

杨绚,张立生,杨琨,等,2020. 台风大风低矮房屋易损性及智能网格预报的应用[J]. 气象,46(3):429-440. Yang X,Zhang L S, Yang K,et al,2020. Typhoon vulnerability of typical low-rise buildings and application of intelligent grid forecast[J]. Meteor Mon,46(3):429-440(in Chinese).

台风大风低矮房屋易损性及智能网格预报的应用^{*}

杨 绚 张立生 杨 琨 王 铸

国家气象中心,北京 100081

提 要: 低矮房屋是受台风影响最为严重的房屋类型之一。从建筑构件可靠性的角度,利用蒙特卡罗方法模拟典型双坡屋面小青瓦砖木结构的低矮房屋(以下简称为“低矮房屋”)不同构件对风速的易损性曲线,低矮房屋不同构件的大风易损性为:侧边>屋檐>迎风屋面>屋脊>侧边墙角>背风屋面。从而构建了台风大风对低矮房屋倒损概率模型,量化风灾对低矮房屋的风险。利用全球灯光数据(DMSP/OLS)对地面粗糙度进行分类,分析不同地面粗糙度低矮房屋易损性的差异。基于我国精细化智能网格预报产品,预估了 2017 年 13 号台风天鸽低矮房屋风险等级,并与实际灾情进行检验。结果表明,该模型的预估结果与实际灾情在广东中西部较为吻合,但在广东东部沿海地区产生了一定范围的空报,可能是智能网格风速预报产品在台风东侧风速偏大所导致,其预估结果的 TS 评分为 0.28,空报率为 0.62,漏报率为 0.48,模型能够在一定程度上预估风灾对低矮房屋的倒损风险。

关键词: 低矮房屋,台风易损性,风灾,蒙特卡罗方法,智能网格

中图分类号: P456,TU208

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.014

Typhoon Vulnerability of Typical Low-Rise Buildings and Application of Intelligent Grid Forecast

YANG Xuan ZHANG Lisheng YANG Kun WANG Zhu

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Low-rise buildings are most severely affected by typhoons. In this paper, based on the reliability design of building structures, Monte-Carlo simulation method is used with a probabilistic framework to simulate the wind vulnerability on component of typical double-sloping roofs with small blue-and-tile bricks (low-rise building). The wind vulnerability of different components of low buildings is as follows: side of roof > eaves > windward roof > roof ridge > wall corner > leeward roof. A probability model of typhoon damage to low-rise houses is constructed which can quantify the risk of wind disasters to low-rise buildings. The ground roughness is classified by using DMSP/OLS data, and the difference of the vulnerability of low-rise buildings with different ground roughness is analyzed. Based on the intelligent grid forecast, the risk of low-rise building induced by Hato, the 13th typhoon in 2017, is estimated. The results are consistent with the actual disaster in the central and western Guangdong. However, partial area of false prediction is generated in the eastern coastal areas of Guangdong, which may be caused by excessive large speed of intelligent grid wind speed forecast products on the east side of Typhoon Hato. The TS score of the estimated results is 0.28, the false alarm ratio is 0.62, and prediction omission is 0.48. So, this model could estimate the risk of wind damage to low-rise buildings to a certain extent.

^{*} 国家气象中心预报员专项(Y201920)和中国气象局决策气象服务专项(JCZX2020017)共同资助

2019 年 4 月 28 日收稿; 2020 年 2 月 11 日收修定稿

第一作者:杨绚,主要从事气象灾害影响评估研究. Email:yx_221@126.com

Key words: low-rise building, typhoon vulnerability, wind hazard, Monte Carlo method, intelligent grid forecast

引 言

中国是遭受台风灾害最严重的国家之一,常因台风造成严重的人员伤亡和巨大的经济损失。受台风影响,我国东南沿海地区每年都有大量房屋遭到破坏。例如,2006 年第 8 号台风桑美在温州市苍南县登陆,造成 5 万间房屋损毁,其中绝大多数为低矮房屋(葛学礼等,2006);2014 年第 9 号台风威马逊造成海南、广东、广西和云南等省(区)共 4.2 万间房屋倒塌,54.3 万间房屋不同程度遭受损坏(郭桂祯等,2017)。随着我国经济的快速发展,乡镇或郊区的低层居民建筑已有了较大的变化,框架结构、砖混结构的应用越来越广泛,但是经过许多学者的实地调研发现(黄鹏等,2010;齐洪威等,2015;霍林生等,2016),传统的砖木结构低矮房屋仍大量存在,这类房屋大多为双坡小青瓦屋面,通常缺乏抗风设计、建筑质量较差,加之建造年代久远,屋面和墙体角部区域往往在风灾下遭到严重的破坏,此类房屋倒塌是台风造成人员伤亡和财产损失的主要成因之一。

近些年来,针对建筑结构的台风大风脆弱性研究,主要采用历史损失数据法、专家经验法、建筑构件可靠性法以及结构工程数值模拟法等方法建立建筑的脆弱性模型(Pita et al, 2015; 王相军等, 2014; 陈文方等, 2017)。依赖历史数据和主观经验,得到的易损性评价结果与已发生的灾害损失结果较为吻合(丑洁明等, 2018),但由于存在损失数据量难以收集、数据质量不佳等缺点,会造成一定的误差(Zhang et al, 2014);建筑构件可靠法及结构工程模拟法是将建筑物看作各构件的组合,通过对建筑结构特征、热带气旋风压与建筑各构件之间的易损性和相互作用进行模拟,最终获得建筑物整体的脆弱性曲线,该方法可以弥补灾害损失数据数量上的不足,通过改变模型参数,量化研究不同减灾措施的影响,因而得到广泛应用(Henderson and Ginger, 2007; Pita et al, 2012)。美国 HAZUS-MH 飓风模型以建筑物承灾体引起的直接经济损失为模拟对象,针对各类建筑的结构特点从建筑外部结构破坏、内部破坏、内部财产损失及使用损失等各方面分别构建损失函数(Vickery et al, 2006a; 2006b)。

国内也开展了大量针对低矮房屋易损性和抗风

性研究。已有研究对台风登陆过程中近地面风场及其湍流度进行观测(宋丽莉等, 2005; 胡尚瑜等, 2011; 赵小平等, 2016),得到低矮房屋表面风荷载特征(李秋胜等, 2010; 黄鹏等, 2014; Song et al, 2016)。通过对低矮房屋开设不同位置、不同大小、不同数量的洞口研究屋面或墙体局部风压分布特点(戴益民和李秋胜, 2011; 高阳, 2017; 李牧羽等, 2017)。对不同坡度、高深比等特征进行刚性模型测压风洞试验,利用最小二乘法拟合各分区体型系数,给出屋面主体结构风荷载分区体型系数的建议值(陶玲等, 2014)。通过蒙特卡罗方法对屋面、墙体等构件分析在台风下的失效概率,同时建立房屋损毁状态与各构件损坏情况的矩阵(钟兴春等, 2017)。

