

中国龙卷风时空统计特性及灾情分析

孙禹枫¹, 李丹煜², 王京学^{1*}, 刘彬², 谭笑³, 邱刚³, 范文琪²

¹北京林业大学水土保持学院, 北京

²中国电力科学研究院有限公司, 北京

³国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年4月28日; 录用日期: 2024年7月4日; 发布日期: 2024年7月15日

摘要

龙卷风是毁灭性的自然灾害之一, 其经过之处常发生严重的破坏。针对龙卷风危害程度大但相关统计数据少的问题, 本文基于《中国气象灾害年鉴》中记录的有关龙卷风的描述, 对2003~2019年发生在我国境内的648次龙卷风的时间和空间特性进行统计分析, 对龙卷风发生后建筑物、树木、农作物的受损情况及人员伤亡情况进行探讨, 并利用熵权法综合评定的思想对龙卷风灾情进行综合评价。结果表明: 我国东南沿海、东北平原及高原地区为龙卷风的常发地带; 龙卷风在夏季发生的频次较其他季节高, 且常发生在下午14~16时。自2003~2019年间, 龙卷风导致建筑物损坏和倒塌的数量分别为282,349和86,263间, 且位于我国东部地区的建筑物受损数量大于西部; 龙卷风过境后, 树木的失效模式主要有连根拔起、树干折断、树干倾斜及枝条折断四类, 2003~2019年间树木遭受龙卷风破坏的数量累计为2,390,457棵, 且位于四川、河南、江苏省的树木受损较为严重; 农作物受灾、成灾和绝收面积分别为1296920.8、337,529和233,010公顷; 2003~2019年龙卷风共造成388人死亡、7485人受伤, 受灾人数达20,033,080人次; 根据熵权法建立的龙卷风灾情综合评价模型对龙卷风灾情进行评价, 得出我国华东、华南和东北地区灾情最为严重。研究结果对中国龙卷风数据库的建立和防灾减灾具有一定的参考意义。

关键词

龙卷风, 时空统计特性, 中国气象灾害年鉴, 灾情分析, 灾情综合评价

Temporal-Spatial Statistical Characteristics and Disaster Analysis of Tornadoes in China

Yufeng Sun¹, Danyu Li², Jingxue Wang^{1*}, Bin Liu², Xiao Tan³, Gang Qiu³, Wenqi Fan²

¹School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing

*通讯作者。

文章引用: 孙禹枫, 李丹煜, 王京学, 刘彬, 谭笑, 邱刚, 范文琪. 中国龙卷风时空统计特性及灾情分析[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(7): 935-948. DOI: 10.12677/ag.2024.147087

²China Electric Power Research Institute, Beijing³Electric Power Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing JiangsuReceived: Apr. 28th, 2024; accepted: Jul. 4th, 2024; published: Jul. 15th, 2024

Abstract

Tornado is one of the most destructive natural disasters, often causing severe damages where it passes. The extent of the damage caused by tornadoes is significant, while the related statistical data are few. This paper presents a statistical analysis of the temporal-spatial characteristics of 648 tornadoes occurred in China from 2003 to 2019, based on the descriptions related to tornadoes recorded in Yearbook of Meteorological Disasters in China. The impacts of tornadoes on buildings, trees, crops and casualties are also discussed. A comprehensive evaluation of tornado disaster is conducted using the entropy-weighting method. The results show that the tornadoes often occur in the southeast coast, northeast plain, and the plateau areas in China. They occur most frequently in summer, between 2 and 4 pm. A total of 282,349 buildings were damaged by tornadoes, and 86,263 buildings were collapsed. And the number of buildings damaged in the eastern part of China is greater than that in the west. After the tornado passes, the failure modes of trees mainly include four types: uprooting, trunk breaking, trunk tilting and branch breaking. The number of trees damaged by tornadoes was 2,390,457 from 2003 to 2019, with severely damaged ones occurring in Sichuan, Henan, and Jiangsu provinces. The areas of crops which were affected, caused disaster and demolished are 1296920.8, 337,529, and 233,010 hectares, respectively. From 2003 to 2019, a total of 20,033,080 people were affected by tornadoes, among which 388 people were died and 7485 people were injured. Using the entropy-weighting method, a comprehensive evaluation model was established for the evaluation of tornado disaster. The results indicate that tornado disasters in East China, South China, and Northeast China are the most severely damaged areas. The research findings have certain reference significance for the establishment of a tornado database in China and disaster prevention and mitigation efforts.

Keywords

Tornado, Temporal-Spatial Statistical Characteristics, Yearbook of Meteorological Disasters in China, Disaster Analysis, Comprehensive Evaluation of Disaster

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

自古以来，人与自然是有着密不可分的联系。龙卷风作为一种自然界破坏力极强的强对流天气之一，对人民的生命财产安全具有不可忽视的影响。例如，2005年7月30日11时50分左右，安徽省灵璧县出现龙卷风，此次龙卷风共造成15人死亡、51人受伤，房屋倒塌1617间，农作物受灾面积达27万亩；2023年6月1日14时10分左右，受强对流天气影响，辽宁省开原市金沟子镇出现龙卷风，导致80余人受灾，60余处的房屋造成了不同程度的损坏，农业受损面积约4000亩。由此可见，龙卷风造成的危害极为严重，加强对龙卷风的认识并建立有效的防灾减灾措施迫在眉睫。

