DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.017

夏季风驱雨对墙体传热量的影响效果分析

王 童, 白 璐, 王乙晴, 平正浩

(内蒙古工业大学 土木工程学院,内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 我国南方地区降雨较多,风驱雨是该地区建筑墙体负荷预测与能耗计算的关键影响因素。为明确风驱雨作用对建筑墙体传热量的削减作用,基于广州、上海、海口和长沙1999-2023年6月的气象数据,计算四座城市各朝向风驱雨量,分析风驱雨量特性及累计传热量计算结果,提出可反应蒸发冷却作用对墙体传热量影响效果的参数——折减系数,并给出折减系数的推荐取值范围。结果表明:受季风影响广州、海口和上海的南墙和东墙的月均风驱雨量大,基本在3 mm以上,长沙各朝向的风驱雨量较为平均,在2.17 mm左右;折减系数与风驱雨量呈负相关且受累计传热量的影响;利用分布函数给出广州和长沙折减系数取值范围较为准确,85%均在预测范围之内。海口与上海92%位于折减系数预测范围的下限以上。本研究所提出的折减系数可用于工程实际中考虑降雨对围护结构传热的影响,为进一步精确进行能耗计算奠定基础。

关键词: 风驱雨; 累计传热量; 折减系数

中图分类号: TU111; **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0625-08

Analysis of summer wind-driven rain impact on wall heat transfer

WANG Tong, *BAI Lu*, *WANG Yiqing*, *PING Zhenghao*

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China)

Abstract: There is a lot of rainfall in southern China, and wind-driven rain is the key influencing factor for building wall load prediction and energy consumption calculation in this region. In order to clarify the effect of wind-driven rainfall on the heat transfer of building walls, based on the meteorological data of Guangzhou, Shanghai, Haikou and Changsha from 1999 to June 2023, the wind-driven rainfall in each direction of the four cities was calculated, and the characteristics of wind-driven rainfall and the calculation results of cumulative heat transfer were analyzed. A parameter named reduction coefficient was proposed to reflect the influence of evaporative cooling on wall heat transfer, and the recommended value ranges of this coefficient were also presented. The results show that under the influence of the monsoon, the average monthly wind-driven rainfall of the south and east walls of Guangzhou, Haikou and Shanghai is large, which is basically more than 3 mm, and the wind-driven rainfall in each direction of Changsha is relatively average, about 2.17 mm. The reduction coefficient is negatively correlated with wind-driven rainfall and also affected by cumulative heat transfer. By using the distribution function, the value range of the reduction coefficient of Guangzhou and Changsha is more accurate, with 85% of the values falling within the predicted range. For Haikou and Shanghai, 92% of the values lie above the lower limit of the predicted range. The reduction factor proposed in this study can be used to consider the influence of rainfall on the heat transfer of the enclosure structure in engineering practice, which lays a foundation for further accurate energy consumption calculation.

Key words: wind-driven rain; cumulative heat transfer; reduction factor

风驱雨(WDR)是指雨水在降落过程中,受到风向和风速等因素的影响,倾斜降落到外壁面的现象。风驱雨是建筑外壁面水分的主要来源,因此风驱雨是影响建筑热工性能的重要因素。目前风驱雨量的计算方法主要有三种,分别为现场实测、CFD数值模拟、半经验模型。首先,现场实测是将测量仪器悬挂在墙面上直接测量风驱雨量的一种方法。Cho E等[1]分析真实建筑的风驱雨量,将现场测量值和估算值进行对比,验证分析了所提出的经验方程。Hu X等[2]了解各种外部装饰材料的动

收稿日期: 2024-08-30 **修回日期**: 2026-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(52368010);内蒙古自治区自然科学基金(2022QN05014)

第一作者: 王 童(1998—),女,硕士生,主要从事建筑热湿环境研究。E-mail:wt166800@163.com

通信作者: 白 璐(1992—),男,博士,讲师,主要从事建筑热工性能和建筑节能等方面的研究。E-mail:bailu1266@163.com

态WDR吸收行为,并选取了9种整理材料作为研究对象,进行了现场测量。结果表明,材料的物理参数、表面防水性能和累积WDR对WDR的吸收率均有影响。Hua Ge等[3]在加拿大三个地区对中高层建筑的WDR进行了实地测量,实验所得结论为建筑物的WDR捕获量与风速和水平降雨强度成正相关。其次,数值方法是基于建筑物周围风场和水平降雨密度的建筑立面WDR分布的数学模拟。王辉等[4]通过数值模拟不同形状的开口,不同风速和降雨强度下的WDR场,发现洞口形式和风速的变化对开洞建筑迎风立面和室内地面抓取率影响显著。Kubilay[5]对一栋高层塔楼的风驱雨量进行了实测,将EM模型模拟结果与测量数据进行对比,分析该模型与其他数值模型的优略。相较于上述两种方法,半经验模型法较为简单,节约了实验与模拟的成本和时间,只需根据风向、风速和逐时降雨强度的气象数据就能估算出建筑物外壁面的风驱雨量。常用的半经验模型主要包括ISO半经验模型[6]和ASHRAE半经验模型[7]。陈超等[8]对风驱雨撞击量的取值方法进行研究,结果表明ASHRAE半经验模型相对于ISO半经验模型其计算结果会高出3~8倍。Lu等[9]研究表明在使用ISO模型计算风驱雨量的过程,采用概率平均值和算术平均值对风向和风速进行取值更为准确。穆海振[10]采用半经验模型对上海地区的风驱雨量进行分析,结果表明风驱雨荷载总体呈现东北方位大、西南方位小的特点。

