

台风大风对输电线路致灾性的评估研究

李佳英 王韞喆 王莉萍 张立生

(国家气象中心, 北京, 10081)

摘要: 根据我国建筑结构和主要架空输电线路设计标准, 基于广义极值分布理论, 利用历史地面气象监测数据, 计算气象观测站的不同重现期的基本风压, 选取台风影响期间最大风产生的最大风压、极大风产生的极大风压作为致灾因子, 结合不同类型输电线路(低压、中压、高压、超高压及以上)的风压致灾阈值指标, 构建台风大风对输电线路致灾性评估模型。根据台风大风对输电线路的影响情况, 将台风大风对输电线路的致灾等级划分为中、较高、高、极高共4个等级, 并给出对应的不同输电线路的灾害影响。利用2012-2023年中国气象局气象灾害管理系统灾情数据, 对评估模型结果进行合理性检验: 台风造成输电线路损坏或供电中断的205个样本中, 模型评估出183个样本有输电线路致灾风险, 模型评估准确率为89.3%; 台风级及以上强度登陆我国台风造成电力受灾的有162个样本, 模型评估出146个样本评估有输电线路致灾风险, 评估准确率为90.1%, 其中中、较高、高、极高等级样本数分别占总样本数的26.5%、36.4%、14.8%、12.3%; 模型总体评估效果较好。该模型可结合台风预报或实况数据, 进行灾前预评估以及灾后的快速评估, 为面向电力行业的台风气象服务提供参考。

关键词: 台风大风, 风压, 输电线路, 致灾性, 评估

P49, P429

DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2026.050201

Assessment on the Disaster Risk of Typhoon Gale to Transmission Lines

LI Jiaying WANG Yunzhe WANG Liping ZHANG Lisheng

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on China's design codes for building structures and major overhead transmission lines, this study adopts the generalized extreme value distribution theory and historical surface meteorological observation data to calculate the return-period basic wind speeds and basic wind pressures at different return -periods for meteorological observation stations. The maximum wind pressure

*中国气象局决策气象服务专项(JCZX2022013), 国家重点研发计划(2020YFE0201900), 国家气象中心创新团队共同资助

第一作者: 李佳英, 主要从事气象灾害风险评估研究, E-mail: Lijy@cma.gov.cn

generated by the maximum gale and the extreme wind pressure generated by extreme wind are taken as the disaster-inducing factors of typhoon gale for transmission lines, and a disaster assessment model for transmission lines under typhoon gale is established by combining the wind pressure disaster threshold indicators of different types of transmission lines: low-voltage, medium-voltage high-voltage, and ultra-high voltage and above. According to the impact of typhoon gale on transmission lines, the disaster level of typhoon gale on transmission

lines is divided into four grades: medium, relatively high, high and extremely high, and the corresponding disaster impacts on different types of transmission lines are specified. The disaster data from the meteorological disaster management system of the China Meteorological Administration (CMA) between 2012 and 2023 are used to verify the rationality of the developed disaster assessment model for transmission lines under typhoon gale. Among the 205 samples with transmission line damage or power supply interruption caused by typhoons, the model identifies 183 samples with disaster risk on transmission lines, achieving an assessment accuracy of 89.3%. Out of the 162 samples of power disasters caused by typhoons with typhoon-level or above intensity landing in China, the model identifies 146 samples with disaster risk on transmission lines. Among these, the proportions of samples with medium, relatively high, high and extremely high grades in the total samples are 26.5%, 36.4%, 14.8% and 12.3% respectively, and the assessment accuracy reaches 90.1%, indicating that the overall performance of the model is satisfactory. The developed assessment model can conduct pre-disaster pre-assessment and rapid post-disaster assessment by combining typhoon forecast or observation data, thus provide reference for typhoon meteorological services for the power industry.

Key words: typhoon gale wind pressure, transmission line, disaster risk, assessment

引言

台风的破坏力极大，是夏秋季节严重威胁我国沿海特别是东南沿海地区，以及内陆省份的灾害性天气系统之一。台风一旦正面登陆沿海城市，会对电力通信网，尤其是光缆网架的稳定运行带来恶劣影响。如2014年台风“威马逊”以超强台风级登陆海南，海南东北部、广东雷州半岛和广西沿海地区普遍出现10~13级平均风，阵风达14~17级(缪旭明等, 2014)，台风登陆时的中心附近最大风力和最低气压均达到或突破了有记录以来历史极值(黄浩辉等, 2021)，强风暴雨及其引发的洪涝、滑坡、泥石流等灾害导致海南、广东、广西、云南4个省(自治区)80余人死亡，4万多间房屋倒塌，50余万间发生不同程度损坏(源自国家减灾中心网站, <https://www.ndrcc.org.cn/yjgz/10854.jhtml>)。2016年台风“莫兰蒂”以强台风级登陆厦门后，局地风速突破历史风速最大值，造成500kV线架空输电线路发生倒塔(陈文兴, 2017)，60余万棵树倒伏，全市出现大面积停电、交通瘫痪，经济损失超100亿元(源自央广网, https://news.cnr.cn/native/city/20160920/t20160920_523146621.shtml)。随着我国东部沿海地区经济的继续发展，重大台风灾害所带来的灾损将会进一步加大，造成的社会影响不容忽视。

台风对电力设施影响的主要因素是强风和暴雨。输电线路的电线杆、输电塔在台风大风作用下直接发生倾斜甚至倒塌和断裂，或者被吹倒的树拉倒，都会造成输电线路损坏、供电中断；台风暴雨导致的城市积涝会造成地下电力设施进水，引发的滑坡和泥石流等次生灾害会造成输电线断线、倒塔、闪络等故障(鞠

平等, 2019; 吴冠雄, 2020; 陈永业, 2016)。目前, 对于电力系统常规故障下的风险评估已有开展, 对于极端天气下的电网系统风险评估也逐步展开, 方法主要有基于网络拓扑结构的风险评估和基于系统运行状态的风险评估方法等(丁明等, 2017; 孙为民等, 2024; 王丙兰等, 2017), 但这些研究大多是针对某地电力系统进行, 对于判断大范围甚至全国的电力供应风险的参考有限。

本文基于广义极值分布理论, 利用历史地面气象监测数据, 依据我国建筑结构和电力行业主要架空输电线路设计标准, 建立了不同地区的不同重现期基本风压, 选取台风实际影响期间日最大风速、极大风速产生的风压作为致灾因子, 结合不同类型架空输电线路的风压致灾阈值, 构建台风大风对输电线路致灾性评估模型, 并对模型评估结果进行了合理性验证。本研究旨在为台风大风对输电线路致灾性的风险评估或预估工作提供参考。

1. 数据和方法

1.1 数据来源

气象资料来自于国家气象信息中心气象大数据云平台“中国地面日值数据”, 其中站点记录的日最大风速为每日观测 10min 平均风速的最大值, 日极大风速为 3s 平均风速的最大值。选取 1951 年以来的全国 2365 个气象观测站每日的最大风速记录, 计算出各站点年最大风速值, 在此基础上, 确定各站点不同重现期的基本风压。台风路径资料来自于中国气象局热带气旋资料中心“最佳路径数据集”, 根据台风路径确定影响我国台风时间, 基于气象观测站日最大风速、日极大风速计算台风影响期间的最大风压、极大风压。灾情数据主要从中国气象局气象灾害管理系统获取, 部分来自参考文献(陈文兴, 2017)。文中地图基于审图号为 GS(2019)3082 号的标准地图制作, 底图无修改。

