暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

基于灰色关联度等方法的江苏雷暴大风灾害风险评估与区划

顾荣直 吴洪颜 吴海英

Risk assessment and zoning of thunderstorm-gale disasters in Jiangsu Province based on grey correlation degree and other methods

GU Rongzhi，WU Hongyan，WU Haiying

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-026

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于风雨综合指数的安徽省台风灾害房屋风险评估方法

Risk assessment method of housing damage by typhoon disaster based on comprehensive wind and rain intensity index in Anhui Province

暴雨灾害. 2024, 43(3): 363-370 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-073

基于投影寻踪方法的湖北省雷电灾害风险区划

Risk zoning of lightning disaster in Hubei Province based on projection pursuit method

暴雨灾害. 2019, 38(3): 291-296 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.03.012

基于地形订正技术的安徽冰雹灾害风险区划

Risk zoning of hail disaster in Anhui Province based on terrain correction technology

暴雨灾害. 2023, 42(5): 606-612 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-021

基于改进层次分析法的湖北省雷电灾害风险区划

Risk zoning of lightning disaster in Hubei Province based on improved analytic hierarchy process

暴雨灾害. 2023, 42(1): 88-96 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-185

基于信息扩散理论的江苏省雷电灾害风险评估

Lightning disaster risk assessment in Jiangsu province based on information diffusion theory

暴雨灾害. 2021, 40(5): 564-568 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.014

四川省暴雨过程强度及损失评估方法研究

Study on evaluation method of intensity and loss of rainstorm in Sichuan Province

暴雨灾害. 2019, 38(1): 79-85 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.01.010

关注微信公众号，获得更多资讯信息

顾荣直,吴洪颜,吴海英.2025.基于灰色关联度等方法的江苏雷暴大风灾害风险评估与区划[J].暴雨灾害,44(3):300−308. GU Rongzhi, WU Hongyan, WU Haiying. 2025. Risk assessment and zoning of thunderstorm-gale disasters in Jiangsu Province based on grey correlation degree and other methods [J]. Torrential Rain and Disasters,44(3):300−308 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−026

基于灰色关联度等方法的江苏雷暴大风灾害风险评估与区划

顾荣直，吴洪颜，吴海英
(江苏省气象台，南京 210017)

摘　要：江苏省雷暴大风灾害频发，开展雷暴大风灾害风险评估是提高当地气象防灾减灾能力的重要手段。利用2008—2022年江苏省国家和区域气象观测站逐日气象资料及其所辖市县灾情信息，结合河网密度、数字高程等地理信息数据，选取最大风速、日最大降水量、冰雹发生频率、人口密度、地均GDP、农田面积和安全房屋面积比这7项指标，利用灰色关联度分析和通径分析方法，筛选确定最大风速、日最大降水量和冰雹发生频率作为雷暴大风灾害致灾因子及其权重，建立雷暴大风灾害危险性评估模型，结合孕灾环境敏感性及人口、经济、农作物和安全房屋比等承灾体暴露性，由层次分析法分析获得各项评估指标权重，建立雷暴大风灾害风险指数模型，得到江苏雷暴大风灾害风险区划。结果表明：(1) 江苏雷暴大风危险性较高-高等级区域主要集中在徐州大部、宿迁中部及淮安和泰州的局部地区。(2) 江苏雷暴大风灾害较高-高风险区域分布在淮北西部、沿淮和江淮之间中部地区。该风险区划结果基本反映了江苏省雷暴大风灾害的潜在风险。

关键词：雷暴大风；风险区划；灰色关联度；灾情指数
中图法分类号：P429　　**文献标志码**：A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−026

Risk assessment and zoning of thunderstorm-gale disasters in Jiangsu Province based on grey correlation degree and other methods

GU Rongzhi, WU Hongyan, WU Haiying

(*Jiangsu Meteorological Observatory*, *Nanjing* 210041)

Abstract: Thunderstorm-gale disasters are frequent in the Jiangsu Province. It is an important technical means to improve the local meteorological disaster prevention and mitigation capabilities by carrying out risk assessment of thunderstorm-gale disasters. In this paper, multiple types of data were used to focus on the risk research of the thunderstorm-gale disasters in Jiangsu Province, by adopting the Grey correlation degree, path analysis, and AHP methods. The various data contain daily meteorological data from national stations and regional stations in Jiangsu Province from 2008 to 2022, disaster information from cities and counties, as well as geographic information data such as river network density and digital elevation, and seven indicators were selected for analysis, which were including maximum wind speed, daily maximum precipitation, frequency of hail occurrence, population density, per capital GDP, farmland area, and safe housing area ratio. A thunderstorm-gale disaster risk assessment model is established by using grey relational analysis and path analysis methods, combined with the sensitivity of disaster prone environments and the exposure analysis of disaster bearing bodies such as population, economy, crops, and safe housing area ratio, to obtain the risk zoning results for thunderstorm-gale disasters in Jiangsu. The results are as follows. (1) The higher-level dangerous area of thunderstorm-gales disasters in Jiangsu Province was mainly concentrated in most areas of Xuzhou, central Suqian, and some parts of Huai'an and Taizhou. (2) The high risk areas of thunderstorm-gale disasters in Jiangsu were distributed in the western part of Huaibei, the central region between the Huai River and the Yangtz River, and the zoning results were consistent with the actual disaster situation highly. The risk zoning results could reflect the potential risks of thunderstorm-gale disasters in

收稿日期：2024−02−07；**定稿日期**：2024−07−31
资助项目：中国气象局“揭榜挂帅”项目 (CMAJBGS202212)；江苏省重点研发计划社会发展面上项目 (BE2022851)；江苏省气象局科研基金面上项目 (KM202101)
第一作者：顾荣直，从事气象灾害风险评估与区划研究。E-mail: live_gg@163.com
通信作者：吴洪颜，从事气象灾害风险评估与区划研究。E-mail: 306916487@qq.com
© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

Jiangsu Province.

