

热带气旋登陆衰减模型改进

全涌, 金泽名

(同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过优化区域划分并引入热带气旋登陆时移动方向角和海陆交界区域陆地比, 对 Vickery 模型进行改进。以东南沿海区域登陆的热带气旋为例, 将改进模型给出的热带气旋中心压差模拟结果与热带气旋观测值以及既有方法模拟结果进行对比。结果表明, 改进模型利用热带气旋登陆时的移动方向强化了深入陆地热带气旋中心压差模拟效果, 利用陆地比强化了海岸线附近热带气旋中心压差模拟效果。

关键词: 热带气旋全路径模型; 登陆衰减模型; 陆地比

中图分类号: P444

文献标志码: A

Improvement of Tropical Cyclone Landfall Attenuation Model

QUAN Yong, JIN Zeming

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The Vickery model is improved by optimizing the regional division, and introducing the direction angle of tropical cyclone movements and the land ratio of sea-land alternate zones in this paper. Taking the tropical cyclone landing in the southeast coastal area as an example, the simulated central pressure difference value of the improved model for the tropical cyclone is compared with the observed value and the simulated result of existing models. The results show that the improved model enhances the central pressure difference simulation effect of the tropical cyclone penetrating the land with the direction of tropical cyclone movement when landing, and enhances the central pressure difference simulation effect of the tropical cyclone near the coastline with the land ratio.

Keywords: full track model for tropical cyclones; landing attenuation model; land ratio

合理地估计热带气旋极值风速的大小具有重要意义。对于某个特定区域而言, 热带气旋的样本太少, 仅基于当地风气候观测数据不能准确预估一定重现期的极值风速^[1]。风工程研究者一般采用热带气旋工程模拟方法解决该问题, 即: 基于热带气旋历史观测数据求出的热带气旋关键参数概率分布, 通过随机抽样的方式抽取多组关键参数样本, 然后将关键参数代入热带气旋模型并给出多个热带气旋。目前对于热带气旋模拟常用的方法有直线模型、局部模型和全路径模型。直线模型和局部模型均是通过建立合适大小的模拟圆选取热带气旋样本^[2]。东南沿海区域可获得的热带气旋历史观测样本较少, 对于一个确定的模拟圆, 样本数量更少, 由此建立的热带气旋关键参数概率模型会有较大的不确定性, 这导致基于直线模型和局部模型的传统概率统计方法无法保证模拟精度^[3-4]。Vickery 等提出的全路径方法^[5]对热带气旋演化全过程进行模拟, 包括热带气旋的起始点生成、行进路径、行进方向、洋面强度发展以及登陆强度衰减等。许多学者对 Vickery 方法进行了改进, Powell 等^[6]采用马尔科夫链模拟热带气旋路径演化过程, Li 等^[7-8]简化了 Vickery 方法的路径模型。然而, 对于建筑设计而言, 热带气旋强度的预测结果更重要。

热带气旋强度变化主要是由热带气旋内部结构变化和外部环境影响所导致的。当热带气旋处于海洋时, 海水产生的水蒸气使热带气旋获得水汽冷凝释放的热量, 从而增强热带气旋的强度。当热带气旋登陆后, 陆地不仅不能给热带气旋提供能量, 而且会通过地面摩擦消耗热带气旋的能量, 从而导致热带气旋强度衰减^[9]。除了下垫面变化外, 登陆区域、初始登陆强度、登陆入射角等因素也与热带气旋强度衰减密切相关^[2]。全路径模拟中的强度模型把热带气旋整个过程分为海洋和陆地 2 个部分, 采用海

热带气旋对建筑结构具有很强的破坏作用, 准

收稿日期: 2022-10-30

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778493)

第一作者: 全涌, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为高层建筑抗风与风速风振实测。

E-mail: quanyong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

洋强度模型和登陆衰减模型分别模拟。在登陆过程中,特别是多次登陆或者途径近海岛屿的情况,由于热带气旋尺度较大,因此在陆地消耗能量的同时也从海洋中吸收能量,若采用登陆衰减模型则导致热带气旋登陆前后的强度过小,若采用海洋强度模型则导致热带气旋登陆前后的强度过大。

