

黄晨然, 朱军, 向淑君, 等. 玉屏核电厂区域龙卷风参数估算与分析[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(4): 48-52.

## 玉屏核电厂区域龙卷风参数估算与分析

黄晨然<sup>1</sup>, 朱 军<sup>1</sup>, 向淑君<sup>1</sup>, 李 霄<sup>1</sup>, 夏 阳<sup>2</sup>

(1. 贵州省气候中心, 贵州 贵阳 550002; 2. 贵州省六盘水市气象局, 贵州 六盘水 553000)

**摘 要:** 利用玉屏核电站厂址周围 3 个经纬度区域范围内 1950—2021 年期间的龙卷风调查资料, 采用富士达 F 等级划分法评定龙卷风级别, 按照《核电厂厂址选择的极端气象事件(HAD101/10)》的规定, 估算出核电站设计基准龙卷风相关参数和设计基准等级。结果表明: 玉屏核电站厂址区域设计基准龙卷风最大风速估算值为  $63.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (对应  $10^{-7}$  概率值), 总压降为 29.5 hPa, 压降速率为  $7.1 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大旋转风速为  $51.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 最大平移速度为  $12.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 设计基准等级为 F2。计算结果为项目设计和建设提供重要的理论参考依据。

**关键词:** 龙卷风; 设计基准; 富士达分级; 风速概率

**中图分类号:** TM623.8 **文献标识码:** A

## Estimation and Analysis of Tornado Parameters around the Yuping Nuclear Power Plant

HUANG Chenran<sup>1</sup>, ZHU Jun<sup>1</sup>, XIANG Shujun<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>1</sup>, XIA Yang<sup>2</sup>

(1. Guizhou Province Climate Center, Guiyang 550002, China;

2. Liupanshui Meteorological Bureau of Guizhou Province, Liupanshui 553000, China)

**Abstract:** Based on the tornado survey data in the three longitude and latitude regions around the Yuping Nuclear Power Plant site from 1950 to 2021, the tornado grade is assessed by using the Fujita scale method. The design basis tornado parameters and grade in the assessment area are calculated according to *Extreme Meteorological Events for the Selection of the Nuclear Power Plant Site (HAD101/10)*. The results show that the recommended maximum wind speed of the design reference tornado around the Yuping Nuclear Power Plant site is  $63.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (corresponding probability value is  $10^{-7}$ ), the total pressure drop is 29.5 hPa, the pressure drop rate is  $7.1 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ , the maximum rotating wind speed is  $51.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the maximum translation speed is  $12.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , and the design reference grade is F2. The calculation results provide important theoretical reference for project design and construction.

**Key words:** tornado; design basis; Fujita scale; wind speed probability

## 0 引言

龙卷风是一种小范围的强烈涡旋气流, 属小尺度天气系统, 状如漏斗, 风速极快, 破坏力很大<sup>[1]</sup>。

国内学者针对龙卷风的统计特征、形成机理、单个个例等方面进行了研究, 同时也对核电厂址龙卷风参数进行了估算。黄大鹏等<sup>[2]</sup>分析了中国龙卷风及其灾害的时空分布特征, 发现近 30 a 中国龙卷风