Key words: thunderstorm-gale; risk zonation; grey correlation degree; disaster index

引　言

雷暴大风是指雷暴与大风相伴的天气现象, 其中大风指由强对流带来的地面灾害性强阵风 (龙卷除外), 瞬时风力可达或超过 8 级 (≥17.2 $m\cdot s^{-1}$)。雷暴大风发生时, 常伴有短时强降水, 有时还会出现冰雹, 破坏力很大。如 2021 年 4 月 30 日, 受东北冷涡影响, 江苏省自北向南遭受强对流天气袭击, 沿江及以北大部分地区出现 8 级以上大风和直径 2~5 cm 的冰雹, 受其影响全省 27 358 人受灾, 17 人死亡, 转移安置 3 138 人, 农作物受灾面积 10 984 hm^2, 房屋倒损 12 977 间, 直接经济损失高达 1.64 亿元, 因此研究江苏省雷暴大风灾害风险评估与区划对提前部署防范雷暴大风灾害, 有效减少灾害损失具有重要意义。

雷暴大风具有空间尺度小、突发性强及预报难度大等特点, 国内外学者针对其天气系统、结构特征、环境参数等 (Zeng et al., 2021; 禹梁玉等, 2021; 孙晓磊等, 2023; 杨慧等, 2024), 以及不同地区雷暴日和雷暴大风的时空分布和趋势变化等方面 (王学良等, 2016; 费海燕等, 2016; 孔锋等, 2018) 做了大量工作, 研究成果为雷暴大风灾害风险评估工作提供了研究基础。雷暴大风灾害风险评估是预防气象灾害、避免或减轻气象灾害损失的基础性研究, 对其风险进行区划是灾害风险评估的重要内容。近年来, 国内外科技工作者在雷暴大风灾害风险评估方面做了大量有价值的尝试, 并取得众多科研成果。例如, 缪霄龙等 (2012)、彭晓丹 (2020) 等利用不同等级的风速构建危险指数, 从致灾因子、孕灾环境、承灾体及防灾能力方面对杭州和广州地区雷暴大风灾害进行风险区划。中国气象局 (2021) 给出了大风致灾危险性评估技术规范, 构建综合考虑了大风灾害危险性指数、孕灾环境敏感性、承灾体暴露度和脆弱性的风险评估模型。胥蓓蕾等 (2023) 基于风速、灾害频次和灾损建立了下击暴流灾害风险层次分析结构模型。但雷暴大风灾害往往是伴随其他气象灾害同时发生的, 难以分离出不同灾害类型所直接导致的灾害损失, 以上研究中大风灾害风险评估方法中致灾因子除了风速、大风频率和灾害密度外, 并未考虑伴随的强降水、冰雹等灾害对大风灾情的叠加影响, 而本文将综合考虑伴随强降水或冰雹等天气的雷暴大风灾害风险评估与区划。

灰色关联分析是利用灰色关联度的大小来描述系统间各要素强弱关系的方法, 已在农业、气象和经济等领域得到广泛应用 (吴洪颜等, 2012; 孙曦恋, 2014)。针对雷暴大风灾害中多致灾因子的复杂影响, 可利用灰色关联分析有效处理其中的不确定性问题。本文利用 2008—2022 年江苏省灾害数据和气象 (风速、降水、冰雹、雷电) 资料, 采用灰色关联度分析和通径分析方法, 筛选并确定雷暴大风灾害致灾因子及各因子权重系数, 建立江苏省雷暴大风多因子危险性指数模型; 在雷暴大风灾害危险性指数基础上, 结合孕灾环境敏感性和人口、经济、农作物、安全房屋比等承灾体暴露性, 通过层次分析法确定各评估指标的权重, 开展江苏省雷暴大风灾害风险区划研究, 定量分析江苏省雷暴大风灾害风险的空间分布, 为江苏省不同区域雷暴大风灾害防御提供科学依据。

1　数据说明

本文所用的资料包括: (1) 江苏省气象信息中心提供的 2008—2022 年江苏省雷暴大风过程中相关国家和区域气象观测站 (以下简称为国家和区域站) 的日最大风速、日降水量、冰雹数据和闪电数据; (2) 江苏省应急管理局和江苏省气候中心提供的 2008—2022 年江苏省 65 个市 (县、区) 雷暴大风灾情数据, 其中包含较为完整灾害损失数据的有效样本 417 条; (3) 国家基础地理信息中心提供的 1:25 万的江苏省基础地理数据; (4) 第一次全国自然灾害综合风险普查办公室下发的人口、经济、农作物和房屋承灾体数据。

气象数据和灾情数据用于分析雷暴大风过程特征因子与灾情指数的相关关系, 确定雷暴大风危险性致灾因子和危险性指数; 基础地理信息数据和承灾体数据用于分析孕灾环境敏感性和承灾体暴露性, 计算雷暴大风灾害风险指数。

2　雷暴大风灾害风险评估与区划方法

2.1　灾情数据处理和致灾因子筛选

灾情调查记录显示, 雷暴所伴随的大风、雷电、强降水及冰雹等气象因子都可能对承灾体造成危害, 且各气象因子间影响机理复杂, 存在量级差异。综合考虑现有灾情数据的量级差异和随机性, 本文选择序列相对完整的伤亡人数 (个)、倒损房屋 (间)、农田受灾面积 (公顷) 和直接经济损失 (万元) 数据做规范化处理, 再根据各类灾情规范化指数得到综合灾情指数 (G) (金志凤等, 2011), 该指数可在一定程度上反映出一次灾情大小。G 的计算过程如下

当伤亡人数 (i)≥100 人, 房屋倒损数 (r)≥1 000 间, 受灾农田面积 (a)≥666.67 hm^2, 直接经济损失 (d)≥1 000 万元时, 利用对数函数关系计算规范化指数 (I)

$$\begin{cases} I_i = \log(i) - 1 \\ I_r = \log(r) - 2 \\ I_a = \log(a) - 2 \\ I_d = \log(d) - 2 \end{cases} \tag{1}$$

当受灾人数 (i)<100 人,房屋倒损数 (r)<1 000 间, 受灾农田面积 (a)<666.67 hm^2, 直接经济损失 (d)<1 000 万元时, 利用线性函数关系计算 I

$$\begin{cases} I_i = \dfrac{i}{100} \\ I_r = \dfrac{r}{1\,000} \\ I_{\mathrm{a}} = \dfrac{a}{666.67} \\ I_d = \dfrac{d}{1\,000} \end{cases} \tag{2}$$