目前,国内外对于龙卷风的研究主要集中在龙卷风的灾情调查、形成机制、风场特性及龙卷风作用下建筑物的风荷载与风致响应四个方面。自20世纪70年代起,便有学者开始对龙卷风发生后的灾情情况进行记录分析。例如,相德勤等[1]对1978年4月14日发生在陕西千县周城公社的龙卷风的伤亡人数及财产损失进行了统计分析;张军[2]对1981年5月发生在河北涞水的一次强龙卷风的持续时间及运动轨迹进行了调查研究;霍星远等[3]分析了2005年6月10日发生在辽宁朝阳县的一次龙卷风的天气状况及农作物受损情况;毛以伟等[4]调查了武汉5·14罕见龙卷风天气发生后的人员伤亡及树木、建筑的受损情况。在龙卷风的形成机制方面,Lewellen等[5]指出近地表流入层的差异是确定现有超级单体低水平中气旋是否产生龙卷风的关键因素;王沛霖等[6]指出在对流层深厚气层中气压低、风速大、层结不稳定、低层高温高湿和中下层位势不稳定的条件下,龙卷风更易发生;刘勇等[7]认为龙卷的形成与地面双冷锋结构形成有关,副冷锋不断向冷锋补充干冷空气导致地面上出现了较强气流;金巍等[8]指出低空气流由水平涡度扭曲为垂直涡度,在上升气流中被拉伸为中气旋,地面附近的背景垂直涡度由于增加的垂直拉伸作用而迅速加强,从而产生龙卷风。在龙卷风的风场特性方面,刘式适等[9]通过理论推导方式,利用气压梯度力、惯性离心力、黏性力三力平衡的柱坐标系下的大气动力和热力学方程组,求解了龙卷风的三维速度场,从理论上绘制出龙卷风的三维漏斗型结构,并指出龙卷风由惯性离心力造成的涡旋流和水平辐合辐散而引起的急流叠加而成;Kosiba等[10]通过对发生在香港国际机场的一场龙卷风进行现场实测,得出龙卷风的三维风场以及角动量的径向高度分布,发现龙卷风达到最大强度之前低水平角动量的增加;Karen等[11]测量了龙卷风的高度及不同高度处的风力。此外,随着对龙卷风的认识不断加深,已有研究通过风洞试验和计算流体动力学(CFD)数值模拟等方法实现了龙卷风风场的模拟,例如,田玉基等[12]运用龙卷风模拟器生成了5种涡流比的龙卷风风场,总结分析了龙卷风的切向风速、径向风速、竖向风速以及气压降的空间分布规律,并验证了龙卷风模拟器的有效性;王蒙恩等[13]运用数值模拟方法构建了龙卷风物理模拟器的数值计算模型,经过风洞试验验证后,指出随着涡流比的增大,龙卷风风场最大切向风速逐渐增大,涡核中心气压降明显降低,涡核半径随之变大,涡核中心附近切向风速的标准差变小;Verma等[14]通过CFD数值模拟并结合现场实测验证,指出计算域出口直径变化对龙卷风风场的影响大于龙卷风模拟风场总高度变化;Hangan和Kim[15]建立了一个小尺度龙卷风数值模型,可以在平稳条件下模拟龙卷风的切向风速、径向风速和竖向风速风场。为研究龙卷风作用下建筑物的风荷载与风致响应特性,国内外学者通过理论分析、现场实测、风洞试验及CFD数值模拟开展了一定的研究。例如,Fortuin等[16]通过分析景观尺度格局及其与地形属性、总体气候格局和土壤特征的关系,预测了龙卷风和剧烈雷暴对美国东南部森林的危害风险;Bain等[17]通过现场实测与风洞试验方法对龙卷风荷载作用下木屋盖的设计提供了经验;王进等[18]采用龙卷风模拟器,对受静止龙卷风涡旋影响下的立方体建筑物进行了压力测量,并指出涡流比为0.72的模拟龙卷风涡旋可以代表斯宾塞(Spencer)发生的一次改良藤田级数EF3级龙卷风的涡旋;汪大海等[19]通过建立三维风场揭示了龙卷风作用下输电线路风灾破坏的机理,得出在最大风速确定的情况下,响应随涡核尺度增大而减小,各跨不平衡张力引起的纵向的位移及反力响应会随着跨数的增多而增加,随绝缘子的增长而减小;Selvam[20]采用大涡模拟湍流模型对龙卷风作用下结构的风致效应进行了模拟,为基于大涡模拟的龙卷风数值模拟提供了经验;杨庆山等[21]提出龙卷风影响下高速列车倾覆概率分析方法,并结合实际案例进行分析,得出在列车数量不变的情况下,通过调整列车发车间隔可以降低19%的倾覆风险。综上所述,目前我国关于龙卷风的研究主要针对单个龙卷风展开,对龙卷风的时空统计特性及灾害指示物的破坏情况缺少较为全面且详尽的分析。研究中国龙卷风的统计特性并分析不同指示物的破坏情况及总体灾情情况对中国龙卷风数据库的建立及灾害指示物的确定具有一定的参考意义,对减少风致灾害损失具有一定的工程价值。

鉴于此,本文基于中国气象局编著的《中国气象灾害年鉴》记录的有关龙卷风的描述,对2003~2019

年发生在我国境内的 648 次龙卷风的空间和时间统计特性进行分析, 探讨建筑物、树木、农作物的受损情况及人员伤亡情况, 利用熵权法综合评定的思想综合评价龙卷风灾情, 为中国龙卷风数据库的建立及风致灾害防治提供参考。

2. 数据来源

本文采用的数据来源于《中国气象灾害年鉴》(2004~2020), 该年鉴在第 2 章气象灾害分述章节中, 详细记录了上一年中我国龙卷风的发生情况。值得说明的是, 虽然一些强度极弱、持续时间极短的龙卷风有尚未被记录的可能, 但该年鉴为我国目前关于龙卷风较为完整的记录, 对龙卷风的统计分析具有重要的参考价值。为了区分不同强度等级的龙卷风, 本文采用日本改良藤田级数(JEF 等级)进行划分。JEF 等级将龙卷风强度划分为 6 个等级, 即 JEF0、JEF1、JEF2、JEF3、JEF4 和 JEF5, 其中, JEF0 等级最低, JEF5 等级最高, 随着等级的提高, 龙卷风的破坏性增强。

表 1 给出了 2003~2019 年我国不同强度的龙卷风的数量统计情况。值得一提的是, 在年鉴中, 有 250 起龙卷风无具体描述, 本文通过抽样调查分析了上述龙卷风的相关新闻报道及影像资料, 发现其破坏程度均不明显, 故本文将上述 250 起龙卷风全部归为 JEF0 级。由表 1 可知, 在 2003~2019 年发生在我国境内的 648 次龙卷风中, JEF0 级的龙卷风有 307 起, 占比最大; JEF1、JEF2 和 JEF3 级的龙卷风分别有 126、195 和 19 起; JEF4 级的龙卷风有 1 起, 为 2016 年 6 月 23 日发生在江苏省盐城市的龙卷风, 该龙卷风为我国有记录以来强度等级最大的龙卷风; 目前国内暂无 JEF5 级的龙卷风。