随着国家对台风灾害风险评估的需求越来越高,开展具有针对性的承灾体脆弱性研究具有重要的意义,尤其是将学术研究应用到政府防灾减灾管理中,为沿海地区减轻台风灾害风险提供科学工具(陈文方等, 2017)。以往研究多从土木工程的角度分析建筑物脆弱性,本研究不仅从结构工程的角度分析台风大风低矮房屋的易损性,建立低矮房屋倒塌概率模型,还将全球夜间灯光遥感数据(DMSP/OLS)作为孕灾环境应用于该模型中,分析不同地面粗糙度低矮房屋易损性的差异,并且基于我国精细化智能网格预报,制作台风大风影响预报产品,试图在台风来临前,预估沿海地区低矮房屋的倒塌风险,对居民转移等防灾减灾工作提供一定的科学依据。

1 数 据

1.1 气象数据

风场预报产品采用我国智能网格预报业务产品中的逐小时 10 m 纬向风分量(U)和 10 m 经向风分量(V)预报数据,该产品全国陆地区域范围为 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ} \sim 140^{\circ}\text{E}$,空间分辨率为 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$,起报时间为每日 08 时和 20 时。

2017 年第 13 号台风天鸽资料来自于国家气象中心台风与海洋中心,包括“天鸽”登陆时间、登陆地点、登陆时近中心最大风速和强度信息等。“天鸽”的实况风速资料来自于国家气象信息中心提供的 2017 年 8 月 20 日 08 时至 24 日 08 时全国区域

地面自动站逐小时 10 min 平均风速数据。为了在影响评估业务中应用,将站点平均风速数据插值到与智能网格相匹配的 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 网格上。

1.2 灾情数据

房屋倒损灾情数据来源于中国气象局气象灾害管理系统的灾情直报和国家减灾中心,灾情数据是以县(区)为单位统计收集的倒塌和损坏房屋的数量。

1.3 夜间灯光遥感数据

采用全球夜间灯光遥感数据(Defense Meteorological Satellite Program/Operational Line Scan System, DMSP/OLS),来源于美国国家地球物理数据中心(<http://ngdc.noaa.gov/eog/dmsp/downloadV4composites.html>),获取图像的幅宽为 3000 km,像元大小为 0.008333° 。该数据为 2013 年 30 s 分辨率的稳定灯光图像数据,是在消除了云及火光等偶然噪声影响后对全年 VNIR 通道灰度值直接平均化处理后得到的(Elvidge et al, 2009; Small et al, 2011; Liu et al, 2012),数据灰度值范围为 1~63,饱和灯光灰度值为 63,空间分辨率为 1 km。DMSP/OLS 夜间灯光数据具有独特的夜间低光探测能力和反映人类活动信息(尤其是城市区域的人类活动信息)的特点,可以提供大范围的城市用地信息,因此广泛应用于区域或全球尺度的城市范围提取和变化评估研究(He et al, 2006; Imhoff et al, 1997; 吴健生等, 2014)。

利用该数据对地面孕灾环境进行分类,将我国东南沿海地区的地面粗糙度分为四类,分别是大城市或城市中心区、普通城市区、城镇区和其他区域(图 1),并对该数据与智能网格风速产品的分辨率进行匹配,将其插值到 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的网格上。

1.4 数字高程模型数据

数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘(shuttle radar topography mission, SRTM)数据。本研究选取研究区域内 1 km 分辨率的 DEM 数据,并将该数据插值到 $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ 的智能网格上。

2 概率模型基本思路和方法

为了方便分析典型低矮房屋不同区域的易损

性,将其分为屋面和墙体(图 2)。屋面的设定为铺盖小青瓦,屋面坡度 α 分别取 5° 、 15° 和 30° ;墙体的砌体种类为普通砖木结构(包括烧结普通砖、混凝土普通砖、蒸压灰砂普通砖等),单层高 4 m,共两层,山墙高 10 m,墙体厚 0.3 m。

在建筑工程中,台风大风致低矮房屋结构破坏的可能性是以结构失效概率来描述的。建立低矮房屋结构可靠度与风速的函数关系,分析低矮房屋不同构件随风速变化的失效概率,是台风大风低矮房屋倒损概率模型的基本思路。

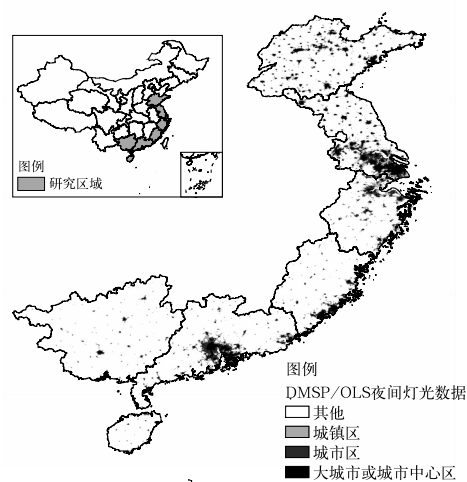


图 1 DMSP/OLS 夜间灯光数据对东南沿海地区城市结构的分区

Fig. 1 Classification of urban structure by DMSP/OLS nightlight in Southeast China coastal regions

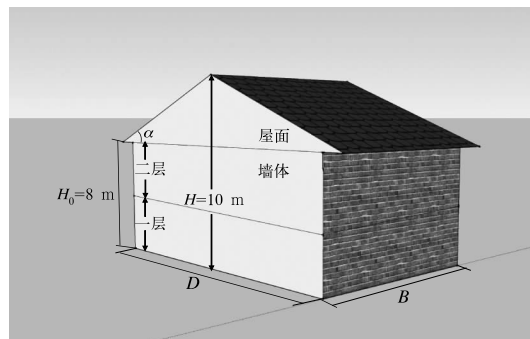


图 2 典型双坡屋面小青瓦砖木结构房屋结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a typical double-sloping roof with small blue tile brick structure

2.1 结构可靠度

根据《建筑结构可靠性设计统一标准》(GB50068—2018)(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018), 结构可靠度定义为结构在规定时间内与条件下完成预定功能的概率, 即:

$$Z = R - S \begin{cases} Z < 0 & \text{失效状态} \\ Z = 0 & \text{极限状态} \\ Z > 0 & \text{可靠状态} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R 为结构抗力, S 为作用在结构上的荷载效应。

2.2 低矮房屋的结构抗力

结构抗力定义为结构或结构构件承受所用效应的能力。根据《砌体结构设计规范》(GB5003—2011; 以下简称为《砌体规范》; 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2011), 结构抗力大小取决于构件截面形状的尺寸、材料性能、作用力、几何参数等因素, 计算非常复杂。在实际工程中, 为了表达结构抗力的不确定性和取值范围, 可将其表示为多个随机变量乘积之和, 并认为其服从正态分布。

台风大风对于小青瓦双坡屋面的破坏, 主要是瓦片被掀掉。其结构抗力可认为主要是瓦片本身重力垂直于屋面的分量(宫文壮, 2009), 并根据《砌体规范》的局部受压构件的承载力, 计算公式简化为:

$$R_r = \gamma_a R \cos \alpha \quad (2)$$

式中: γ_a 为屋面局部抗压提高系数, 表示由于瓦片间摩擦、瓦面加固措施等的不确定因素, 根据《砌体规范》, 该系数取值范围在 1~1.5; R 为小青瓦的重力密度, 均值可取 $24 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$; α 为屋面坡度。