1.2 R 年一遇重现期最大风速计算

采用极值 I 型分布函数计算出 R 年一遇(重现期)的最大风速。极值 I 型分布函数为:

$$F(x) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{C_1}{\sigma_1} \quad (2)$$

$$u = \bar{x} - \frac{C_2}{\alpha} \quad (3)$$

式中: x 为最大风速, u 为分布的位置参数, α 为分布的尺度参数。 u 和 α 与样本时间尺度有关。 C_1 和 C_2 为系数, \bar{x} 为均值, σ_1 为标准差, 计算方法和系数取值参考《建筑结构荷载规范(GB50009-2012)》(中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2012)。

由此, 重现期为 R 年的最大风速 x_R (中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监

督检验检疫总局，2012）可按下式确定：

$$x_R = u - \frac{1}{\alpha} \ln \left[\ln \left(\frac{R-1}{R} \right) \right] \quad (4)$$

1.3 风压计算

根据《建筑结构荷载规范（GB50009-2012）》（中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，2012），风压 w_p 计算公式为：

$$w_p = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (5)$$

式中： ρ 为空气密度， v 为最大风速。

定义由式（4）最大风速 x_R 计算得到为R年重现期的基本风压，由台风影响期间的逐日数据计算得到为实际风压，其中由日最大风速得到最大风压，由日极大风速得到极大风压。

1.4 不同等级输电线路的最大风速重现期确定

由于各地不同时期建设的输变电设施依据和标准不相同，同样气象条件产生的电力设施损坏也不尽相同。各地主要使用的多种版本电力行业标准中，对于不同类型架空输电线路的最大风速重现期多为10a、15a、30a、50a、100a（表1）。考虑到输电线路老化会造成抗灾能力下降，本文进一步增加5a，即本研究中输电线路的最大风速重现期确定为5a、10a、15a、30a、50a、100a一遇。

表1 输电线路设计有关标准中对风速重现期的规定

Table 1 Provisions of the transmission line standards on the recurrence period of wind speed

电压等级	重现期	参考标准
10kV 及以下	10a	10kV 及以下架空配电线路设计技术规程（DL/T 5220-2005）（中华人民共和国国家发展和改革委员会，2005）
	30a	10kV 及以下架空配电线路设计技术规范（DL/T 5220-2021）（国家能源局，2021）
66kV 及以下	15a	66kV 及以下架空线路设计规范（GB50061-97）（国家技术监督管理局和中华人民共和国建设部，1998）
	30a	66kV 及以下架空电力线路设计规范（GB50061-2010）（中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，2025）
110kV~330kV	30a	110kV~750kV 架空输电线路设计规范（GB50545-2010）（中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，2010）
220kV~330kV	30a	220kV~500kV 紧凑型架空输电线路设计技术规程（DL/T5217-2013）（国家能源局，2013）
500kV	50a	220kV~500kV 紧凑型架空输电线路设计技术规程（DL/T5217-2013）（国家能源局，2013）
500kV~750kV	50a	110kV~750kV 架空输电线路设计规范（GB50545-2010）（中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，2010）
1000kV	100a	1000kV 架空输电线路设计规范（GB50665-2011）（中华人民共和国住房和城乡建设部和中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，2011）

1.5 Anderson-Darling 检验

Anderson-Darling (A-D) 检验 (Anderson and Darling, 1952) 是一种用于正态性检验 (或其他分布拟合优度检验) 的统计方法。其核心在于通过比较样本的经验累积分布函数与目标理论分布的累积分布函数, 判断数据是否服从该分布。通过对统计量 A 与相应显著性水平下的临界值进行比较, 得出拒绝或接受原假设的结论, 可以模拟数据拟合优度, 有效识别出气象数据序列中“隐蔽”的非随机缺失。

A-D 检验所用统计量用 A^2 来表示 (Anderson and Darling, 1952) :

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \{ \ln F(x_i) + \ln [1 - F(x_{n+1-i})] \} \quad (6)$$

式中: n 为样本容量 (观测值个数); x_1, x_2, \dots, x_n 是将原始样本数据按升序排列后的有序统计量, 即 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$; $F(x_i)$ 为理论累积分布函数在 x_i 处的取值, 本文理论累积分布函数采用 Gumbel 分布 (极值分布)。

根据电力标准相关要求, 气象资料时间不少于 10 年, 检验的显著性水平取值为 0.05。最终年最大风速资料统计量通过 A-D 检验的站点数为 1544 个站, 占全国 2365 个站的 65%; 未通过 A-D 检验的, 可能是由于迁站、周围环境条件变化或其他原因导致风速资料发生较大变化所致。

2. 台风大风对输电线路致灾性评估模型

2.1 样本选取

根据中国气象局气象灾害管理系统数据, 对 2012-2023 年的台风灾害进行分析, 发现台风期间很多记录只说明输电线路损坏、供电中断或者出现停电现象, 缺乏损坏输电线路具体型号信息, 多数记录没有上报电线杆折杆、断杆、倒杆数量等情况。同时, 输电线路设计规范中对风速也未特别限定于某种类型。鉴于此, 剔除掉台风期间无 6 级以上大风的样本, 得到 205 个地市级台风电力灾情样本, 其中有 32 个样本有电力经济损失数据, 电力损失与最大风速、极大风速的皮尔逊相关系数分别为 0.3811、0.4564, 说明电力损失与最大风速、极大风速均有明显相关性。

2.2 台风大风对输电线路致灾性评估

根据历史台风电力灾情数据, 有些台风影响期间, 最大风压没有达到输电线路设计基本风压, 但极大风风压超过基本风压, 也会发生较重的输电线路受损事件, 故本文将台风实际影响期间最大风产生的风压、极大风产生的极大风压均作为台风大风对输电线路的致灾因子。由于灾情资料是按照行政单位为上报的, 因此台风大风对输电线路致灾性评估同样以地市级区域为单位进行评估。

台风大风对输电线路致灾指数 $f(EW_{i,j})$ 计算公式如下:

$$f(EW_{i,j}) = a \times EWD_{i,j} + b \times EGT_{i,j} \quad (7)$$

式中 $EWD_{i,j}$ 和 $EGT_{i,j}$ 分别为台风影响期间最大风、极大风对不同等级输电线路致灾指数； a, b 分别为权重系数，参考台风电力损失与极大风、最大风建立的线性回归公式，取值为0.45、0.55； i 为地市范围内所有气象站点数， j 为设定的基本风压阈值等级， $j=1\sim 6$ 依次代表5a、10a、15a、30a、50a、100a一遇。