Table 1. Statistical table of the number of tornadoes with different intensity scales in China from 2003 to 2019
表 1. 2003~2019 年我国不同强度等级龙卷风的数量统计表

JEF0	JEF1	JEF2	JEF3	JEF4	JEF5	总计
307	126	195	19	1	0	648

3. 龙卷风时空统计特性分析

3.1. 空间分布特性



Figure 1. Spatial distribution of tornadoes with different intensity scales in China from 2003 to 2019
图 1. 2003~2019 年我国不同强度等级龙卷风的空间分布情况

图 1 为 2003~2019 年我国不同强度等级龙卷风发生位置的空间分布图。由图可知，我国龙卷风大部分发生在东南沿海地区，部分发生在西北内陆地区。其中，JEF0、JEF1 级龙卷风发生位置较广泛，JEF2 级龙卷风在江苏省和湖北省的分布较多，JEF3 级主要分布在河南省和江苏省，唯一的一起 JEF4 级龙卷风发生在江苏省。

图 2 所示为我国各省级行政区不同强度龙卷风发生频数的统计图。截至 2019 年，除北京、贵州未见龙卷风灾情外，其他 30 个省、自治区、直辖市在 2003~2019 年间均有龙卷风案例的记录。从数量上看，广东省龙卷风发生频数较多，共发生了 49 起 JEF0 级龙卷风、33 起 JEF1 级龙卷风和 16 起 JEF2 级龙卷风；从强度等级上看，大多数省份 JEF0 级龙卷风占比最大，如山西省发生的龙卷风均为 JEF0 级。

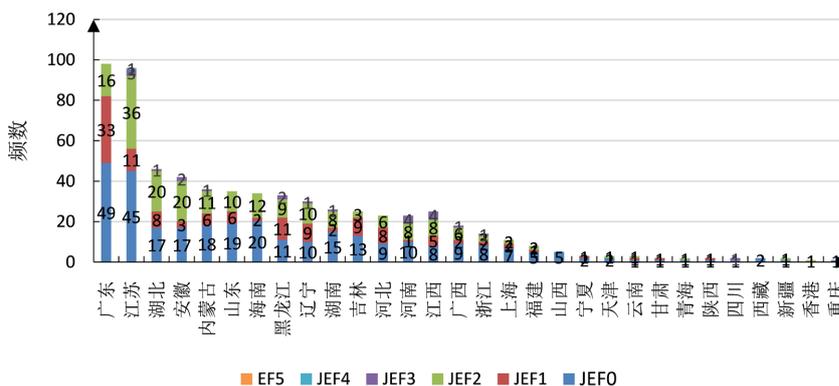


Figure 2. A statistical map of the frequency of tornadoes with different intensities in various provinces of China from 2003 to 2019
图 2. 2003~2019 年我国各省级行政区不同强度龙卷风发生频数统计图

3.2. 时间分布特性

为了分析 2003~2019 年我国全国范围及各个省份(本文以广东和江苏为例进行说明)龙卷风的频数变化情况，本文将每年中不同强度等级龙卷风的发生频数汇总，并将其按发生时间进行划分，结果如图 3 所示。从总体上看，我国龙卷风发生的频率呈下降趋势，龙卷风发生频数最高的一年在 2005 年，累计有 74 起，而频数最低的一年在 2019 年，对应有 14 起，两年相差 60 起；其中，广东和江苏两地的龙卷风频数变化趋势与总体类似。值得一提的是，虽龙卷风发生次数呈现一定的下降趋势，但这并不意味着龙卷风产生的破坏程度减小，例如，2015 年 7 月 1 日发生在黑龙江哈尔滨市呼兰区的龙卷风最大风速达到了 70 m/s，导致 2.6 万人受灾；2016 年 6 月 23 日发生在江苏盐城的 JEF4 级龙卷风造成了 99 人死亡，因此，龙卷风及其产生的危害仍应受到格外重视。

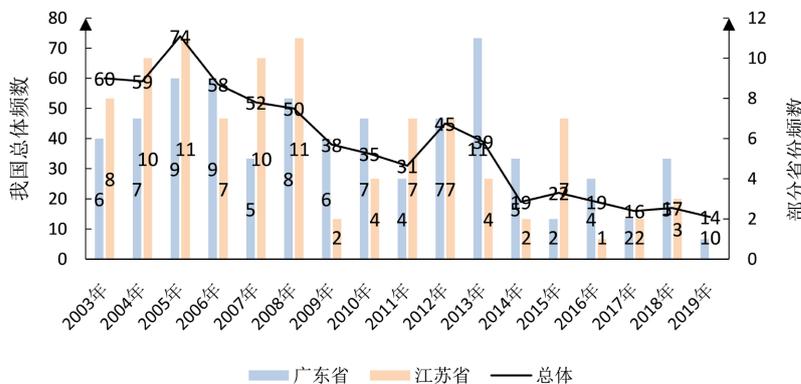


Figure 3. The frequency change diagram of tornadoes in the whole China and some provinces from 2003 to 2019
图 3. 2003~2019 年我国全国范围及部分省份龙卷风发生频数变化图

为了分析一年中不同月份龙卷风的发生情况，本文统计了 2003~2019 年各个月份我国龙卷风发生的频数，结果如图 4 所示。由图可知，龙卷风频发的月份主要集中在 6~8 月份，其中 7 月份的发生频数最多，这是由于 7 月份高温及强降水的气候特点为龙卷风的形成提供了条件[22]；而在 12~2 月期间，龙卷风的发生频数相对较少。

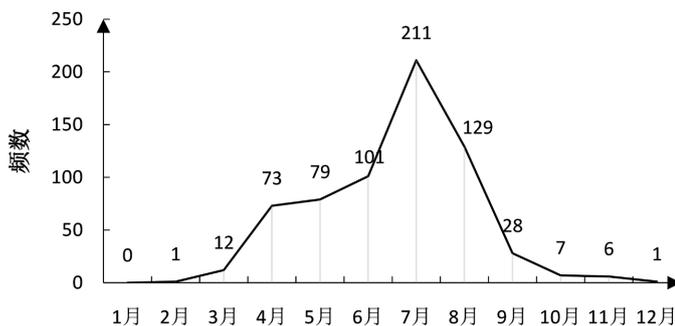


Figure 4. Variation diagram of occurrence frequency of tornadoes in each month from 2003 to 2019
图 4. 2003~2019 年各月份龙卷风发生频数变化图