目前经常使用的登陆衰减模型有 Batts 等^[10]提出的以时间为自变量的线性衰减模型和 Vickery 等^[5]提出的以时间为自变量的指数衰减模型,但这 2 种模型都没有考虑热带气旋移动方向对衰减率的影响。虽然陈宝山^[2]考虑了登陆入射角对热带气旋登陆衰减率的影响,但是热带气旋登陆入射角是与海岸线之间的夹角,在全路径模拟中热带气旋登陆的随机性和海岸线的复杂性导致模拟变得非常困难。上述模型都只适用于登陆后深入陆地的热带气旋,对于多次登陆或者途径近海岛屿的热带气旋,并没有考虑海洋所提供的能量。

由于上述登陆衰减模型具有一定的局限性,为了使热带气旋强度衰减模型模拟结果更接近观测值,通过优化区域划分并考虑热带气旋的移动方向和登陆区域陆地比对热带气旋强度的影响来改进登陆衰减模型,同时将现有方法预测结果与实测结果进行对比,说明本文方法的进步之处。

1 登陆区域划分优化

对于沿海登陆区域的划分,王晓芳等^[11]将沿海区域划分为 3 个纬度带:21°N~28°N、28°N~35°N、35°N~42°N。这种划分方法没有深入考虑各因素对热带气旋登陆衰减的影响。为此,在详细考虑地形、登陆频次、登陆区域纬度的基础上,将东南沿海分为 6 个区域,分别为长三角沿海区域、珠三角沿海区域、近雷州半岛区域、福建沿海区域、海南岛以及台湾岛。长三角沿海区域热带气旋登陆数量较少,强度较低,地势较为平坦;福建沿海区域因武夷山脉导致边界层摩擦较大,热带气旋强度衰减较快;珠三角沿海区域热带气旋登陆数量多,强度大,破坏性强;近雷州半岛区域受北部湾影响,导致热带气旋向西登陆后下垫面水气供应没有完全阻断;一些热带气旋从海南岛和台湾岛中穿过,然后登陆到东南沿海。

2 热带气旋登陆后的衰减模型改进

大部分研究表明,气旋登陆后的衰减规律和气

旋本身、登陆区域、初始登陆强度、登陆入射角等因素密切相关^[2,7,12]。陈宝山^[2]在 Vickery 等^[5]提出的登陆衰减模型基础上考虑热带气旋登陆入射角对热带气旋衰减率的影响。热带气旋全路径模拟是每隔 6 h 模拟一个位置,热带气旋位于我国边界时正好是模拟点的概率非常低,这就意味着热带气旋登陆后模拟的位置已经在陆地内。我国东南沿海海岸线十分复杂,判断登陆点(热带气旋路径与海岸边界的交点位置)比较困难,行进距离的计算误差也较大,导致陈宝山模型预测效果一般。通过分析得到行进时间相对于行进距离与中心压差相关性更高,因此采用行进时间作为自变量并在 Vickery 等^[5]提出的登陆衰减模型上考虑了登陆入射角,对登陆衰减模型进行改进。

2.1 登陆后深入陆地衰减模型改进

本节研究的热带气旋在登陆后深入陆地,而不会在海岸线附近移动,因此不考虑海洋在热带气旋登陆过程中的强度贡献。采用中国科学院海洋科学数据中心提供的 1949—2019 年 70 年间西北太平洋热带气旋路径数据^[13],包含每个热带气旋的真实路径、热带气旋强度、气压、中心风速、移动速度、移动方向。将热带气旋登陆任意时间后的中心压差和初始登陆时刻的中心压差的比值与热带气旋登陆后的行进距离 d 和行进时间 t 分别进行相关性分析,结果如表 1 所示。

表 1 中心压差与行进时间和行进距离的相关性分析
Tab.1 Correlation analysis of central pressure difference with t and d

地理区域	与 d 的相关性	与 t 的相关性
长三角沿海区域	-0.294	-0.458
近雷州半岛区域	-0.374	-0.281
珠三角沿海区域	-0.540	-0.570
福建沿海区域	-0.225	-0.508
海南岛	-0.362	-0.482
台湾岛	-0.263	-0.492