风驱雨作用在壁面后,雨水会蒸发导致壁面温度降低从而产生了冷却壁面的效果。钱天达等[11]针对风驱雨量三种模型进行了总结与分析,研究发现风驱雨会给建材热工性能和建筑能耗带来很大的影响。Diaz等[12]研究了降雨对低层建筑热工性能的影响,从室外表面与周围环境的单位面积的总热量传递在雨季可能被高估了20%。邹子琪等[13]进行风驱雨对建筑能耗的影响研究,在考虑风驱雨和不考虑风驱雨条件下,对陶土烧结砖和瓷砖墙体进行全年动态模拟和能耗计算,研究表明风驱雨会明显降低建筑制冷能耗,不考虑风驱雨的情况下,瓷砖和陶土烧结砖墙体制冷能耗分别被高估了11.26%和14.53%。

综上所述,关于风驱雨模型的研究已经较为完善,可通过计算得到较为准确的风驱雨量。同时研究者进一步依据风驱雨量,探究风驱雨作用对墙体热量传递的影响,目前相关研究多为在驱动雨系数法的基础上,进行模拟,得到风驱雨作用后的墙体传热量。虽结果相对准确,但该计算过程复杂,无法在工程实际中广泛的应用。本研究为便于工程实践中评估风驱雨对建筑能耗的影响,依据典型城市20年的气象数据,采用ISO模型计算出不同朝向的风驱雨量,对比有无风驱雨两种工况下墙体累计传热量的差异性,提出可反应壁面蒸发冷却对墙体传热量影响的指标——折减系数,利用概率分布函数分析典型城市不同朝向20年折减系数的频率分布特点,给出对应折减系数的推荐取值范围,便于评估降雨的蒸发冷却作用对壁面传热量的影响,有助于工程实践中得到更准确的建筑能耗。

1 研究方法

1.1 数学模型

1.1.1 ISO半经验模型

现有研究表明ASHRAE半经验模型,其计算所得值较ISO半经验模型和实测结果较大,常高于实测值3~8倍准确性方面较ISO模型稍逊一筹[8,18]。此外ISO半经验模型对物理过程的考量全面,能够将雨滴大小的分布状况,地面高度、地形、障碍物对风速的影响等一系列关键要素都纳入其中与之相比。ASHRAE半经验模型所考虑到的影响因素少。ISO半经验模型中给出的建筑垂直外墙面的风驱雨量表示为:

$$R_{\mathrm{wdr}}=\frac{2}{9}C_R C_T O W U_{10} R_h^{0.88}\cos\theta \tag{1}$$

式中:U_{10}为10 m高度处的参考风速,m/s;R_h为水平降雨量,mm/h;C_R为场地粗糙度系数;C_T为地形系数,一般取1.0;O为阻碍因子;W为墙因子;θ为风向与墙面法线之间的夹角。本文所选取的模型参数取值[8]见表1。

表1 计算参数

Tab. 1 Calculation parameters

标准	参数	取值
ISO 15927—3:2009	W	0.3
	C_R	0.77
	C_T	1
	O	0.5

1.1.2 蒸发换热过程

墙体的单位传热量可以表示为:

$$q=K(t_{\mathrm{out}}-t_{\mathrm{in}}) \tag{2}$$

$$K=\frac{1}{\dfrac{1}{h_1}+\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}+\frac{1}{h_2}} \tag{3}$$

式中:q为墙体的单位传热量,W/m^2;K为传热系数,W/(m^2·K);$\displaystyle\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}$为平壁单位面积的总导热热阻,(m^2·K)/W;$h_1$为外表面对流换热系数,取值为19 W/(m^2·

K)；h_2为内表面对流换热系，取值为8.7 W/(m²·K)；t_{out}为室外气象综合温度，℃；t_{in}为室内空气温度，℃。

6月墙体累计传热量为：

$$Q_1 = A\sum_{i=1}^{n}(q_i \times 3\,600) \tag{4}$$

式中：Q_1为累计传热量，J；n为小时数。

水分蒸发的汽化潜热可以表示为：

$$Q_2 = m \times r \times 10^3 \tag{5}$$

$$r = 2\,497.848 - 2.324t \tag{6}$$

式中：Q_2为蒸发潜热量，J；m为蒸发的水分质量，kg；r为水的汽化潜热，kJ/kg，t为室外空气温度，℃。

1.1.3　折减系数

为直观的了解风驱雨对建筑能耗的影响程度，定义考虑壁面淋雨的墙体累计传热量与未考虑壁面淋雨的墙体累计传热量的比值为折减系数，如式7。本次研究假设淋在外壁面的风驱雨量全部蒸发冷却，转化为汽化潜热量，并无水分残留在墙体内部。折减系数最大为1，表示无降雨，壁面未发生蒸发冷却现象，Q_2为0。当折减系数小于1时，表示降雨造成壁面发生蒸发冷却现象，此时Q_2不为0。折减系数越小说明蒸发潜热量Q_2越大，风驱雨对墙体的传热量影响越大。