在各月份的基础上，《中国气象灾害年鉴》(2004~2020)对 222 起龙卷风记录了其具体发生时间。基于此，本文对该 222 起龙卷风的发生时间进行了统计分析，如图 5 所示。由图可知，大多数龙卷风的发生时间集中在 14~20 时，而在其他时间段，龙卷风发生的次数相对较少。

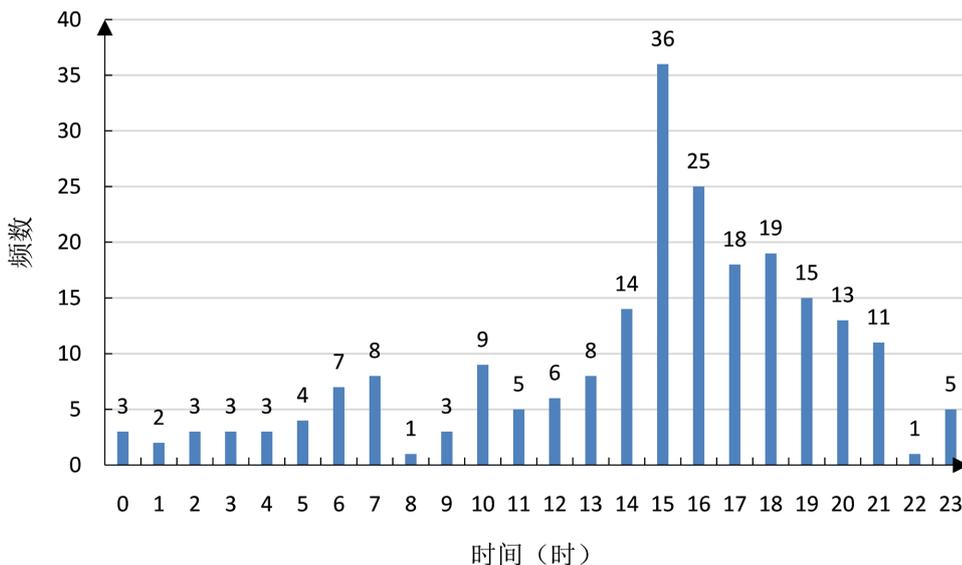


Figure 5. Statistical graph of occurrence frequency of tornadoes in different time periods from 2003 to 2019
图 5. 2003~2019 年不同时段龙卷风发生频数统计图

4. 龙卷风灾情分析

龙卷风造成的灾害损失程度往往与其袭击的区域特征紧密相关，包括地理位置、经济发展水平、人口密集程度等因素。即便是强度相当的龙卷风，其对不同地区带来的破坏和影响也存在显著差异。为了深入理解我国不同省份遭受龙卷风灾害时的具体损失情况，本文采用宏观视角，对各地龙卷风对建筑、树木、农作物以及人口所造成的损害进行了量化统计和全面评价。通过这一分析，我们旨在揭示龙卷风灾害的影响规模，并为灾害风险管理和应急响应策略的制定提供科学依据。

4.1. 建筑物受损情况分析

龙卷风过境后, 建筑物的受损情况可以分为三类, 即一般损坏、严重损坏和倒塌[23], 其破坏实例如图 6 所示。经统计分析, 我国 2003~2019 年房屋遭受龙卷风后出现一般损坏和严重损坏的数量累计 282,349 间, 倒塌的房屋数量累计 86,263 间。图 7 列举了不同结构形式的建筑物遭受龙卷风后的破坏情况。对比砖混结构、钢筋混凝土、钢结构和木结构建筑的破坏特点发现, 钢筋混凝土遭遇龙卷风后破坏程度较低, 主要以围护结构破坏为主, 其抗风性能优于轻钢结构和砖木结构。因此, 对龙卷风多发地区的不同类型建筑物加固也应有所侧重[24]。



Figure 6. Examples of damaged buildings after tornadoes: (a) Generally damaged (2020.5.18, Weifang, Shandong); (b) Seriously damaged (2017.8.21, Nenjiang, Heilongjiang); (c) Collapsed (2021.5.14, Caidian, Wuhan)

图 6. 龙卷风发生后建筑物受损情况举例: (a) 一般损坏(2020.5.18, 山东潍坊); (b) 严重损坏(2017.8.21, 黑龙江嫩江); (c) 倒塌(2021.5.14, 武汉蔡甸)

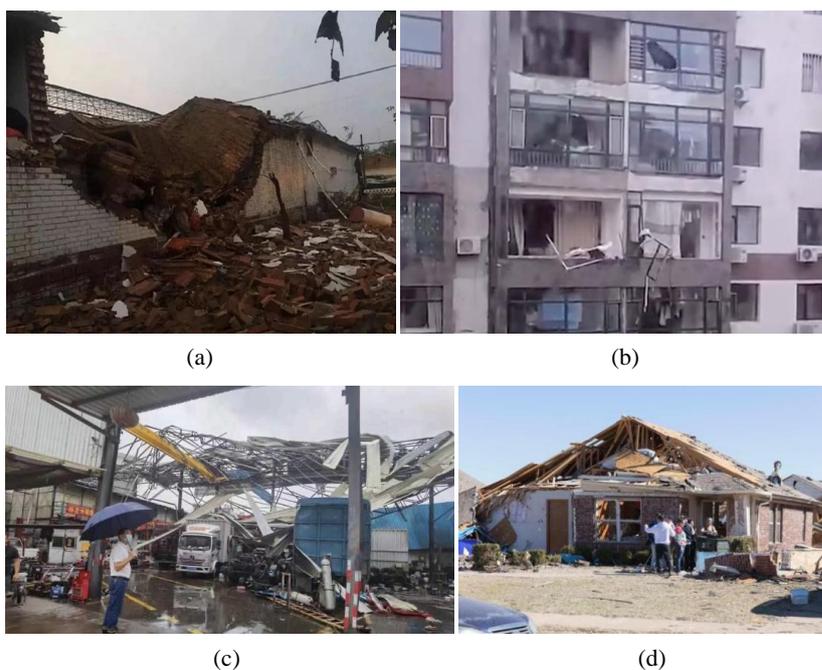


Figure 7. Examples of damaged buildings of different structure types after tornadoes: (a) Damage of brick-concrete house (2018.8.13, Jinghai, Tianjin); (b) Damage of reinforced concrete building (2021.8.25, Huludao, Liaoning); (c) Damage of steel structure facilities (2022.7.4, Huangpu, Guangdong); (d) Damage of wooden house (2023.2.26, Oklahoma, USA)

