

上海地区风驱雨气候特征分析

穆海振

(上海市气象信息与技术支撑中心, 上海 200030)

摘要: 风驱雨是建筑物抗风雨设计需要考虑的主要因素之一。利用 2006—2015 年上海宝山气象站逐时降水、风速和风向观测数据, 分析了上海地区降水、风的气候背景和降雨时风环境特征, 计算了年风驱雨量指数和风驱雨荷载指数, 评估了不同时间分辨率数据对指数计算值影响, 所得主要结论如下: (1) 宝山站小时出现降水的气候频率接近 10%, 超过 99% 的样本小时降水量小于 5 mm, 降雨集中时段为夏季。宝山站全年盛行风向依次为东北、东和东南, 其中东北风多出现在秋季和冬季, 东和东南风多出现在春季和夏季。(2) 宝山站出现降雨时的风环境与全体样本统计值有明显差异, 出现降雨和极端降雨时的主要风向均为东北和东, 且平均风速较全体样本平均值明显偏大。(3) 宝山站的年风驱雨指数为 $3.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 风驱雨荷载总体呈现东北方位大、西南方位小的特点, 其中东北和东两个方位的风驱雨荷载指数年均值分别为 413.0 mm 和 388.3 mm, 西南方位为 103.7 mm。(4) 基于日值、月值和年值统计数据计算得到的年风驱雨量指数值均较基准值(基于小时数据)偏低, 其中年值偏低最多, 日值最少。相关研究成果可望为上海的建筑设计 and 城市规划等工作提供参考。

关键词: 上海; 风驱雨; 气候特征; 建筑设计

中图分类号: TU14; P49

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0128-06

Climatic characteristics of wind driven rain of Shanghai

MU Haizhen

(Shanghai Meteorological Information and Technology Support Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: Wind driven rain (WDR) is one of the main factors to be considered in architectural design. Using hourly precipitation, wind speed and direction data (2006—2015) of Shanghai Baoshan weather station, the climate characteristics of the precipitation, wind and wind environment during rain events were analyzed, annual WDR index and WDR load index were obtained, and the impact of different time resolution data source on index calculation were evaluated in this paper. The main conclusions are as follows: (1) The frequency of Baoshan station hourly rainfall occurrence is close to 10%, more than 99% of the sample hours' precipitation is less than 5 mm, and the main season for rainfall is summer. The annual prevailing wind direction at Baoshan station is northeast, east and southeast, with seasonal variation of northeast during autumn & winter and east or southeast during spring & summer. (2) Wind environment during rainfall events of Baoshan station is obviously different to all samples' statistics; the governing wind directions during rainfall events are northeast and east, and the average wind speed is greater than all the samples' result. (3) The WDR index of Baoshan station is $3.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. WDR load index of northeast and east is largest and southwest is smallest, the WDR load index of northeast (east) is 413.0 mm (388.3 mm), while the southwest is 103.7 mm. (4) The WDR index calculated through daily, monthly and annual data were smaller than the baseline value (based on hourly data) with largest range of yearly method and smallest range of daily method. The research results obtained in this paper will provide reference for the architectural design and urban planning of Shanghai.

Key words: Shanghai; wind driven rain; climate characteristics; architectural design

风驱雨(Wind Driven Rain, 简称 WDR)是指雨在垂直坠落过程中受风的影响而产生水平运动矢量形成斜雨的一种自然现象, 属于地球科学、建筑科学等领域的重要研究内容。在地球科学领域, 风驱雨对降水观测的准确度有重要影响^[1-3], 也是评估降水对土壤侵蚀的重要参数^[4-6]; 在建筑科学

领域, 风驱雨会影响建筑物表面水热交换性能和耐久性, 也会导致建筑材料渗水、结霜、褪色, 同时也会给建筑物外立面产生额外的雨荷载^[7-10]。因此, 开展风驱雨气候特征研究不仅能够进一步深化对自然现象的认识, 也能够为降低雨水灾害影响和相关技术标准制定提供科学依据, 有重要

收稿日期: 2018-02-02

修改稿日期: 2019-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501701); 公益性气象行业科研专项(201306030、201406038)