$EWD_{i,j}$ 和 $EGT_{i,j}$ 与台风影响期间实际风压、输电线路的设计基本风压阈值有关。其中：

$$EWD_{i,j} = \begin{cases} 0, & Awp_i < bwp_{i,1} \\ 1, & bwp_{i,1} \leq Awp_i < bwp_{i,2} \\ 2, & bwp_{i,2} \leq Awp_i < bwp_{i,3} \\ 3, & bwp_{i,3} \leq Awp_i < bwp_{i,4} \\ 4, & bwp_{i,4} \leq Awp_i < bwp_{i,5} \\ 5, & bwp_{i,5} \leq Awp_i < bwp_{i,6} \\ 6, & Awp_i \geq bwp_{i,6} \end{cases} \quad (8)$$

$$EGT_{i,j} = \begin{cases} 0, & Agp_i < bwp_{i,1} \\ 1, & bwp_{i,1} \leq Agp_i < bwp_{i,2} \\ 2, & bwp_{i,2} \leq Agp_i < bwp_{i,3} \\ 3, & bwp_{i,3} \leq Agp_i < bwp_{i,4} \\ 4, & bwp_{i,4} \leq Agp_i < bwp_{i,5} \\ 5, & bwp_{i,5} \leq Agp_i < bwp_{i,6} \\ 6, & Agp_i \geq bwp_{i,6} \end{cases} \quad (9)$$

式中： Awp_i 和 Agp_i 分别为台风影响期间的最大风压和极大风压，取值分别为该地市所辖站点中逐日最大风压和极大风压的最大值， $bwp_{i,j}$ 为不同阈值等级下的基本风压。

计算出不同等级输电线路致灾指数后，挑选某地市所有站点中最大致灾指数作为该地市台风大风对输电线路的致灾指数（ ETY_i ）：

$$ETY_i = \max (f(EW_{i,1}), f(EW_{i,2}), f(EW_{i,3}), f(EW_{i,4}), f(EW_{i,5}), f(EW_{i,6})) \quad (10)$$

2.3 台风大风对输电线路致灾性评估等级划分

根据建筑可靠度理论，当实际风压超过建筑物设计基本风压设计阈值时，即可能发生损坏。当台风大风产生的实际风压，超过某种类型输电线路的基本风压设计阈值时，该类型输电线路就可能发生损坏。在灾情信息详细的情况下，致灾等级的划分可采用依据历史灾情损失的聚类分析法、ROC 曲线最优阈值划分等，但由于现有灾情数据中关于输电线路型号及损坏数量信息稀少，缺乏详细的灾情样本做支撑，利用具体类型输电线路灾情建立与评估指数的量化关联较为困难。

鉴于自适应方法可以结合专家经验和数据统计特征优势，本文采用自适应方案对输电线路致灾性评估结果进行等级划分。首先分析历史电力灾情数据，有限样本中损坏输电线路型号多在220kV以下，参考表1

的电力行业标准及式 (8)、式 (9)，给出初步分级阈值 [2, 3, 4]。之后依据数据特征选择自然断点法，根据统计结果与标准分级数据的差异程度优化分级指标，最后确定分级阈值为 [1.65, 2.70, 3.65]。据此将台风大风对输电线路的等级划分为中、较高、高、极高共 4 个等级，不同输电线路分为 4 类，即低压 (1kV 及以下)、中压 (10kV~35kV)、高压 (66kV~220kV)、超高压及以上 (330kV 及以上)。致灾指数分级及相应等级下不同类型输电线路受到的灾害影响详见表 2。

表 2 台风大风对输电线路致灾性评估的等级划分及灾害影响

Table 2 Grading of hazard assessment and disaster impacts of typhoon gale on power transmission lines

致灾等级	致灾指数	灾害影响
中	[0.10, 1.65)	低压 (1kV 及以下) 输电线路发生损坏或跳闸、停运；中压 (10kV~20kV) 输电线路可能损坏或跳闸、停运；局地发生供电中断、停电
较高	[1.65, 2.70)	中压 (10kV~20kV) 输电线路发生损坏或跳闸、停运；35kV 中压及 66kV 高压输电线路可能发生损坏或跳闸、停运；发生小范围供电中断、停电
高	[2.70, 3.65)	35kV 中压及 66kV 高压输电线路发生损坏或跳闸、停运；高压 (110kV~220kV) 和 330kV 及以上超高压输电线路可能发生损坏或跳闸、停运；发生大范围供电中断、停电
极高	[3.65, 6.00)	高压 (110kV~220kV) 和 330kV 及以上超高压输电线路发生损坏或跳闸、停运；发生大范围长时间供电中断、停电

3 结果与分析

3.1 不同重现期基本风压

对通过 A—D 检验的 1544 个站，按照式 (5) 计算得到不同重现期的全国基本风压分布，见图 1~图 6。基本风压的高值区主要位于西北地区、青藏高原北部、内蒙古、东北地区、黄淮等地，除东南沿海地区外，南方地区基本风压相对较低。

由 5a、10a 重现期基本风压中可见 (图 1、图 2)，我国中东部大部地区基本风压不超过 $0.25 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ ，新疆北部、内蒙古、东北等地及东南沿海部分地区超过 $0.3 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ ，个别站点超过 $0.4 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由 15a 重现期基本风压可见 (图 3)，西北地区、内蒙古、东北地区及东南沿海地区基本在 $0.3 \sim 0.8 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ ，黄淮大部、江汉、江淮至西南地区、华南北部一般低于 $0.3 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ ；由 30a 重现期基本风压可见 (图 4)，华北、黄淮东部等地部分地区增大至 $0.3 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ 以上，西北地区、内蒙古、东北地区及东南沿海地区基本在 $0.35 \sim 0.9 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ ，南方大部地区一般低于 $0.4 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ ；50a、100a 重现期基本风压 (图 5、图 6) 较 15a、30a 重现期的高值区范围向东明显扩大，北方由新疆、内蒙古扩展至东北、黄淮等地，南方由沿海局部站点增加到华东沿海至华南沿海地区，新疆北部和东部、青藏高原东部、西北地区东部、内蒙古、东北地区北部和西部、华北、黄淮东部及东南沿海地区基本风压超过 $0.45 \text{KN} \cdot \text{m}^{-2}$ ，其中新疆北部、浙江东部沿海、福建东部沿海、广东

沿海及海南岛沿海地区基本风压较高，为 $0.7 \sim 1.2 \text{ KN m}^{-2}$ ，新疆阿拉山口附近风压很高，达 $1.2 \sim 1.5 \text{ KN m}^{-2}$ ，浙江东部沿海的部分地区及福建东南部沿海局地有 $1.3 \sim 2.0 \text{ KN m}^{-2}$ ，而黄淮西部、江淮、江汉至西南、江南等地为相对低值区，除高山站点外，一般不超过 0.5 KN m^{-2} 。从气候背景来看，冬春季北方地区受冷空气和温带气旋影响风力大，夏秋季东南沿海地区受登陆台风影响基本风速也较高，基本风压分布与风速气候特征是吻合的。