将以上 I 相加得到 G

$$G = I_{\mathrm{i}} + I_{\mathrm{r}} + I_a + I_{\mathrm{d}} \tag{3}$$

采用数理统计方法, 分析江苏省 65 个县 (市、区) 2008—2022 年的灾情指数及对应的雷暴大风最大风速、日最大降水量、过程降水量和冰雹发生频率等特征因子的相关性。其中, 最大风速、日最大降水量选择了某次雷暴大风 (若极大风风速≥17.2 m·s^{-1} (8 级) 则认为是一次雷暴大风过程) 灾情所发生县 (市、区) 国家站和区域站中最大观测值; 过程降水量指雷暴大风发生时天气系统影响期间的累计降水量; 冰雹发生频率指某县 (市、区) 雷暴大风过程中出现冰雹的次数所占比例。然而在相关分析中发现过程降水量虽然与灾情指数之间没有显著相关, 但其大小影响着最大风速、日最大降水量与灾情指数的相关结果。因此, 本文尝试采用通径分析来分析所选雷暴大风特征因子与灾情指数的关系, 确定其致灾因子。因为通径分析可识别自变量对因变量影响的直接效应和间接效应, 找出由于自变量间相关性较强而引起多重共线性的自变量, 剔除不必要的自变量, 建立“最优”的回归方程 (黄俊, 2011; 武梦晗等, 2023)。首先对所分析数据进行正态性检验, 当数据满足正态性或近似正态性的要求后, 建立各自变量与因变量Y的多元线性回归方程

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + \cdots + b_m x_m \tag{4}$$

式中b_i是自变量 x_i (i=1, 2,⋯, m) 对因变量 Y 的偏回归系数。对各偏回归系数作标准化处理, 即用相应自变量的标准差与因变量的标准差之比去乘各偏回归系数, 所得的标准化偏回归系数P_{Yx_i}即为自变量 x_i 对因变量 Y 的直接通径系数。而自变量 x_i 通过其它相关变量对因变量 Y 的间接通径系数等于相关变量的直接通径系数乘以自变量 x_i 与其它相关变量之间的相关系数。

根据灰色系统理论 (刘思峰等, 2010), 将雷暴大风的致灾因子和所造成的灾情作为一个灰色系统, 通过各因子时间序列曲线发展趋势的相似度来衡量其关联程度, 相似度越高, 关联度越大。该方法不仅对样本数要求较低, 还可定量各致灾因子与灾情间的关联效应。具体步骤如下:

(1) 将综合灾情指数作为灰色关联分析中的原始数据列 X_0={$x_0(k)$}。对应的雷暴大风致灾因子则是比较数据列为 X_{i}={$x_i(k)$}, 其中 k (k=1,2,⋯, n) 为样本长度, i (i=1,2,⋯, m) 为比较数据的列数 (即为致灾因子数)。

(2) 对原始数据列和比较数据列进行初始化处理, 使之无量纲, 归一化, 具体计算如下

$$x_j(k)' = \frac{x_j(k) - \min(x_j(k))}{\max(x_j(k)) - \min(x_j(k))} \tag{5}$$

式中 $\max(x_j(k))$、$\min(x_j(k))$ 分别为数据样本$x_j(k)$的最大值和最小值, j (j=0,1,2,⋯, m) 为全样本列数。

(3) 计算各比较数据与原始数据关联系数

$$\zeta_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \rho_i \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho_i \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \tag{6}$$

其中 i=1,2,⋯, m; k=1,2,⋯, n; 分辨系数取 ρ=0.5;

(4) 计算比较数据与原始数据的关联度 r_i, 即$\zeta_i(k)$的算术平均值

$$r_i = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} \zeta_i(k) \tag{7}$$

根据关联度 r_i, 可计算出第 i 个影响因子的权重w_i

$$w_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^{m} r_i} \tag{8}$$

其中 i=1,2,⋯, m。

通过灰色关联分析确定特征因子权重系数后, 结合雷暴大风灾害出现频率构建雷暴大风危险性指数 (H)

$$H = (w_1 \times W + w_2 \times R + w_3 \times B) \times P \tag{9}$$

其中,

$$P = \frac{D_{\mathrm{dd}}}{D_{\mathrm{total}}} \tag{10}$$

式 (9) 中为雷暴大风灾害各致灾因子权重, W 为最大

风速的归一化值, R 为日最大降水量的归一化值, B 为冰雹发生频率, 取值范围为 (0, 1), P 为雷暴大风灾害的出现频率, D_{dd} 为雷暴大风成灾日数, D_{total} 为过程最大风速在 6 级及以上的总日数。

2.2 雷暴大风灾害危险性指数模型构建

雷暴大风常对人身安全、房屋建筑物、树木、农作物、户外设施以及供电线路等造成影响, 但现有灾情中仅受灾人口、倒损房屋、受灾农田和直接经济损失等数据较为完整, 若想从中理清单一灾种的作用或多灾种叠加影响, 需对灾情与各特征因子进行相关分析。图 1 为基于样本数为 417 条雷暴大风有效灾情数据得到的江苏省 2008—2022 年雷暴大风特征因子和灾情指数相关系数, 可见最大风速与伤亡人口、倒损房屋、直接经济损失呈显著正相关, 冰雹是否出现则与伤亡人口、受灾农田面积和直接经济损失关系密切, 而降水量与灾情关系不明显。然而, 在不同量级的过程降水量下其他特征因子与灾情的关系有所不同 (表 1), 当过程降水量≥50 mm 时, 日最大降水量与倒损房屋、受灾农田面积和直接经济损失呈显著正相关, 最大风速与灾情相关不明显; 过程降水量为 10~50 mm 时, 最大风速对各类承灾体都有显著正相关, 日最大降水量与灾情相关不明显; 过程降水量<10 mm 时, 最大风速与倒损房屋密切相关, 日最大降水量则与直接经济损失和 G 显著相关。另外, 在不同量级的过程降水量下冰雹对灾情均有显著正相关表现, 只是承灾体不同。