收稿日期: 2023-03-20

第一作者简介: 黄晨然 (1990—), 女 (布依族), 工程师, 主要从事气候可行性论证和气候评估研究, E-mail: huangchr@126.com。

通讯作者简介: 夏阳 (1990—), 男, 工程师, 主要从事中短期天气预报工作, E-mail: sun\_shine\_xia@126.com。

资助项目: 玉屏公司厂址气候可行性论证服务项目。

灾害年发生次数呈现明显下降趋势;胥蓓蓓等<sup>[3]</sup>对龙卷风灾害风险度的区划研究表明,最高风险等级分布在华东地区,西南地区为龙卷风低度风险区之一;范雯杰等<sup>[4]</sup>研究指出,1961—2010年间中国的龙卷也更多地分布于江淮地区、两湖平原、华南地区和东北地区等平原地区,并且具有在某地集中频发的特征;杜康云等<sup>[5-6]</sup>对京津冀区域龙卷风灾害特征进行了分析,并对风险度进行了评价;纪文君等<sup>[7]</sup>探讨了龙卷风发生的条件、可能机制、旋转方向和移动路径预测;伍培云等<sup>[8]</sup>利用盆地涡旋模型研究了龙卷风形成机制,解释了龙卷风旋转方向的机理;郭鲁彦等<sup>[9]</sup>根据观测资料对发生在内蒙古通辽市的一次龙卷过程特征进行了分析;徐靖宇等<sup>[10]</sup>对2017年发生在湖南邵阳市的一次龙卷天气进行了详细的分析;刘宁微等<sup>[11]</sup>对辽宁一次龙卷风的诊断分析表明,不稳定能量和气柱上升运动的配置关系达到峰值时产生了龙卷风;陈正洪等<sup>[12]</sup>和蔡秀华等<sup>[13]</sup>根据《核安全导则汇编(上册)》<sup>[14]</sup>规定的方法详细计算了龙卷风各个参数间的关系,最后给出核电站的龙卷风设计基准参数。

贵州玉屏低温供热堆商业示范项目获国家能源局批准同意开展前期工作。核电厂是一个由多种性质的材料和多种结构组成的对安全要求极高的建筑物群体,龙卷风对其可能的威胁存在于两个方面。一个是其内部存在强烈旋转的上升气流所产生的极大的瞬间负荷和对建筑物所产生的极大的扭矩直接把建筑物推倒或扭曲。另一方面,其巨大的内外压力差可使密闭或半密闭的建筑物或大型容器产生瞬时爆裂。因此调查和收集厂址区域附近的龙卷风灾情个例并对龙卷风设计基准参数进行计算分析,评估玉屏厂址项目的气候风险性。本文利用项目厂址周围3个经纬度区域范围内1950—2021年期间的龙卷风调查资料,计算出厂址区域龙卷风的相关风参数,最后给出了龙卷风设计基准等级,为项目设计和建设提供科学的气象参数和合理化建议。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

从兼顾气象特征同一性和可能获得足够样本出发,考虑核电站的绝对安全性,按照《核电厂厂址选择的极端气象事件(HAD101/10)》(以下简称《导则》)的技术要求,龙卷风调查区域以厂址为中心,南北跨3个纬度,东西跨3个经度,调查范围内共计

54个县(市),面积约为10.0万km<sup>2</sup>,其中贵州32个,湖南18个,重庆2个,广西2个。龙卷风资料调查年限为1950—2021年,共收集到13个龙卷风个例。

本文龙卷风资料源于3个方面:(1)调查范围内所涉县(市、区)气象局、三防办、编志办、民政局、档案馆、新闻机构等部门记录资料;(2)与中国龙卷风相关的已发表研究论文;(3)气候影响评价、全国气象灾情普查数据、中国气象灾害大典各省分卷、各地气象观测台站上报的气象报表等。做到了广泛收集,互为印证,尽可能不遗漏并与事实相符,基本准确。

### 1.2 方法

1.2.1 龙卷风强度等级分类 根据龙卷风的破坏程度和灾情景象,采用美国芝加哥大学龙卷风专家藤田博士(Dr. T. Theodore Fujita)建立的富士达F等级分类方法<sup>[15]</sup>,对龙卷风强度等级进行逐个确定。

1.2.2 面积—强度关系 利用厂址周围区域收集的龙卷风破坏资料,根据龙卷风平均破坏面积和相应风速,建立以下形式的关系公式:

$$\ln(a_i) = c \ln(\bar{V}_i) - k \quad (1)$$

式中, $a_i$ 是*i*等级龙卷风平均破坏面积; $\bar{V}_i$ 是*i*等级龙卷风的中位值风速; $c$ 、 $k$ 是经验拟合系数。

当面积和强度关系拟合不好时,各等级龙卷风的平均破坏面积宜采用下式计算:

$$A_i = L_{pi} \cdot W_{pi} = (1.609)^2 \times 10^{(i-3)} \quad (2)$$

式中, $i=1,2,\dots,5$ 。

1.2.3 事件—强度关系 根据龙卷风强度等级分级结果,统计高于每个强度等级龙卷风发生的累积次数,按下式拟合次数分布与强度等级关系:

$$\ln N_i = -c' U_i + k' \quad (3)$$

下式则为通常的经验指数分布函数:

$$N_i = N_0 \cdot e^{-c' U_i} \quad (4)$$

式中, $N_0 = e^{k'}$ ,是拟合函数外延至 $U_i = 0$ 的频数; $U_i$ 是F标度等级为*i*的阈值风速; $N_i$ 是龙卷风风速超过 $U_i$ 的累积次数; $c'$ 和 $k'$ 是经验拟合系数( $c'$ 、 $k'$ 均为正值)。