砖木结构的墙体结构抗力主要为在水平风荷载下的弯曲抗拉能力, 普通砖沿通缝的弯曲抗拉最为容易受损, 因此, 本研究分析普通砖沿通缝在风荷载作用下的抗弯能力, 结合汤奎天(2008)的研究, 其功能函数为:

$$R_M = \frac{1}{6} b_k h_k^2 (f_{m,k} + \gamma H) \quad (3)$$

式中: $\frac{1}{6} b_k h_k^2$ 表示墙砌体的截面抵抗矩, 其中 b_k 是墙面宽度标准值, 本研究取 4 m, h_k 是墙面厚度标准值, 取 0.3 m; $f_{m,k}$ 为砌体弯曲抗拉强度设计值, 其中, 砂浆强度是砌体弯曲抗拉能力最为关键的因素, 根据《砌体规范》, 基于四种不同砂浆强度等级 ($\geq M10$ 、M7.5、M5 和 M2.5, 即砂浆抗压强度平均值分别大于 10、7.5、5 和 2.5 MPa) 的普通砖, 沿通缝的弯曲抗拉强度标准值在 0.13~0.27 MPa; γ 为

砌体容量, 均值取 18; H 为砌体高度, 单层取 4 m。

2.3 低矮房屋的风荷载

建筑物所受风的作用力称为风荷载。《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012; 以下简称《荷载规范》; 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012), 规定了垂直于建筑物表面上的主要受力结构和围护结构的风荷载标准值。由于低矮房屋不考虑风振系数, 两者风荷载计算的区别为, 对围护结构的风荷载计算中, 采用局部体型系数, 它表示风压在局部区域的平均压力分布值; 在计算主要受力结构的风荷载则采用体型系数。

根据实际调查, 大风对低矮房屋的破坏往往是从围护结构开始(黄鹏等, 2010; 齐洪威等, 2015; 霍林生等, 2016), 受台风(或大风)影响, 风荷载在建筑物表面的风压分布不均匀, 通常在屋檐、侧边区等局部区域形成很大的峰值压力(李秋胜等, 2010), 从而发生损坏(刘学敏和王国新, 2016)。房屋围护结构的风荷载, 计算公式如下:

$$w_k = \beta_{gz} \mu_d \mu_z w_0 \quad (4)$$

式中: w_k 为风荷载标准值(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$), β_{gz} 为高度 z 处的阵风系数, μ_d 为风荷载局部体型系数, μ_z 为风压高度变化系数, w_0 为基本风压(单位: $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$), 《荷载规范》规定基本风压为 50 年重现期风压。依据《荷载规范》选择离地高度 10 m 的风压变化系数和阵风系数(表 1)。

屋面结构分区的风荷载体型系数依据《荷载规范》取绝对值的较大值(图 3b 和表 2), 本研究不再单独分析不同坡角对屋面体型系数的影响。墙体的主要受力结构为迎风面、山墙和背风面的中心区, 其体型系数分别为 0.8、-0.7 和 -0.5(图 3a), 可以认为墙体主要受力结构在台风(或大风)影响下承受的平均风压(吸)力相较于围护结构小很多, 通常不会直接被大风破坏。因此, 本研究在分析墙体大风易损性时, 仅考虑墙体的侧边墙角负压区, 该区域作为墙体的围护结构, 局部体型系数取 -1.4(图 3a 和表 2), 在一定的风力下, 会受到大风的影响而受损。

根据伯努利方程计算风压, 其中, 空气密度根据 2000 年以来登陆我国台风的时间、气压、气温和相对湿度数据, 计算得到我国台风季东南沿海地区空气密度均值为 $1.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 方差为 $0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; 风速取 10 m 高度处 10 min 平均风速。

《荷载规范》将地面粗糙度分为四类(表 1), 本研究 1.3 节已利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据对东

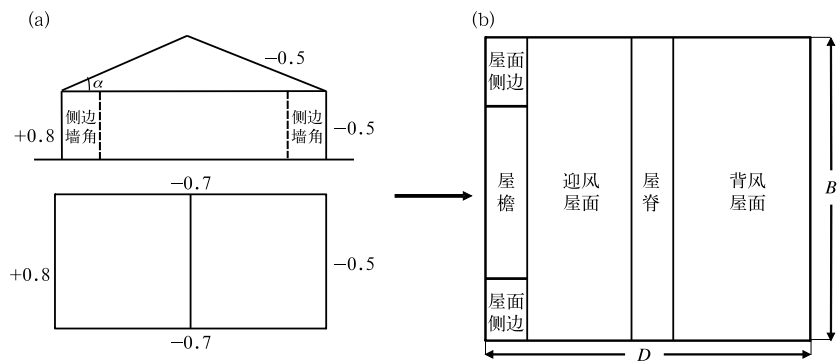


图 3 低矮房屋的(a)体型系数及侧边墙角区域和(b)屋面的体型系数分区

Fig. 3 Shape partition of (a) low-rise building, (b) roof

表 1 不同地面粗糙度对应离地 10 m 高度的风压变化系数和阵风系数

Table 1 Wind pressure variation coefficient and gust coefficient at 10 m in four types of ground roughness			
地面粗糙度类别		风压变化系数	阵风系数
A 类	近海海面 and 海岛、海岸及沙漠地区(简称近海地区)	1.28	1.6
B 类	田野、乡村以及房屋比较稀疏的乡镇(简称乡镇)	1.0	1.7
C 类	有密集建筑群的城市市区(简称城市)	0.65	2.05
D 类	密集建筑群且房屋较高的市区(简称大城市)	0.51	2.4

表 2 低矮房屋屋面分区和墙角的体型系数

Table 2 The shape coefficient in roof and wall corner of low-rising building						
结构分区	屋面侧边	屋檐	迎风屋面	屋脊	背风屋面	侧边墙角
体型系数	-2.0	-1.8	-1.2	-1.5	-0.6	-1.4

南沿海地区 B 类、C 类和 D 类的地面粗糙度进行分类。对于 A 类近海地区的范围选取,研究表明,从新的地表粗糙度开始的前 500 m 过渡区范围与上游地面相同,即当台风从海面吹至陆地时,不管海岸上陆地的粗糙度如何,都应从海岸边向陆地划出 500 m 的距离,视此区域属于海面相同的地面粗糙度类别(黄本才和汪丛军,2008)。因此在本研究中,沿海岸线向陆地取 500 m 的区域作为近海地区。

表 1 给出的 10 m 高度风压变化系数仅适用于较为平坦的地形,为了使低矮房屋大风易损模型在业务中得到应用,需要考虑地形对低矮房屋风荷载的影响。《荷载规范》针对山区的建筑物,对风压高度变化系数给出了地形修正系数。对于山峰和山坡,修正系数的计算公式为:

$$\eta = \left[1 + \kappa \tan \alpha \left(1 - \frac{z}{2.5H} \right) \right]^2 \quad (5)$$