第一作者: 穆海振(1974—), 男, 高级工程师, 主要从事应用气象学研究。E-mail: muhz@hotmail.com

的实际应用价值。

风驱雨气候特征研究常用方法为半经验法,即利用气象常规观测要素,基于现场观测数据建立的半经验公式对风驱雨参数进行估计和分析,由于该方法资料易于获取,能充分利用广泛分布的气象台站资料,精度上也能基本满足建筑设计需求,因此得到了相关学者的广泛关注和普遍的应用,如 Lacy^[11-13] 利用年降水量与年平均风速提出了风驱雨指数,基于此指数及其改进形式,先后有学者绘制了丹麦、波兰、加拿大、美国、印度、西班牙、挪威、巴西、罗马尼亚等国的风驱雨地图^[14-17],在上述研究成果中,应用的气象台站观测资料主要为风和降雨,时间分辨率从小时、日、月和年不等。在前期研究成果基础上,英国、法国及欧盟标准委员会先后编制了相关技术规范,明确了建筑外立面防风驱雨设计参数的计算方法^[18-19]。

风驱雨对建筑物的影响在国内也得到一定程度的关注,如在《建筑物外墙防水工程技术规程》^[20]中明确了建筑外墙的防水标准设计时应综合考虑年降水量和风压的影响,也有学者利用 CFD 方法分析了建筑物布局对风驱雨特性的影响^[7-10, 21-22],但总体来看,对风驱雨的气候特征方面的研究成果还比较少,这一方面制约了我国建筑物抗风雨设计的标准的进一步优化完善,也使 CFD 数值模拟工作缺乏基础数据支撑,影响其成果的应用,因此有必要加强我国的风驱雨气候特征研究工作。上海位于副热带季风区,受季风影响,夏季雨量充沛,台风、强对流天气是影响上海的主要气象灾害^[23],其出现时往往强风、暴雨相伴而生,且上海的经济社会发展水平高,经济要素高度密集,高层建筑林立,研究上海地区风驱雨气候特征不仅对上海城市建设和防灾减灾有重要的实际应用价值,也可为国内其他地区,特别是东部沿海地区开展相关工作提供借鉴和参考。因此,本文参考国内外相关研究成果,利用上海宝山区气象站逐小时气象观测数据,分别从气候背景、降雨风环境、风驱雨指数及不同时间分辨率资料代表性等方面对风驱雨的气候特征及其研究方法进行了初步探索。

1 资料和方法

1.1 资料

本文所用气象资料来自于上海市宝山气象站,

该站位于上海北部,属国家基本气象站,台站观测环境较好,符合相关技术规范要求,所用资料包括该站逐时降水、风速、风向和逐日天气现象观测数据。小时降水量观测值为累计降水量,单位为 mm;风速和风向数据为地面 10 m 高度处观测仪器测定值,为定时前 10 min,即时距为 10 min,风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。资料起止时间为 2006 年 1 月至 2015 年 12 月,经过较为严格的质量控制^[24]。在研究降雨时风环境和风驱雨量、风驱雨负荷时,根据天气现象观测记录,若当日出现降雪,则该日的小时风和降水观测记录不参与统计。

1.2 方法

1.2.1 风环境参数计算

本文在绘制玫瑰图时,依据风的来向依次将其分为北(N)、东北(NE)、东(E)、东南(SE)、南(S)、西南(SW)、西(W)、西北(NW)8个方位,每个方位所含角度范围为 45° ,其中正北方位定为 0° ,依据式 1 和式 2 分别计算各方位范围内风向出现频率与该风向平均风速。风速为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的观测记录定义为静风。

$$F_i = \frac{M_i}{N} \times 100 \quad (i = 1, 8) \quad (1)$$

$$U_i = \frac{\sum_{j=1}^{M_i} WS_{i,j}}{M_i} \quad (i = 1, 8) \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: F_i 为第*i*个方位风出现频率,单位为%; U_i 为第*i*个方位的平均风速,单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; N 为总观测记录数, M_i 为第*i*个方位角范围内风观测记录出现频数, $WS_{i,j}$ 为第*i*个方位内第*j*个观测记录风速值。

