

许遐祯, 潘文卓, 缪启龙. 江苏省龙卷风灾害风险评价模型研究 [J]. 大气科学学报, 2009, 32(6): 792-797.

江苏省龙卷风灾害风险评价模型研究

许遐祯^{1,2}, 潘文卓^{1,3}, 缪启龙¹

(1. 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044;
2. 江苏省气候中心, 江苏 南京 210008; 3. 杭州市气象局, 浙江 杭州 310051)

摘要:在分析江苏省龙卷风气候特征的基础上,建立了以江苏省为例的龙卷风灾害风险性评价模型,确定水域面积、海拔高度、人均国民生产总值、人口密度、龙卷密度和龙卷灾害综合灾度这 6 个因子作为评估指标,利用层次分析法确定各因子的权重,计算出江苏省各市龙卷风灾害风险度并进行了风险度区划。结果表明,苏州、无锡、南通为龙卷灾害高度风险区,常州、南京为较高风险区,镇江、泰州、徐州、盐城、扬州、连云港为中度风险区,宿迁和淮安为低度风险区。

关键词:龙卷风;江苏;风险评估;层次分析法;频数分布

中图分类号: P425.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097(2009)06-0792-06

Disaster Risk Assessment of Tornado in Jiangsu Province

XU Xia-zhen^{1,2}, PAN Wen-zhuo^{1,3}, MIAO Qi-long¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, NU IST, Nanjing 210044, China;
2. Jiangsu Climate Center, Nanjing 210008, China; 3. Hangzhou Meteorological Bureau, Hangzhou 310051, China)

Abstract: Based on the analysis of climatic characteristics of tornados in Jiangsu Province, a tornado disaster risk assessment model for Jiangsu Province has been established. Six factors, i.e. waters area, elevation, gross national product per capita, population density, tornado density and tornado disaster were chosen as assessment indexes, and their weighting are determined with the analytic hierarchy process. The tornado disaster's risk level for each city of Jiangsu province was calculated and rated. The result shows that Suzhou, Wuxi and Nantong belong to the highest risk region of tornado disaster; Changzhou and Nanjing belong to the higher risk region; Zhengjiang, Taizhou, Xuzhou, Yancheng, Yangzhou and Liangyungang belong to the medium risk region; and Suqian and Huai'an belong to the low risk region.

Key words: tornado; Jiangsu province; risk assessment; analytic hierarchy process; frequency distribution

0 引言

龙卷风为一种水平尺度很小,但破坏力很大的小尺度天气系统。大多数龙卷出现在有强雷雨时,少数出现在降雨时,个别的还有出现在未降水的浓积云底部^[1]。就全球而言,美国是龙卷出现最多的国家,平均每年出现 500 次左右,5 月龙卷最盛^[2];就中国而言,包括江苏省在内的华东、华南一带属于

龙卷的多发区^[3]。龙卷发生有 3 个必要条件:湿润的空气必须非常不稳定;在不稳定空气中必须形成塔状积雨云;高空风必须与低空风方向相反,从而发生风切变将上升的空气移走^[4]。

美国因龙卷风出现最多,其对龙卷风的研究也较多^[5-9]。MacGoman 等^[7]认为,龙卷一般发生于近地面层(厚度不小于 1 km)内水汽丰富,中层(底部在 1~2.5 km 高度以上)有干冷空气存在,通过蒸发

收稿日期: 2008-06-23; 改回日期: 2009-02-26

基金项目: 江苏省气象灾害重点实验室资助项目(KLME050103)

作者简介: 许遐祯(1963—),男,江苏沭阳人,高级工程师,研究方向为气候资源、气象灾害, xuxz0119@126.com

冷却提供潜在的强烈下曳气流的环境中; Fujita^[10]、McDonald^[11]提出以建筑物等地面物体的破坏强度依次划分龙卷风为 F0, F1, F2, ..., F5 的级别,称为富士达分级或 F 分级。

