

王霁吟, 陈宝君, 宋金杰, 等. 2015. 基于再分析资料的我国龙卷发生环境和通用龙卷指标 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 411–420. Wang Jiyin, Chen Baojun, Song Jinjie, et al. 2015. Atmospheric conditions of tornado genesis and universal tornadic index based on reanalysis data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 411–420, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14127.

基于再分析资料的我国龙卷发生环境和通用龙卷指标

王霁吟^{1,2} 陈宝君² 宋金杰² 王元²

¹ 浙江省气象台, 杭州 310021

² 南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 利用 NCEP 再分析资料, 对 2004~2009 年《中国气象灾害年鉴》(许小峰, 2005–2012) 上记录的龙卷按区域进行整合分析, 确定在中国适合龙卷发生的大气环境条件。结合国内外已有参数, 用临近探空的分析方法初步建立了一个适用于中国的龙卷潜势预报通用指标。研究表明: 我国龙卷主要发生在东部地区, 其发生发展需要有利的高低空形势场配置, 并且不稳定能量的累积、水汽的输送都至关重要; 从环境场来看, 首要条件是有合适的对流有效位能和大的深层 (0~6 km) 风切变, 低的抬升凝结高度和大的低层 (0~1 km) 风切变也是重要因素; 建立了基于 NCEP 资料的龙卷潜势预报通用指标, 并利用 2010~2011 年的龙卷事件对该指标进行了预测检验。

关键词 龙卷 潜势预报 通用龙卷指标 再分析资料

文章编号 1006-9585 (2015) 04-0411-10

中图分类号 P445.1

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14127

Atmospheric Conditions of Tornado Genesis and Universal Tornadic Index Based on Reanalysis Data

WANG Jiyin^{1,2}, CHEN Baojun², SONG Jinjie², and WANG Yuan

¹ Zhejiang Province Meteorological Observatory, Hangzhou 310021

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The authors used the NCEP reanalysis system to make integrated analysis by region and have found environmental conditions associated with tornadoes taken from *Year-book of Meteorological Disasters in China* (Xu Xiaofeng, 2005–2012) for the period of 2004–2009. Then an index has been formulated from analyzing kinds of parameters derived from proximity soundings. Results show that favorite significant tornado environments were concentrated in the east of China. The coordinating between low and high situation was important as well as instability energy accumulation and vapor transport. It was also proven that tornadoes in China occur in conditions accompanied by moderate convective available potential energy (CAPE), high wind shear (0–6 km layer shear and 0–1 km layer shear) and low cloud base. The results of this study were used to create a universal tornadic index based on NCEP reanalysis data and designed to forecast activity in tornadic environment. The quality of this index was tested with tornado activities in China for the period from 2010 to 2011.

Key words Tornado, Potential forecasting, Universal tornadic index, Reanalysis data

收稿日期 2014-06-21; 网络预出版日期 2014-11-06

资助项目 国家自然科学基金项目 41175118, 国家重点基础研究发展计划项目 2013CB430105

作者简介 王霁吟, 女, 1989 年出生, 硕士, 助理工程师, 主要从事中尺度灾害性天气研究。E-mail: 307886348@qq.com

通讯作者 陈宝君, E-mail: bjchen@nju.edu.cn

1 引言

龙卷是最为猛烈的对流天气现象之一, 典型龙卷的直径约几百米, 所产生的最大地面风速可达 140 m s^{-1} , 能造成重大的人员伤亡和财产损失。我国是世界上受龙卷影响较为严重的国家之一, 仅发生在东部地区的龙卷每年就有 200~300 个左右, 其中灾害性的龙卷达到 10~15 个 (魏文秀和赵亚民, 1995)。龙卷风的巨大能量使其具有极大破坏能力, 所到之处给国家和人民生命财产造成极大的损失。例如: 2003 年 7 月 8 日夜发生在安徽无为的一次龙卷过程造成 16 人死亡和 166 人受伤, 大量房屋倒塌 (俞小鼎等, 2006); 2005 年 7 月 30 日上午发生在安徽灵璧的伴随强降水的龙卷过程致死 15 人并伤 46 人 (俞小鼎等, 2008); 2007 年 7 月 3 日下午发生在安徽天长和江苏高邮的龙卷也造成多人死亡和数十人重伤 (刘娟等, 2009)。由于尺度小、生命史短, 龙卷很难被采用常规技术手段的气象观测网所捕捉, 更难提前做出准确的预警和预报。如何及时有效地对龙卷发生时间与地点做出预报, 并采取适当的手段干预龙卷过程以降低龙卷所造成的影响和损失, 是中小尺度天气动力学难点和重点问题之一。