1.2.2 年风驱雨量指数

在计算年风驱雨指数时,参考 Lacy^[25]的研究成果,建立了风驱雨指数计算公式(式(3)),该指数能够比较合理地描述墙面接受的风驱雨总量,有利于建筑设计师对不同地区风驱雨暴露度进行对比分析。

$$aWDR = \frac{\sum_{j=1}^{M_a} \frac{R_j}{1\,000} \cdot Ct \cdot WS_j}{N} \quad (3)$$

式中: $aWDR$ (annual Wind Driven Rain)为年风驱雨指数,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,根据相关文献研究成果^[11-13], $aWDR$ 的等级定义为: $aWDR < 3$ 为低风险(Shielded), $3 \leq aWDR < 7$ 为中等风险(Moderate), $7 \leq aWDR < 11$ 为高风险(High), $aWDR \geq$

11 为严重风险(Severe); R 为小时降水量, 单位为 mm; WS 为地面 10 min 平均风速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; C_t 为时距转换系数, 由于气象站观测资料的平均风速观测时距为 10 min, 需要在计算时转换至时距为 1 h, 本文依据 ASCE7-10 规范^[26], 取转换系数为 0.94; Ma 为符合条件的观测记录数, N 为用于统计的年数。

1.2.3 各方位风驱雨荷载指数

依据《ISO 15927-3: 2009》标准, 在给定方位角条件下, 空旷边界条件下建筑墙面的年风驱雨负荷指数(Airfield Index)可用式 4 表示, 该指数可视为在自由大气中穿过给定方位单位面积垂直墙面的年风驱雨总量。

$$L_i = \frac{\frac{2}{9} \sum_{j=1}^{M_0} WS_j \cdot C_t \cdot R_j^{\frac{8}{3}} \cdot \cos(WD_j - \theta_i)}{N} \quad (i = 1, 8) \quad (4)$$

式中: L_i 为 θ_i 方位角下年风驱雨荷载指数, 单位为 $\text{mm} \cdot \text{yr}^{-1}$; WS_j 为小时平均风速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; C_t 为时距转换系数; R_j 为小时降水量, 单位为 mm; WD_j 为风向; θ_i 为墙面方位角。 M_0 为统计年份内所有 $\cos(WD_j - \theta_i)$ 值大于 0 的观测记录数, N 为用于统计的年数。

表 1 宝山站各等级小时降水量出现频率/%

Tab. 1 The hourly precipitation frequency distribution of Baoshan station

降水等级/mm	0	[0.1~4.9]	[5.0~9.9]	[10.0~14.9]	[15.0~19.9]	≥ 20
出现频率/%	90.65	8.8	0.35	0.09	0.05	0.06

2.2 风环境

图 2 给出了宝山站的年平均风向和风速玫瑰图。宝山站的年主导风向依次为东北、东和东南, 其中东北风出现的频率超过 20%, 西南风出现的频率为最小, 仅为 6.2%, 静风的频率为 1.2%。从各月的盛行风向来看(图略), 在冬季和秋季, 出现最多的风向多为东北风, 而在春季和夏季, 盛行风向则为东风和东南风。宝山站年平均风速为 $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 西北方位平均风速最大, 达到 $3.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 西南方位平均风速最小, 为 $2.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 相邻方位角间平均风速变化总体上较为平缓。

3 降雨风环境

3.1 降雨风环境总体情况

图 3 为宝山站出现降雨情景(小时累积雨量 $> 0 \text{ mm}$)下风环境情况。降雨时宝山站的主导风向为

2 降水和风环境背景

2.1 降水

图 1 为宝山站多年平均逐月降水分布情况, 从中可以看出, 宝山站降水月际分布总体呈现出夏季多、冬季少的特点, 其中夏季 6~8 月的降水量达到 551.9 mm, 占全年降水总量的 45%, 冬季(12 月、1 月和 2 月)的降水总量为 172.0 mm, 约占全年总量的 14%。此外, 从小时降水量的频率分布来看(表 1), 宝山小时观测记录出现降水的频率接近 10%, 且其中绝大多数观测记录降水量均小于 5 mm, 小时降水量高于 5 mm 的频率小于 1%。