在我国,已有不少学者对龙卷风个例的环流和天气特征的研究^[12-16]。陈家宜等^[17]对江苏省 1960—1996 年龙卷风灾情资料进行了分级评定,但资料周期较短且苏州、无锡和常州三市的资料未经详查核实。

气象灾害风险评价,是指通过风险分析的手段或观察外表法,对尚未发生的气象灾害的致灾因子强度、受灾程度,进行评定和估计。“风险评价”也称为“风险评估”^[18]。近年来,为了提高气象灾害风险分析水平,我国学者进行了大量的研究^[19-21]。而对龙卷风灾害的风险评估尚未见报道,江苏的地形条件和天气气候条件较有利于龙卷风的形成和发展;经济发达,人口密度大,使得龙卷发生时造成灾害损失和人员伤亡也较大。本文根据江苏省的自然、社会、经济状况,结合龙卷风灾害发生的灾情,建立龙卷风风险度评价模型,并进行江苏省龙卷风灾害风险等级区划,对指导各级政府防灾减灾、保障人民生命财产安全具有重要意义。

1 资料来源和初步分析

资料的时间从 1956 年至 2005 年共 50 a,来源有 50 a 间江苏省各地气象报表、各级气象部门的灾情简报、民政厅灾害简报及各地气象工作人员的实地调查报告,资料详尽、可靠。

对资料进行了调查核实和电子化处理,包括龙卷灾害发生日期、时刻、持续时间、地点(具体到乡镇、村),龙卷风长度、宽度,以及记录到的风向、风力、风速和详细灾情。对灾情进行详细分类,统计了损坏房屋数、倒塌房屋数、树木损失数、电线杆吹倒数、受伤人数、死亡失踪人数、农业受灾面积、经济损失和其他灾情和遭破坏事实。调查结果显示 1956—2005 年江苏省共有 1 070 次龙卷风记录,江苏地区平均每年发生 21.4 次龙卷风事件。

2 江苏省龙卷风的空间分布特征

统计表明,1956—2005 年江苏省发生龙卷风记录最多的地级市为南通,50 a 间共有 300 次记录,最多的县(县级市)为如东,有 62 次记录,平均每年发生 1.24 次;记录最少的地级市为宿迁,为 29 次,最少的县(县级市)为江浦和扬中,仅有 2 次记录。

由江苏省各县市的龙卷频数分布(图 1)可见,江苏省龙卷发生的频数总体分布是沿海多,靠内陆少;而沿海分布为南多北少;东南部多,中西部少。江苏省 13 个地级市中,南通市是江苏省龙卷发生频数的最高值区,苏州为次高值区,两个城市都位于江苏东南部;发生频数属于中等的有无锡、常州、泰州、淮安、盐城和徐州;发生频率较低的为南京、镇江、扬州、宿迁和连云港。

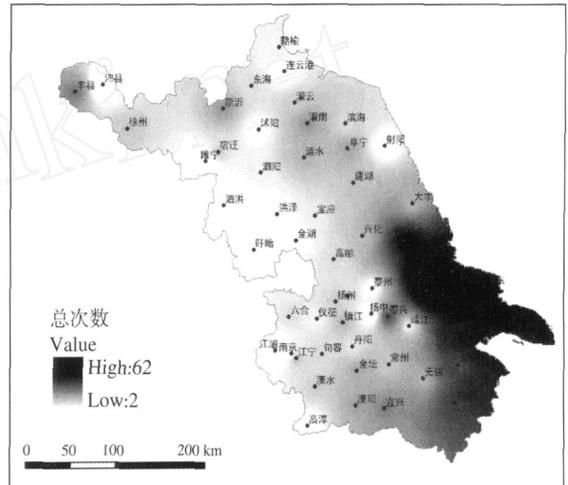


图 1 1956—2005 年江苏省龙卷风发生的频数分布
Fig 1 Frequency distribution of tomados in Jiangsu Province during 1956—2005