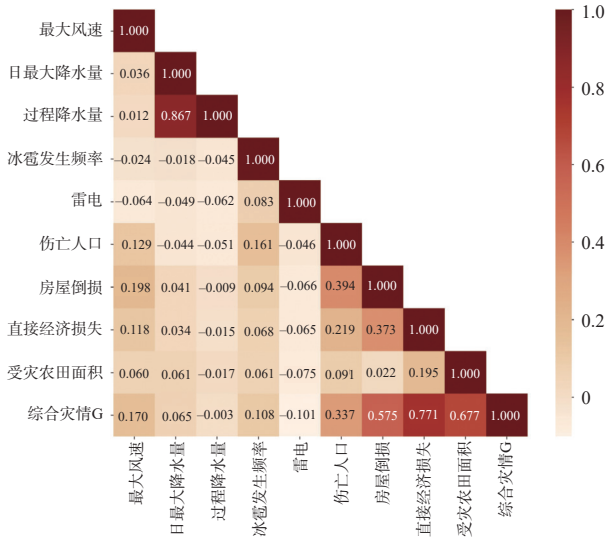


图 1 江苏省 2008—2022 年雷暴大风特征因子和灾情指数相关系数

Fig. 1 The correlation coefficient between characteristic factors of thunderstorm-gales and disaster index in Jiangsu Province from 2008 to 2022

表 1 江苏省 2008—2022 年各等级过程降水量下致灾因子与灾情指数的相关系数 (通过 α=0.05 显著性检验)

Table 1 The correlation coefficient between characteristic factors and disaster index under various levels of rainfall in Jiangsu Province from 2008 to 2022 (through α= 0.05 significance test)

致灾因子	过程降水量/mm											
	≥50			[25, 50)			[10, 25)			[0, 10)		
	最大风速	日最大降水量	冰雹发生频率	最大风速	日最大降水量	冰雹发生频率	最大风速	日最大降水量	冰雹发生频率	最大风速	日最大降水量	冰雹发生频率
伤亡人口	-	-	-	0.182 7	-	0.339 8	-	-	-	-	-	0.464 9
倒损房屋	-	0.161 8	-	0.314 7	-	-	0.229 3	-	-	0.248 7	-	-
受灾农田面积	-	0.173 8	0.200 7	0.166 1	-	-	-	-	-	-	-	-
直接经济损失	-	0.167 3	-	0.239 0	-	-	-	-	0.201 9	-	0.219 4	0.216 4
灾情指数(G)	-	0.248 4	0.216 3	0.349 2	-	-	-	-	-	-	0.220 9	0.195 4

注: 表中"-"表示该等级过程雨量下致灾因子与灾情指数(G)的相关系数未通过显著性检验。

综上, 雷暴大风天气中过程降水量达到 50 mm 以上时, 降水的致灾影响可能大于风速, 随着过程降水量逐渐减少, 风速的致灾作用明显增加; 而过程降水量较小时, 风速、降水和冰雹对成灾均呈正相关, 风速与建筑物损失相关最明显, 降水和冰雹对直接经济损失的影响程度略小且相近。

为进一步确定雷暴大风的致灾因子, 对最大风速、日最大降水量、过程降水量、冰雹发生频率和灾情指数做通径分析 (表 2), 发现最大风速、冰雹发生频率的直接通径系数和相关系数都较大, 均达到显著水平, 且通过其他特征因子的间接作用也较小, 说明二者对灾情的作用来自于本身; 日最大降水量的直接通径系数达到显著水平, 虽然通过过程降水量的间接效用为负, 但其对灾情指数仍呈弱正效应 (0.07), 而过程降水量的直接通径系数为负值, 虽然通过日最大降水量和最大风速的正间接效应, 但其对灾情指数的作用依然为负 (-2.8×10^{-3})。对比过程降水量、日最大降水量的直接和间接效应, 说明在兼顾

表 2 江苏省 2008—2020 年雷暴大风各致灾因子通径系数

Table 2 The path coefficient of various factors of thunderstorm-gales from 2008 to 2020 in Jiangsu

致灾因子	最大风速	日最大降水量	过程降水量	冰雹发生频率	综合灾情指数(G)
最大风速	0.175 507	0.008 278	−0.002 35	−0.011 87	0.169 56
日最大降水量	0.006 275	0.231 523	−0.174 02	0.001 568	0.065 347
过程降水量	0.002 059	0.200 831	−0.200 61	−0.005 08	−0.002 81
冰雹发生频率	−0.013 28	0.002 315	0.006 502	0.156 875	0.152 411

其他特征因子的情况下，可选择日最大降水量作为致灾因子。因此，本文选择最大风速、冰雹发生频率、日最大降水量作为雷暴大风的致灾因子。

为全面评价各致灾因子对雷暴大风灾情的重要性，本文根据式 (5)—(8) 计算最大风速、日最大降水量和冰雹发生频率与 G 的关联度 (表 3)，发现最大风速的关联度最大，达到 0.75，其次是日最大降水量，关联度为 0.74，冰雹发生频率与灾情的关联度最小，为 0.68。通过进一步计算，得到雷暴大风危险性指数模型中致灾因子所对应的权重系数分别为 0.35、0.34 和 0.31。

表 3 综合灾情指数 (G) 与致灾因子的灰色关联度及致灾因子权重

Table 3 The Grey correlation degree between disaster index G and disaster causing factors and the weight of each factor

致灾因子	关联度	权重(w_i)
最大风速	0.747 915	0.346 066
日最大降水量	0.735 023	0.340 101
冰雹发生频率	0.678 251	0.313 832

2.3 雷暴大风灾害风险模型

自然灾害成灾是由致灾因子、自然环境以及承灾体属性等多因素综合影响的结果 (史培军等, 2014)。由于在雷暴大风危险性计算中考虑了各地灾情发生频率，一定程度上能够反映当地的防灾减灾水平，因此，本文仅利用雷暴大风危险性、孕灾环境敏感性和承灾体暴露性作为评估指标来构建风险指数模型。