图 7. 龙卷风发生后不同结构类型的建筑物破坏举例: (a) 砖混结构民房破坏(2018.8.13, 天津静海); (b) 钢筋混凝土楼房破坏(2021.8.25, 辽宁葫芦岛); (c) 钢结构设施破坏(2022.7.4, 广东黄埔); (d) 木结构房屋破坏(2023.2.26, 美国俄克拉荷马)

为分析我国龙卷风导致的建筑物受损数量的空间分布情况，本文将各个省份龙卷风造成的一般损坏、严重损坏和倒塌的建筑物数量累加，得到各个省份建筑物受损数量总数，如图 8 所示。从整体上看，我国东部地区的建筑物受损数量大于西部，其中，江苏、安徽、黑龙江等地建筑物的破坏数量极多。

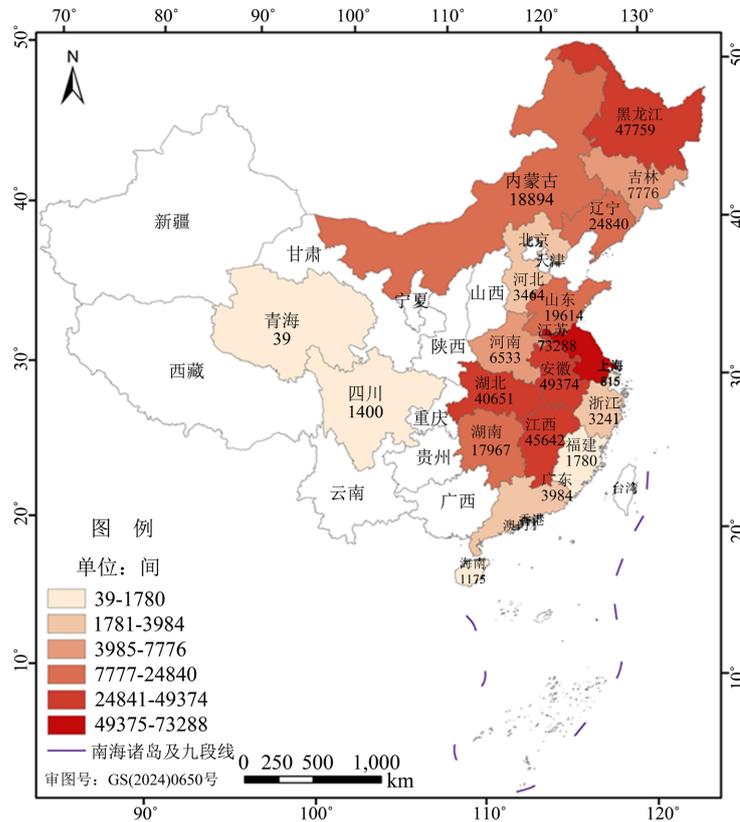


Figure 8. The distribution map of the number of damaged buildings after tornadoes (2003~2019)
 图 8. 龙卷风发生后建筑物受损数量分布图(2003~2019 年)

4.2. 树木受损情况分析

龙卷风过境后，森林树木及城市行道树也会发生不同程度的损坏。统计《中国气象灾害年鉴》龙卷风导致的树木受损相关描述，发现 2003~2019 年间树木发生不同受损情况的总数为 2,390,457 棵，其中，树木被连根拔起(如图 9(a))和拦腰折断(如图 9(b))的数量分别为 144,130 和 113,841 棵，分别占 6.03%和 4.67%。除了年鉴中提到的上述两种受损模式外，结合龙卷风灾后相关新闻报道，树木还可能发生树干倾斜和枝条折断破坏，如图 9(c)和图 9(d)所示。



(a)

(b)



Figure 9. Examples of damaged types of trees after tornadoes: (a) Uprooted trees (2020.6.12, Yangzhou, Jiangsu); (b) Broken trees (2023.8.4, Tongliao, Inner Mongolia); (c) Tilted trunks (2021.5.14, Caidian, Wuhan); (d) Trees with broken branches (2020.7.6, Chongming, Shanghai)
图 9. 龙卷风发生后树木受损类型举例：(a) 连根拔起(2020.6.12, 江苏扬州); (b) 拦腰折断(2023.8.4, 内蒙古通辽); (c) 树干倾斜(2021.5.14, 武汉蔡甸); (d) 枝条折断(2020.7.6, 上海崇明)

图 10 中展示了 2003~2019 年间我国各个省份树木受损数量总数的空间分布, 由图可知, 我国大部分省份树木均遭受到龙卷风灾害破坏, 其中, 四川、河南、江苏的树木破坏情况尤为严重, 应引起足够重视。