1.2.4 超过额定风速的概率 厂址遭受龙卷风给定风速范围内某一风速的概率采用下式计算:

$$P(V_j, V_{j+1}) = \frac{\sum_{i=j}^n \lambda_i \cdot a_{ij}}{A} \quad (5)$$

式中, $P(V_j, V_{j+1})$ 是评价区域在一年内经受风

速区间为富士达强度等级  $j$  和  $j+1$  龙卷风的概率; $\lambda_i$  是  $i$  等级龙卷风在评价区域内年平均出现次数; $a_{ij}$  是  $i$  等级龙卷风风速在  $V_j$  和  $V_{j+1}$  之间的破坏面积; $A$  是区域的面积,此处取为  $10^5$ ;  $n$  是区域内考虑的最强的龙卷风等级,此处取为 4。

某一具体地点经受风速大于或等于强度等级为  $K$  的龙卷风速的概率为:

$$P_E(V_K) = \sum_{j=k}^n \cdot P(V_j, V_{j+1}) \quad (6)$$

1.2.5 设计基准龙卷风参数 为评价设计基准龙卷风的其他有关参数,可利用旋衡风方程得到简单的压降模型。在该模型中,旋衡风方程被用于描述龙卷风向内径向压力和离心力之间的平衡。压降速率和总压降的计算式如下:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{V_T}{R_m} \rho V_m^2 \quad (7)$$

$$\Delta P \approx \rho V_m^2 \quad (8)$$

式中,  $R_m$  为最大旋转风速半径,  $V_T$  为最大平移速度,  $V_m$  为最大旋转风速,  $\rho$  为空气密度。对强龙卷风来说,由于中心气压很低,其空气密度也较低,取  $\rho = 1.10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

按照《导则》的规定,对于强龙卷风,假定:设计最大旋转风速半径  $R_m$  为 50 m,此时有:

$$V_T = 0.19 V_F \quad (9)$$

$$V_m = 0.81 V_F \quad (10)$$

1.2.6 飞射物碰撞动量 分别针对 1800 kg 的汽车、125 kg 的 20 cm 穿甲炮弹和 2.5 cm 实心钢球 3 类飞射物计算碰撞动量,计算式如下:

$$p = mv \quad (11)$$

式中,  $p$  为碰撞动量;  $m$  为飞射物质量;  $v$  为最大水平速度,取设计基准龙卷风最大风速的 35%。

## 2 模型拟合与参数计算

### 2.1 富士达 F 分级

根据此次收集调查的龙卷风灾情资料,多位行业专家按照龙卷风强度富士达(F)等级分类法进行会商研判<sup>[14]</sup>,对龙卷风强度等级进行逐个确定(表 1)。从表 1 可以看出,下垫面并不平坦的贵州山地地形,并不利于龙卷风系统的发生发展,从而导致在拟选厂址附近,龙卷个例更多地集中在地势相对平坦的湖南境内。

对富士达分级各级龙卷风出现次数和频率进行统计发现,调查区域内出现了 F0、F1 和 F2 3 个级别的龙卷风,其中 F0 级出现最多为 9 个,占总数的

69.23%; F1 级共发生了 3 个,占总数的 23.08%; F2 级只发生了 1 个,占总数的 7.69%。龙卷风的多发区域一般也是出现强级别龙卷风较多的区域。