大风的孕灾环境因子主要包括高程、地形起伏度、河网密度及植被覆盖率等。本文所研究的雷暴大风过程既包括了天气尺度系统背景下区域性雷暴大风过程，也包括弱天气尺度系统强迫下局地雷暴大风过程，前者在大尺度环境风场的影响下，地形起伏和坡向对雷暴大风也有一定影响。综合分析江苏地形地貌特征、历史雷暴大风灾情和孕灾环境各因素，本文暂考虑地形坡向和河网密度为孕灾环境因子。利用 DEM 数据经 Arcgis 坡向分析后，选择风力偏大的低洼地势、山体阳坡和迎风坡为风灾敏感区，按照敏感度从低到高排序、并重分类为 1、2、3、4、5；江、河、湖面及河网密布的地区易产生对流性天气 (江苏省气象局, 2017)，根据自然断点法将河网密度值分为五级，按水网密度值从低到高次序赋值为 1、2、3、4、5。根据层次分析法确定地形坡向 (S_1) 和河网密度 (W_n) 的权重系数分别为 0.45、0.55，加权得到孕灾环境敏感性 (S)

$$S = 0.45 \times S_1 + 0.55 \times W_n \tag{11}$$

根据灾情数据分析，本文选择人口密度 (P_{op})、地均产值 (G_{dp})、农田面积 (A_{gr})、较安全房屋面积比 (H_{ou}) 作为雷暴大风灾害的承灾体评价指标，并确定各等级分值 (表 4)。通过各指标的暴露性分析 (刘少军, 2010)，根据层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) (邓雪等, 2012) 确定各指标的权重系数分别为 0.20、0.15、0.35、0.30，加权计算得到综合承灾体的暴露度 (E)

$$E = 0.2 \times P_{op} + 0.15 \times G_{dp} + 0.35 \times A_{gr} + 0.30 \times H_{ou} \tag{12}$$

表 4 承灾体暴露性评价指标的划分标准

Table 4 Classification criteria for risk assessment indicators of hazard bearing bodies exposure

分值	等级	人口密度/(人·km^{-2})	地均产值/(千万元·km^{-2})	农田面积/千公顷	较安全房屋面积比/%
1	V(低)	≤100	≤0.5	≤10	≥80
2	IV(较低)	(100, 200]	(0.5, 1.0]	(10, 30]	[60, 80)
3	III(中等)	(200, 400]	(1.0, 1.5]	(30, 50]	[40, 60)
4	II(较高)	(400, 800]	(1.5, 5.0]	(50, 70]	[20, 40)
5	I(高)	>800	>5.0	>70	<20

综上，在确定了雷暴大风致灾危险性指数后，结合孕灾环境敏感性和承灾体暴露度构建雷暴大风的风险指数模型 (R)

$$R = H^{\alpha} \times S^{\beta} \times E^{\gamma} \tag{13}$$

式中，H、S、E 分别为雷暴大风危险性、孕灾环境敏感性、承灾体暴露度；综合考虑江苏雷暴大风灾情中各因素的贡献程度，并结合前人工作 (马蕾等, 2020) 和层次分析法，确定权重系数 α、β、γ 分别为 0.4、0.3、0.3。

3 区划结果与分析

3.1 雷暴大风灾害危险性评估

根据雷暴大风危险性指数 (式 9、10) 计算结果, 利用自然断点法 H 从小到大划分为低、较低、中、较高和高 5 个危险性等级 (图 2a): $H<0.05$为低危险性等级, $0.05\leqslant H<0.10$为较低危险性等级, $0.10\leqslant H<0.15$为中等危险性等级, $0.15\leqslant H<0.20$为较高危险性等级, $0.20\leqslant H\leqslant 0.30$为高危险性等级。其中徐州大部分、宿迁西部、泰州中部以及淮安、盐城和南通的局部地区雷暴大风危险性处于较高-高等级, 占全省面积 21.36%, 这主要是该区域雷暴大风和冰雹发生频次较高、极端最大风速值较大以及日降雨量普遍较大综合影响的结果 (图略); 徐州局部 (沛县)、宿迁 (泗洪局部、泗阳局部、沭阳)、连云港局部 (东海西部)、淮安 (盱眙、洪泽大部、涟水北部、淮安区东部)、盐城 (滨海、阜宁大部、射阳、建湖、市辖区和东台)、泰州 (兴化东部、泰兴大部、靖江)、扬州 (宝应、高邮北部)、南通 (海安大部、如皋大部、通州大部) 以及常州市区局部的危险性等级为中等, 占全省面积 30.54%; 其余大部分地区包括连云港大部、淮安局部、扬州大部、盐城局部、南通南部以及苏南大部分地区雷暴大风灾害危险性处于低-较低水平, 这些区域虽然暴雨日数相对较多, 但最大日降雨量相对偏低、雷暴大风和冰雹发生频次偏少 (图略)、不易出现强雷暴大风, 因此雷暴大风危险性等级则较低。

通过雷暴大风危险性评估结果 (图 2a) 和灾情指数 (G) 分布 (图 2b) 对比分析可知, 灾情指数 (G) 较高区域与雷暴大风危险性等级较高的区域具有较好的一致性; 而泰州大部、扬州部分和南通局部地区虽然 G 并不大, 但是灾情发生频次较高而灾害损失相对较小, 因而该区域评估所得雷暴大风危险性等级仍然相对较高。因此, 可以认为雷暴大风灾害危险性评估结果是科学合理的。

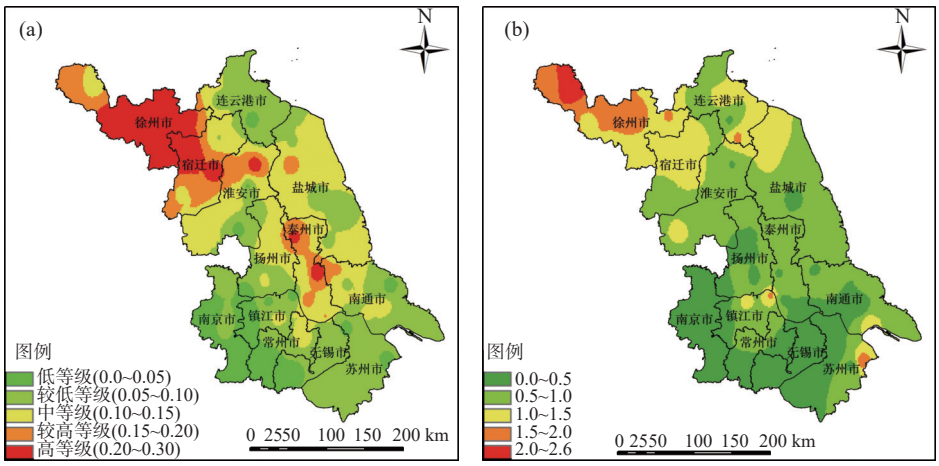


图 2 江苏省 2008—2022 年雷暴大风灾害危险性等级分布 (a) 和灾情指数 (G) 空间分布 (b)