式中: κ 为系数,对山峰取 2.2,山坡取 1.4; $\tan \alpha$ 为山体的坡度,当 $\tan \alpha > 0.3$ 时,取 0.3; H 为山顶或山坡全高(单位:m); z 为建筑物高度,本研究取 10 m。

对东南沿海地区 DEM 数据计算其格点上的坡度,并将 5 km 网格范围内平均地面标高作为地面

标高,计算网格范围内海拔高度最大值与地面标高的差,将其作为该网格点的山坡高度 H 。本研究没有考虑低矮房屋相对于山区最高点(山峰)的相对距离,因此, κ 系数统一取 1.4。

2.4 蒙特卡罗方法

蒙特卡罗(Monte Carlo)方法又被称为随机模拟法,其基于大数定律和中心极限定理为基本原理,利用随机变量的统计计算、抽样模拟来生成不同分布类型随机数,以求解数理领域近似解。该方法常用于解决具有确定统计规律的不确定性问题,在结构可靠度研究中,利用该方法不需考虑功能函数的非线性和极限状态曲面的复杂性,因此在结构工程中得到广泛应用(王东等,2008;钟兴春等,2017)。

利用蒙特卡罗方法模拟低矮房屋结构可靠度的流程如下:(1)建立计算模型:根据低矮房屋不同构件的风荷载体型系数等变量,建立低矮房屋不同构件的结构可靠度与风速的函数关系式;(2)确定参数的统计特性:确定风荷载基本变量(风速、风向等)、结构抗力基本变量等参数的概率分布;(3)循环抽样:利用蒙特卡罗法,对低矮房屋不同构件与风速的函数模型进行随机循环抽样 1 万次,得到屋面和墙

体不同区域的失效概率,并分析该区域的易损性。在利用蒙特卡罗方法模拟低矮房屋的风速易损性时,不考虑地形对风速的影响。

2.5 评分方法

为了客观地评价台风低矮房屋倒损概率模型的业务适用性,引用了天气预报中的预兆评分(TS)对其进行检验。由于实际房屋倒损灾情数据是以县(区)为单位统计收集的,灾情统计的内容是倒损房屋的数量;而本研究模型评估的风险等级是大风对单个房屋破坏的可能性,对于一次台风(大风)过程可能破坏多少间房屋难以预估,这主要是由于难以获得东南沿海省份每个县(区)存在多少间砖木结构小青瓦低矮房屋或老旧低矮房屋。因此,在业务检验中,我们以预(评)估结果的落区与实际发生灾情的县(区)进行对比检验,对风险等级暂不检验。针对台风低矮房屋倒损风险落区预(评)估结果的 TS 评分、空报率(FAR)和漏报率(PO),计算公式如下:

$$TS = NA / (NA + NB + NC) \quad (6)$$

$$FAR = NB / (NA + NB) \quad (7)$$

$$PO = NC / (NA + NC) \quad (8)$$

式中:NA、NB、NC 分别为预报正确、空报、漏报的县(区)个数。当预(评)估落区的县(区)与实况灾情县(区)域相同时,则判定为预报正确;预(评)估出在某县(区)域内存在风险而实况没有出现灾情,则为空报;预(评)估没有风险的县(区),而实况出现灾情,则为漏报。

3 研究结果

3.1 低矮房屋不同构件易损性分析

根据台风大风低矮房屋倒损概率模型基本思路和方法,屋面的结构可靠度计算由式(2)与式(4)相减得到,侧边墙角结构可靠度的计算由式(3)减去式(4),式中各参数的设定综合参考了《砌体规范》和《荷载规范》中的取值(表 3)。

根据上文结构可靠度的计算公式开展蒙特卡罗

表 3 屋面和墙体结构可靠度参数设定

Table 3 Reliability parameters of roof and structure

参数类型	参数名称	概率分布类型	取值范围
屋面结构抗力参数	小青瓦重力密度(R)	正态分布	均值取 $2.4 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 方差取 $0.2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$
	屋面局部抗压系数(γ_a)	均匀分布	$1 \sim 1.5$
	屋面坡角(α)	均匀分布	5° 、 15° 和 30°
墙体结构抗力参数	墙面宽度标准值(b_k)	常数	4 m
	墙面厚度标准值(h_k)	常数	0.3 m
	普通砖沿通缝的弯曲抗拉强度设计值($f_{tm,k}$)	均匀分布	$0.13 \sim 0.27 \text{ MPa}$
	砌体容量(γ)	正态分布	均值取 $18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 方差取 $2 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$
	砌体高度(H)	常数	4 m
风荷载参数	阵风系数(β_{gz})	正态分布	均值为四类粗糙度的阵风系数(表 1), 方差取 0.3
	风荷载体型系数(μ_{sf})	常数	根据不同的区域而定(表 2)
	风压高度变化系数(μ_z)	常数	表 1
	空气密度(ρ)	正态分布	均值取 $1.15 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, 方差取 $0.02 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$
	风速	均匀分布	$20 \sim 100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

模拟,得到在四类地面粗糙度的条件下,屋面各区域和侧边墙角随风速增大的失效概率(图 4)。结果表明,无论在何种地面粗糙度的条件下,随风速增大的易损性为:侧边>屋檐>迎风屋面>屋脊>侧边墙角>背风屋面;以低矮房屋在不同地面粗糙度的易损性来看,A类(近海地区)>B类(乡镇)>C类(城市)>D类(大城市),这与实际灾后调查过程的情况较吻合。其中,屋面的侧边区和屋檐区的易损性较为接近,是最容易被大风破坏的区域。背风屋面由于受风荷载的负压较小,是最不容易被大风破坏的区域,然而屋面坡角对屋脊、迎风屋面、背风屋面的

局部体型系数影响较大,本研究只讨论房屋各构件最不利条件的易损性。以低矮房屋相对较多的地面粗糙度 B 类(乡镇)为例,当风速大于 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (10 级)时,屋面的侧边区和屋檐区开始被大风破坏;当风速约大于 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,迎风屋面和屋脊便可能被大风破坏;背风屋面和侧边墙角直接受大风破坏所需要的风力较大,当风速大于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,背风屋面和侧边墙角才开始受到风速的影响。但在实际灾情中,低矮房屋受损情况会比较复杂,因为一旦屋面的瓦片被掀起,低矮房屋内部的气压将发生突变,原本封闭的房屋在开洞的条件下,将更容易遭受破

坏,从而引发连锁效应,造成房屋更大面积的结构性损坏,甚至倒塌。

3.2 台风大风低矮房屋倒损风险等级设计

在台风灾害预估业务化中,为了判断低矮房屋的倒损概率,根据屋面各构件和墙角随风速的失效率,设计了三个等级表示其倒损风险,分别为较低风险、中等风险和高风险(表 4)。

在低矮房屋倒损风险等级设计中,将易损性比较接近的构件进行组合,得到每个组合对应的失效率风速区间,作为风险等级的风速阈值,判断房屋整体的倒损概率。将各构件分成三个组合,分别是(1)屋面侧边和屋檐,(2)迎风屋面和屋脊,(3)背风屋面和侧边墙角(表 4)。当屋面侧边区或屋檐失效率不超过 20%时,认为只是屋面檐口区域受到一定破