$$\varphi = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \tag{7}$$

1.2　物理模型

上海和长沙属于夏热冬冷地区，模拟所采用的墙体构造由内壁面到外壁面依次为20 mm水泥砂浆、200 mm普通烧结页岩空心砖砌块、25 mm保温材料（难燃型挤塑聚苯板）和20 mm水泥砂浆[14]。广州和海口属于夏热冬暖地区，模拟所采用的墙体构造由内壁面到外壁面依次为20 mm水泥砂浆、200 mm加气混凝土砌块、25 mm保温材料（EPS）和15 mm水泥砂浆[15]。如图1和图2所示。

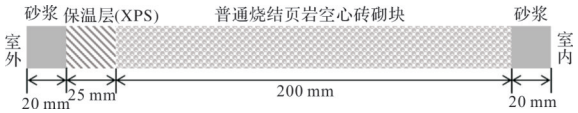


图1　夏热冬冷地区墙体构造示意图

Fig. 1　Schematic diagram of wall structure in hot summer and cold winter region

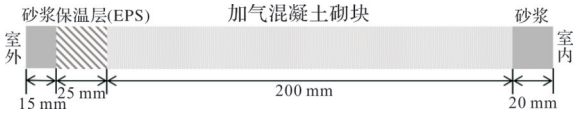


图2　夏热冬暖地区墙体构造示意图

Fig. 2　Schematic diagram of wall structure in hot summer and warm winter region

1.3　边界条件

6月是全国大部分城市步入夏季的起始阶段。此月，降雨量相较于春季大幅度提升，蒸发换热效果显著增强。因此，本研究选取1999-2018年6月四座典型城市的风向、风速和降雨量[16]，计算得到建筑各朝向的风驱雨量。在计算墙体累计传热量时，为使研究结果具有普适性，室外温度采用典型气象年气象数据[17]，计算得到的室外综合温度。根据人体温度舒适区，设置室内为空调房间，温度设置为恒定温度24 ℃[13,21]。

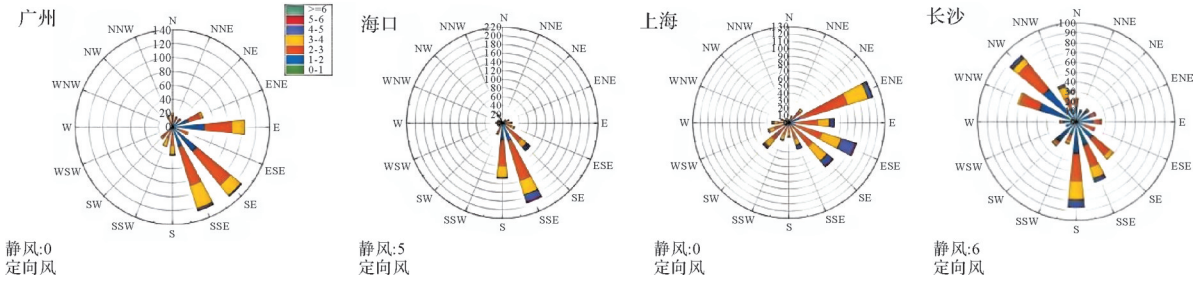


图3　各城市6月风速风向

Fig. 3　Wind speed and direction in each city in June

各城市6月风速风向，见图3。广州以东南风为主，海口以东南风为主，上海以东北风为主，长沙以南风和西北风为主。由图4可以看出逐年6月降雨量，其中广州降雨量最多，长沙次之，海口和上海最少。

2　结果与讨论

2.1　建筑壁面风驱雨量及折减系数分析

通过计算得到海口、广州、长沙和上海四座城市1999—2018年6月不同朝向的风驱雨量和折减系数，为减少这20个年份中6月份极端降雨情况的影响，使研究结果更具有普适性，故将四座城市四个朝向20个年份的风驱雨量舍去一个最大值和最小值，以1999—2018年中18个年份的数据作为分析对象，虚线给出了这18个年份6月份各朝向风驱雨量的平均值，如图5。

