风速值差距较小的情况下,暴雨下的东 6 抓取率明显低于强降雨和大雨,这是由于前者的主导风向为北偏西 22.5° ,其风向角与后两者有较大差异,而东立面在整个降雨时段基本处于背风区,导致东立面抓取率明显偏小。对于南立面的南 1 测点,暴雨时主导风向为东偏北 22.5° ,该风向下由于周围建筑南立面的干扰减小,导致测点雨量显著大于其他两类降雨。风经建筑立面向上爬升并在檐口发生分离,风速有所增大,相对于大粒径雨滴,小粒径雨滴易受风速驱动,偏离能碰撞突出建筑立面的路径,导致雨滴尤其小粒径雨滴容易击中立面,导致东立面的抓取率较小。

选择东 6 测点的实测值与国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 预测值^[17]进行比较,对比情况如图 13 所示。由图 13 可知,大雨时,预测值约为实测值的 2 倍,是由于 ISO 模型是依据气象数据的平均值确定预测值,平均方法对结果有较大影响。此外,ISO

半经验模型计算时考虑的粗糙度系数 C_R 、地形系数 C_T 及墙系数等参数均会显著影响预测值,实测建筑处于屋面,而基于地面长期实测确定的系数较难反映屋面 WDR 场。暴雨和强降雨时实测值与 ISO 预测值差异较为明显,而大雨时的差距相对减小,原因是由于 ISO 半经验模型不适用于强对流天气情况^[17],即前两类降雨如仍采用 ISO 模型预测会导致与实际情况存在较大偏差。对于东 5 和东 6 测点,两者实测抓取率值存在较大差异,而 ISO 模型因未考虑立面 WDR 水平向分布差异,因此两测点 ISO 预测值相同。

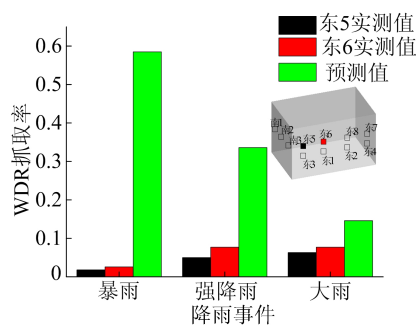


图 13 抓取率实测值降雨事件与 ISO 预测值对比

3 结 论

针对建筑屋面风雨场及突出屋面建筑的立面 WDR,选取暴雨、强降雨及大雨 3 类具有代表性的降雨事件,利用现场实测分析探讨风雨场特点及突出屋面建筑立面 WDR 分布特点,获得以下主要结论。

1) 湍流度和阵风因子均随平均风速的增大而减小,而湍流积分尺度与平均风速成正比。对比 3 类降雨的脉动风功率谱,随着频率增加,3 类降雨时的湍流度、阵风因子和湍流积分尺度的理

论值和实测值差异均较大,原因是气流受到立面阻挡向上爬升并于檐口发生分离,从而形成复杂的屋面湍流风场。

2) 突出屋面建筑的立面 WDR 抓取率受建筑周围风雨条件影响,3 类降雨事件的风速差距较小,因此抓取率的变化并不明显,且降雨强度对抓取率的影响较小。由于受风向的影响,建筑南立面的抓取率较小,而面向盛行风向的东立面,抓取率相对较大,且分布呈现由顶部向底部递减的趋势。

3) 3 类任意降雨事件中均是粒径较小的雨滴数量相对较多,对于同一粒径尺度的雨滴,实测的雨滴浓度谱以及雨滴数量比以 M-P 谱推算小粒径雨滴粒子值高,原因是屋面湍流风场对雨滴运动行为有显著影响。

4) 由于屋面 WDR 场特点,ISO 半经验模型预测值约为实测值的 2 倍,表明采用 ISO 模型估算突出屋面建筑的立面 WDR 存在较大误差。

[参 考 文 献]

- [1] 刘熙明,胡非,李磊,等.北京地区夏季城市气候趋势和环境效应的分析研究[J].地球物理学报,2006,49(3):689-697.
- [2] JING Y, ZHONG H Y, WANG W W, et al. Quantitative city ventilation evaluation for urban canopy under heat island circulation without geostrophic winds; multi-scale CFD model and parametric investigations[J]. Building and Environment, 2021, 196(2): 107793.
- [3] BLOCKEN B, DEROME D, CARMELIET J. Rainwater runoff from building facades; a review[J]. Building and Environment, 2013, 60(1): 339-361.
- [4] BLOCKEN B, CARMELIET J. On the accuracy of wind-driven rain measurements on buildings [J]. Building and Environment, 2006, 41: 1798-1810.
- [5] NORE K, BLOCKEN B, JELLE B P, et al. A dataset of wind-driven rain measurements on a low-rise test building in Norway [J]. Building and Environment, 2007, 42: 2150-2165.
- [6] BRIGGEN P M, BLOCKEN B, SCHELLEN H L. Wind-driven rain on the facade of a monumental tower; numerical simulation, full-scale validation and sensitivity analysis[J]. Building and Environment, 2009, 44: 1675-1690.
- [7] NATH U K D, CHIU V, GE H. Measurements of wind-driven rain on mid-and high-rise buildings in three Canadian regions[J]. Energy Procedia, 2015, 78: 2512-2517.
- [8] KUBILAY A, DEROME D, BLOCKEN B, et al. High-resolution field measurements of wind-driven rain on an array of low-rise cubic buildings[J]. Building and Environment, 2014, 78(8): 1-13.
- [9] WANG X J, LI Q S, LI J C. Field measurements and numerical simulations of wind-driven rain on a low-rise building during typhoons[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104274.
- [10] 李正农,余蜜,吴红华,等.某低矮模型房屋实测风场和风压的相关性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(5):70-78.
- [11] 王旭.东南沿海地区台风特性及低矮建筑屋盖风压实测研究[D].上海:同济大学,2013.
- [12] 中国气象局.风力等级:GB/T 28591—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [13] ISHIZAKI H. Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon-prone regions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1983, 13(1): 55-66.
- [14] CHOIE C C. Gradient height and velocity profile during typhoons[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1984, 13(1): 31-41.
- [15] COUNIHAN J. Adiabatic atmospheric boundary layers; a review and analysis of data from the period 1880—1972 [J]. Atmospheric Environment, 1975, 9(10): 8871-8905.
- [16] 希缪,斯坎伦.风对结构的作用:风工程导论[M].刘尚培,译.2版.上海:同济大学出版社,1992.
- [17] IX-ISO. Hygrothermal performance of buildings—calculation and presentation of climatic data—Part 3: calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data: ISO 15927-3-2009[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2009.

(责任编辑 张 镝)