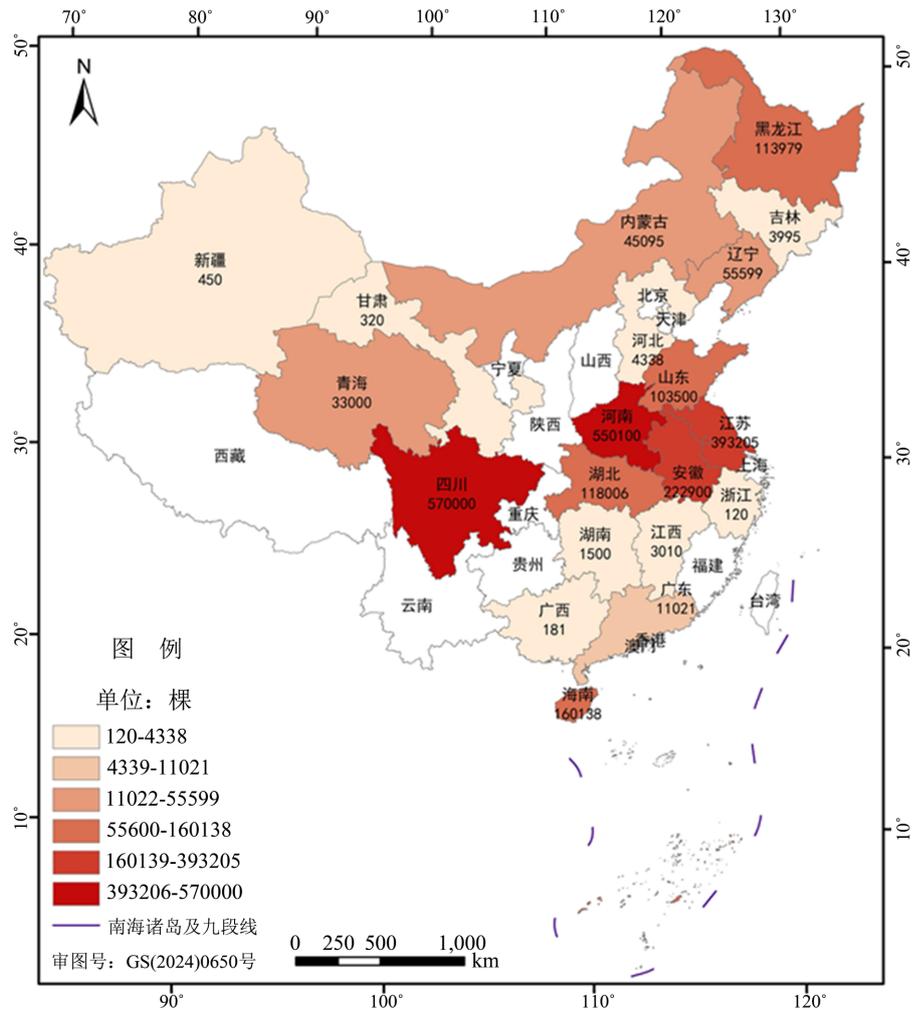


Figure 10. The distribution map of the number of damaged trees after tornadoes (2003~2019)
图 10. 龙卷风发生后树木受损数量分布图(2003~2019 年)

4.3. 农作物受损情况分析

多起龙卷风的相关记录表明,龙卷风对农作物的生长会产生致命的影响。根据龙卷风灾后调查结果,笔者总结出农作物的失效模式主要有根部被吹离土壤和茎部倒伏两类,如图 11(a)和图 11(b)所示。农作物倒伏与其茎秆的刚度、稳定性密切相关[25]。根据龙卷风过境后农作物产量的降低程度,《中国气象灾害年鉴》统计了龙卷风发生后农作物的受灾、成灾及绝收面积[23],分别为 1296920.8、337,529 和 233,010 公顷。根据 2003~2019 年间年鉴的相关记录,农作物受灾、成灾和绝收面积最大可分别达到 18 万、4.2 万和 15 万公顷,农作物受灾、成灾和绝收面积位居前三的相关信息如表 2 所示。



Figure 11. Examples of damaged crops after tornadoes: (a) Root uprooted crops; (b) Stem lodging crops
图 11. 龙卷风发生后农作物受损情况举例: (a) 根部被吹离土壤; (b) 作物茎部倒伏

Table 2. Statistical table of relevant information on the top three areas of crop disaster, disaster and crop failure after tornadoes from 2003 to 2019

表 2. 2003~2019 年龙卷风发生后农作物受灾、成灾和绝收面积位居前三的相关信息统计表

	年份	日期	省份	城市	区县	面积(万公顷)
受灾情况	2005	6.1	山东省	东营市	垦利区	18
	2005	7.3	安徽省	宿州市	灵璧县	18
	2005	8.1	河北省	邢台市	广宗县	10
成灾情况	2003	7.8	安徽省	合肥市	庐江县	4.2
	2010	7.18	江苏省	泰州市	姜堰市	0.95
	2003	7.4	内蒙古	通辽市	科尔沁左翼中旗	0.86
绝收情况	2008	9.19	吉林省	长春市	市区	15
	2005	7.16	黑龙江省	齐齐哈尔市	讷河市	1.41
	2005	8.27	辽宁省	铁岭市	昌图县	0.95

图 12 展示了我国各个省份 2003~2019 年间农作物受灾、成灾和绝收面积总数的空间分布。由图可知,受损农作物主要分布在胡焕庸线以东,其中安徽、黑龙江、吉林的农作物受损情况较严重。

4.4. 人员伤亡情况分析

龙卷风造成的建筑物倒塌、输电线路破坏及车辆、船只翻起会对人的生命造成一定威胁。据统计,2003~2019 年龙卷风共造成 388 人死亡、7485 人受伤、受灾人数¹达 20,033,080 人次。将 2003~2019 年每起龙卷风造成的死亡及受伤人数累加,并统计伤亡人数在各个省份的空间分布情况,结果如图 13 所示。由图可知,湖北、江苏和安徽的伤亡人数较多。

¹ 受灾人数: 行政区域内因自然灾害遭受损失的人口数量(含非常住人口) [26]。

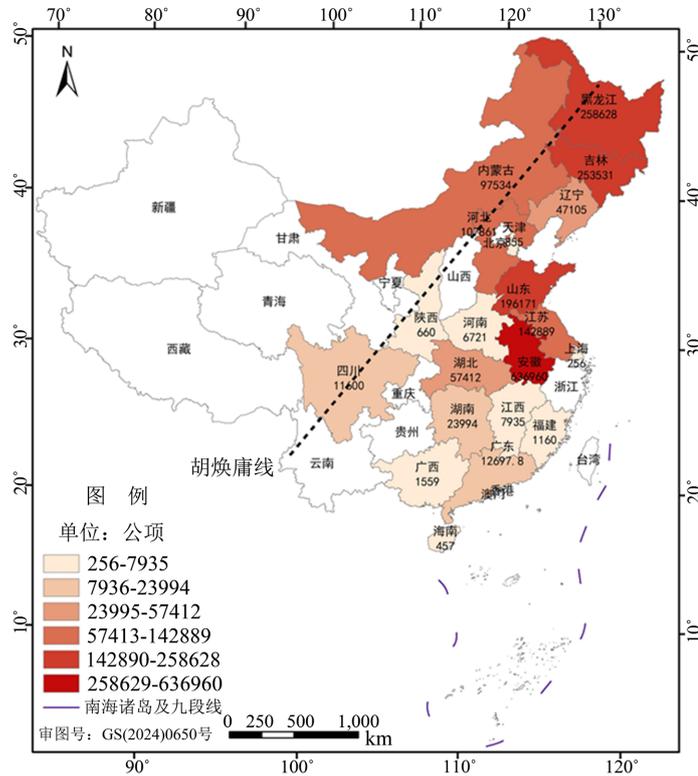


Figure 12. Distribution map of crop damage after tornadoes (2003~2019)