Fig. 2 The spatial distribution of (a) thunderstorm-gales and (b) average G index in Jiangsu Province from 2008 to 2022

3.2 雷暴大风孕灾环境敏感性和承灾体暴露性分析

图 3 为江苏省 2022 年雷暴大风孕灾环境敏感性和承灾体暴露性空间分布, 可见太湖、洪泽湖、高邮湖、骆马湖及长江等开阔水面环境敏感性最高 (分值为 4~5), 易发生大风灾害; 石臼湖、长荡湖、滆湖、阳澄湖、渌洋湖、淮河以及赣榆北部的起伏地带, 敏感性居于中等水平, 较易形成风灾; 其余大部分地区的环境敏感性较低, 分值为 1~2 (图 3a)。

根据承灾体综合暴露性分析 (图 3b), 沿江、苏南东部及长江以北各地级市的市辖区所在地暴露性较高, 分值为 4~5, 原因在于这些地区人口密度大, 地均 GDP 高, 虽然房屋安全比例高, 但建筑面积大且集中; 暴露性中等级区域主要分布在长江以北的大部分地区, 农业暴露性在其中起到主要作用; 暴露性较低区 (分值为 1~2) 分布在东部海岸线、洪泽湖附近、苏南西部以及太湖地区, 这些区域人口密度相对较低, 地均 GDP 低, 尤其是沿江以北地区人口密度明显低于苏南地区, 城镇规模小, 虽然不安全房屋比例高, 但总面积也少。因此, 综合暴露性普遍偏低。

3.3 雷暴大风灾害综合风险区划

根据雷暴大风灾害风险指数 (式 13) 计算结果, 利用自然断点法将风险指数 (R) 按从小到大次序划分为 4 级 (图 4): $0.1\leqslant R<0.45$为低风险等级, $0.45\leqslant R<0.65$为较低风险等级, $0.65\leqslant R<0.85$为较高风险等级, $0.85\leqslant R\leqslant 1.53$为高风险等级。较高-高等级风险区分布在淮北西部、沿淮和江淮之间中部及苏南东部地区, 包括徐州大部、宿迁中部、连云港局部、淮安局部、扬州局部、盐城局部、泰州、南通西部、

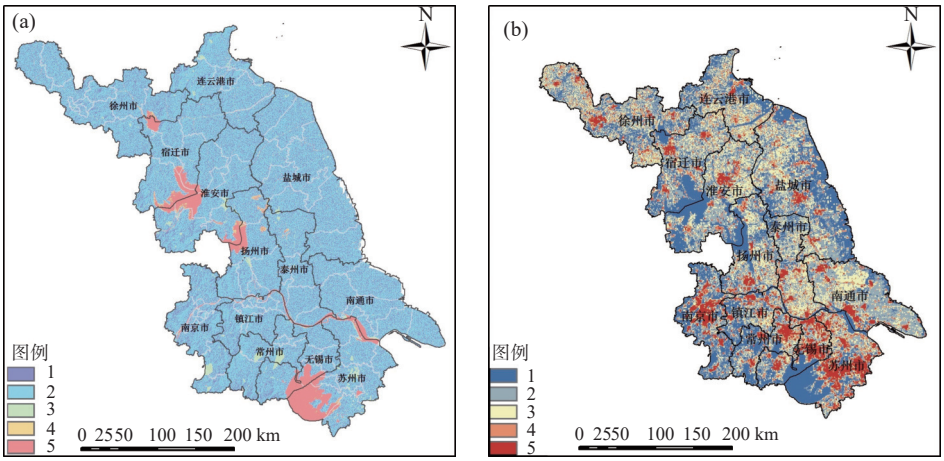


图 3 江苏省 2022 年雷暴大风孕灾环境敏感性 (a) 和承灾体暴露性 (b) 空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of (a) vulnerability of hazard inducing environments and (b) exposure of hazard-bearing bodies of thunderstorm-gales in Jiangsu Province in 2022

常州东部、镇江局部及苏州、无锡的局部地区。这是由于淮北西部雷暴大风的危险性较高、农业比例大、安全房屋比例偏低，加之局地人口密度大而造成，而淮河以南的较高风险区则主要受水网密度、经济总量以及农业暴露性所影响。风险较低区主要分布在淮北东部、江淮之间大部及苏南东部地区，这些地区由于大风发生频率较高，但安全房屋比例相对较高、农业暴露性相对较低，因此雷暴大风风险较低；南京大部、镇江西部、常州西部、无锡西部、淮安南部、连云港南部、南通东部等地的雷暴大风灾害风险最低，这与雷暴大风成灾次数较少，地势起伏，水网密度低、房屋建筑安全比例高有关 (表 5)。

对比分析雷暴大风风险区划结果 (图 4) 和灾情指数 (G) 分布 (图 2b) 可知，G 较大区域与雷暴大风风险等级较高的区域有很好的对应关系，说明该风险区划结果具有一定的合理性和可信度。同时，也发现在江淮之间和沿江东部地区存在着灾害风险等级较高、但灾情指数偏低的不一致现象，这可能与当地防灾抗灾能力有关，因相关数据获取难度较大，本文未做深入探讨。

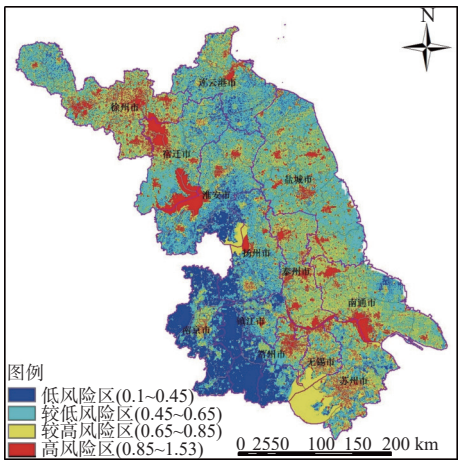


图 4 江苏省 2008—2022 年雷暴大风灾害风险区划图

Fig. 4 The risk zonation of thunderstorm-gale disasters in Jiangsu Province from 2008 to 2022

表 5 2008—2022 年江苏省雷暴大风灾害风险分布县 (市、区)

Table 5 The risk distribution of thunderstorm-gales in counties (cities, districts) of Jiangsu Province from 2008 to 2022