美国是全球龙卷出现最多的国家。近几十年来, 美国在龙卷和强雷暴监测和预报方面取得了很大进展, 预报方法也从主观经验预报发展为借助大量外场观测和数值模拟并以物理因子为基础的客观预报, 随着计算机能力的提升和雷达、卫星等遥感技术的发展与应用, 预报的准确率有很大的提高 (Ostby, 1992, 1999)。针对强对流产生的特定环境特征, 国外学者进行了大量研究, 总结出更精准的预报物理因子和预警方法。例如, Johns et al. (1990) 根据美国 242 个龙卷数据, 发现对流有效位能和 0~2 km 垂直风切变是龙卷发生的有利因子。Brooks et al. (2003) 则利用 NCEP 再分析资料, 采取临近探空 (proximity sounding) 的分析方法, 对 1997~1999 年间发生的强雷暴及龙卷事件进行研究, 找出了有利于强雷暴和龙卷发生的环境条件, 提出对流有效位能、低层风切变、抬升凝结高度、中层温度递减率这些参数对龙卷有很好的指示意义; 进一步研究表明, 利用这些参数及其组合, 能很好地表征和预测龙卷可能发生的区域 (Craven and Brooks,

2005)。除上述因子外, 学者们也指出: 湿度场配置很重要, 龙卷一般发生于近地面水汽丰富、中层有干冷空气存在、通过蒸发冷却提供潜在的强烈下曳气流的环境中 (MacGorman and Burgess, 1994)。Markowski and Richardson (2010) 指出美国大平原易发龙卷与其特殊地理位置有关。而从各种观测资料和龙卷机制来看, 龙卷形成于垂直上升气流区和后侧下沉气流区之间, 由环境和斜压区水平涡管倾斜形成 (Lemon and Doswell, 1979); 后侧下沉气流对龙卷形成有重要作用 (Church et al., 1993)。中国对龙卷的研究多集中在龙卷事件的气象背景场和时空分布特征, 探寻龙卷预报因子和运用雷达观测资料分析龙卷过程 (姚叶青等, 2004; 郑媛媛等, 2009; 许遐祯等, 2010; 冯婧等, 2012)。国内亦有学者利用再分析资料或者模式模拟进行冰雹、雷暴大风等强对流天气的环境潜势研究 (王笑芳和丁一汇, 1994; 刘勇等, 1998; 谢建标等, 2007; 张玲等, 2008; 纪晓玲等, 2010; 陈宝君等, 2012)。然而, 利用 NCEP 资料探讨我国龙卷发生环境潜势及预报指标还很缺乏。

在中国, 适合龙卷发生的环境到底是什么? 如何预测龙卷的发生? 现阶段, 我们可以建立一个集合各类因子的参数指标, 用统计预报的方法结合数值产品、雷达观测、地理特征等预报龙卷。而龙卷的预报因子大致可分为动力因子 (水平风的垂直切变、垂直风速等)、稳定度因子 (对流有效位能、抬升凝结高度、温度垂直递减率等)、水汽因子 (混合比、相对湿度等)。本文就是利用 NCEP FNL 全球分析资料, 结合近 10 年龙卷记录, 探讨基于再分析资料的龙卷环境条件, 确定预报因子, 为开展龙卷潜势预报提供参考。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用的资料包括: NCAR/NCEP 提供的 NCEP FNL 全球分析资料和《中国气象灾害年鉴》(许晓峰, 2005—2012) 提供的龙卷数据资料。其中, NCEP FNL 资料水平分辨率为 1° (纬度) $\times$ 1° (经度), 一天 4 次, 时间间隔为 6 h, 包含了地表 26 个标准等压层 (1000~10 hPa)、地表边界层和对流层顶的要素信息, 它是由谱模式获取的高分辨率资料并同化了地面观测、无线电探空、探空气球、