图 12. 龙卷风发生后农作物受损情况分布图(2003~2019 年)

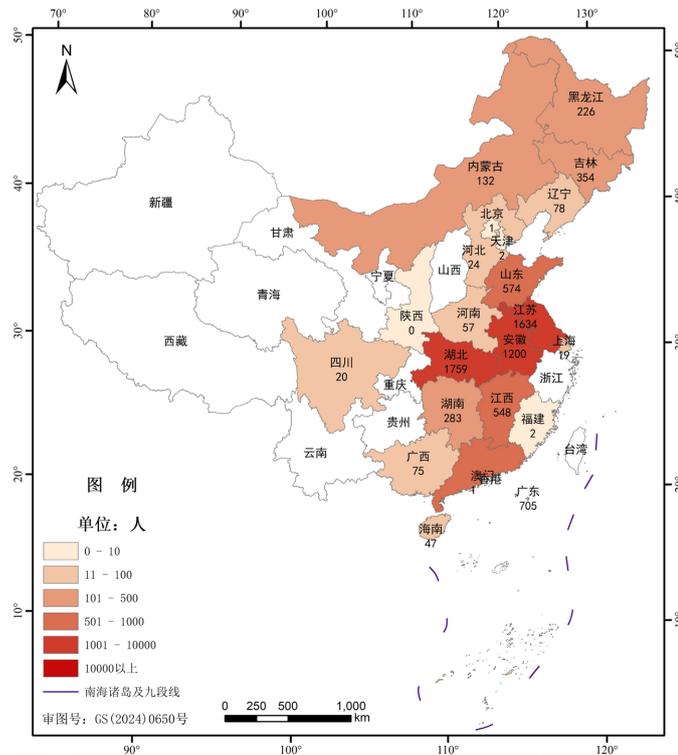


Figure 13. Distribution map of casualties after tornadoes (2003~2019)

图 13. 自龙卷风人员伤亡情况分布图(2003~2019 年)

5. 龙卷风灾情综合评价

5.1. 龙卷风灾情综合评价模型

为评估龙卷风造成的灾情严重程度，本文选择熵权法结合综合评定的思想[27]，通过确定灾害评价指标及其权重，对龙卷风灾情进行分析及评价。具体过程如下：

设 X_{ij} 为龙卷风灾情指标记录的真实值， X_{\min} 、 X_{\max} 分别为某起龙卷风案例中此指标的最小值和最大值，对 X_{ij} 进行无量纲化得到 Y_{ij} ，即

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{1}$$

为确定该指标的变异情况，计算该指标在相同案例、所有指标数据中的占比 p_{ij} ，即

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}} \quad (i=1, \dots, n; j=1, \dots, m) \tag{2}$$

式中， n 为指标数， m 为案例总数。

根据各指标在不同案例中的比值，分别计算各个指标的信息熵 H_j 及权重 ω_j ，即

$$H_j = -\left(\sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}\right) / \ln n \tag{3}$$

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^m H_j} \tag{4}$$

根据各指标的权重值可进一步求出综合受灾指数 G_i ，即

$$G_i = \sum_{j=1}^m \omega_j \times Y_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, m) \tag{5}$$

考虑龙卷风指标记录不全的情况，计算龙卷风灾情指数 S_i ：

$$S_i = \frac{G_i}{\sum_{j=1}^m \omega_j} \tag{6}$$

5.2. 龙卷风灾情综合评价结果

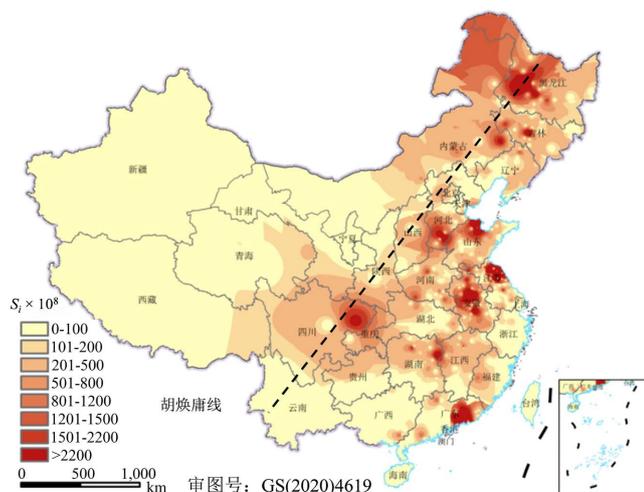


Figure 14. Spatial distribution map of tornado disaster index
图 14. 龙卷风灾情指数空间分布图

采用熵权法对 2003~2019 年发生的 648 起龙卷风灾情案例进行计算, 得到我国龙卷风灾害评价指标及权重, 如表 3 所示。

Table 3. Disaster evaluation index and weight of tornadoes
表 3. 龙卷风灾害评价指标及权重

评价指标	建筑物损坏数/间	建筑物倒塌数/间	树木受破坏数/棵	农作物受灾面积/公顷	农作物成灾面积/公顷	农作物绝收面积/公顷	人员伤亡数/人次
权重	0.121	0.114	0.182	0.133	0.154	0.174	0.122

将 2003~2019 年发生的 648 起龙卷风灾情信息代入到龙卷风综合评价模型中, 得到了不同龙卷风造成的灾情指数, 其空间分布如图 14 所示。由图可知, 龙卷风灾情主要集中在胡焕庸线以东, 其中, 华东、华南和东北地区灾情最为严重, 华北, 华中地区次之, 西北、西南和港澳台地区灾情较轻。

6. 结论

本文根据对 2003~2019 年《中国气象灾害年鉴》有记录的 648 起龙卷风灾情进行统计分析, 得出以下结论:

从空间上看, 我国龙卷风主要分布在东南沿海及东北的平原和高原地区, 江苏、广东的分布数量较多; 从时间上看, 我国龙卷风的发生次数呈逐年递减的趋势; 在一年内, 龙卷风主要发生在 6、7、8 月份的夏季, 其中 7 月份发生次数最多; 在一天内, 龙卷风主要发生在 14~16 时, 此时段内龙卷风发生次数明显高于其它时段。