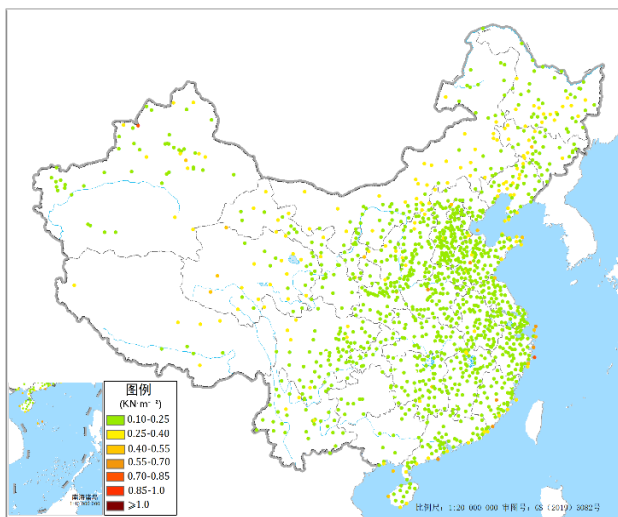


图 1 全国 5a 重现期基本风压分布

Fig.1 Distribution of the 5-year return-period basic wind pressure across China

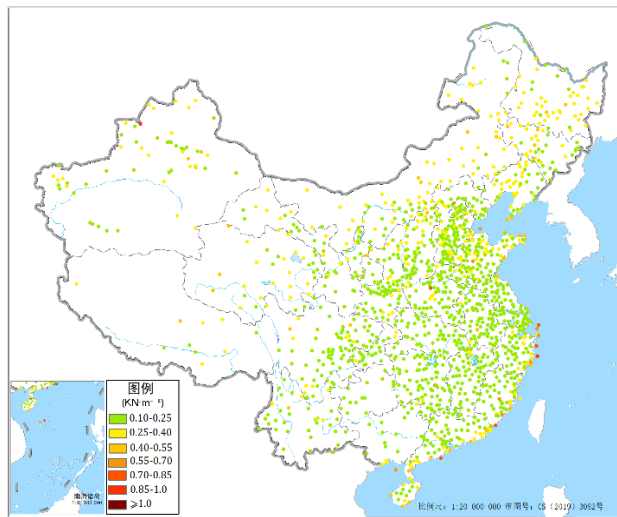


图 2 全国 10a 重现期基本风压分布

Fig.2 Distribution of the 10-year return-period basic wind pressure across China

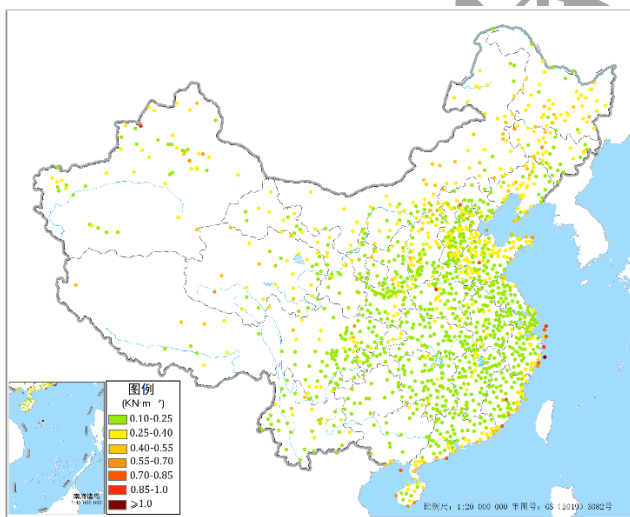


图 3 全国 15a 重现期基本风压分布

Fig.1 Distribution of the 15-year return-period basic wind pressure across China

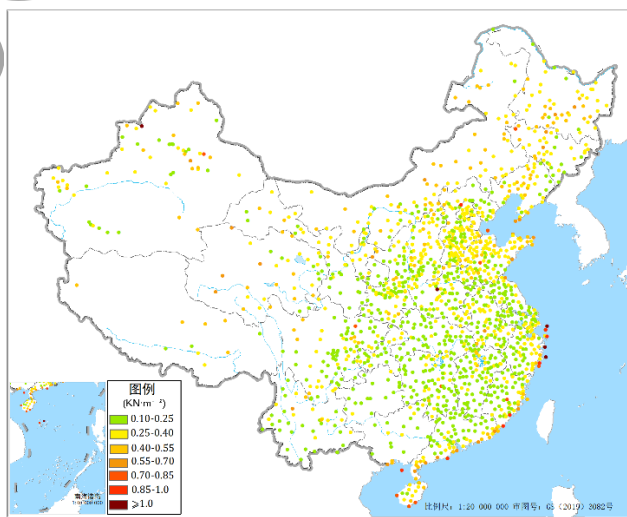


图 4 全国 30a 重现期基本风压分布

Fig.2 Distribution of the 30-year return-period basic wind pressure across China

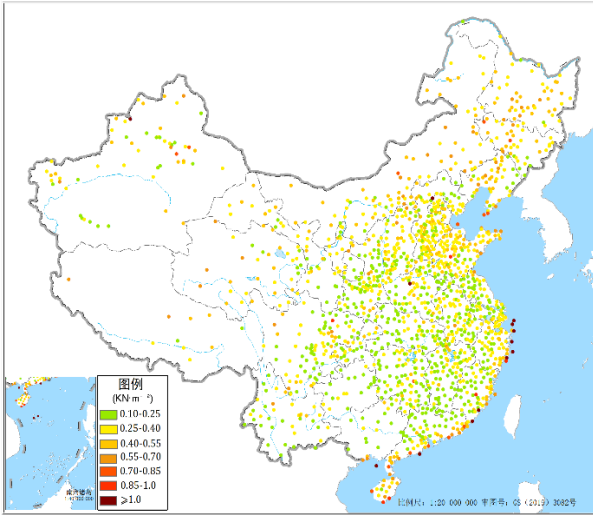


图5 全国 50a 重现期基本风压分布

Fig.3 Distribution of the 50-year return-period basic wind pressure across China

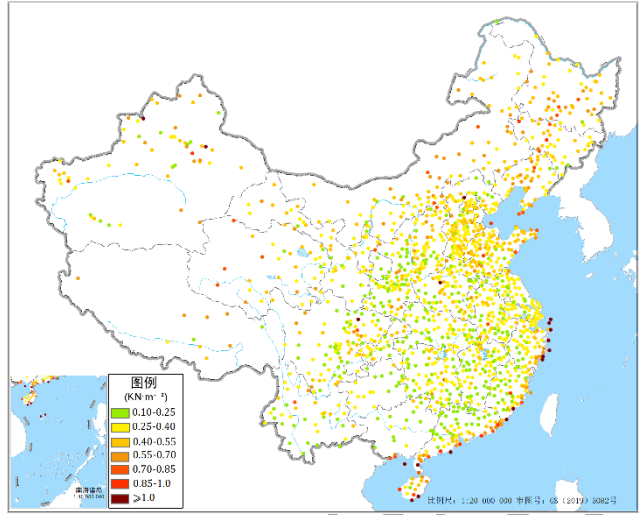


图6 全国 100a 重现期基本风压分布

Fig.4 Distribution of the 100-year return-period basic wind pressure across China