坏,房屋其他主体部分完好,此时房屋所处状态为“较低风险”;当屋面侧面和屋檐的失效率大于等于 20%且不超过 30%,迎风屋面或屋脊区开始被破坏,且失效率小于 20%时,则表明房屋屋面主体结构受到了损坏,则认为房屋处于“中等风险”;当背风屋面或侧边墙角的损失率达到或超过 10%,迎风屋面或屋脊区破坏率达到或超过 20%,或屋面侧边和屋檐的损失率达到或超过 30%,这时认为整个屋面已受到较大程度的破坏,在这种状态下,房屋倒塌的概率快速上升,因此认为该状态为“高风险”。

图 5 以地面粗糙度 B 类(乡镇)为例,给出了低矮房屋三种风险等级所对应的风速集合。结果表明,屋面侧边或屋檐的失效率不超过 20%的风速集合主要分布在 24~28 m·s⁻¹,其倒损风险为“较低风险”。结合屋面侧边和屋檐的失效率大于等于

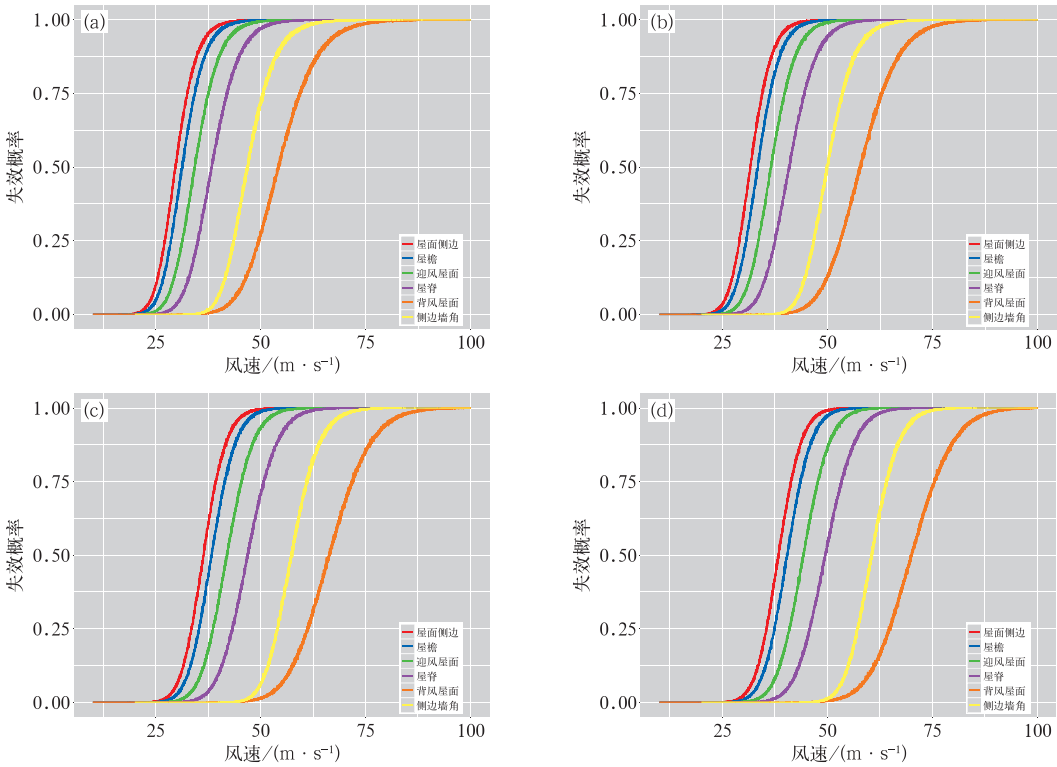


图 4 在四类地面粗糙度条件下,屋面各区域和侧边墙角随风速变化的失效率

(a)A 类:近海地区,(b)B 类:乡镇,(c)C 类:城市,(d)D 类:大城市

Fig. 4 Failure probability of roof component and wall corner with wind speed in four types of ground roughness

(a) Class A: Offshore area, (b) Class B: Township area, (c) Class C: City area, (d) Class D: Big city area

表 4 低矮房屋倒损风险等级设计

Table 4 The level design for low-rise building damage risk

风险等级	屋面侧边、屋檐	迎风屋面、屋脊	背风屋面、侧边墙角
较低风险	失效率<20%	无	无
中等风险	20%≤失效率<30%	失效率<20%	无
高风险	失效率≥30%	失效率≥20%	失效率≥10%

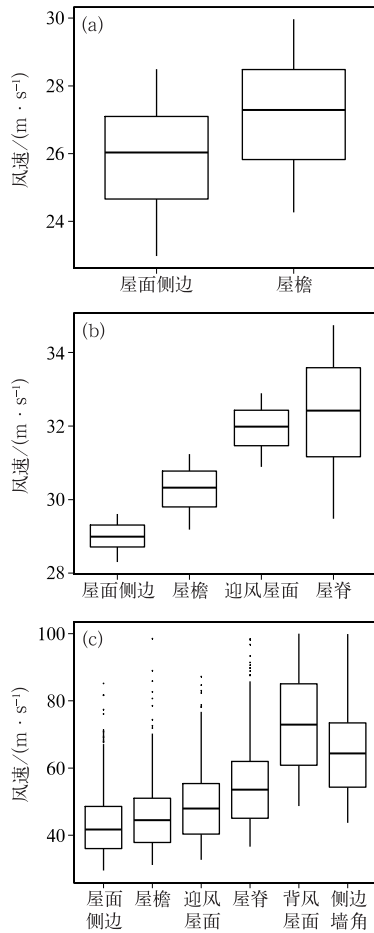


图 5 地面粗糙度 B 类(乡镇)条件下,低矮房屋倒损风险等级风速集合(短横线表示中位数,上、下边框表示四分间距,长线表示整个阈值)
(a)较低风险,(b)中等风险,(c)高风险

Fig. 5 Ensemble wind speed of low-rise building damage risk under the condition of ground roughness of Type B (Short horizontal line denotes the median, top and bottom border denote the interquartile range, long peck line denotes the threshold)
(a) low risk, (b) medium risk, (c) high risk

20%且低于 30%,以及迎风屋面或屋脊损失率不超过 20%的风速集合分布在 $28 \sim 34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,认为该风速区间为低矮房屋倒损的“中等风险”。当风速大于 $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,屋面侧边、屋檐的失效率达到 30%以上,同时迎风屋面、屋脊损失超过 20%,对应低矮房屋倒损等级的“高风险”。其他三类地面粗糙度的风险设计及对应的风速阈值所用的方法均与之相同,不再赘述。

3.3 基于智能网格风速产品的业务应用

为了使台风大风低矮房屋倒损概率模型能够在台风灾害预评估业务中应用,需要对其评估结果进行检验。由于该理论模型仅考虑了单个房屋对瞬时大风的易损性,而在实际台风灾害预估中,大风的持