3 龙卷灾害风险性评价模型

3.1 龙卷风灾害风险性的影响因素

龙卷风灾害的大小受到一个区域的自然状况、社会经济状况、灾情状况及其间的相互关系的综合影响,每一种因子又包含众多的表现形式,形成了龙卷风灾害系统内各因子之间复杂的因果关系。由于风险性分析必须考虑社会经济状况,而社会经济状况受时间尺度的长短而差异很大,尤其是我国这样处于高速发展中的国家,如 20 世纪 90 年代的社会经济状况和 80 年代的相比,各项国民经济指标值已经大大增加。故而本文利用江苏省 1991—2000 年(90 年代)10 a 间 256 次龙卷致灾过程的资料进行灾害风险性分析,较为接近当前时期而能较好地反映最新的状况。结合龙卷的易灾环境特征和成灾特点,可以认为水域面积、海拔高度、人均国民生产总值、人口密度、龙卷密度和龙卷灾害综合灾度这 6 个因子为龙卷的主要致灾因子,它们对龙卷灾害风险性有着极大的相关关系,且具有较强的区域差异性,适宜用空间数据表达,可以作为龙卷灾害风险性指

标,用以龙卷灾害的综合区划。龙卷灾害风险性因子的原始数据,水域面积比、海拔高度、人均 GDP 和人口密度数据均取自 2001 年江苏省统计年鉴。

其中,龙卷灾害综合灾度是对区域龙卷风灾害灾情的一种度量。区域内龙卷灾害灾情可以反映龙卷发生的频率、影响程度以及受灾情况。根据 1991—2000 年江苏省 256 例龙卷灾害案例,分析综合灾度,以市为评价单位。龙卷次数、经济损失和人员伤亡为估算综合灾度的 3 个主要因子。其中,经济损失又以房屋损倒量和树木损倒量作为两个主要评价因子。以综合灾度作为反映江苏省龙卷灾害区域空间分布相对差异的信息,龙卷灾害综合灾度 M 计算方法如下

$$M = (A + B + C) / 3. \quad (1)$$

式中: A 为各市龙卷发生次数/全省龙卷总次数; B 为各市经济损失因子估算值,由如下计算得

$$B = (B_1 + B_2) / 2. \quad (2)$$

其中: B_1 为各市房屋损倒量/全省房屋损倒量; B_2 为各市树木损倒量/全省树木损倒量; C 为各市伤亡人数/全省总伤亡人数。

可见,(1)式中 M 是小于等于 1 的龙卷风灾情度量,且 $\sum_{k=1}^{13} M_k = 1$, M_k 为第 k 个城市的龙卷灾害综合灾度 ($k=1, 2, \dots, 13$)。

3.2 龙卷灾害风险性评价方法

进行龙卷灾害风险性评价,首先应对上述 6 个龙卷灾害风险性因子的原始数据(表略),采用公式(3)进行初始化处理^[18]:

$$X_i^* = \frac{X_i - X_{i(\min)}}{X_{i(\max)} - X_{i(\min)}}. \quad (3)$$

式中: X_i 表示各指标序列中的每一项,其中 $i=1 \sim 6$,并依次分别代表水域面积、海拔高度、人均国民生产总值、人口密度、龙卷密度和综合灾度; $X_{i(\max)}$ 表示该指标中的最大值; $X_{i(\min)}$ 表示该指标中的最小值。

在上述指标体系的基础上,根据所得指标数据和下面的构造模型,计算江苏各市龙卷灾害风险度,如下式

$$V_k = \sum_{i=1}^6 X_i^* \times W_i. \quad (4)$$

式中: V_k 为第 k 个城市的龙卷灾害风险度 ($k=1, 2, \dots, 13$); X_i^* 为第 i 个因子的初始化值; W_i 为第 i 个因子的权重。各因子权重的确定,可用多种分析法来确定,如德尔菲法、层次分析法等。