3.2 历史评估检验情况

从中国气象局气象灾害管理系统提取 2012-2023 年台风灾情资料，全国共有 205 个台风案例有电力设施受损或电力供应受灾情况报告。分析台风电力受灾报告，发现很多受灾地区没有上报电力具体受灾情况，上报的电力受灾信息中相关内容也欠丰富、描述也较为笼统，如：部分高压断线、断杆等；部分地区出现不同程度的断电情况；部分供电线杆、通信线杆被吹断，造成电力及通信中断；部分地区出现内涝、停电停水、通讯中断情况；一些市政绿化树、供电、通讯设施不同程度受损失；等等。探究原因，在台风灾害发生过程中，往往出现房屋损坏或倒塌、农田受淹、城乡积涝、大量基础设施损毁等情况，涉及灾害信息和条目较多，基层人手有限，部门分享数据少，可能是导致灾情上报不全的原因。

鉴于气象部门灾情数据目前现状，本文将地市区域内上报灾情中凡是有电力受灾损失、电线杆倒损、出现停电等信息之一，即确定为该地市出现台风电力受灾情况。对台风灾情数据进行整编，根据电力受灾发生时间、地点，从地面观测数据中提取每个台风大风过程的日最大风速、日极大风速，分别计算台风过程中测站的最大风和极大风风压，并剔除掉无大风天气（6 级以下）出现的灾情站点，利用 2.2、2.3 节方法，计算出台风大风对输电线路致灾指数和等级。

对中国气象局气象灾害管理系统灾情数据完整性进行分析，发现在很多台风灾情案例中，有新闻报道有某地电力设施受损情况但气象部门灾情报告中并未报告相关信息的现象。由于灾情数据的漏报会影响评估结果的检测，故本文仅对模型评估准确率进行检验，未计算模型空报率和漏报率。将台风大风对输电线路致灾性评估结果与灾情分布进行空间属性叠加，如果模型评估出风险，该地市实际也出现电力灾情，记为评估与实况相符，即评估准确。

基于本文研发的台风大风对输电线路致灾性评估模型，对 2012-2023 年期间台风大风对输电线路致灾性评估结果进行检验。在台风大风造成输电线路损坏或供电中断的 205 个样本中，模型共评估出 183 个样本有输电线路致灾风险，评估准确率为 89.3%。对以台风级及以上强度登陆我国的台风情况进行评估(表 3)，实际台风大风灾害造成输电线路损坏的有 162 个样本，模型评估结果为有风险的为 146 个样本，模型评估准确率为 90.1%；其中，输电线路损坏等级为中等的为 43 个样本，占总样本数的 26.5%，较高等级为 59 个样本，占比 36.4%，高等级为 24 个样本，占比 14.8%，极高等级为 20 个样本，占比 12.3%。可见，台风大风只要超过输电线路设计阈值，输电线路损坏可能性很大，对城市电力供应产生较大影响。由于不同等级输电线路灾情数据不足，暂无法对全部台风大风对不同等级输电线路损坏致灾性进行分级检验。

表 3 2012-2023 年以台风级及以上强度登陆我国的台风大风对输电线路致灾性评估检验

Table 3 Assessment and verification of transmission line disasters caused by typhoon gale with typhoon-force and above intensity landing in China from 2012 to 2023 (disaster data sourced from reports of meteorological departments)

年份	台风名	实况出现电力灾情地市*	台风大风对输电线路致灾风险评估等级				评估与实况相符比例/%
			中	较高	高	极高	
2012	韦森特	广东梅州、江门		广东梅州		广东江门	100
2012	达维	山东滨州、临沂，辽宁朝阳，浙江湖州、宁波、嘉兴	山东滨州，浙江湖州、嘉兴		山东临沂		66
2012	海葵	浙江金华、丽水、湖州、杭州、嘉兴、台州，江苏无锡、南京、苏州、常州，安徽宣城，上海金山、青浦	安徽宣城	浙江金华、丽水、杭州、嘉兴，江苏无锡、南京、台州，上海常州	浙江湖州、金山、青浦	江苏苏州	100
2012	启德	广西防城港、崇左，广东湛江、茂名	广西防城港、广东茂名		广东湛江		75
2013	苏力	浙江丽水	浙江丽水				100
2013	尤特	广西梧州	广西梧州				100
2013	潭美	福建福州、泉州、宁德，浙江温州	福建泉州	福建福州、温州	福建宁德		100
2013	天兔	福建泉州、漳州，广东汕头、潮州、梅州、汕尾、广州、韶关、惠州		福建泉州、漳州，广东梅州、广州、韶关	广东惠州	广东汕头、潮州、汕尾	100
2013	菲特	浙江台州、丽水、杭州、嘉兴、温州，福建宁德，江苏苏州	浙江台州，江苏苏州	浙江丽水、杭州	福建宁德	浙江温州	85
2014	威马逊	海南文昌、昌江、保亭，广东湛江、茂名、阳江，广西南宁、防城港、玉林、百色	海南昌江，广西南宁，广东茂名、阳江		海南文昌	广西防城港，广东湛江	70
2014	海鸥	海南万宁、昌江、海口、琼州、儋州，广东湛江、茂名、阳江、江门，广西防城港、崇左	海南昌江、琼中，广西崇左	海南海口、儋州，广东阳江，广西防城港	广东茂名、江门	广东湛江	90

2015	灿鸿	浙江宁波、绍兴、温州、杭州、嘉兴、台州, 上海浦东	浙江湖州、嘉兴, 上海浦东	浙江绍兴、杭州	浙江宁波、温州、台州	100
2015	苏迪罗	福建宁德、莆田, 南平、三明、龙岩, 浙江丽水、温州、台州, 江苏盐城	福建龙岩, 浙江台州	福建莆田、南平、三明, 浙江丽水、温州, 江苏盐城	福建宁德	100
2015	杜鹃	福建福州、莆田、宁德, 浙江丽水	福建莆田, 浙江丽水	福建宁德	福建福州	100
2015	彩虹	广东茂名、湛江、江门, 广西玉林、来宾		广东茂名、江门	广东湛江	60
2016	妮妲	广西梧州、广东揭阳	广西梧州		广西揭阳	100
2016	莫兰蒂	福建宁德、福州、龙岩、漳州、厦门、泉州、浙江丽水		福建宁德、福州、龙岩	福建漳州、福建厦门、泉州	85
2016	鲑鱼	福建福州、漳州、莆田、宁德、三明、南平、龙岩, 浙江丽水	浙江丽水	福建漳州、莆田、三明、南平、龙岩	福建福州、宁德	100
2016	沙莉嘉	广东湛江	广东湛江			100
2016	海马	广东梅州、河源、潮州、惠州、汕头, 福建漳州、龙岩	广东潮州、汕头, 福建龙岩	广东梅州	广东惠州, 福建漳州	100
2017	天鸽	广东肇庆			广东肇庆	100
2017	帕卡	广东惠州、深圳、江门, 广西梧州	广东惠州、深圳	广东江门		75
2018	玛莉亚	福建福州、宁德、泉州		福建泉州	福建福州、宁德	100
2018	山竹	广东深圳、湛江、潮州、惠州、江门、阳江、广州、茂名、肇庆、佛山、云浮, 广西贵港、梧州、来宾	广东湛江、潮州、茂名, 广西来宾	广东深圳、阳江、广州, 广西梧州	广东惠州、肇庆	92
2020	黑格比	浙江嘉兴	浙江嘉兴			100
2020	海高斯	广东江门、中山	广东中山	广东江门		100
2021	烟花	浙江嘉兴、上海浦东	浙江嘉兴	上海浦东		100
2022	暹芭	广西贵州、梧州, 广东肇庆、茂名, 海南儋州、白沙	广西梧州	广东肇庆	广东茂名	50
2022	梅花	上海崇明、浦东	上海浦东		上海崇明	100
2023	杜苏芮	福建泉州、三明、厦门		福建三明、厦门	福建泉州	100