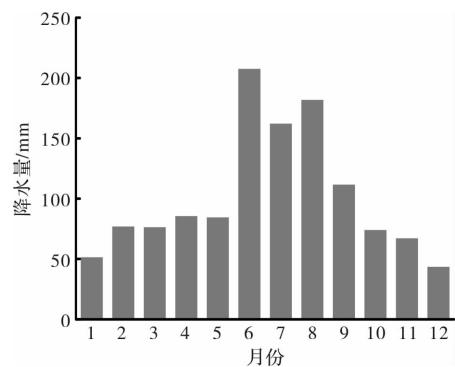


图 1 宝山站逐月降水量分布图(2006—2015 年)

Fig. 1 The monthly precipitation of Baoshan Station (2006—2015)

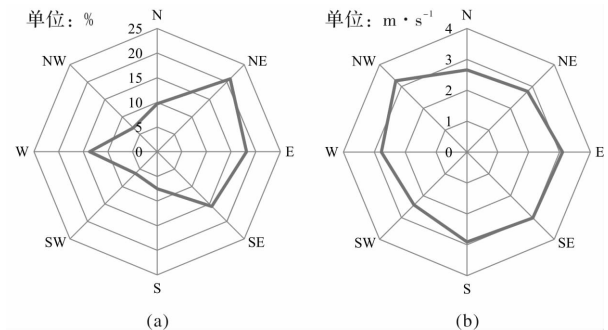


图 2 2006—2015 年宝山站风向玫瑰图和风速玫瑰图

Fig. 2 The rose map for wind direction and wind speed for Baoshan station (2006—2015)

东北风, 出现频率高达 29.9%, 其次为东风, 出现频率为 18.1%, 降雨时出现风向频率最少的方位为西南, 静风出现的频率为 0.5%。从平均风速来看, 宝山站出现降雨时的风速为 $3.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中风速最大的风向为东风, 平均风速为 $3.4 \text{ m} \cdot$

s^{-1} , 最小为西南风, 平均风速仅为 $2.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 与全年主导风向相比, 可以看出与出现降雨时的风环境有明显差别, 表现出平均风速总体有增加趋势, 出现静风的频率偏小, 且风向偏北的频率有明显增大趋势.

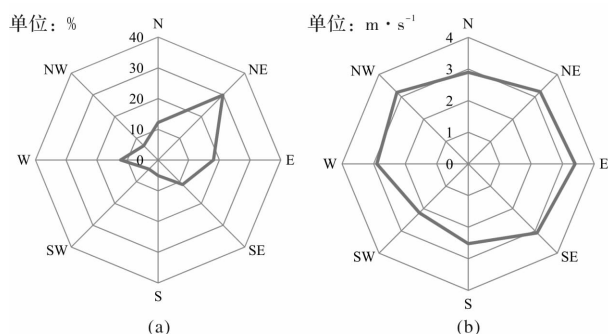


图 3 2006—2015 年宝山站降雨时风向玫瑰图
和风速玫瑰图

Fig. 3 The rose map for wind direction and wind speed during rainfall events for Baoshan station (2006—2015)

3.2 极端降雨风环境分析

极端降雨时风环境状况是建筑抗风雨参数设计需要考虑的重要因素, 因此进一步统计分析了宝山站小时降雨量大于 10 mm , 即发生极端降水时的风环境特性(图 4). 据统计, 2006—2015 年期间宝山站小时降雨超过 10 mm 的观测记录数为 176 次, 占总体样本数的 0.2% . 从图 4 可以看出, 当降雨超过 10 mm 时, 宝山站平均风速继续增大, 达到 $3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 静风频率则为 0, 其中东北风和东风的平均风速最大, 分别为 $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $3.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且两个方位风向频率亦为最高, 西南风的风速仍为最小, 为 $2.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 与有降雨时风环境相比, 极端降雨情景下平均风速偏大, 静风频率偏小, 值得关注的是, 主导风向除东北风和东风外, 风向偏西的频率也明显增加.