可以看出，受到降雨强度、风向和风速等因素的影响，各城市不同朝向的风驱雨量有显著差异，广州上海东墙最大在4.7 mm以上，海口最大值出

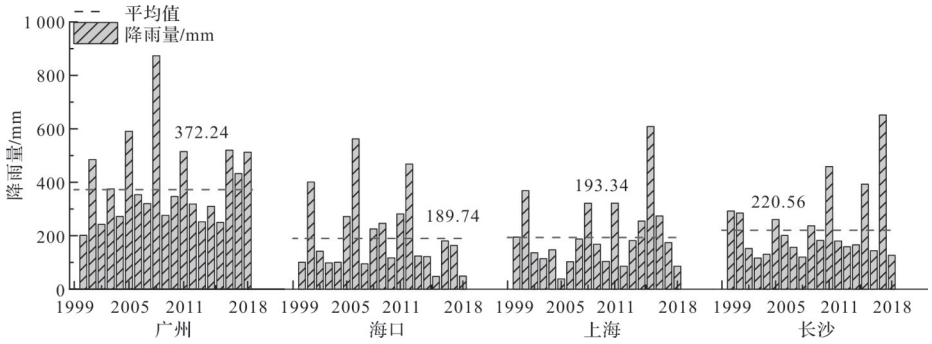


图 4 1999-2018 年逐年 6 月降雨量

Fig. 4 Annual rainfall in June from 1999 to 2018

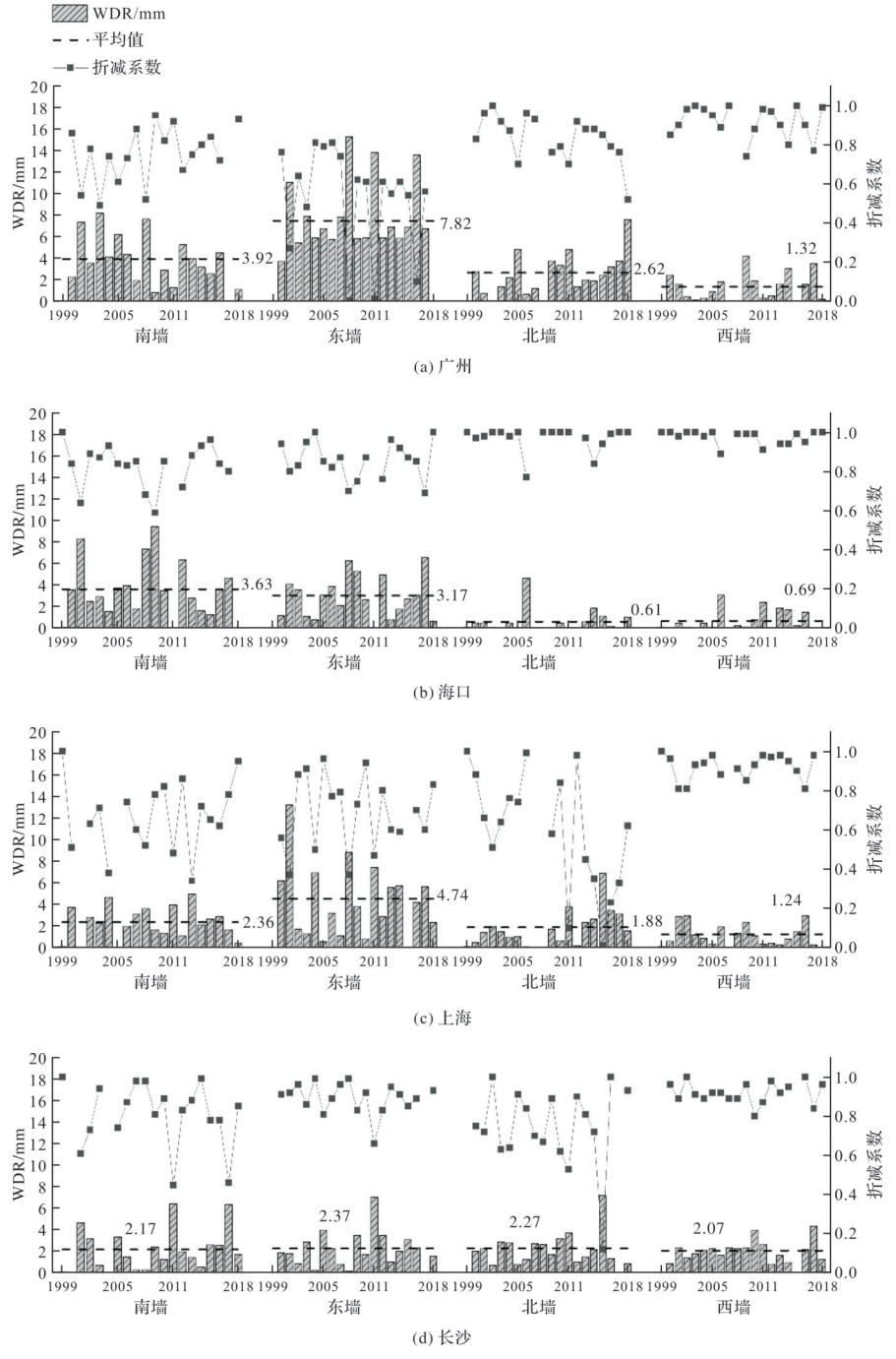


图 5 1999-2018 年逐年 6 月 WDR 量

Fig. 5 Annual WDR amount in June from 1999 to 2018

现在南墙 3.63 mm，长沙四个朝向较为平均在 2.2 mm 左右。广州、海口和上海的南墙和东墙相比于北墙和西墙的风驱雨量较大，这主要是由于受到风向的影响，从图 3 中可以看出广州和海口的主导风向分别为东南风和南东南风，上海主导风向为东东北风，同时存在部分风向为东南风和东东南风，这也就造成了广州与上海两地东墙的风驱雨量大于南墙，具体表现为东墙的风驱雨量较南墙高出 2 mm 以上，而海口东墙和南墙的风驱雨量基本相同。长沙出现西北风和南风的频次较多，因此长沙各朝向的风驱雨量较为平均。