可见,热带气旋登陆长三角沿海区域、珠三角沿海区域、福建沿海区域、海南岛、台湾岛后中心压差与行进时间 t 的相关性更高。因此,对热带气旋登陆衰减模型进行如下改进:

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \exp(-at) \tag{1}$$

$$a = a_0 + a_1 \Delta p_0 + a_2 \sin \varphi + \epsilon \tag{2}$$

式中: Δp_0 和 $\Delta p(t)$ 分别为热带气旋登陆时刻和登陆 t 时间后的中心压差; φ 为热带气旋移动方向与正北方向的夹角; a 为热带气旋登陆衰减率; a_0 、 a_1 、 a_2 为拟合系数; ϵ 为随机误差项,满足均值和均方根值分别

为0和 σ_ε 的正态分布。

2.2 拟合效果比较

根据上述东南沿海热带气旋登陆区域划分和改进登陆衰减模型,对各区域内1949—2019年的历史登陆热带气旋进行统计,拟合各区域对应的热带气旋登陆衰减模型参数,如表2所示, R^2 为多元判定系数(拟合优度系数)。图1展示了改进登陆衰减模型对各区域热带气旋历史数据的拟合结果,改进登陆衰减模型结果与历史数据吻合较好。

表2 东南沿海区域热带气旋登陆衰减参数

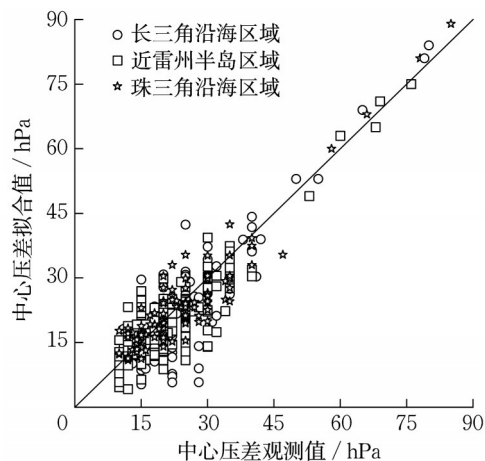
Tab.2 Tropical cyclone landfall attenuation parameters in the southeast coastal area of China

地理区域	$a_0/10^{-4}$	$a_1/10^{-4}$	$a_2/10^{-4}$	R^2
长三角沿海区域	98	8	95	0.228
近雷州半岛区域	-86	16	85	0.346
珠三角沿海区域	35	11	38	0.184
福建沿海区域	-118	15	-42	0.325
海南岛	-45	9	25	0.207
台湾岛	18	5	-31	0.204

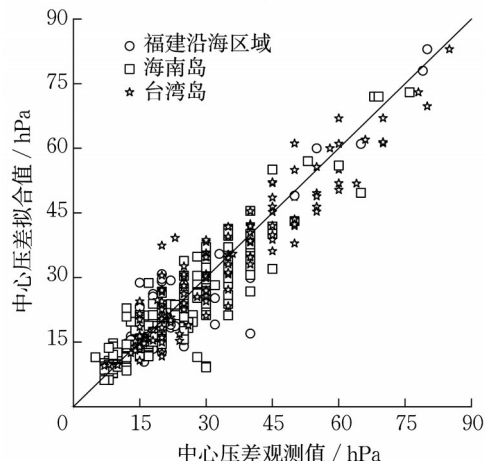
因为海南岛和台湾岛在单个热带气旋经过时实测数据较少,所以利用其他4个区域的热带气旋实测数据,比较了目前主要登陆衰减模型(Batts模型^[10]、Vickery模型^[5]、陈宝山模型^[2])的拟合优度,并在4个区域中随机选择热带气旋进行对比检验。表3与图2所用观测数据均来源于数据集^[13]。由表3可见,在东南沿海4个地理区域,本文模型的拟合优度均优于其他3种模型。由图2可知,长三角沿海区域热带气旋登陆衰减过程中本文模型更加接近观测值,精度更高;在近雷州半岛区域,本文模型和Vickery模型结果在后半段比较接近观测值;在珠三角沿海区域和福建沿海区域,本文模型结果与观测值更为接近,其他3种模型结果在热带气旋衰减全过程都偏大。