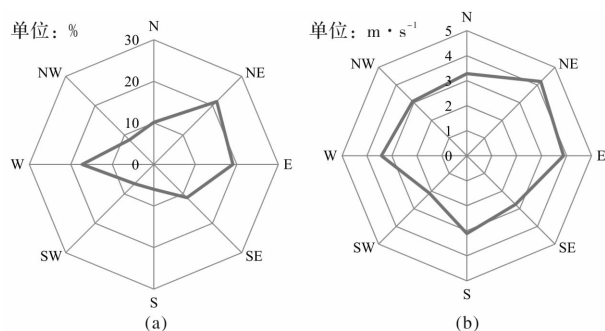


图 4 2006—2015 年宝山站极端降雨时风向玫瑰图
和风速玫瑰图

Fig. 4 The rose map for wind direction and wind speed during extreme rainfall events for Baoshan station (2006—2015)

4 风驱雨参数计算

为方便建筑工程设计应用及与其他地区的对比分析, 下面分别对宝山站的年风驱雨指数和各方位的年风驱雨荷载指数进行了计算. 风驱雨指数参考 Lacy(1964)的定义, 该指数由于计算简便, 且有利于不同地区的比较, 因此在评估风驱雨影响风险时得到了较为广泛的应用, 依据式 3 计算表明宝山站的年风驱雨指数为 $3.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 其风驱雨暴露度等级为中等(Moderate).

为进一步了解不同方位建筑外墙面临的风驱雨暴露度, 利用式 4 计算了 8 个方位角的年风驱雨荷载指数和小时风驱雨发生频率(图 5). 风驱雨荷载总体呈现东北方位大、西南方位小的特点, 其中东北和东两个方位风驱雨荷载最大, 年均值分别为 413.0 mm 和 388.3 mm , 最小为西南方位, 年风驱雨荷载为 103.7 mm , 仅为最大方位荷载的 25.1% . 风驱雨逐时发生频率总体也呈现出东北方位高、西南方位低的趋势, 其中东和东北两个方位风驱雨发生频率最高, 分别为 6.6% 和 6.4% , 西方位发生的频率最低, 仅为 2.7% .

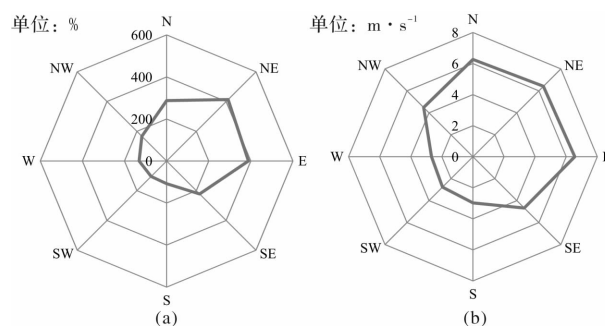


图 5 2006—2015 年宝山站年风驱雨荷载指数
和风驱雨逐时发生频率

Fig. 5 The rose map for wind driven rain load index and wind driven rain occurrence frequency for Baoshan station (2006—2015)

5 时间分辨率对风驱雨参数计算的影响

按照风驱雨指数和各方位风驱雨荷载指数的经验计算方法, 所需要的气象观测数据为小时观测数据, 但在实际工作中, 小时观测数据比较难以获得, 且历史序列较短, 给相关参数的计算工作造成了一定困难, 有时需要利用日值、月值或年值的观测数据进行替代. 为此, 本文利用不同分辨率数据对上海宝山历年风驱雨量进行了计算, 并以小时观测数据为基准, 对不同时间分辨率历

年风驱雨参数的误差进行了分析,以评估观测资料时间分辨率对风驱雨指数计算值的影响,其中日值、月值和年值的平均风速和雨量均利用小时数据进行平均或求和得到。

从变化趋势来看,基于日值、月值和年值数据得到的风驱雨量指数变化趋势与基准值(基于小时数据)一致性较好(表2),均通过 $\alpha=0.01$ 的相关性信度检验,其中基于日值的风驱雨量与基准值一致性最好,相关系数达到0.97。从相对误差来看,基于日值、月值和年值的风驱雨量指数均较基准值偏低,其中日值数据较为接近,偏低4.5%,年值偏低最多,偏低14.8%,其误差分布趋势呈现出在基准值较小的情况下,各类数据来源计算得到风驱雨量比较接近,但当基准值较大时,月值和年值的误差明显增加(图6)。以上结论与M Jose^[27]等人在西班牙的研究结果相一致,用于计算的数据来源时间分辨率愈低,所得风驱雨量的计算值误差越大,这说明用代用资料计算风驱雨量时,要考虑低估风驱雨量的可能性。