显然折减系数的大小与风驱雨量显负相关，且波动范围大，图 5 中各朝向基本表现出风驱雨量越大，折减系数越小。这是由于风驱雨量越大，壁面雨水的蒸发冷却作用越大，带走墙体表面的热量 Q_2 就越多，使得外壁面的温度有所下降，进而减少了外壁面与室外环境的换热量。其中，上海北墙相较于其他朝向出现了风驱雨量较低，而折减系数也很小的情况，这主要是由于北墙的累计传热量 Q_1 较小，风驱雨量虽然会带走墙体表面相似的 Q_2，但在 Q_1 较小的情况下对折减系数 φ 产生较大影响。此外，长沙西墙与其他朝向风驱雨量相似，但折减系数较大，这是由于累计传热量 Q_1 较大，相似的蒸发换热量 Q_2 对折减系数的影响较小。

随着各年份 6 月份风向、风速和降雨量的变化，月风驱雨量存在很大差异，折减系数也随之出现波动。另一方面折减系数也受壁面累计传热量的影响，壁面累计传热量较少，折减系数随风驱雨量的波动程度越大；反之，壁面累计传热量较多，折减系数随风驱雨量的波动程度越小。

2.2　折减系数频率分布

为便于工程实践中估计夏季降雨蒸发冷却对墙体换热量的减少效果，通过观察四座典型城市不同朝向 18 个年份折减系数的频数分布特点，选取适当的频率分布函数进行统计学分析并对其分类，以频率出现概率大于 80% 为限值，给出了四座城市不同朝向 6 月份的折减系数推荐取值范围。

图 6 中大部分折减系数的频数分布与正态分布相类似，首先对四座典型城市不同朝向的折减系数进行正态分布检验。样本数量为 18 个，采用 Shapiro-Wilk test 方法进行正态分布检验。检验结果显著性大于 0.05 时，说明此样本符合正态分布，称为第一类选取标准。计算出折减系数概率大于 80% 的取值范围，需要查标准正态分布表（Z 表）找到 $P(Z_1 \leqslant X_1)=0.1$ 和 $P(Z_2 \leqslant X_2)=0.9$ 时对应的 Z_1 和 Z_2 的数值。通过查表可知 $Z_1=-1.28$ 时，$P(-1.28 \leqslant X_1)=0.1$，同样 $Z_2=1.28$ 时，$P(1.28 \leqslant X_2)=0.9$。由 Z_1 和 Z_2 可以推算出 X_1 和 X_2 的取值，从而得到概率大于 80% 的取值范围（X 的下限为 Z 取 -1.28 时，计算得出 X_1 的数值；X 的上限为 Z 取 1.28 时，计算得出 X_2 的数值）。Z 值的具体计算步骤如下：

$$Z=\frac{X-\mu}{\sigma} \tag{8}$$

式中，X 是原始数据点，μ 是原始数据集的均值，σ 是原始数据集的标准差。

以广州南墙为例，其均值为 0.75（$\mu=0.75$），标准差为 0.14（$\sigma=0.14$），通过计算得到 $X_1=0.57$、$X_2=0.93$，其折减系数 φ 取值范围为 0.57～0.93，如图 6。

若正态分布检验结果显著性小于 0.05 时，说明此样本不符合正态分布，则采用百分位法（百分位法是将样本数据从小到大进行排序，并统计其累计频率，即累计百分位，累计百分位所对应的数值就称为这一百分位的百分位数，如处于 p% 位置的值称第 p 百分位数）作为取值范围的选取标准，称为第二类选取标准。为计算出折减系数概率分布大于 80% 的取值范围，上限则取 10% 处的数值，下限则取 90% 处的数值。

以上海北墙为例，此样本 10% 处的数值为 0.12，90% 处的数值为 0.89，其折减系数 φ 的取值范围为 0.12～0.89，如图 6。

由上述步骤可得四座城市不同朝向的折减系数取值范围，见表 3。其中海口北墙和西墙，以及上海西墙折减系数取值范围均在 0.95～1 之间，说明风驱雨对墙体累计传热量的影响较小，在实际中可忽略不计，因此将不再考虑风驱雨对这三面外墙累计传热量的影响。

2.3　折减系数范围验证

通过本文计算折减系数的相同步骤得出四个城市不同朝向 2019—2023 年逐年 6 月的折减系数。并将 2019—2023 年的折减系数与上述所得取值范围进行对比，得出的结果如图 7 所示。

经检验利用该方法所确定的广州和长沙折减系数取值范围较为准确，共 40 个折减系数，85% 均在预测范围之内。海口与上海共 25 个折减系数，92% 位于折减系数预测范围的下限以上，但存在一些年份略高于预测范围上限，主要原因在于降雨量随机性大，用于验证的年份风驱雨量略低于前二十年的风驱雨量均值，见表 4。因此通过本文所确定的折减系数取值方法可为工程实践提供参考。