3.3 重大台风电力致灾性评估实例

3.3.1 2016 年台风“莫兰蒂”

“莫兰蒂”于 2016 年 9 月 10 日在西北太平洋生成, 15 日在福建厦门沿海登陆 (强台风级, 48 m s^{-1}), 17 日凌晨在黄海南部海域变性为温带气旋。受其影响, 14—17 日华东沿海出现强风暴雨天气 (池艳珍等, 2017; 林小红等, 2019)。其中, 福建和浙江东部沿海出现 8~11 级阵风, 福建厦门、泉州、莆田、福州局地 12~15 级, 厦门最大阵风 17 级以上 (63.1 m s^{-1})。

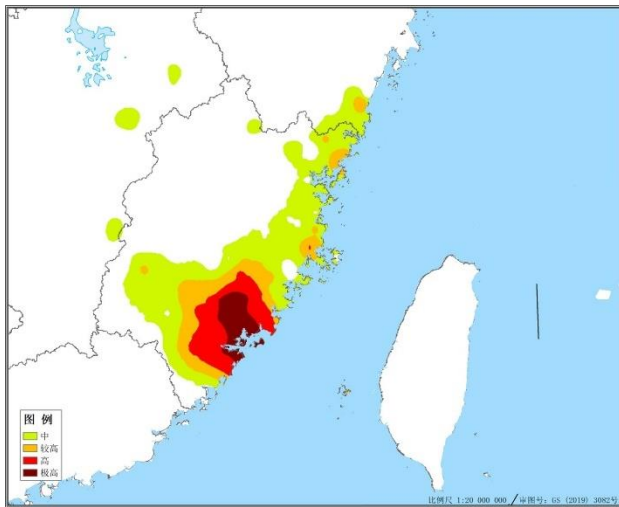


图7 台风大风对输电线路致灾性评估模型对2016年9月13—16日“莫兰蒂”期间的致灾等级评估

Fig. 7 Disaster risk assessment of transmission lines exposed to gale caused by Typhoon Meranti in 13-16 September 2016 based on the disaster assessment model for transmission lines under typhoon gale

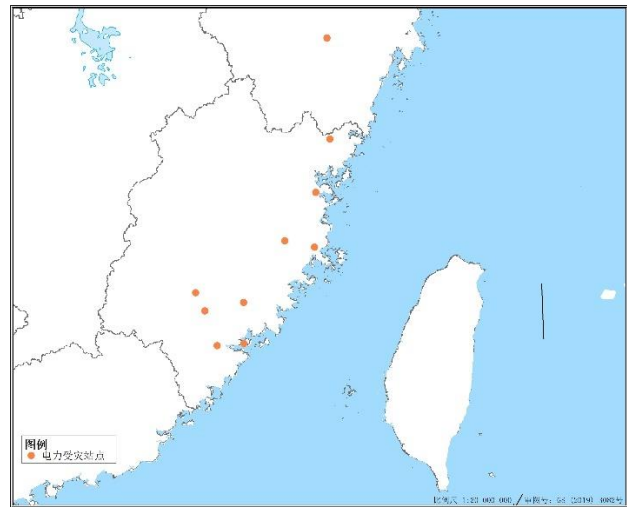


图8 2016年9月13—16日“莫兰蒂”期间气象部门灾情报告的实况电力受灾站点分布

Fig.8 Distribution of power disaster-stricken stations during Typhoon Meranti in 13-16 September 2016 based on disaster reports from meteorological departments

模型对2016年“莫兰蒂”期间的输电线路致灾性评估结果见图7。由图可见，福建沿海的福州、龙岩、宁德、厦门、漳州、泉州等6个地市台风大风对输电线路有致灾性影响，其中福州、龙岩、宁德的致灾等级为较高，厦门、漳州、泉州为极高。根据气象部门灾情报告，福建省厦门、福州、宁德、漳州、泉州、龙岩及浙江省丽水等7个地市发生电力受灾（图8），厦门、漳州、泉州电力设施发生大范围破坏。基于气象部门灾情报告和陈文兴（2017）中相关电力受灾详细信息，对输电线路致灾性评估进行分级检验（表4）。福建福州、龙岩致灾等级为较高，灾情实况出现了10kV及以上输电线路停运和供电中断，与表2中该等级的灾情影响相符；厦门、漳州、泉州致灾等级为极高，灾情实况出现500kV线架空输电线路倒塔及220kV等型号输电线路停运等，与该等级的灾情影响也相符；宁德致灾等级为较高，灾情实况只报告了供电中断，没有具体输电线路损坏情况，对应致灾等级为中等的影响，即评估的致灾等级偏大一级。浙江丽水实际出现电力受灾情况，模型评估为无风险，即出现漏报；实况资料表明，丽水出现的最大风速并不算很高（缙云， 13.2m s^{-1} ）但累计降水量较大（缙云，289mm），可能台风暴雨引发的电力设施进水是造成其电力受灾的主要原因。

综上，“莫兰蒂”期间台风大风对输电线路致灾性评估结果与实况相符的地市比例为85%，即模型评估准确率为85%，其中较高、极高等级的评估准确率分别为67%、100%。在电力受灾最严重的福建厦门、泉州、

漳州, 致灾等级评估均为极高, 对应的灾情影响与实况相符。说明模型对电力受灾严重程度有较好的评估能力。

表 4 台风大风对输电线路致灾性评估模型对 2016 年台风“莫兰蒂”的评估结果与实况对比

Table 4 Comparison of Typhoon Meranti in 2016 between the observation reports and the disaster assessment results based on the disaster assessment model for transmission lines under typhoon gale

致灾等级	地市	输电线路电力灾情实况	相符与否
无	浙江丽水	供电中断 28 条次	否
较高	福建福州	供电中断 95 条, 停运 10kV 馈线 26 条	否
较高	福建龙岩	供电中断 10kV 以上 3 条次	否
较高	福建宁德	供电中断 42 条次	否
极高	福建漳州	供电中断 148 条次, 漳泉 I 路、漳泉 II 路等 500kV 线架空输电线路发生倒塔 *	是
极高	福建厦门	厦沧 I 路、厦沧 II 路等 500kV 线架空输电线路发生倒塔, 21 条 220kV 线路、52 条 110kV 线路、713 条 10kV 线路停运, 停电用户达 55.22 万户 *	是
极高	福建泉州	漳泉 I 路、漳泉 II 路等 500kV 线架空输电线路发生倒塔 *	是

注: 灾情主要来自于气象部门灾情报告, 其中*来自于陈文兴 (2017)。

3.3.2 2018 年台风“山竹”