风险等级	县(市、区)
高风险区	徐州丰县局部、云龙区、鼓楼区、铜山区、贾汪区、邳州大部、睢宁局部、新沂北部；连云港赣榆东部、市区；宿迁宿豫区、骆马湖、泗阳局部、泗洪局部；淮安涟水局部、淮阴区、淮安区局部、盱眙局部和洪泽湖；盐城阜宁局部、射阳局部、盐都局部和东台局部；泰州兴化局部、姜堰北部、高港区、泰兴西部、靖江南部，扬州高邮局部；南通海安南部、市区局部、海门局部；镇江市区局部；苏州市区；常州市区中部；无锡市区
较高风险区	徐州丰县局部、铜山部分、市区、新沂市南部、睢宁大部；宿迁市区；连云港赣榆大部、东海局部、市区局部；淮安涟水部分、淮安区部分、淮阴区部分；扬州高邮湖、高邮市区；盐城阜宁大部、射阳县部分、滨海部分、东台西部；泰州兴化、泰兴大部、姜堰部分、靖江北部；南通海安北部、如皋、市区北部、海门部分、部分启东；苏州太湖、昆山部分；镇江市区局部；南京市区局部

续表 5

Table 5

风险等级	县(市、区)
较低风险区	徐州丰县、沛县大部; 连云港东海、灌云、灌南大部; 宿迁泗洪、沭阳大部、泗阳部分; 淮安盱眙大部、淮安区南部、涟水北部; 盐城建湖、射阳部分、响水大部、大丰和东台东部; 南通如东大部; 扬州市大部; 南京市区大部、、浦口局部、六合局部和高淳局部; 镇江市区局部、丹阳市; 常州金坛东部; 无锡宜兴南部、江阴局部; 苏州吴江、太仓部分、张家港部分
低风险区	徐州沛县局部; 连云港灌云县、灌南部分; 淮安金湖县; 南京六合区大部、浦口区大部、江宁区大部、溧水区大部、高淳区大部; 镇江市区西部、句容市; 常州金坛西部、溧阳, 无锡宜兴大部; 南通如东县局部; 苏州太仓局部

4 结论与讨论

利用 2008—2022 年江苏省雷暴大风灾情数据和气象资料, 将最大风速、日降水量和冰雹发生频率作为雷暴大风的致灾因子, 基于灰色关联度法和通径分析法建立雷暴大风危险性指数, 构建了雷暴大风成灾风险评估模型, 通过 Arcgis 的自然断点分析将江苏省雷暴大风灾害风险划分为高、较高、较低和低 4 个等级。主要得到以下结论:

(1) 通过对灾情指数和各特征气象因子全样本相关分析发现, 最大风速与伤亡人口、倒损房屋、直接经济损失呈显著正相关, 冰雹出现频率则与伤亡人口、受灾农田面积和直接经济损失关系密切, 降水量与灾情因子关系不显著。其中, 最大风速、日最大降水量和冰雹发生频率对灾情指数是直接的正效应; 过程降水量量则是通过日最大降水量间接作用于灾情, 且过程降水量≥50 mm 时, 降水的致灾影响大于风速, 随着雨量减少风速的致灾效应明显。

(2) 综合考虑最大风速、日降水量和冰雹的江苏省雷暴大风危险性等级共分为 5 级, 以淮北西部和江淮之间东部地区危险性最高。其中, 徐州大部、宿迁西部、泰州以及淮安、盐城和南通的局部地区雷暴大风危险性处于较高-高等级, 占全省面积 20.75%; 徐州局部、宿迁局部、连云港市区、淮安局部、盐城大部、泰州局部、扬州局部、南通北部以及常州局部的危险性等级为中等, 占全省面积 20.95%; 其余大部分地区雷暴大风灾害危险性处于低-较低水平。雷暴大风危险性等级的空间分布主要与雷暴大风的成灾频率密切相关。

(3) 根据雷暴大风灾害风险指数将江苏省雷暴大风灾害风险划分为高、较高、较低和低 4 个等级区。其中, 较高-高等级风险区域分布在淮北西部、沿淮和江淮之间中部地区, 包括了徐州大部、宿迁中部、淮安北部、扬州局部、盐城局部、泰州、南通西部、常州东部、镇江局部以及苏州、无锡的局部地区。风险较低区主要分布在苏南东部、江淮之间大部和淮北东部的部分地区; 南京大部、镇江西部、常州西部、无锡西部、淮安南部、连云港南部以及南通东部等地区的雷暴大风灾害风险最低。

本文得到的雷暴大风灾害风险分区不仅涵盖了雷暴大风的综合致灾强度和成灾频率, 还考虑了多种承灾体的空间差异, 最终分区结果与实况灾情较为吻合。然而将灾情数据应用于雷暴大风危险性评估, 确定致灾因子权重, 虽然在一定程度上能够反映出当地防灾抗灾水平和承灾体的脆弱性, 但却不能完全替代其在灾害风险形成中的作用。此外, 由于完整的灾害样本序列偏少, 致灾因子间权重的稳定性也值得商榷, 且未考虑区域间差异, 这些都可能是导致部分地区实际风险值出现偏差的原因。

参考文献 (References):

邓雪,李家铭,曾浩健,等.2012.层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J].数学的实践与认识,42(7):93−100. Deng X, Li J M, Zeng H J, et al. 2012. Analysis and application of AHP weight calculation method [J]. Mathematics in Practice and Theory,42(7):93−100 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−0984.2012.07.012

费海燕,王秀明,周小刚,等.2016.中国强雷暴大风的气候特征和环境参数分析[J].气象,42(12):1513−1521. Fei H Y, Wang X M, Zhou X G, et al. 2016. Climatic characteristics and environmental parameters of severe thunderstorm gales in China [J]. Meteorological Monthly, 42(12):1513−1521 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2016.12.009

黄俊,吴普特,赵西宁.2011.基于神经网络及灰色关联分析的土壤入渗研究[J].土壤学报,48(6):1282−1286. Huang J, Wu P T, Zhao X N. 2011. Research on soil infil-tration based on BP network and grey correlation analysis [J]. Acta Pedologica Sinica,48(6):1282−1286 (in Chinese)

江苏省气象局.2017.江苏省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社:350. Jiangsu Provincial Meteorological Bureau. 2017. Jiangsu Province weather forecast technical manual [M]. Beijing:Meteorological Press:350 (in Chinese)