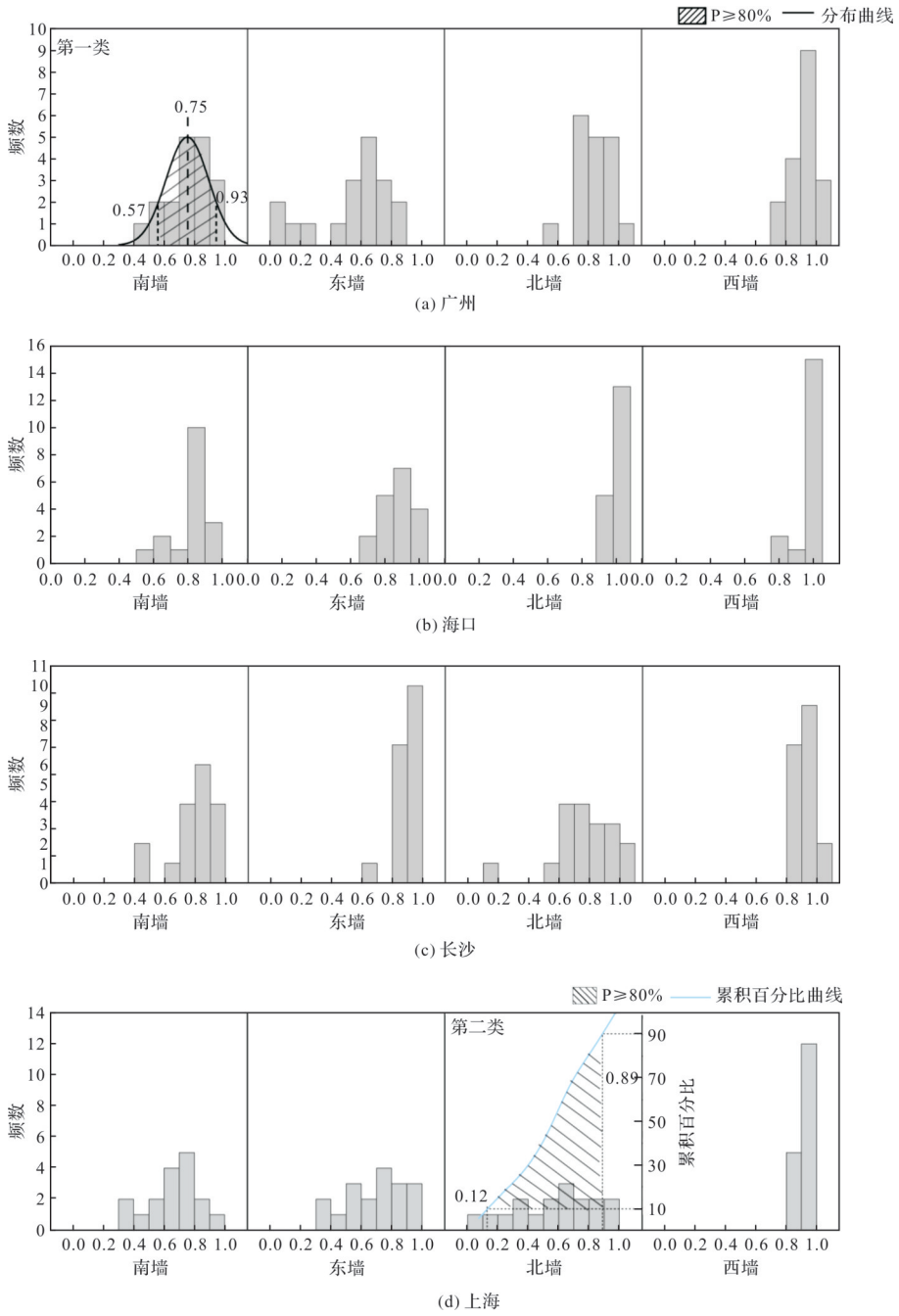


图 6 折减系数频率分布图

Fig. 6 Frequency distribution of reduction factor

表 2 取值范围选取类型

Tab. 2 Selection types of value ranges

朝向	城市			
	广州	海口	上海	长沙
西墙	第二类	/	/	第一类
北墙	第一类	/	第二类	第二类
东墙	第二类	第一类	第一类	第二类
南墙	第一类	第一类	第一类	第二类

为了更加便于工程实践应用,现给出四座城市不同朝向的折减系数推荐值。对于符合正态分布的样本(折减系数取值范围选取类型为第一类),将其均值作为推荐值;对于采用百分位法分析折减系数的样本(折减系数取值范围选取类型为第二类),则选取出现概率较高的数值作为推荐值。四座城市不同朝向的折减系数推荐值,见表4。

现阶段,众多学者在研究过程中充分考量了围护结构热湿耦合以及蒸发换热等多方面因素[19-20],这种计算方法往往需要借助更为繁杂精细的数值模拟手段才能实现。本研究所提出的方法主要应用于工程实际中,虽然数值模拟方法相较于文中所提出的方法更为精确,但有助于工程实践中快速评估壁面淋雨对于墙体传热量的影响。

表 3　折减系数取值范围

Tab. 3　Value ranges of reduction factor

朝向	城市			
	广州	海口	上海	长沙
西墙	0.77～0.99	/	/	0.86～0.98
北墙	0.68～0.98	/	0.12～0.89	0.5～0.99
东墙	0.25～0.81	0.73～0.97	0.45～0.94	0.80～0.99
南墙	0.57～0.93	0.69～0.97	0.44～0.9	0.46～0.99