续时间也是判断房屋倒损风险的重要因素之一。经过与多个台风实际灾情的分析和检验,当各等级风险阈值的风速持续时间超过 3 h 以上时,应将风险等级相应升级。

本研究选择 2017 年第 13 号台风天鸽进行低矮房屋倒损概率模型的分析检验(图 6)。该台风于

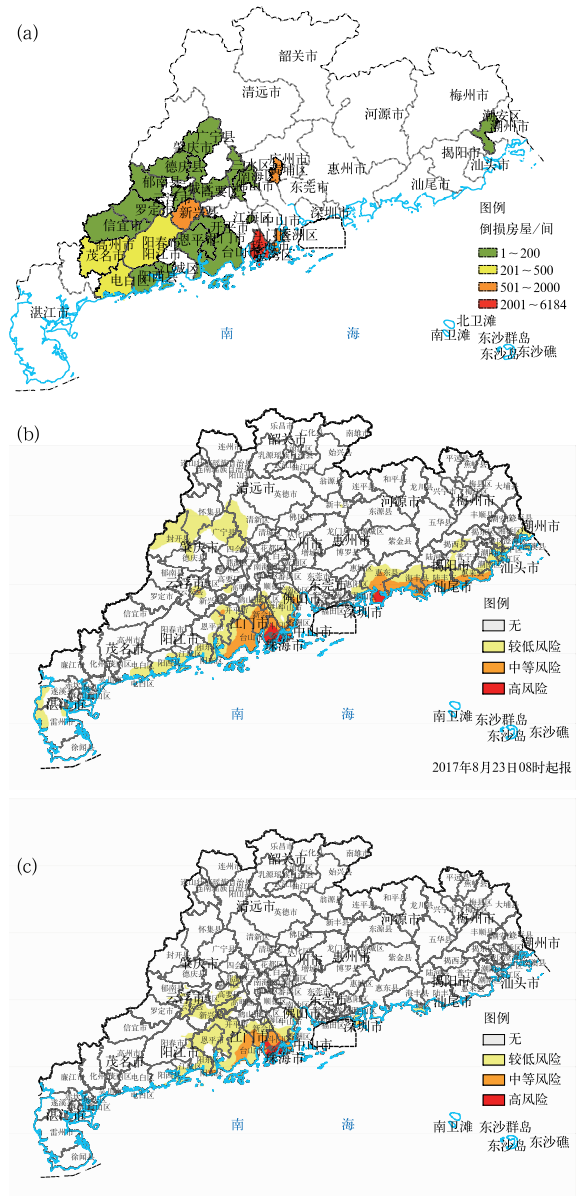


图 6 1713 号台风天鸽(a)实际倒损房屋数量,(b)基于智能网格风速产品预估未来 24 h 台风大风低矮房屋倒损风险等级,(c)基于区域站观测风速评估 24 h 低矮房屋倒损风险等级

Fig. 6 Actual number of damaged houses by the 13th Typhoon Hato in 2017 (a), the estimated future 24 h risk of low-rise building caused by typhoon (b) based on the intelligent grid wind speed forecast product, and (c) based on observed wind speed

2017年8月23日12:50前后在广东珠海南部沿海登陆(强台风级),登陆时风力达 $45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (14级),“天鸽”登陆前后,广东珠江口两侧沿海出现平均风10~14级,是最近几年登陆我国沿海风力较大的台风之一。“天鸽”给广东省共25个县(区)造成房屋倒损的灾情,图6a给出房屋倒塌和损坏(含严重损坏和一般损坏)总数的分布,房屋倒损超过2000间的地区位于珠海斗门区和金湾区,珠海香洲区、广州黄浦区、云浮新兴县倒损房屋超过500间,江门、佛山、肇庆等部分县(区)也出现房屋倒损的灾情。

利用智能网格风速产品,2017年8月23日08时起报的未来24 h(8月23日08时至24日08时)逐小时风速对台风天鸽低矮房屋倒损风险进行预评估(图6b)。结果表明,预估结果与实际灾情在广东中西部较为吻合,但广东东部沿海地区被预估为较高风险地区,与实际灾情不符,这主要是由于智能网格风速产品在台风东侧的风速预报偏大,从而产生了较大区域的空报;云浮、茂名、阳江等地多个县(区)存在房屋倒损的灾情,却没有被预估出来,这可能是由于风速预报在台风登陆后,陆地上风速的衰减速度过快,导致预报风速偏小,产生了一定区域的漏报。该结果预估正确了13个县(区),空报了21个县(区),漏报了12个县(区),预估结果的TS评分为0.28,空报率为0.62,漏报率为0.48(表5)。

表5 台风天鸽低矮房屋倒损风险落区预(评)估的TS评分、空报率和漏报率

Table 5 TS, FAR and PO of the estimated risk of low-rise building by Typhoon Hato

预评估结果	TS评分	空报率	漏报率
基于智能网格风速产品的预估	0.28	0.62	0.48
基于区域站观测风速的评估	0.35	0.35	0.56

基于国家区域观测站的逐小时10 min平均风速评估台风天鸽8月23日08时至24日08时24 h低矮房屋倒损风险(图6c)。该评估结果预报正确了11个县(区),空报6个县(区),漏报14个县(区),其评估结果的TS评分为0.35,空报率为0.35,漏报率为0.56(表5)。相较于基于智能网格风速预报的预估结果,该评估结果的TS评分有所提高,空报率也较小,但漏报率要比预估结果大。漏

报率较大的原因可能是在广东茂名、肇庆等西部地区观测到的风速已减弱,但广东西部普遍出现了强降雨天气,8月23—25日广东茂名局地降雨量达400 mm,因此,这些地区房屋倒损的灾情可能是风雨共同影响导致的。

因此,可以认为该模型能够在一定程度上预(评)估风灾对低矮房屋的倒损风险,但对风速预报的准确性要求较高。

4 结论与讨论

本文从建筑工程的角度,以结构失效率作为台风大风对低矮房屋破坏可能性的指标,利用蒙特卡洛方法模拟低矮房屋不同构件易损性与风速的关系,设计了低矮房屋倒损风险等级,构建了台风大风对低矮房屋倒损概率的评估模型。基于我国智能网格风速预报产品,对2017年13号台风天鸽低矮房屋倒损风险进行预估与检验。

结论及讨论如下:

(1)依据建筑结构可靠性的概念,根据国家建筑相关标准和规范,对结构抗力和风荷载的计算参数进行设定,利用蒙特卡洛方法,模拟了低矮房屋屋面不同构件和侧边墙角的大风易损性,从而量化大风灾害对低矮房屋的风险。

(2)低矮房屋屋面不同构件和侧边墙角的大风易损性为:侧边>屋檐>迎风屋面>屋脊>侧边墙角>背风屋面;不同地面粗糙度的易损性为:A类(近海地区)>B类(乡镇)>C类(城市)>D类(大城市)。

(3)基于我国智能网格逐小时风速产品和区域自动站平均风速观测资料,对台风天鸽低矮房屋倒损风险进行预评估,并与实况灾情进行对比和评分检验。基于智能网格风速产品的预估结果与实况相比在广东中西部较为吻合,但在广东东部沿海地区产生了一定范围的空报,TS评分为0.28,空报率为0.62;基于区域自动站平均风速的评估结果TS评分为0.35,较智能网格风速的结果要好。模型能够在一定程度上预(评)估风灾对低矮房屋的倒损风险。