4 江苏省龙卷灾害风险度各因子权重的确定

4.1 方法介绍

这里采用层次分析法^[22-25](Analytical Hierarchy Process,简称 AHP法),该方法是美国运筹学家匹茨堡大学教授 Saaty 于 20 世纪 70 年代初提出的。这种方法的特点是在对复杂的决策问题的本质、影响因素及其内在关系等进行深入分析的基础上,利用较少的定量信息使决策的思维过程数学化,从而为多目标、多准则或无结构特性的复杂决策问题提供简便的决策方法。AHP 法实现步骤如下:

(1)建立递阶层结构。按照评价指标体系的基本关系构建递阶层,指标体系的每层中各元素支配下一层中的相应元素,形成一个递阶层次,同一层中各元素相互独立,从而形成了由一个总目标层和若干个子准则层组成的递进的“金字塔”型层结构。

(2)建立两两比较判断矩阵。在确定的递阶层次结构中,每一个元素和该元素支配的下一层元素构成一子区域,对于子区域内的各元素采用专家咨询法来构建若干个判断矩阵。设 A 元素 A_k 与下层元素 B_1, B_2, \dots, B_n 有联系,则判断矩阵如表 1 所示。其中 b_{ij} 表示对于 A_k 而言,其下一层任意元素 B_i 对 B_j 相对重要性的数值表现。 b_{ij} 的取值由 Saaty 的 1~9 值法(表 2)决定。显然,判断矩阵都有如下性质: $b_{ii}=1$, $b_{ji}=1/b_{ij}$ 。判断矩阵的值根据客观数据、专家意见和分析者的认识综合给出。

表 1 判断矩阵

A_k	B_1	B_2	...	B_n
B_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1n}
B_2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2n}
...
B_n	b_{n1}	b_{n2}	...	b_{nn}

表 2 判断矩阵的标度及含义

Table 2 Scale and meaning of judgment matrix

标度	含义
1	表示两个因素相比,具有相同重要性
3	表示两个因素相比,前者比后者稍重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
9	表示两个因素相比,前者比后者极端重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	若因素 i 与因素 j 的重要性之比为 b_{ij} , 那么因素 j 与因素 i 重要性之比为 $b_{ji}=1/b_{ij}$

(3)计算单一准则下元素相对权重。计算判断矩阵的最大特征根和特征向量,应用和积法计算,其步骤为:

a 将判断矩阵 B 每一列归一化

$$a_{ij} = b_{ij} \left[\sum_{k=1}^n b_{kj} \right]^{-1}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

b 将 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 按行加总。

c 将 b 中所得的行和向量归一化,得排序权重向量

$$W_i = W_i \left[\sum_{j=1}^n W_j \right]^{-1}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

d 按下式计算判断矩阵 B 对应的最大特征值

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(AW)_i / nW_i]. \quad (7)$$

其中 $(AW)_i$ 表示 AW 的第 i 个分量。

(4)进行一致性检验

a 计算一致性指标:

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1). \quad (8)$$

b 根据判断矩阵的阶数 n,查找相应的一致性指标 RI。对于 $n = 1, 2, \dots, 9$, Saaty 给出了 RI 的值(表 3)。

表 3 一致性指标 RI

Table 1 Consistency index RI					
n	RI	n	RI	n	RI
1	0	4	0.90	7	1.32
2	0	5	1.12	8	1.41
3	0.58	6	1.24	9	1.45

c 计算一致性比率:

$$CR = CI/RI \quad (9)$$

当 $CR < 0.1$ 时,认为判断矩阵的一致性是可以接受的,否则应对判断矩阵作适当修正。

(5)计算各层指标的组合权重。将满足一致性检验的相同模型的特征值取平均,也就形成了所在子区域块的各自相对权重。最后一层各元素的权数依次乘以上一层受控元素的相对权数,从而形成各元素对于总目标的绝对权重。