3 热带气旋登陆过程中的衰减模型改进

目前热带气旋全路径模拟中的强度是通过海洋强度模型和登陆衰减模型分别进行模拟,没有对从海洋到陆地过渡阶段进行考虑,这导致热带气旋登陆前后的强度模拟误差很大,特别是登陆入射角较小或者一直在海岸线附近移动的热带气旋。由于此类热带气旋在较长时间内同时受到海洋和陆地的影响,因此海洋对气旋的增强效应基本与陆地对气旋的削弱效应相当,气旋的强度变化很小。如果采用



a 长三角沿海区域、近雷州半岛区域和珠三角沿海区域



b 福建沿海区域、海南岛和台湾岛

图1 各区域历史登陆热带气旋中心压差预测与拟合结果
Fig.1 Prediction and fitting results of central pressure difference of historical landing tropical cyclone in various regions

表3 模型拟合优度

Tab.3 Model goodness of fit

地理区域	不同模型 R^2			
	Batts模型	Vickery模型	陈宝山模型	本文模型
长三角沿海区域	0.128	0.204	0.133	0.228
近雷州半岛区域	0.156	0.321	0.166	0.346
珠三角沿海区域	0.102	0.177	0.08	0.184
福建沿海区域	0.096	0.318	0.187	0.325

登陆衰减模型或海洋强度模型对登陆过程进行计算,就会使热带气旋强度的变化与实际情况不符。因此,需要建立同时考虑海洋和陆地影响的模型来模拟热带气旋登陆过程中气旋强度的变化。