本文仅考虑了单个封闭房屋的情况,没有考虑房屋各构件的相互作用,但在实际台风灾害中,一旦

大风造成房屋某构件损坏造成开洞后,房屋的内压会发生突变,房屋其他区域的受力情况也不再符合理论模型。通过对实际房屋倒损灾情的分析,暴雨对低矮房屋的破坏风险也不容忽视,在台风风雨共同作用下,房屋的受灾情况会变得更加复杂。

本文利用夜间灯光数据对孕灾环境的地面粗糙度进行分类,虽然在业务应用中增加了DEM数据对地形修正,但在地面粗糙度的分类上仍然存在一定的局限性。大气边界层内的平均风速是地面粗糙度的函数,地面粗糙度对风速的影响较大,为了更有效地预(评)估台风大风对低矮房屋的倒损风险,在今后的工作中,需增加土地利用类型等数据,对地面粗糙度进行更精确的分类。

智能网格预报产品会直接影响灾害影响评估模型的结果,因此在今后的工作中,需要对智能网格风速进行客观订正(胡海川等,2017;孙全德等,2019;杨程等,2019),提高对台风大风过程的预报效果,同时完善影响评估模型,利用集合预报等方法形成灾害影响评估结果的矩阵,有效表达预报产品和预估产品的不确定性。

参考文献

- 陈文方,端义宏,陆逸,等,2017.热带气旋灾害风险评估现状综述[J].灾害学,32(4):146-152. Chen W F, Duan Y H, Lu Y, et al, 2017. Review on tropical cyclone risk assessment[J]. J Catastrophol, 32(4):146-152(in Chinese).
- 丑洁明,班晴皓,董文杰,等,2018.影响广东省的热带气旋特征分析及灾害损失研究[J].大气科学,42(2):357-366. Chou J M, Ban J H, Dong W J, et al, 2018. Characteristics analysis and assessment of economic damages caused by tropical cyclones in Guangdong Province[J]. Chin J Atmos Sci, 42(2):357-366(in Chinese).
- 戴益民,李秋胜,2011.低矮房屋迎风屋面局部风压特性研究[J].建筑结构,41(6):103-109. Dai Y M, Li Q S, 2011. Wind pressures around the windward roof edges on low-rise buildings[J]. Build Struct, 41(6):103-109(in Chinese).
- 高阳,2017.低矮建筑屋面局部极值风压特性的风洞试验研究[D].长沙:湖南科技大学. Gao Y, 2017. Wind tunnel test research on extreme wind pressure characteristic on local roof of low-rise buildings[D]. Changsha: Hunan University of Science and Technology(in Chinese).
- 葛学礼,朱立新,于文,等,2006.浙江苍南县“桑美”台风建筑灾害与抗风技术措施[J].工程质量, (10):18-22. Ge X L, Zhu L X, Yu W, et al, 2006. Building disaster caused by Saomai Typhoon in Cangnan County, Zhejiang Province as well as the technical measure for anti-typhoon[J]. Qual Civ Eng Construct, (10):18-22(in Chinese).
- 宫文壮,2009.广东沿海地区村镇低矮房屋台风易损性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学. Gong W Z, 2009. Study on typhoon vulnerability for low-rise buildings in coastal areas of Guangdong [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(in Chinese).
- 郭桂祯,赵飞,王丹丹,2017.基于脆弱性曲线的台风-洪涝灾害链房屋倒损评估方法研究[J].灾害学,32(4):94-97. Guo G Z, Zhao F, Wang D D, 2017. A method research of house damage in typhoon-flood disaster chain based on vulnerability curve[J]. J Catastrophol, 32(4):94-97(in Chinese).
- 胡海川,黄彬,魏晓琳,2017.我国近海洋面10 m风速集合预报客观订正方法[J].气象,43(7):856-862. Hu H C, Huang B, Wei X L, 2017. Objective correction method of ensemble forecast of 10 m winds on Chinese offshore[J]. Meteor Mon, 43(7):856-862(in Chinese).
- 胡尚瑜,宋丽莉,李秋胜,2011.近地边界层台风观测及湍流特征参数分析[J].建筑结构学报,32(4):1-8. Hu S Y, Song L L, Li Q S, 2011. Monitoring of typhoons in surface boundary layer and analysis of wind turbulence characteristics[J]. J Build Struct, 32(4):1-8(in Chinese).
- 黄本才,汪丛军,2008.结构抗风分析原理及应用:第2版[M].上海:同济大学出版社. Huang B C, Wang C J, 2008. Principle and Application of Structural Wind Resistance [M]. 2nd ed. Shanghai: Tongji University Press(in Chinese).
- 黄鹏,蔡玢,全涌,等,2014.基于实测的低矮房屋屋面风压极值计算方法[J].西南交通大学学报,49(2):247-253. Huang P, Cai B, Quan Y, et al, 2014. Peak pressure estimation method of wind loads on low-rise building based on field measurement[J]. J Southwest Jiaotong Univ, 49(2):247-253(in Chinese).
- 黄鹏,陶玲,全涌,等,2010.浙江省沿海地区农村房屋抗风情况调研[J].灾害学,25(4):90-95,138. Huang P, Tao L, Quan Y, et al, 2010. Investigation of wind resistance performance of rural houses in coastal areas of Zhejiang Province[J]. J Catastrophol, 25(4):90-95,138(in Chinese).
- 霍林生,王银坤,李永鑫,等,2016.台风“苏迪罗”对福建沿海村镇房屋破坏情况的调研[J].防灾减灾工程学报,36(2):315-322. Huo L S, Wang Y K, Li Y X, et al, 2016. Investigation of building damage conditions of coastal towns and villages in Fujian Province by Typhoon “Soudelor”[J]. J Dis Prev Mitigat Eng, 36(2):315-322(in Chinese).
- 李牧羽,李钢,甘石,2017.低矮房屋体形系数的修正及风荷载计算方法研究[J].防灾减灾工程学报,37(3):487-495. Li M Y, Li G, Gan S, 2017. Study on pressure coefficient and wind load calculation method for low-rise buildings[J]. J Dis Prev Mitigat Eng, 37(3):487-495(in Chinese).
- 李秋胜,戴益民,李正农,2010.强台风“黑格比”作用下低矮房屋风压特性[J].建筑结构学报,31(4):62-68. Li Q S, Dai Y M, Li Z N, 2010. Wind pressures on low-rise building surface during a se-