表2 基于不同时间分辨率数据的多年平均风驱雨量对比分析(2006—2015年)

Tab. 2 Comparison of wind driven rain index based on hourly, daily, monthly and yearly data source (2006—2015)

时间分辨率	小时/h	日	月	年
平均年风驱雨量/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	3.8	3.6	3.3	3.3
相关系数	1	0.97	0.88	0.86
相对误差/%	0	-4.5	-13.0	-14.8

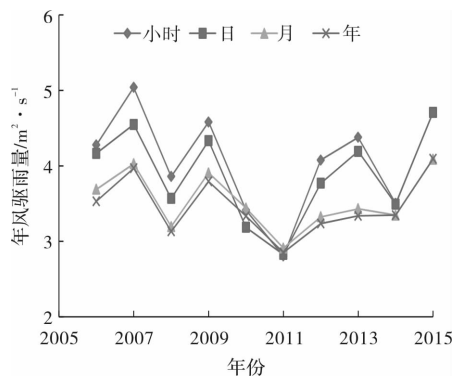


图6 基于不同时间分辨率数据的宝山站历年风驱雨量变化

Fig. 6 Variation of wind driven rain index based on hourly, daily, monthly and yearly data source

6 结论和讨论

利用上海宝山站逐时观测气象资料,分析了降水和风的气候背景、不同量级降雨时风环境特征,计算了风驱雨量指数和风驱雨荷载指数,评估了不同时间分辨率来源数据对指数计算值的影

响,主要结论如下:

(1)宝山站逐时出现降水的气候频率接近10%,超过99%的样本小时降水量小于5 mm,夏季是降雨的集中时段。在冬季和秋季,宝山出现最多风向多为东北,在春季和夏季,盛行风向则为东和东南,全年盛行风向依次为东北、东和东南。

(2)宝山站出现降雨时的风环境与全体样本统计值有明显差异,出现降雨和极端降雨时宝山站的主导风向均为东北风和东风,降雨和极端降雨情景下的平均风速明显增大,其中极端降雨时平均风速增大更为明显。

(3)宝山站的年风驱雨指数为 $3.8 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,其风驱雨暴露度等级为中等。年风驱雨荷载总体呈现东北方位大、西南方位小的特点,其中东北和东两个方位风驱雨荷载指数最大,年均值分别为413.0 mm和388.3 mm,最小的西南方位其年风驱雨荷载指数值为103.7 mm。

(4)基于日值、月值和年值数据得到的风驱雨量指数变化趋势与基准值(基于小时数据)一致性较好,但其值均较基准值普遍偏低,其中年值偏低最多,相对误差为-14.8%,日值最少,相对误差为-4.5%。

通过本文研究工作,可以看到宝山站降雨时风环境与常年平均有较明显差异,如平均风速变大,风频更为集中出现在东北和东,这些信息值得建筑设计时关注,所得参数也可用于与其他地区的对比分析,同时以下方面还需要在后续工作中进一步深化研究:1)在大范围区域内开展研究工作,以便不同地区间的比较,以得到更具普适性的结论;2)在统计风驱雨量等参数时要考虑重现期等指标的计算,以便在实际工作更为方便地应用;3)利用数值模拟、现场观测等方法对现有国外标准和规范中的参数进行验证和完善,为制定符合中国实际情况的技术规范提供参考。

参考文献 References

- [1] BORIS S, 邹耀芳. 风和降雨强度对降雨收集的影响: 各国雨量器与标准坑式雨量器的国际对比[J]. 气象科技, 1988(6): 88-92, 97.
BORIS S, ZOU Yaofang. Influence of wind and rainfall density on precipitation measurement: International comparison of rainfall gauges and standard pit gauges in different countries. Meteorological Science and Technology, 1988(6): 88-92, 97.
- [2] 任芝花, 李伟, 雷勇, 等. 降水测量对比试验及其主要结果[J]. 气象, 2007(10): 96-101.