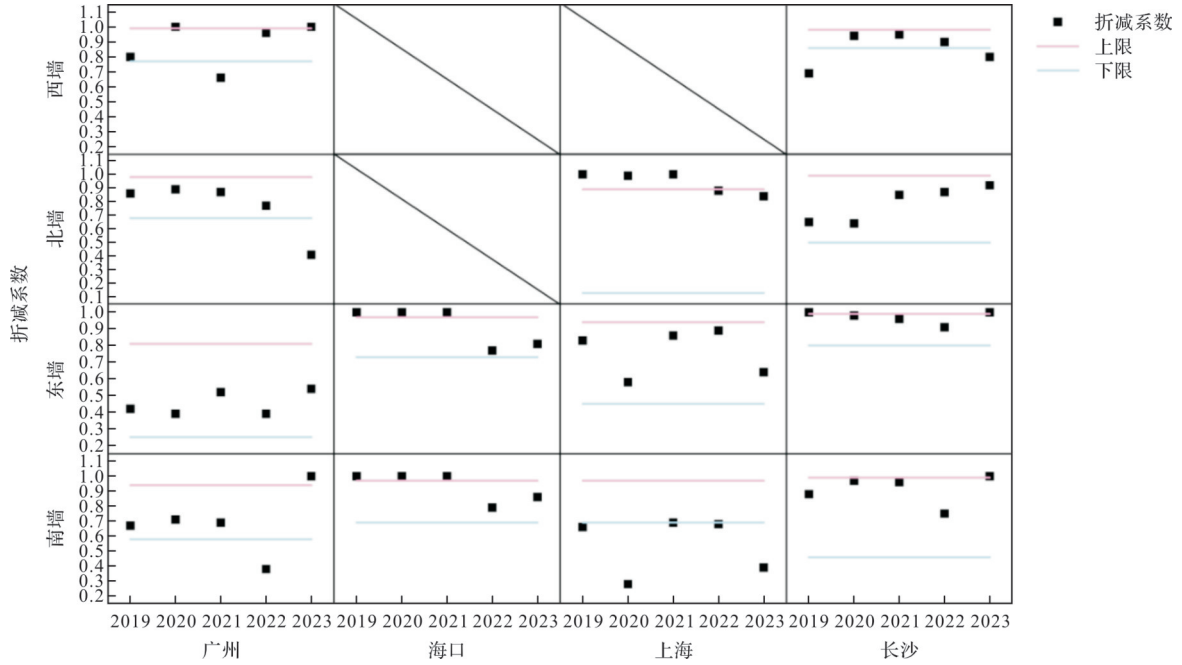


图 7　四座城市折减系数验证分析图

Fig. 7　Verification analysis diagram of reduction factors for four cities

表 4　折减系数推荐值

Tab. 4　Recommended value of reduction factor

朝向	城市			
	广州	海口	上海	长沙
西墙	0.95	/	/	0.92
北墙	0.83	/	0.65	0.7
东墙	0.65	0.86	0.69	0.95
南墙	0.75	0.83	0.67	0.85

3　结论

本文计算了广州、海口、上海和长沙四个城市1999-2023年6月不同朝向的风驱雨量,量化了风驱雨对墙体传热的作用效果,提出了可反映某时间段内雨水蒸发冷却效果对墙体传热量影响程度的指标,得到以下结论:

(1)我国沿海地区6月份受东南季风的影响,广州、海口和上海的南墙和东墙相比于北墙和西墙的月均风驱雨量较大,基本在3 mm以上,长沙相较于上述三座城市处于内陆地区,各朝向的风驱雨量较为平均,在2.17 mm左右.

(2)折减系数一方面与风驱雨量呈负相关,另一方面与墙体累计传热量有关,波动范围大,四座典型城市东墙和南墙折减系数较小,西墙的折减系数较大.

(3)采用正态分布和百分位法,对折减系数进行统计分析,选取不同城市各朝向的取值范围. 经验证,广州和长沙折减系数取值范围较为准确,85% 均在预测范围之内. 海口与上海92% 位于折减系数预测范围的下限以上.

风驱雨对我国南方地区的围护结构热工性能及负荷计算有重要影响,本文提出了折减系数这一参数来衡量降雨对墙体传热量的影响效果,该参数便于工程实际应用,为进一步优化能耗预测奠定了基础.

参考文献 References

[1] CHO E, YOO C, KANG M, et al. Experiment of wind-driven-rain measurement on building walls and its in-situ validation [J]. Building and Environment, 2020, 185: 107269.

[2] HU X, ZHANG H, QIAN T, et al. Modeling of

wind-driven rain absorption ratio of building exterior finishing materials based on field measurements[J]. Frontiers of Architectural Research, 2024.

[3] GE H, NATH U K D, Chiu V. Field measurements of wind-driven rain on mid-and high-rise buildings in three Canadian regions[J]. Building & Environment, 2017, 116(5):228-245.