表 1 1950—2021 年评估区域龙卷风记录表

Tab.1 Record of tornadoes in the assessment area from 1950 to 2021

| 发生时间            | 所属地区 | 强度等级 |
|-----------------|------|------|
| 1959 年 5 月 4 日  | 洪江   | F0   |
| 1985 年 7 月 19 日 | 麻阳   | F0   |
| 1989 年 5 月 10 日 | 沅陵   | F2   |
| 1989 年 8 月 7 日  | 城步   | F0   |
| 1991 年 3 月 7 日  | 怀化   | F0   |
| 1991 年 3 月 7 日  | 麻阳   | F0   |
| 1991 年 3 月 7 日  | 通道   | F0   |
| 1991 年 3 月 7 日  | 沅陵   | F0   |
| 1991 年 3 月 7 日  | 芷江   | F0   |
| 1992 年 4 月 20 日 | 凤凰   | F1   |
| 1992 年 8 月 15 日 | 保靖   | F1   |
| 1994 年 7 月 19 日 | 麻阳   | F0   |
| 1999 年 7 月 25 日 | 会同   | F1   |

### 2.2 面积—强度关系

根据最小二乘法计算得出 F0 和 F1 等级龙卷风的面积—强度经验方程(1)中的常数,结果见表 2。

表 2 面积—强度关系式

Tab.2 The relational expression of tornado area and intensity

| 级别 | 经验公式                                              |
|----|---------------------------------------------------|
| F0 | $\text{Lna}_0 = 3.85 \text{Ln} \bar{V}_0 - 17.28$ |
| F1 | $\text{Lna}_1 = 5.14 \text{Ln} \bar{V}_1 - 21.75$ |

同时,由样本得到的面积—风速曲线见图 1,符合由皮尔逊公式推论的曲线型。由此可见,龙卷风的等级越高,风速越大,危害的面积也就越大。

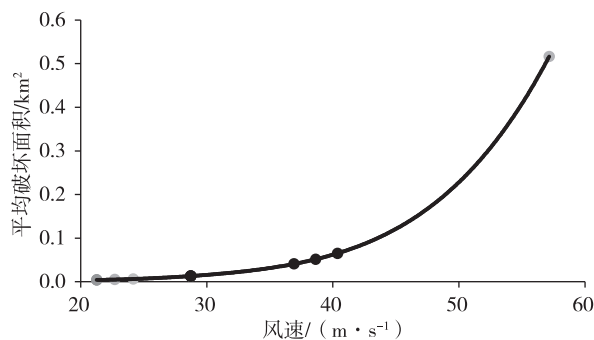


图 1 评估区域龙卷风面积—风速曲线

Fig.1 Areas of tornadoes versus wind speeds in the assessment area

2.3 事件—强度关系

根据最小二乘法计算得出大于或等于 F0 等级龙卷风的事件—强度经验方程(3)中常数  $c'$ 、 $k'$  的值分别为 0.0779 和 4.0015,由此得到频次—强度关系经验方程为:

$$\ln N_i = -0.0779 U_i + 4.0015$$

F0 与 F1 等级龙卷风样本得到的累积次数—风速曲线见图 2,由于 F2 级及以上等级龙卷风个例极少,无法进行参数拟合。

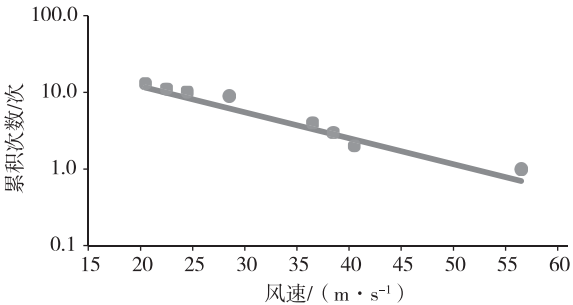


图2 评估区域龙卷风累积次数—风速曲线  
Fig.2 The relationship curve of cumulative number of tornadoes and wind speed in the assessment area

表3 评估区域出现不同风速区间某一风速龙卷风的概率

Tab.3 The probability of tornadoes with a certain wind speed in different wind speed ranges for the assessment area

| 等级                                 | F1                    | F2                    | F3                    | F4                    |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ | 33 ~ 50               | 50 ~ 70               | 70 ~ 93               | 93 ~ 117              |
| 总区域区间中值概率 $P(V_{j=i})$             | $8.99 \times 10^{-8}$ | $5.66 \times 10^{-8}$ | $4.61 \times 10^{-8}$ | $4.47 \times 10^{-8}$ |