“山竹”于 2018 年 9 月 7 日在西太平洋生成, 16 日在广东江门沿海登陆(强台风级, 14 级, 45 m s^{-1}), 是 2018 年最强登陆台风(周星妍等, 2019; 徐敬涵等, 2024)。受其影响, 华南大部出现狂风和强降雨, 其中 16—17 日, 广东珠三角及沿海地区、香港、澳门等地出现 8~11 级阵风, 广东中山、珠海、深圳和香港、澳门等地阵风 12 级以上, 最大阵风出现在惠州汕尾列岛 (62.8 m s^{-1} , 17 级以上)。

台风大风对输电线路致灾性评估结果表明, “山竹”期间, 广东广州、深圳、湛江、潮州、惠州、江门、阳江、茂名、肇庆、佛山、云浮、中山及广西梧州、来宾等 14 个地市有致灾性影响(图 9), 其中中山、深圳、惠州、江门、佛山、云浮、肇庆等 8 个地市为高等级, 开平和佛山局地有极高等级。根据气象部门灾情上报信息, 广东和广西上述地市共有 13 个出现电力受灾情况(图 10), 台风大风对输电线路致灾性评估准确率为 92%。评估结果中, 仅广西贵港台电力受灾未被有效评估出, 分析原因发现贵港历史大风资料未通过 A-D 检验, 该站点未作为评估站点计算。另外, 气象部门上报灾情仅有个别地区报告具体输电线路损坏情况, 样本太少无法进行输电线路受灾分级检验。总体而言, 对“山竹”的输电线路致灾评估区域与实际电力受灾区域基本一致, 可以客观评估出台风大风导致的电力受灾地区。

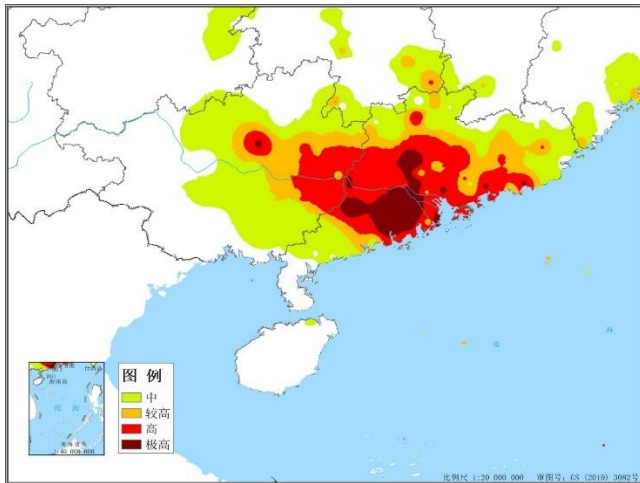


图9 台风大风对输电线路致灾性评估模型对2018年9月14—17日“山竹”期间的致灾等级评估

Fig. 9 Disaster risk assessment results of transmission lines exposed to gale caused by Typhoon Mangkhut in 14-17 September 2018 based on the disaster assessment model for transmission lines under typhoon gale

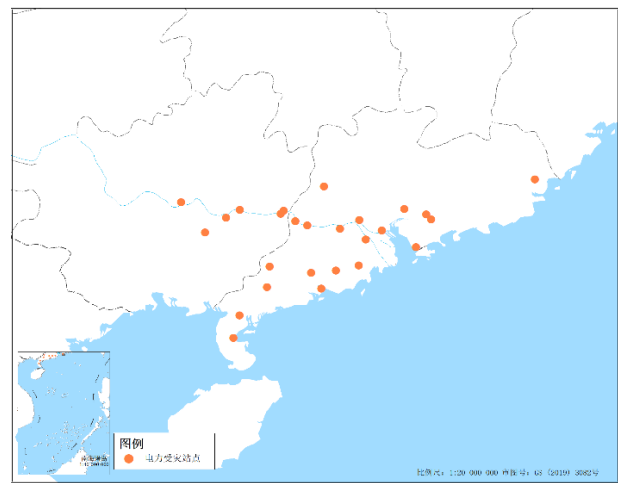


图10 2018年9月14—17日“山竹”期间气象部门灾情报告的实况电力受灾站点分布

Fig.10 Distribution of power disaster-stricken stations during Typhoon Mangkhut in 14-17 September 2018 based on disaster reports from meteorological departments

4 结论与讨论

本文根据我国建筑结构和主要架空输电线路设计标准，基于广义极值分布理论，利用历史地面气象监测数据，计算气象观测站的不同重现期基本风压，选取台风影响期间的最大风压、极大风压作为台风大风对输电线路的致灾因子，结合低压、中压、高压、超高压及以上等不同类型输电线路的风压致灾阈值指标，构建台风大风对输电线路致灾性评估模型，并利用2012-2023年中国气象局气象灾害管理系统灾情数据对评估模型结果进行合理性检验。结论如下：

(1) 对通过A-D检验的1544个站点计算5a、10a、15a、30a、50a、100a重现期基本风压。基本风压的高值区主要位于西北地区、青藏高原北部、内蒙古、东北地区、黄淮等地，除东南沿海地区外，南方大部地区基本风压相对较低。新疆北部和东部、青藏高原东部、西北地区东部、内蒙古、东北地区北部和西部、华北、黄淮东部及东南沿海地50a、100a重现期的基本风压超过 0.45 KN m^{-2} ，其中新疆北部、浙江东部沿海、福建东部沿海、广东沿海及海南岛沿海地区达 $0.7 \sim 2.0 \text{ KN m}^{-2}$ ，新疆阿拉山口附近风压也比较高，达 $1.2 \sim 1.5 \text{ KN m}^{-2}$ 。冬春季节，北方地区易受冷空气和温带气旋影响，夏秋季节，东南沿海地区易受登陆台风影响，基本风压的分布特征与气候特征吻合。

(2) 利用灾情数据对构建的台风大风对输电线路致灾性评估模型结果进行合理性检验。2012-2023年台风大风导致电力受灾案例样本有205个，模型评估出风险的有183个，评估准确率为89.3%。对台风级及以上强度登陆我国的台风进行评估，实际台风大风灾害造成输电线路损坏的有162个样本，模型评估出风险的有146个样本，评估准确率为90.1%，其中输电线路损坏等级为中等、较高、高、极高的分别有43个、

59 个、24 个、20 个样本，分别占总样本数的 26.5%、36.4%、14.8%、12.3%。

(3) 选取重大台风灾害案例，对模型总体评估效果及分级评估情况进行检验。2016 年“莫兰蒂”期间，台风大风对输电线路致灾性的评估准确率为 85%，其中较高、极高等级的评估准确率分别为 67%、100%。对电力受灾最严重的 3 个地市，模型给出的致灾等级评估均为极高，致灾等级影响与灾情实况相符。2018 年“山竹”期间，模型的评估准确率为 92%，评估结果与实际电力受灾区域基本一致。