[4] 王辉,李雷. 建筑开洞对风驱雨影响特性的数值研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(10):1371-1378.
WANG Hui, LI Lei. Numerical study on the influence characteristics of building openings on wind and rain[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition),2022,45(10):1371-1378.

[5] KUBILAY A, DEROME D, BLOCKEN B, et al. CFD simulation and validation of wind-driven rain on a building facade with an Eulerian multiphase model[J]. Building & Environment, 2013, 61(61):69-81.

[6] ISO 2009. Hygrothermal performance of buildings-Calculation and presentation of climatic data-Part3: calculation of a driving rain index for vertical surfaces from hourly wind and rain data. ISO, 15927-3: 2009. International Organization for Standardization.

[7] ASHRAE Standard Criteria for Moisture-control Design Analysis in Buildings: 160-2009 [S]. ASHRAE, Atlanta, GA.

[8] 陈超,张会波,钱天达. 基于半经验模型的建筑风驱雨研究[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(10):95-102.
CHEN Chao, ZHANG Huibo, QIAN Tianda. Research on Wind and Rain Driving in Buildings Based on Semi-empirical Model [J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(10): 95-102.

[9] LU B, FANG J, LI Y, et al. Accuracy of semi-empirical models for wind-driven rain using different data processing methods for wind velocity and direction [J]. Building and Environment, 2023, 237: 110300.

[10] 穆海振. 上海地区风驱雨气候特征分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(1):128-133,139.
MU Haizhen. Climatic characteristics of wind driven rain of Shanghai[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition),2019,51(1):128-133,139.

[11] 钱天达,张会波,陈超,等. 风驱雨对建筑外墙润湿的影响研究综述[J]. 建筑节能(中英文),2022,50(5):1-9.
QIAN Tianda, ZHANG Huibo, CHEN chao, et al. A review of the effects of wind and rain on the wetting of building exterior walls [J]. Building Energy Efficiency,2022,50(5):1-9.

[12] DIAZ C A, OSMOND P. Influence of rainfall on the thermal and energy performance of a low rise building in diverse locations of the hot humid tropics [J]. Procedia Engineering, 2017, 180:393-402.

[13] 邹子琪. 广州地区风驱雨条件下的建筑垂直调和界面蒸发降温研究[D]. 广州:广州大学,2022.
ZOU Ziqi. Study on evaporative cooling of building vertical harmony interface under wind-driven rain conditions in Guangzhou[D]. Guangzhou: Guangzhou University,2022.

[14] 续璐,丁勇. 夏热冬冷地区不同构造形式外墙动态传热特性分析[J]. 暖通空调,2021,51(6):21-28,127.
XU Lu, DING Yong. Analysis of dynamic heat transfer characteristics of exterior walls with different structural forms in hot summer and cold winter[J]. HVAC,2021,51(6):21-28,127.

[15] 中国建筑标准设计研究院. 外墙外保温建筑构造:10J121[M]. 北京:中国计划出版社,2010.
China Building Standard Design and Research Institute. Exterior wall insulation building structure: 10J121[M]. Beijing: China Planning Press,2010.

[16] NOAA. National centers for environmental information [EB/OL]. [2024-01-02]. [2024-08-30]. https://www.ncei.noaa.gov/access.

[17] 宋芳婷,诸群飞,吴如宏,等. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京:中国建筑出版社, 2005.
SONG Fangting, ZHU Qunfei, WU Ruhong, et al. Special meteorological dataset for building thermal environment analysis in China [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005.

[18] FANG A, CHEN Y, WU L. Modeling and numerical investigation for hygrothermal behavior of porous building envelope subjected to the wind driven rain[J]. Energy and Buildings,2021,231: 110572.

[19] 何雪琼,张会波,禹国军,等. 附加空气层的多层墙体热湿耦合非稳态传递模型及验证[J]. 化工学报,2020,71(S1):114-119.
HE Xueqiong, ZHANG Huibo, YU Guojun, et al. Non steady state heat and moisture coupled transfer model and verification of multi-layer walls with additional air layer [J]. Journal of Chemical Engineering, 2020,71(S1): 114-119.

[20] 黎珊,李琼,毛会军,等. 湿热地区公交候车亭夏季喷雾降温实验研究[J]. 建筑科学,2023,39(4):63-69,80.
LI Shan, LI Qiong, MAO Huijun, et al. Experimental study on spray cooling of bus shelters in hot and humid areas in summer [J]. Architectural Science, 2023,39(4): 63-69,80.

[21] 何石维. 夏热冬冷地区风驱雨对外墙热湿行为及建筑室内热湿环境和能耗的影响研究[D]. 南昌:南昌大学,2021.
HE Shiwei. Study on the influence of wind and rain on the heat and humidity behavior of external walls and the indoor heat and humidity environment and energy consumption of buildings in hot summer and cold winter [D]. Nanchang: Nanchang University,2021.

[22]路标,张会波,李丽,等. 基于实测数据确定建筑立面风驱雨系数[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版). 2026,58(3): 335-342.
LU Biao, ZHANG Huibo, LI Li, et al. Determination of wind-driven rain coefficient for building facades based on measured data[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2026,58(3): 335-342.

(编辑 吴海西)