3.1 陆地比

本文提出了陆地比 β 来解决以上问题,陆地比是指一定范围内陆地所占的比例。“一定范围”则由大多数热带气旋风眼范围确定。风眼是位于热带气

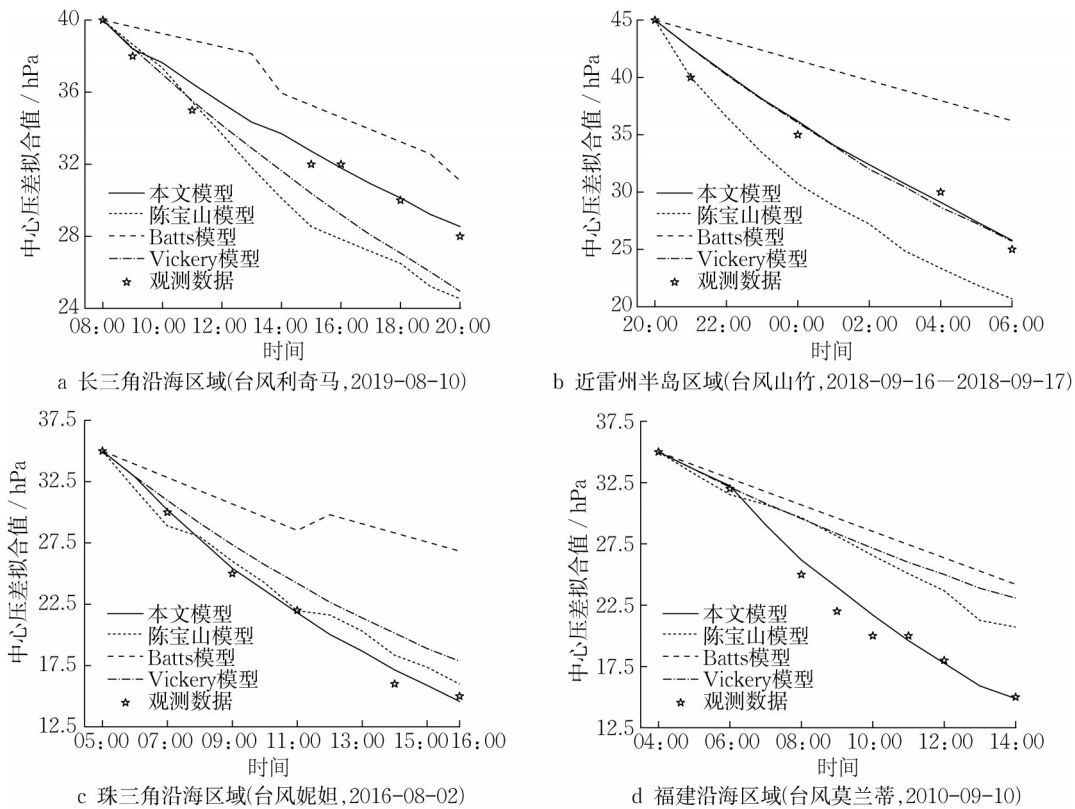


图2 各区域衰减模型热带气旋中心压差对比

Fig.2 Comparison of central pressure differences in tropical cyclones between attenuation models in various regions

旋旋转中心的相对平静区域,Shen^[14]的研究结果表明,热带气旋的强度对风眼直径敏感,因此“一定范围”的大小应基本与风眼直径范围一致。Knapp等^[15]给出了风眼尺寸的常见取值,在50 km左右,并随高度升高而增长。目前风眼最极端的例子为1960年热带气旋卡门(370 km)^[16]。综合大多数热带气旋风眼范围,将东南沿海地区划分为1°×1°的经纬度网格,以热带气旋在海岸线附近经纬度网格为中心,与附近8个经纬度网格组成一个九宫格,这个九宫格的范围就是“一定范围”,即3°×3°的经纬度覆盖面。“一定范围”计算式为

$$\beta = \frac{S_{\text{land}}}{S_{\text{square}}} \quad (3)$$

式中, S_{land} 、 S_{square} 分别为九宫格中的陆地面积和总面积。

3.2 登陆前后强度变化分析

本文统计了1949—2019年所有东南沿海热带气旋首次登陆的中心压差 Δp_0 与之前在海洋上的中心压差 Δp_{sea} ,如表4所示。

70年内一共有784次热带气旋登陆东南沿海区域,444次 $\Delta p_0 < \Delta p_{\text{sea}}$,占总数的57%左右;270次 $\Delta p_0 = \Delta p_{\text{sea}}$,占总数的34%左右;70次 $\Delta p_0 > \Delta p_{\text{sea}}$,占

表4 登陆前后中心压差变化

Tab.4 Variations in central pressure difference before and after landfall

Δp_0 与 Δp_{sea} 关系	次数
$\Delta p_0 < \Delta p_{\text{sea}}$	444
$\Delta p_0 = \Delta p_{\text{sea}}$	270
$\Delta p_0 > \Delta p_{\text{sea}}$	70

总数的9%左右,大部分 Δp_0 只比 Δp_{sea} 高1~3 hPa。

3.3 登陆过程中强度模型

当热带气旋登陆时,根据原始热带气旋路径数据,有91%的概率热带气旋中心压差会降低或保持不变,即使热带气旋中心压差上升也十分有限。在介于海洋与陆地之间的登陆衰减模型中,为了简化计算,暂不考虑海洋提供的强度大于陆地衰减的强度,因此将介于海洋与陆地之间的模型改为

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \exp(-a\beta t) \quad (4)$$

由于海洋面积的存在,近海的热带气旋衰减相较于内陆不会那么迅速,因此令新的衰减率为 $a\beta$ 。 β 在0~1内变化,随着 β 从零开始逐渐增大,即陆地面积越来越大,衰减率越来越接近于 a 。

3.4 算例

热带气旋凤凰最大的特点是始终沿着海岸线移

动,而不是在长三角登陆后向内地方向移动。图3为热带气旋凤凰登陆后中心压差观测值变化。可见,热带气旋一直处于陆地与海洋之间,中心压差基本保持不变。从热带气旋登陆到热带气旋离开中心压差只衰减了5 hPa,说明海洋增加的热带气旋能量与陆地消耗的热带气旋能量基本保持一致,只采用海洋强度模型或登陆衰减模型都不能准确地计算热带气旋中心气压。因此,采用带陆地比的登陆衰减模型可以较好地模拟此类特殊热带气旋登陆后的中心压差。