(4) 台风大风对输电线路致灾性评估模型评估效果总体较好，但也存在一定偏差，需要未来继续加强研究。一是台风对电力供应的评估还需考虑台风暴雨引发内涝所造成的电力中断等灾害的影响；二是某些站点历史大风资料未通过 A-D 检验，还需进一步检查其原因并扩大评估站点样本量；此外，受台风具体输电线路灾情数据不足的限制，暂无法进行更多案例的灾害分级检验，数据的不足也制约了模型的改进空间。结合台风格点预报或观测实况资料，基于本文研发的台风大风对输电线路致灾性评估模型，可进行灾前预评估和灾后快速评估，为面向电力行业的台风决策气象服务提供参考。

参考文献

- 陈文兴, 2017. 2016 年福建电网输电线路“莫兰蒂”台风受损情况及原因分析[J]. 能源与环境, (1): 106-109. Cheng W X, 2017. Analysis of the damage and causes of Typhoon Meranti on the transmission lines of Fujian in 2016[J]. Energy Environ, (1): 106-109 (in Chinese).
- 陈永业, 2016. 考虑恶劣天气的配电网防灾风险评估研究[D]. 北京: 华北电力大学. Chen Y Y, 2016. Study on risk assessment of distribution network considering the bad weather [D]. Beijing: North China Electric Power University (in Chinese).
- 池艳珍, 何芬, 唐振飞, 2017. 2016 年登陆和影响福建台风成因分析及预测[J]. 气象, 43(10): 1287-1295. CHI Y Z, HE F, TANG Z F, 2017. Cause analysis and forecast assessment on typhoon landing and impacting Fujian in 2016[J]. Meteor Mon, 43(10): 1287-1295(in Chinese).
- 丁明, 钱宇骋, 张晶晶, 2017. 考虑多时间尺度的连锁故障演化和风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 37(20): 5902-5912. Ding M, Qian Y C, Zhang J J, 2017. Multi-timescale cascading failure evolution and risk assessment model[J]. Proc CSEE, 37(20): 5902-5912 (in Chinese).
- 国家技术监督局, 中华人民共和国建设部, 1998. GB 50061-97 66kV 及以下架空电力线路设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社. The State Bureau of Quality and Technical Supervision, Ministry of Construction of the People's Republic of China, 1998. GB 50061-97 Code for design of 66kV or under over-head electrical power transmission line[S]. Beijing: China Electric Power Press (in Chinese).
- 国家能源局, 2013. 220kV~500kV 紧凑型架空输电线路设计技术规程. DL/T 5217-2013 [S]. 北京: 中国计划出版社. National Energy Administration, 2013. Technical code for design of 220kV~500kV compact overhead transmission line. DL/T 5217-2013 [S]. Beijing: China Planning Press (in Chinese).
- 国家能源局, 2021. 10kV 及以下架空配电网线路设计规范. DL/T 5220-2021 [S]. 北京: 中国计划出版社. National Energy Administration, 2021. Code for design of 10kV or under overhead distribution line. DL/T 5220-2021 [S]. Beijing: China Planning Press (in Chinese).
- 黄浩辉, 陈雯超, 植石群, 等, 2021. 基于测风塔实测台风威马逊登陆过程的强风特性分析[J]. 气象, 47(2): 143-156. Huang H H, Chen W C, Zhi S Q, et al, 2021. Analysis on severe wind characteristics during typhoon rammasun landing process based on the observation at wind tower[J]. Meteor Mon, 47(2): 143-156 (in Chinese).
- 鞠平, 王冲, 辛焕海, 等, 2019. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. 电力自动化设备, 39(11): 1-7. Ju P, Wang C, Xin H H, et al, 2019. Flexibility, resilience and toughness of power system[J]. Electr Power Autom Equip, 39(11): 1-7 (in Chinese).
- 林小红, 吴幸毓, 陈淼, 等, 台湾海峡西岸台风大风特征及极端大风典型个例分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(6): 93-100. LIN X H, WU X Y, CHEN M, et al, 2019. Characteristics of strong typhoon wind and typical cases of extreme wind on the west coast of the Taiwan Strait, China[J]. J Meteor Environ, 2019, 35(6): 93-100(in Chinese).
- 缪旭明, 高拴柱, 张静, 2014. 超强台风“威马逊”成因及应对[J]. 中国应急管理, (9): 47-49. Miu X M, Gao S Z, Zhang J, 2014. The causes and responses to super typhoon Rammasun[J]. China Emerg Manage, (9): 47-49 (in Chinese).

孙为民, 孙华东, 何剑, 等, 2024. 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估技术综述[J]. 电网技术, 48(1): 129-139. Sun W M, Sun H D, He J, et al, 2024. Review of power system resilience assessment techniques for severe natural disasters[J]. Power Syst Technol, 48(1): 129-139 (in Chinese).

王丙兰, 宋丽莉, 袁春红, 等, 2017. 河南电网输电线路舞动的气象要素指标研究[J]. 气象, 43(1): 108-114. Wang B L, Song L L, Yuan C H, et al, 2017. Study of meteorological indices for transmission line galloping in Henan power grid[J]. Meteor Mon, 43(1): 108-114 (in Chinese).

吴冠雄, 2020. 台风灾害下电力通信网保障对策[J]. 信息系统工程, (11): 104-105. Wu G X, 2020. Countermeasures for ensuring the power and communication network under typhoon disasters[J]. China CIO News, (11): 104-105 (in Chinese).

徐敬涵, 冉令坤, 炎利军, 等, 2024. 台风“山竹”外围强龙卷的结构和机理分析[J]. 大气科学, 48(3): 843-858. XU J H, RAN L K, YAN L J, et al, 2024. Analysis of the structure and mechanism of the tornado at the periphery of Typhoon Mangkhut [J]. Chin J Atmos Sci (in Chinese), 48(3): 843-858(in Chinese).

中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2005. 10kV 及以下架空配电线路设计技术规程.DL/T 5220-2005 [S]. 北京: 中国电力出版社. National Development and Reform Commission of the People's Republic of China, 2005. Code for designing over-head distribution transmission line up to 10kV. DL/T 5220-2005 [S]. Beijing: China Electric Power Press (in Chinese).

中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2010. 110kV~750kV 架空输电线路设计规范.GB 50545-2010 [S]. 北京: 中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2010. Code for design of 110kV~750kV overhead transmission line .GB 50545-2010 [S]. Beijing: China Planning Press (in Chinese).

中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2011. 1000kV 架空输电线路设计规范.GB 50665-2011 [S]. 北京: 中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2011. Code for design of 1000kV overhead transmission line. GB 50665-2011 [S]. Beijing: China Planning Press (in Chinese).

中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 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, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine 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, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2025. 66kV 及以下架空电力线路设计标准.GB 50061-2010 [S]. 北京: 中国计划出版社. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2025. Standard for design of 66kV or under overhead electrical power transmission line. GB 50061-2010 [S]. Beijing: China Planning Press (in Chinese).

周星妍, 曾红玲, 王遵娅, 等, 2019. 2018 年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J]. 气象, 45(4): 543-552. ZHOU X Y, ZENG H L, WANG Z Y, et al, 2019. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2018[J]. Meteor Mon, 45(4): 543-552(in Chinese).

Anderson T, Darling D. 1952. Asymptotic theory of certain goodness of fit criteria based on stochastic processes. The Annals of Mathematical Statistics, 23(2): 193-212.