- REN Zhihua, LI Wei, LEI Yong, et al. A comparison experiment of solid precipitation measurement and its primary results. *Meteorological Monthly*, 2007(10): 96-101.
- [3] 郑祚芳, 任国玉. 风场变形误差对北京降水记录及变化趋势的影响[J]. *水科学进展*, 2017(5):1-9.
ZHENG Zuofang, REN Guoyu. Effects of gauge under-catch on precipitation observation and long-term trend estimates in Beijing area[J]. *Advance in Water Science*, 2017(5):1-9.
- [4] MARZEN M, ISERLOH T, LIMA J L M P D, et al. Impact of severe rain storms on soil erosion: experimental evaluation of wind-driven rain and its implications for natural hazard management [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590:502-513.
- [5] 花长城, 彭兴黔, 吴仁伟, 等. 福建土楼夯土墙风驱雨侵蚀损伤预测研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(6): 1068-1074.
HUA Changcheng, PENG Xingqian, WU Renwei, et al. Predicted research of the erosion damage of the rammed earth wall of fujian earth buildings caused by the wind-driven rain [J]. *Journal of Natural Resources*, 2012(6):1068-1074.
- [6] 蔡丽君, 王国栋. 风矢量对坡面降雨动能分布的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2003(06):15-17.
CAI Lijun, WANG Guodong. The effects of the wind vector on the distribution of raindrop kinetic energy over sloping field [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003(06):15-17.
- [7] 孙芳锦, 吕艳卓, 冯旭. 大跨度悬挑屋盖风驱雨压分布特性的数值模拟研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(4):470-477.
SUN Fangjin, L Yanzhuo, FENG Xu. Study on wind-driven rain pressure distribution characteristics of large span cantilever roof [J]. *J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2017, 49(4): 470-477.
- [8] 王辉, 陈雨生, 曹洪明. 建筑立面风驱雨气动干扰特性的数值模拟研究[J]. *应用力学学报*, 2017(2):297-303, 405.
WANG Hui, CHEN Yusheng, CAO Hongming. Numerical simulation study on characteristics of aerodynamic interference on wind-driven rain on building facades [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017(2):297-303, 405.
- [9] 王辉, 邓羊晨, 易兵兵, 等. 湿下击暴流作用下建筑立面雨压分布特性的数值分析[J]. *应用力学学报*, 2016(1):99-104, 184.
WANG Hui, DENG Yangchen, YI Bingbing, et al. Numerical analysis of distribution characteristics of rain pressure on building facade under downburst accompanied with rain [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2016(1):99-104, 184.
- [10] 杨俊涛, 楼文娟. 风驱雨 CFD 模拟及平均雨荷载计算方法研究[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(5):600-606.
YANG Juntao, LOU Wenjuan. Research on wind driven rain CFD simulation and method calculating mean rain load [J]. *ACTA Aerodynamica Sinica*, 2011(5): 600-606.
- [11] LACY R E. Driving rain at Garston, United Kingdom [R]. CIB No. 4. CIB commission W-11, 1964. p. 1-4.
- [12] LACY R E. An index of driving rain[J]. *Meteorol. Mag.* 1962, 91: 177-184.
- [13] LACY R E. An index of exposure to driving rain [J]. *Building Res. Station Digest* 1971, (127):1-8.
- [14] BLOCKEN B, CARMELIET J. A review of wind-driven rain research in building science [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2004, 92:1079-1130.
- [15] RYDOCK J P, LISØ K R, FØRLAND E J, et al. A driving rain exposure index for Norway [J]. *Building & Environment*, 2005(11):1450-1458.
- [16] PÉREZ-BELLA J M, DOMÍNGUEZ-HERNÁNDEZ J, RODRÍGUEZ-SORIA B, et al. Estimation of the exposure of buildings to driving rain in Spain from daily wind and rain data [J]. *Building & Environment*, 2012, 57:259-270.
- [17] DOMÍNGUEZ-HERNÁNDEZ J, PÉREZ-BELLA J M, ALONSO-MARTÍNEZ M, et al. Assessment of water penetration risk in building facades throughout Brazil, *Building Research & Information*, 2016, 45: 492-507.
- [18] British Standards Institution. Code of practice for assessing exposure of walls to wind driven rain; BS 8104 [S]. London, UK; BSI, 1992.
- [19] British Standards Institution. ISO 15927-3:2009 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[S]. London, UK; BSI, 2009.
- [20] 住房和城乡建设部. 建筑外墙防水技术规程: JGJ/T235-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001年.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction. Technical regulations for waterproofing of building exterior wall: JGJ/T235-2011 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2001.
- [21] 王辉, 陈雨生, 曹洪明, 等. 组合布局对建筑立面风驱雨分布影响特性的数值分析[J]. *土木工程学报*, 2016, 49(12):27-34.
WANG Hui, CHEN Yusheng, CAO Hongming, et al. Numerical simulation for influence of combination layout on wind-driven rain distribution on building facades [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016(12): 27-34.