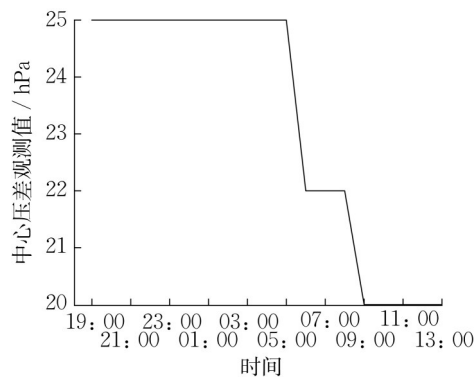


图3 热带气旋凤凰登陆后中心压差观测值变化(2014-09-23—2014-09-24)

Fig.3 Changes in the measured value of central pressure difference after the landfall of tropical cyclone Fenghuang (2014-09-23—2014-09-24)

如图4所示,本文模型拟合海岸线附近移动的热带气旋中心压差更加接近观测值。

其他登陆衰减模型没有考虑附近海洋提供的能

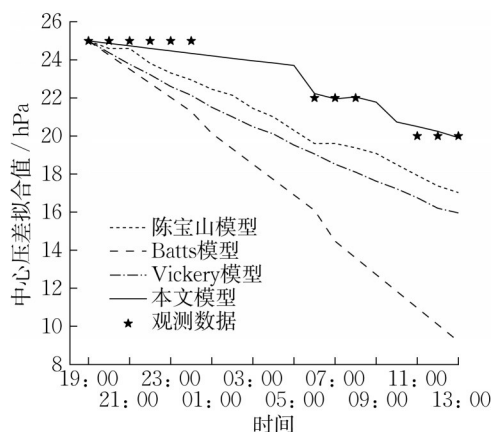


图4 各模型中心压差拟合曲线对比(长三角沿海区域、热带气旋凤凰,2014-09-23))

Fig.4 Comparison of fitting curves of central pressure difference between different models (Yangtze River Delta coastal area, tropical cyclone Fenghuang, 2014-09-23)

量,均导致预测结果偏小。本文模型通过参数陆地比减缓了中心压差衰减幅度,适用于海岸线附近移动强度衰减很慢的热带气旋。

4 结论

(1)本文提出的区域划分充分考虑地形、登陆频次以及登陆区域纬度对热带气旋登陆强度衰减的影响,为各区域模拟的准确性奠定了基础。

(2)由相关性分析可知,相较于登陆后的行进距离,登陆后的行进时间与登陆衰减后强度的相关性更高。因此,以登陆后的时间为衰减的自变量,同时考虑了热带气旋移动方向并将其作为参数提出改进登陆衰减模型。本文模型不仅可以简化计算,还可以取得与热带气旋观测值较为一致的结果。

(3)由统计分析可知,热带气旋首次登陆后强度大概率发生衰减,但近海领域海洋仍会为热带气旋提供能量,热带气旋强度衰减也会减缓。因此,将“一定范围”(9个 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度网格)陆地比代入本文模型以模拟热带气旋登陆前后的强度。与其他衰减模型对比结果可知,引入陆地比的登陆衰减模型考虑了热带气旋在海岸线附近移动时海洋所提供的能量,从而减缓了强度衰减,可以更精确地模拟此类热带气旋强度。

作者贡献声明:

全 涌:论文选题和设计,提供解决思路,修改论文关键内容。

金泽名:参与论文选题和设计,撰写论文,修改论文。

参考文献:

- [1] 梁陆军,王炎铭,李强,等.结合台风全路径模拟的宁波地区台风极值风速估计[J]. 建筑施工, 2021, 43(6): 1157.
LIANG Lujun, WANG Yanming, LI Qiang, et al. Typhoon extreme wind speed estimation in Ningbo area combined with typhoon full-path simulation [J]. Building Construction, 2021, 43(6): 1157.
- [2] 陈宝山.台风数值模拟优化及建筑结构设计风压计算方法研究[D].上海:同济大学, 2016.
CHEN Baoshan. Research on numerical simulation optimization of typhoon and calculation method of wind pressure in building structure design[D]. Shanghai: Tongji University, 2016.
- [3] LI S H, HONG H P. Use of historical best track data to estimate typhoon wind hazard at selected sites in China [J]. Natural Hazards, 2015, 76(2): 1395.

(下转第 1767 页)