金志凤,叶建刚,霍治国,等.2011.浙江省热带气旋灾损和等级评估[J].生态学杂志,30(6):1304−1311. Jin Z F, Ye J G, Huo Z G, et al. 2011. Tropical cyclone disaster loss and damage grade assessment in Zhejiang Province [J]. Chinese Journal of Ecology,30(6):1304−1311 (in Chinese)

孔锋,郭君,王一飞,等.2018.近 56 年来中国雷暴日数的时空分异特征[J].灾害学,33(3):87−95. Kong F, Guo J, Wang Y F, et al. 2018. Spatial and temporal variation characteristics of thunderstorm days in China in recent 56 years [J]. Journal of Catastrophology,33(3):87−95 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−811X.2018.03.017

刘少军.2010.基于多信息源的台风灾害实时评估系统研究[D].成都:成都理工大学. Liu S J. 2010. Research on real time evaluation system for typhoon disasters based on multiple information sources [D]. Chengdu:Chengdu University of Technology (in Chinese)

马蕾,刘垚,武万里,等.2020.宁夏高速公路大风灾害风险评价[J].干旱气象,38(3):504−510. Ma L, Liu Y, Wu W L, et al. 2020. Risk assessment of gale disaster on expressways in Ningxia Province [J]. Journal of Arid Meteorology,38(3):504−510 (in Chinese). doi:10.11755 /j.issn.1006−7639(2020)−03−0504

缪霄龙,缪启龙,宋健,等.2012.杭州地区雷雨大风灾害风险区划[J].气象与减灾研究,35(3):45−50. Miao X L, Miao Q L, Song J, et al. 2012. Risk zoning of thunderstorm- gale disasters in Hangzhou area [J]. Research on Meteorology and Disaster Reduction,35(3):45−50 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007−9033.2012.03.007

彭晓丹.2020.广州市雷雨大风灾害风险区划[J].广东气象,42(1):64−66. Peng X D. 2020. Risk zoning of thunderstorm gales in Guangzhou city [J]. Journal of Guangdong Meteorology,42(1):64−66 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1007−6190.2020.01.016

史培军,孔锋,叶谦,等.2014.灾害风险科学发展与科技减灾[J].地球科学进展,29(11):1205−1211. Shi P J, Kong F, Ye Q, et al. 2014. Disaster risk science development and disaster risk reduction using science and technology [J]. Advances in Earth Science,29(11):1205−1211(in Chinese). doi:10.11867/j.issn.1001−8166.2014.11.1205

孙曦恋,郑文钟.2014.粮食总产量变化影响因素的灰色关联分析[J].农业工程,4(3):159−162. Sun X L, Zheng W Z. 2014. Grey correlation analysis of total grain output influencing factors in Zhejiang province [J]. Agricul-tural Engineering,4(3):159−162 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.2095−1795.2014.03.051

孙晓磊,王科,左涛,等.2023.引发“6.25”天津极端雷暴大风的超级单体与中尺度对流系统分析[J].暴雨灾害,42(3):312−323. Sun X L, Wang K, Zuo T, et al. 2023. Analysis of supercell and meso-scale convective system causing an extreme thunderstorm gale in Tianjin on 25 June 2020 [J]. Torrential Rain and Disasters,42(3):312−323 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022−093

王学良,余田野,汪姿荷,等.2016. 1961—2013 年中国雷暴气候特征及东亚夏季风影响研究[J].暴雨灾害,35(5):471−481. Wang X L, Yu T Y, Wamg Z H, et al. 2016. Analysis on climate characteristics of thunderstorm in China and effect of East Asian summer monsoon on it during 1961—2013 [J]. Torrential Rain and Disasters,35(5):471−481 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.05.009

吴洪颜,商兆堂,程婷,等.2012.基于聚类分析的江苏冬小麦农业气候区划研究[J].中国农学通报,28(26):119−124. Wu H Y, Shang Z T, Cheng T, et al. 2012. Ago-climatic divisions of winter wheat in Jiangsu Province based on cluster analysis [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,28(26):119−124 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1000−6850.2012.26.027

武梦晗,王弋.2023.新疆莎车灌区农作物需水量和产量特征及其影响因素[J].生态学杂志,42(8):1858−1868. Wu M H, Wang Y. 2023. Characteristics and influencing factors of crop water demand and yield in Shache irrigation area of Xinjiang [J]. Chinese Journal Ecology, 42(8):1858−1868 (in Chinese). doi:10.13292/j.1000−4890.202307.017

胥蓓蕾, 童心, 邱鹏辉, 等.2023.我国下击暴流强风灾害风险分析与区划研究[J].中国农业资源与区划,45(2):104−111. Xu B X, Tong X, Qiu P H, et al. 2023. Risk analysis and zoning research on downburst disasters in China [J]. Chines Journal of Agriculture Resources and Regional Planning,45(2):104−111 (in Chinese) doi:10.7621/cjarrp.1005−9121.20240210

杨慧,张一平,崔丽曼,等.2024.河南一次伴有龙卷的多阶段强对流天气形成机制分析[J].暴雨灾害,43(3):299−312. Yang H, Zhang Y P, Cui L M, et al. 2024. Formation mechanism of a multi-stage severe convective weather event accompanied by local tornado in Henan [J]. Torrential Rain and Disasters,43(3):299−312 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023−217

禹梁玉,王啸华,顾荣直,等.2021.江苏一次下击暴流过程致灾大风成因分析[J].热带气象学报,37(5-6):801−811. Yu L Y, Wang X H, Gu R Z, et al. 2021. Cause Analysis of disastraus gale in downburst event in Jiangsu [J]. Journal of Tropical Meteorology,37(5-6):801−811(in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2021.074

中国气象局.2021.全国气象灾害综合风险普查技术规范《大风灾害调查与风险评估技术规范 (灾害调查类)》[S]. China Meteorological Administrator. 2021. Technical specification for national meteorological disaster comprehensive risk survey: technical specification for gale disaster investigation and risk assessment (disaster investigation) [S] (in Chinese)

Zeng X Y, Ma L, Zhu K Y. 2021. Research on the disaster-causing ability index of convective gale disaster based on the principle of entropy maximization [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 41(4):113−118. doi:10.3969/j.issn.1674−2184.2021.04.016

(责任编辑 唐国瑛)