表4 评估区域出现大于各等级风速阈值龙卷风的概率

Tab.4 The probability of tornadoes that wind speed is over threshold for each level in the assessment area

| K           | 1                     | 2                     | 3                     | 4                     |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 下限风速 $V_K$  | 33                    | 50                    | 70                    | 93                    |
| 概率 $P(V_K)$ | $2.37 \times 10^{-7}$ | $1.47 \times 10^{-7}$ | $9.08 \times 10^{-8}$ | $4.47 \times 10^{-8}$ |

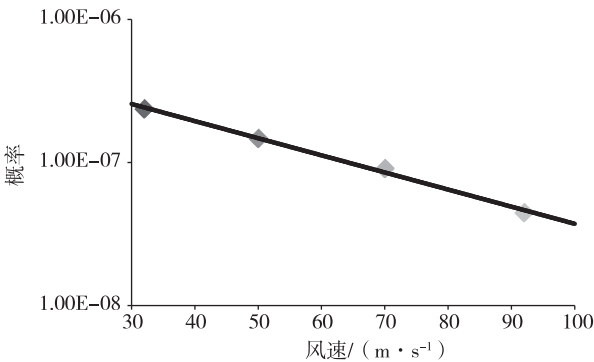


图3 出现大于各等级风速阈值龙卷风的概率曲线  
Fig.3 The probability curve of tornadoes that wind speed is over threshold for each level

2.5 设计基准龙卷风参数

按照方程(7) ~ (10),假定设计最大旋转风速

2.4 与风速概率的关系

在确定频次—强度和面积—强度关系相关参数后,便可以计算调查区域内某地点一年中遇  $i$  等级龙卷风的风速概率和超过额定风速的概率,即龙卷风风险度的评价模型。

调查区域面积约为  $1 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,根据公式(5) ~ (6),可以推导出一年中出现  $i$  等级龙卷风的平均次数  $\lambda_i$ ,得到  $\lambda_1 = 0.12, \lambda_2 = 0.04, \lambda_3 = 0.01, \lambda_4 = 2.62 \times 10^{-3}$ ,进而计算出调查区域某地点一年中遇到  $i$  等级龙卷风的概率(表 3)。从表 3 可以看出,出现 F1 ~ F4 等级龙卷风的概率分别为  $8.99 \times 10^{-8}$ 、 $5.66 \times 10^{-8}$ 、 $4.61 \times 10^{-8}$ 、 $4.47 \times 10^{-8}$ 。此时,核电站厂址经受风速大于或等于强度等级  $K$  的下限风速的概率如表 4 所示。此处采用设计基准概率值为每年  $10^{-7}$  来进行评价。由表 4 可知,评估区域内超过 F2 类下限风速的概率为  $1.47 \times 10^{-7}$ ,超过 F3 类下限风速的概率为  $9.08 \times 10^{-8}$ ,故认为 F2 类可作为拟选厂址评估区域的设计基准龙卷。根据表 4 绘制拟合曲线(图 3)。结果显示,厂址区域  $10^{-7}$  概率值所对应的风速为  $63.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

半径为 50 m,概率为  $10^{-7}$  对应的设计基准龙卷风风速  $V_F$  为  $63.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。计算设计基准龙卷风相关参数,最大平移速度  $V_T$  为  $12.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大旋转风速  $V_m$  为  $51.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,压降速率  $dp/dt$  为  $7.1 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,总压降  $\Delta P$  为  $29.5 \text{ hPa}$ 。

2.6 飞射物评价

按照《导则》建议,计算汽车、穿甲弹类和实心钢球 3 类飞射物碰撞动量,可把设计基准龙卷风最大风速的 35% 作为碰撞速度。按照式(11)计算结果如表 5 所示,1800 kg 的汽车碰撞动量达  $40\ 230 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,125 kg 下落的穿甲弹类碰撞动量为  $2800 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而 2.5 cm 实心钢球碰撞动量为  $1.45 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

表 5 龙卷风产生飞射物设计基准

Tab. 5 The design basis for missiles generated by tornado

| 项目                    | 情景类别 | 飞射物            | 最大风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 最大水平速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 碰撞动量/ $(\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-----------------------|------|----------------|----------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $10^{-7}$ 概率值<br>对应结果 | 情景 1 | 1800 kg 的汽车    | 63.9                                   | 22.4                                     | 40 230                                                 |
|                       | 情景 2 | 125 kg 下落的穿甲弹类 | 63.9                                   | 22.4                                     | 2800                                                   |
|                       | 情景 3 | 2.5 cm 实心钢球    | 63.9                                   | 22.4                                     | 1.45                                                   |