4.2 构造判断矩阵

利用层次分析法来确定龙卷风险性评估模型中各个因子的权重,首先,把龙卷风险性评估确定为层次分析的总目标,即第一层(A层),以地形条件、社会经济、龙卷状况作为第二层次(B层),选取 6 个指标作为第三层(C层),如图 2 所示。

(1)相对目标层 A,社会经济和龙卷状况比地形

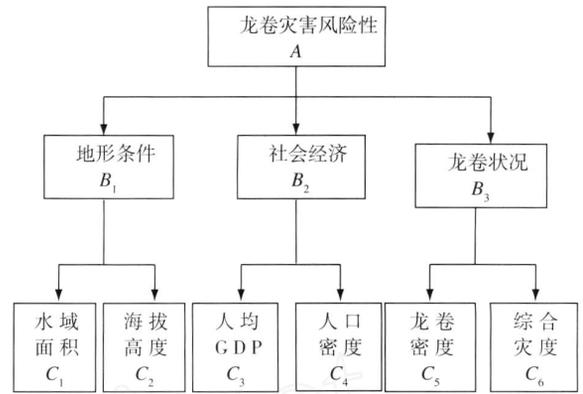


图 2 龙卷风灾害风险性划分的层次分析法模型

Fig 2 A analytical hierarchy process model for tomado disaster risk division

条件都略为重要,而由于若同等强度龙卷发生在不同地区,对社会经济发达的地区的影响肯定比经济社会欠发达地区的影响大的多,故而认为社会经济条件比龙卷状况条件稍为重要,因而构造的矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/2 \\ 3 & 1 & 3 \\ 2 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}.$$

(2)对于地形条件而言,水域面积比相对于海拔高度稍重要,构造判断矩阵为

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}.$$

(3)对于经济社会条件而言,人均国民生产总之比人口密度略微重要,构造判断矩阵为

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 2 \end{bmatrix}.$$

(4)对于龙卷状况,龙卷灾害综合灾度更为重要,构造判断矩阵为

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}.$$

4.3 各层次相对权重和一致性检验

(1)首先对 A 层次计算该层间的相对权重和一致性检验。

$$AW = \begin{bmatrix} 0.481 \\ 1.822 \\ 0.766 \end{bmatrix}.$$

计算得 $\lambda_{max} = 3.053$,则 $CI = 0.0265$;查表当 $n = 3$ 时, $RI = 0.58$,则 $CR = CI/RI = 0.047 < 0.1$,结果通过一致性检验。

(2)其次对 B 层次计算该层间的相对权重和一致性检验。

$$B_1W = \begin{bmatrix} 1.5 \\ 0.5 \end{bmatrix}。$$

计算得 $\max = n = 2$, 则 $CI = 0, CR = CI/RI = 0$, 通过一致性检验。

$$B_2W = \begin{bmatrix} 1.333 \\ 0.667 \end{bmatrix}。$$

计算得 $\max = n = 2$, 则 $CI = 0, CR = CI/RI = 0$, 通过一致性检验。

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}, \text{与 } B_1 \text{ 一样, } W = \begin{bmatrix} 0.75 \\ 0.25 \end{bmatrix}, \text{且可}$$

通过一致性检验。

4.4 总权重计算

由上述得出的各层影响因子的权重, 可得出各因子的总权重, 如表 4 所示。

表 4 C 层各因子对龙卷风灾风险性 (A) 相对重要性的总权重值

Table 4 Total weight values of the relative importance of C various factors to tomado disaster risk (A)

	$B_1 (0.16)$	$B_2 (0.6)$	$B_3 (0.25)$	总权重 W
C_1	0.75			0.12
C_2	0.25			0.04
C_3		0.66		0.40
C_4		0.33		0.20
C_5			0.75	0.19
C_6			0.25	0.06