- [3] NOMURA T, AKIYAMA T. High-temperature latent heat storage technology to utilize exergy of solar heat and industrial exhaust heat [J]. *International Journal of Energy Research*, 2016.
- [4] JEGADHEESWARAN S, POHEKAR S D. Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(9): 2225-2244.
- [5] AGYENIM F, HEWITT N, EAMES P, et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(2): 615-628.
- [6] 谢望平, 汪南, 朱冬生, 等. 相变材料强化传热研究进展[J]. *化工进展*, 2008, 27(2): 190-195.
XIE Wangping, WANG Nan, ZHU Dongsheng, et al. Review of heat transfer enhancement of the PCMs[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2008, 27(2): 190-195.
- [7] DHAIDAN N S, KHODADADI J M. Melting and convection of phase change materials in different shape containers: A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 43:449-477.
- [8] SHOKOUHMAND H, KAMKARI B. Experimental investigation on melting heat transfer characteristics of lauric acid in a rectangular thermal storage unit[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2013, 50(6): 201-212.
- [9] ISKHAKOV I, RIBAKOV Y. Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 72(5):186-200.
- [10] HU Z, LI A, GAO R, et al. Effect of the length ratio on thermal energy storage in wedge-shaped enclosures [J]. *Journal of Thermal Analysis & Calorimetry*, 2014, 117(2):807-816.
- [11] DHAIDAN N S, KHODADADI J M, AL-HATTAB T A, et al. Experimental and numerical investigation of melting of phase change material/nanoparticle suspensions in a square container subjected to a constant heat flux[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 66(11):672-683.
- [12] 袁艳平, 曹晓玲, 白力, 等. 矩形单元内癸酸熔化特性的数值模拟与实验[J]. *西南交通大学学报*, 2012, 47(2):236-240.
YUAN Yanping, CAO Xiaoling, Bai Li, et al. Melting behaviors of Capric Acid in rectangular enclosure [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2012, 47(2):236-240.

(编辑 桂智刚)

(上接第 133 页)

- [22] 胡正生, 王辉, 孙建平, 等. 高层建筑迎风面风驱雨分布预测模型适用性的数值研究[G]//工程防震减灾新技术、新进展和新应用(下). 合肥:合肥工业大学出版社, 2016:811-818.
HU Zhengsheng, WANG Hui, SUN Jianping, et al. Numerical simulation on suitability of the semi-empirical model on wind-driven rain distribution on tall building windwards facades [J]//New technology, development & application in engineering for seismic prevention and disaster mitigation. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2016:811-818.
- [23] 严济远, 徐家良. 上海气候[M]. 北京:气象出版社, 1996:1-10.
YAN Jiyuan, XU Jialiang. *Shanghai Climate* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1996:1-10.
- [24] 中国气象局. 地面气象观测规范 [M]. 北京:气象出版社, 2003.
China Metrological Administration. *Specifications for surface meteorological observation* [M]. Beijing: Meteorological Press, 2003.
- [25] LACY R E. *Climate and Building in Britain* [M]. London, UK: Her Majesty's Stationery Office, 1977.
- [26] American Society of Civil Engineers. *Minimum design load for buildings and other structures: ASCE7-10* [S]. Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2013.
- [27] PÉREZ-BELLA J M, DOMÍNGUEZ-HERNÁNDEZ J, CANO-SUNNÉN E, et al. On the significance of the climate-dataset time resolution in characterising wind-driven rain and simultaneous wind pressure. Part I: scalar approach[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2018(6): 1783-1797.

(编辑 桂智刚)