### 3 结论

本文龙卷风资料调查收集遵循《导则》规定的深度和广度,评价分析力求按照其推荐的方法和参数进行。

对玉屏核电站厂址附近面积约为 10.0 万  $\text{km}^2$  调查区域内 1950—2021 年期间发生过的龙卷风事件进行调查和统计,共收集到 13 个龙卷风个例,均出现在 2000 年以前,21 世纪以来未找到龙卷风相关观测和灾情记录。按照龙卷风富士达 F 等级划分,F0 级有 9 个,F1 级有 3 个,F2 级仅有 1 个,至今未出现 F3 及以上龙卷风事实。以调查区域的总样本做出各强度级别龙卷风的累积频数、破坏面积与风速曲线和拟合函数,经龙卷风流场模型估算得到玉屏核电站厂址区域设计基准龙卷风最大风速推荐值为  $63.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (对应  $10^{-7}$  概率值),总压降为 29.5 hPa,压降速率为  $7.1 \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大旋转风速为  $51.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大平移速度为  $12.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。汽车、穿甲弹类和实心钢球 3 类飞射物碰撞动量分别为  $40\,230 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $2800 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $1.45 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。最大风速超过 F2 级龙卷风速下限,故推荐厂址区域龙卷风设计基准等级为 F2。同时也建议项目厂址至少每 5 a 进行一次龙卷风复核,以确保最大设计风速能够应对气候变暖背景下龙卷风频发和强度变大风险。

### 参考文献

[1] 陈家宜,杨慧燕,朱玉秋,等.龙卷风风灾的调查与评估[J].自然

灾害学报,1999,8(4):111-117.

[2] 黄大鹏,赵珊珊,高歌,等.近 30a 中国龙卷风灾害特征研究[J].暴雨灾害,2016,35(2):97-101.

[3] 胥蓓蕾,赵世浩,邱鹏辉,等.我国龙卷风灾害风险区划研究[J/OL].(2022-04-21)[2023-03-07].建筑结构,https://doi.org/10.19701/j.jzjg.20210947.

[4] 范雯杰,俞小鼎.中国龙卷的时空分布特征[J].气象,2015,41(7):793-805.

[5] 杜康云,顾光芹,许启慧,等.京津冀区域龙卷风灾害特征分析[J].气象科技,2019,47(1):140-146.

[6] 杜康云,顾光芹,杨铭,等.基于核安全导则推荐方法的京津冀龙卷风灾害评估[J].气象科技,2020,48(2):299-306.

[7] 纪文君,刘正奇,郭湘平,等.龙卷风生成机制的探讨[J].海洋预报,2003,20(1):14-19.

[8] 伍培云,陆建隆.盆地涡旋旋转方向和龙卷风的形成[J].河北师范大学学报(自然科学版),2004,28(2):143-146.

[9] 郭鲁彦,万宇,于佳琪,等.2016 年 9 月通辽市一次龙卷过程的观测分析[J].中低纬山地气象,2021,45(1):53-57.

[10] 徐靖宇,周长青,陈龙,等.2017 年夏初邵阳一次龙卷天气过程个例分析[J].中低纬山地气象,2018,42(2):41-46.

[11] 刘宁微,马雁军,刘晓梅.辽宁省“05-6”龙卷风过程的诊断与数值模拟[J].自然灾害学报,2007,16(5):85-90.

[12] 陈正洪,如来林,袁业畅.湖北大坂核电站周边地区龙卷风参数的计算与分析[J].南京气象学院学报,2009,32(2):333-337.

[13] 蔡秀华,吕文忠,陈龙泉.福清核电厂厂址区域龙卷风设计基准参数的估算[J].气候与环境研究,2021,26(3):351-358.

[14] 国家核安全局.核安全导则汇编(上册)[M].北京:中国法制出版社,2000.

[15] GB/T 50674-2013,核电厂工程气象技术规范[S].