5 江苏省龙卷风风险度计算及评价

表 4 中 W 为计算的权重系数, 另外, 根据一致性检验步骤, 可知以上构建判断矩阵的一致性比例 CR 完全满足一致性检验的要求, 因此权重系数完全可以采用。由上得到各因子的权重值, 利用经过初始化处理的各因子原始数据, 根据公式 (4), 可以求得江苏省各个城市对应的龙卷灾害风险度 V_k , 如表 5 所示。据此, 可以对江苏省龙卷灾害风险度作进一步的区划和评价。

表 5 江苏省龙卷灾害风险度 V_k

Table 5 Jiangsu Province tomado disaster risk V_k

	V_k		V_k		V_k
南京	0.413	南通	0.654	镇江	0.385
无锡	0.684	连云港	0.277	泰州	0.333
徐州	0.331	淮安	0.107	宿迁	0.121
常州	0.434	盐城	0.300		
苏州	0.687	扬州	0.291		

根据上述求得的江苏省龙卷灾害风险度结果,

可以对其进行龙卷灾害风险度分区。将龙卷灾害风险度计算结果按 $>0.6, 0.6 \sim 0.4, 0.4 \sim 0.2$ 和 0.2 作为划分龙卷灾害高、较高、中和低的界限值, 分别赋值 1、2、3、4 作为龙卷灾害风险度区划指标值 (表 6)。

表 6 江苏省龙卷风灾害风险区等级划分指标

Table 6 Index of level division of tomado disaster risk area in Jiangsu Province

区域	等级	指标	主要地理范围
高风险区	1	>0.6	苏州、无锡、南通
较高风险区	2	$0.6 \sim 0.4$	常州、南京
中度风险区	3	$0.4 \sim 0.2$	镇江、泰州、徐州、盐城、扬州、连云港
低风险区	4	0.2	宿迁、淮安

根据区划的结果, 可以将江苏省分成龙卷灾害高度风险区、较高度风险区、中度风险区和低度风险区, 运用图像处理工具生成江苏省龙卷灾害风险度区划图 (图 3)。

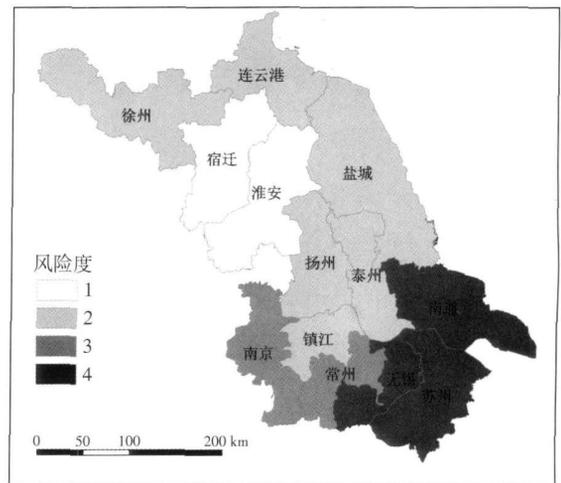


图 3 江苏省龙卷风灾害风险度区划图

Fig 3 Regional division of tomado disaster risk for Jiangsu Province

6 结论

(1) 1956—2005 年江苏省共有 1 070 次龙卷风记录, 平均每年发生 21.4 次。江苏省龙卷发生的频数总体分布是沿海多, 靠内陆少; 而沿海分布为南多北少; 东南部多, 中西部少。

(2) 建立了以江苏省为例的龙卷风灾害风险性评价模型, 确定水域面积、海拔高度、人均国民生产总值、人口密度、龙卷密度和龙卷灾害综合灾度这 6

个因子作为评估指标。

(3)应用层次分析法确定模型中各因子的权重,据此计算出江苏省各市龙卷风灾害风险度,并进行了风险度区划。

(4)区划结果表明苏州、无锡、南通为龙卷灾害高度风险区,常州、南京为较高风险区,镇江、泰州、徐州、盐城、扬州、连云港为中度风险区,宿迁和淮安为低度风险区。结果较好的反映了江苏省龙卷风发生概率大小和灾损大小在区域间的可能性分布,为各级政府防灾减灾提供了依据。