在 2003~2019 年间, 我国房屋遭受龙卷风破坏的累计损坏数为 282,349 间, 累计倒塌数为 86,263 间, 我国东部房屋破坏数量明显大于西部, 江苏、安徽和黑龙江等地房屋的破坏数量极多; 我国树木遭受龙卷风破坏数量为 2,390,457 棵, 主要失效模式有连根拔起、树干折断、树干倾斜及枝条折断, 四川、河南和江苏的树木受龙卷风破坏较多; 我国农作物遭受龙卷风破坏受灾、成灾和绝收面积分别为 1296920.8 公顷、337,529 公顷和 233,010 公顷, 主要失效模式有根部被吹离土壤和茎部倒伏, 安徽、黑龙江和吉林的农作物受损情况较严重; 龙卷风共造成 388 人死亡, 7485 人受伤, 受灾人数达 20,033,080 人次, 相同强度的龙卷风对不同地区造成的影响不同。通过熵权法综合评价的思想对龙卷风灾情进行评价得出, 龙卷风灾情主要集中在胡焕庸线以东, 其中, 华东、华南和东北地区灾情最为严重。

基金项目

国家电网有限公司科技项目(5200-202318147A-1-1-ZN)。

参考文献

- [1] 相德勤, 李瑛. 1978 年陕西乾县龙卷风纪实[J]. 灾害学, 1986(1): 67-69.
- [2] 张军. 河北涞水的一次龙卷风[J]. 气象, 1981(11): 32-50.
- [3] 霍星远, 刘鹏飞, 尹洪涛, 等. 辽宁省朝阳县 2005 年 6 月 10 日龙卷风天气过程分析[J]. 安徽农业科学, 2008(4): 1514-1515, 1518.
- [4] 毛以伟, 方思达, 吴翠红, 等. 武汉 5·14 罕见龙卷风天气气象服务回顾[J]. 城市与减灾, 2022, 143(2): 23-27.
- [5] Lewellen, D.C., Lewellen, W.S. and Xia, J. (2000) The Influence of a Local Swirl Ratio on Tornado Intensification Near the Surface. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **57**, 527-544.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<0527:tioals>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<0527:tioals>2.0.co;2)
- [6] 王沛霖. 珠江三角洲春季龙卷发生的环境条件[J]. 热带气象学报, 1996(1): 60-64.
- [7] 刘勇, 刘子臣, 马廷标, 乔旭霞. 一次飚线过程中龙卷及飚锋生成的中尺度分析[J]. 大气科学, 1998(3): 71-80.

- [8] 金巍, 曲岩, 安来友. 超级单体引发的龙卷天气过程分析[J]. 气象, 2009, 35(3): 36-41, 133-134.
- [9] 刘式适, 付遵涛, 刘式达, 等. 龙卷风的漏斗结构理论[J]. 地球物理学报, 2004(6): 959-963.
- [10] Kosiba, K.A., Robinson, P., Chan, P.W. and Wurman, J. (2014) Wind Field of a Nonmesocyclone Anticyclonic Tornado Crossing the Hong Kong International Airport. *Advances in Meteorology*, **2014**, Article 597378. <https://doi.org/10.1155/2014/597378>
- [11] Kosiba, K. and Wurman, J. (2023) The Strongest Winds in Tornadoes Are Very Near the Ground. *Communications Earth & Environment*, **4**, Article No. 50. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00716-6>
- [12] 田玉基, 钮亚楠, 杨庆山, 等. 物理模拟龙卷风的风速和气压降分布特征[J]. 工程力学, 2020, 37(3): 66-76.
- [13] 王蒙恩, 曹曙阳, 操金鑫. 龙卷风风场的数值模拟研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 1548-1556.
- [14] Verma, S., Panneer Selvam, R., Tang, Z. and Zuo, D. (2022) Comparison of Tornado-Induced Pressures on Building from CFD Model with TTU Experimental Measurements. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **228**, Article 105076. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2022.105076>
- [15] Hangan, H. and Kim, J.D. (2008) Swirl Ratio Effects on Tornado Vortices in Relation to the Fujita Scale. *Wind and Structures*, **11**, 291-302. <https://doi.org/10.12989/was.2008.11.4.291>
- [16] Fortuin, C.C., Montes, C.R., Vogt, J.T. and Gandhi, K.J.K. (2022) Predicting Risks of Tornado and Severe Thunderstorm Damage to Southeastern U.S. Forests. *Landscape Ecology*, **37**, 1905-1919. <https://doi.org/10.1007/s10980-022-01451-7>
- [17] Bain, C.L.D., Kopp, G.A. and El Ansary, A.M. (2022) Design of Stick-Framed Wood Roofs under Tornado Wind Loads. *Frontiers in Built Environment*, **8**, Article 1029237. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.1029237>
- [18] Wang, J. and Cao, S. (2021) Characteristics of Tornado Wind Loads and Examinations of Tornado Wind Load Provisions in ASCE 7-16. *Engineering Structures*, **241**, Article 112451. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112451>
- [19] 汪大海, 韩少鸿, 黄国庆, 等. 输电线路龙卷风风振响应的参数分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3871-3881.
- [20] Selvam, R.P. and Millett, P.C. (2003) Computer Modeling of Tornado Forces on Buildings. *Wind and Structures*, **6**, 209-220. <https://doi.org/10.12989/was.2003.6.3.209>
- [21] 杨庆山, 左有嘉, 回忆, 等. 龙卷风导致高速列车倾覆风险评估与管理[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 75-84.
- [22] Maxwell, S.A. (1883) The Formation of Tornadoes. *Science*, **2**, 620-621. <https://doi.org/10.1126/science.ns-2.40.620>
- [23] 中国气象局. 中国气象灾害年鉴 2020 [M]. 北京: 气象出版社, 2021.
- [24] 杨庆山, 王雨, 回忆, 等. 辽宁开原 7·3 龙卷风致结构破坏调研与分析[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 183-190.
- [25] 李正农, 郝艳峰. 农作物抗风研究综述[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(3): 54-62.
- [26] 中华人民共和国应急管理部. 特别重大自然灾害损失统计调查制度[Z]. 2020.
- [27] 张星. 自然灾害灾情的熵权综合评价模型[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(6): 189-192.