- vere Typhoon ‘Hagepit’[J]. J Build Struct, 31(4): 62-68 (in Chinese).
- 刘学敏, 王国新, 2016. 低层无筋砌体基于性能的强风易损性分析[J]. 防灾减灾学报, 32(2): 40-45. Liu X M, Wang G X, 2016. The vulnerability analysis of low structure based on deformation properties[J]. J Dis Prev Reduct, 32(2): 40-45 (in Chinese).
- 齐洪威, 韩琴, 罗海燕, 等, 2015. 2014 年“威马逊”超强台风作用下建筑结构灾损调查与分析: 轻钢结构[J]. 建筑结构, 45(15): 27-35. Qi H W, Han Q, Luo H Y, et al, 2015. Reconnaissance and analysis of building structure damages caused by super Typhoon Rammasun in 2014: light steel structures[J]. Build Struct, 45(15): 27-35 (in Chinese).
- 宋丽莉, 毛慧琴, 黄浩辉, 等, 2005. 登陆台风近地层湍流特征观测分析[J]. 气象学报, 63(6): 915-921. Song L L, Mao H Q, Huang H H, et al, 2005. Analysis on boundary layer turbulent features of landfalling typhoon[J]. Acta Meteor Sin, 63(6): 915-921 (in Chinese).
- 孙全德, 焦瑞莉, 夏江江, 等, 2019. 基于机器学习的数值天气预报风速订正研究[J]. 气象, 45(3): 426-436. Sun Q D, Jiao R L, Xia J J, et al, 2019. Adjusting wind speed prediction of numerical weather forecast model based on machine learning methods[J]. Meteor Mon, 45(3): 426-436 (in Chinese).
- 汤垚天, 2008. 沿海地区低矮民居台风致破坏风险分析研究[D]. 重庆: 重庆大学. Tang Y T, 2008. Risk analysis for typhoon-induced damages of low-rise houses in the coastal area of China [D]. Chongqing: Chongqing University (in Chinese).
- 陶玲, 黄鹏, 顾明, 等, 2014. 低矮建筑屋面风荷载分区体型系数研究[J]. 建筑结构, 44(10): 79-83. Tao L, Huang P, Gu M, et al, 2014. Study on regions shape coefficients of roof wind loads of low-rise buildings[J]. Build Struct, 44(10): 79-83 (in Chinese).
- 王东, 陈建康, 王启智, 等, 2008. 基于条件与对偶抽样的 Monte-Carlo 结构可靠度分析[J]. 中国农村水利水电, (5): 66-68, 70. Wang D, Chen J K, Wang Q Z, et al, 2008. Structural reliability analysis by Monte-Carlo based on conditional expectation variance reduction and antithetic variable sampling[J]. China Rural Water Hydropower, (5): 66-68, 70 (in Chinese).
- 王相军, 戴益民, 闫旭光, 等, 2014. 低矮房屋表面平均风压的数值模拟和实测及风洞试验比较研究[J]. 建筑结构, 44(10): 84-88. Wang X J, Dai Y M, Yan X G, et al, 2014. Numerical simulation, field measurements and wind tunnel of mean wind pressures on the low-rise buildings surface[J]. Build Struct, 44(10): 84-88 (in Chinese).
- 吴健生, 刘浩, 彭建, 等, 2014. 中国城市体系等级结构及其空间格局——基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的实证[J]. 地理学报, 69(6): 759-770. Wu J S, Liu H, Peng J, et al, 2014. Hierarchical structure and spatial pattern of China’s urban system: evidence from DMSP/OLS nightlight data[J]. Acta Geogr Sin, 69(6): 759-770 (in Chinese).
- 杨程, 姜瑜君, 余贞寿, 等, 2019. 基于偏最小二乘回归的区域模式风速预报订正技术研究[J]. 气象, 45(5): 676-684. Yang C, Jiang Y J, Yu Z S, et al, 2019. Correction technology of regional wind speed forecasting based on partial least square regression[J]. Meteor Mon, 45(5): 676-684 (in Chinese).
- 赵小平, 朱晶晶, 樊晶, 等, 2016. 强台风海鹰登陆期间近地层风特性分析[J]. 气象, 42(4): 415-423. Zhao X P, Zhu J J, Fan J, et al, 2016. Analysis on wind characteristics in surface layer during landfall of Typhoon Kalmaegi[J]. Meteor Mon, 42(4): 415-423 (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2011. 砌体结构设计规范: GB 50003—2011[S]. 北京: 中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People’s Republic of China, 2011. Code for design of masonry structures: GB 50003—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People’s Republic of China, 2012. Load code for the design of building structures: GB 50009—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press (in Chinese).
- 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2018. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. Ministry of Housing and Urban Rural Development of the People’s Republic of China, 2018. Unified standard for reliability design of building structures: GB 50068—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press (in Chinese).
- 钟兴春, 方伟华, 曹诗嘉, 2017. 基于构件损毁模拟仿真的沿海农村典型低矮房屋台风风灾易损性研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 53(1): 51-59. Zhong X C, Fang W H, Cao S J, 2017. Probabilistic component-based Monte Carlo simulation of vulnerability for a typical low-rise rural residential building in coastal China[J]. J Beijing Normal Univ (Nat Sci), 53(1): 51-59 (in Chinese).
- Elvidge C D, Ziskin D, Baugh K E, et al, 2009. A fifteen year record of global natural gas flaring derived from satellite data[J]. Energies, 2(3): 595-622.
- He C Y, Shi P J, Li J G, et al, 2006. Restoring urbanization process in China in the 1990s by using non-radiance-calibrated DMSP/OLS nighttime light imagery and statistical data[J]. Chin Sci Bull, 51(13): 1614-1620.
- Henderson D J, Ginger J D, 2007. Vulnerability model of an Australian High-set house subjected to cyclonic wind loading[J]. Wind Struct Int J, 10(3): 269-285.
- Imhoff M L, Lawrence W T, Stutzer D C, et al, 1997. A technique for using composite DMSP/OLS “City Lights” satellite data to map urban area[J]. Remote Sens Environ, 61(3): 361-370.
- Liu Z F, He C Y, Zhang Q F, et al, 2012. Extracting the dynamics of urban expansion in China using DMSP-OLS nighttime light data

- from 1992 to 2008[J]. *Landscape Urban Plan*, 106(1):62-72.
- Pita G, Pinelli J P, Cocke S, et al, 2012. Assessment of hurricane-induced internal damage to low-rise buildings in the Florida Public Hurricane Loss Model[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 104-106:76-87.
- Pita G, Pinelli J P, Gurley K, et al, 2015. State of the art of hurricane vulnerability estimation methods: a review [J]. *Nat Hazards Rev*, 16(2):04014022.
- Small C, Elvidge C D, Balk D, et al, 2011. Spatial scaling of stable night lights[J]. *Remote Sens Environ*, 115(2):269-280.
- Song L L, Chen W C, Wang B L, et al, 2016. Characteristics of wind profiles in the landfalling typhoon boundary layer[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 149:77-88.
- Vickery P J, Lin J, Skerlj P F, et al, 2006a. HAZUS-MH hurricane model methodology. I: hurricane hazard, terrain, and wind load modeling[J]. *Nat Hazards Rev*, 7(2):82-93.
- Vickery P J, Skerlj P F, Lin J, et al, 2006b. HAZUS-MH Hurricane model methodology. II: damage and loss estimation[J]. *Nat Hazard Rev*, 7(2):94-103.
- Zhang S Y, Nishijima K, Maruyama T, 2014. Reliability-based modeling of typhoon induced wind vulnerability for residential buildings in Japan[J]. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 124:68-81.