参考文献:

- [1] 江仁. 气象学 [M]. 北京:中国农业出版社, 2000: 149-150.
- [2] Kessler E. 雷暴形态学和动力学 [M]. 北京:气象出版社, 1991.
- [3] 周淑贞. 气象学与气候学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1997: 150-151.
- [4] 迈克尔·阿拉贝. 龙卷风 [M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 2006.
- [5] Ostby F P. Operations of the National Severe Storm Forecasting Center[J]. *W ea Forecasting*, 1992, 7: 546-563.
- [6] Ostby F P. Improved accuracy in severe storm forecasting by the severe storms unit during the last 25 years: Then versus new [J]. *W ea Forecasting*, 1999, 14: 526-543.
- [7] MacGorman D R, Burgess D W. Positive cloud-ground lightning in tomadic storms and hailstorms [J]. *Mon Wea Rev*, 1994, 122 (8): 1671-1679.
- [8] Lemon L R, Doswell III C A. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tomado genesis [J]. *Mon Wea Rev*, 1979, 107: 1184-1197.
- [9] Johns R H, Davies J M, Leftwich P W. An examination of the relationship of 0-2 km AGL "positive" wind shear to potential buoyant energy in string and violent tomado situations [C] // *Preprints, 16th Conf on Severe Local Storms*. Kananaskis Park, Alberta, Canada: AmerMeteor Soc, 1990: 593-598.
- [10] Fujita T T. Proposed characterization of tomadoes and hurricanes by area and intensity [R] // *SMRP Res Paper No. 91*, University of Chicago, 1971: 42.
- [11] McDonald J R. T Theodore Fujita: His contribution to tomado knowledge through damage documentation and the Fujita scale [J]. *Bull AmerMeteor Soc*, 2001, 82 (1): 63-72.
- [12] 姚叶青,魏鸣,王成刚,等. 一次龙卷过程的多普勒天气雷达和闪电定位资料分析 [J]. *南京气象学院学报*, 2004, 27 (5): 587-594.
- [13] 宋子忠,刘娟,张健,等. 灵璧强龙卷个例的多普勒天气雷达分析 [J]. *气象科学*, 2006, 26 (6): 689-695.
- [14] 廖玉芳,俞小鼎,唐小新,等. 基于多普勒天气雷达观测的湖南超级单体风暴特征 [J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30 (4): 433-443.
- [15] 魏文秀,赵亚民. 中国龙卷风的若干特征 [J]. *气象*, 1995 (5): 36-40.
- [16] 干莲君,田心如,张东凌,等. 龙卷风的风强分析与极值推断 [J]. *气象科学*, 1999, 19 (1): 99-103.
- [17] 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 (4): 111-117.
- [18] 黄崇福. 自然灾害风险评价理论与实践 [M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [19] 李硕,冯学智,左伟. 西藏那曲牧区雪灾区域危险度的模糊综合评价研究 [J]. *自然灾害学报*, 2001, 7 (4): 106-114.
- [20] 解以扬,韩素芹,由立宏,等. 天津市暴雨内涝灾害风险分析 [J]. *气象科学*, 2004, 24 (3): 342-349.
- [21] 梅宝玲,陈舜华. 内蒙古生态环境预警指标体系研究 [J]. *南京气象学院学报*, 2003, 26 (3): 387-394.
- [22] 王莲芬,许树柏. 层次分析法引论 [M]. 北京:中国人民大学出版社, 1990.
- [23] 田瑾,项静恬. 经济、环境等非线性系统的预测和调控 [M]. 北京:中国统计出版社, 2001.
- [24] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法 [M]. 北京:中国物价出版社, 2001.
- [25] 邱东. 多指标综合评价方法的系统分析 [M]. 北京:中国统计出版社, 1991.

(责任编辑:倪东鸿)