飞机及卫星观测资料。从年鉴上选取的龙卷数据资料包含具体时间、地点、受灾情况等, 龙卷事件一般伴随着冰雹、雷雨大风和短时强降水。所有资料使用的时间范围为 2004~2011 年。

2.2 分析方法

为得到在中国适合龙卷发生的环境, 先对 2004~2009 年间华东 10 个、华南 8 个典型龙卷进行整合研究, 分析适合龙卷发生的大尺度平均天气背景、中小尺度环境特征, 总结出与龙卷有关的环境参数、物理因子。再结合国外的强风暴指标, 用临近探空分析方法对 2004~2009 年在中国发生的 121 个龙卷做分析。所谓龙卷事件的临近探空分析方法, 即采用最靠近龙卷发生时间和发生地的温湿风垂直廓线, 去寻找环境参数和龙卷发生的对应关系, 并区分出龙卷与非龙卷的环境。选用发生时间 3 h 以内和离发生地点 0.5 个经纬度以内的资料(实际没有在中点或者中线上的个例)。龙卷较多发生的中午及午后(北京时间 11:00 至 17:00)用 06:00 (协调世界时)的 FNL 资料, 17:00 至 23:00 (北京时间)用 12:00 (协调世界时)的资料, 以此类推。最后做出一个适用于中国地区的龙卷通用指标, 用来对龙卷的潜势预报作参考。

3 预报指数的建立与检验

3.1 指数建立

3.1.1 龙卷的天气背景和环境场特征

不同地区发生的龙卷可能会有不同的天气形势与环境背景。这里主要分析我国龙卷多发地华东、华南地区诱发龙卷的环境背景场特征。在 2004~2009 年间挑选华东 10 个、华南 8 个典型龙卷个例, 以龙卷发生地为原点, 进行平均整合研究。

华东 10 个龙卷的平均 500 hPa 高空场上(图 1a), 龙卷的平均发生地位于偏东北—西南走向的低槽前部, 东南部由副热带高压控制, 在这两个系统配合下, 发生地上空由西南风控制。从高空到低层(850 hPa, 图 1b)低槽几乎重合, 低层有切变线, 气旋性风切, 中低层处于一个冷涡前部。综上, 称华东适于龙卷发生的形势场为“副高外缘冷涡型”。

从 500~850 hPa (图 1 c、1d), 龙卷发生地及其附近湿度较大, 相对湿度超过 85%, 500 hPa 以上湿度锐减, 下湿上干, 且湿度层较厚。与槽后较

干燥的冷平流、低层的暖平流配合, 有利于强对流天气的出现。由计算得, 龙卷发生地及其南部对流有效位能 (convective available potential energy, CAPE, 记为 C_{APE}) 值超过 1500 J kg^{-1} , 是一大片较不稳定区域。龙卷一般是在能量的不断积累和在一定条件下强烈转化和释放的过程中产生的(吴海英等, 2009)。

500 hPa 西南风风速超过 18 m s^{-1} , 低层 850 hPa 有西南急流, 风速超过 15 m s^{-1} , 使得急流轴以下低空大气有很强烈的垂直风切变。 $0 \sim h \text{ km}$ 算数平均垂直风切变为 $(V_h - V_0)/h$, V_h 为高度 h 处的风速, V_0 为地面风速。华东地区龙卷发生地附近 $0 \sim 6 \text{ km}$ 的垂直风切变在 $2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上, 而 $0 \sim 1 \text{ km}$ 垂直风切变高达 $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。Thompson et al. (2002b) 分析研究了超级单体和龙卷的多种对流参数的统计值, 得到 F2 级以上龙卷 $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变平均值为 $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 下限为 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, $0 \sim 1 \text{ km}$ 垂直风切变平均值为 $9.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 下限为 $5.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 并认为 $0 \sim 1 \text{ km}$ 垂直风切变对判断龙卷更为有效。华东 10 个龙卷 $0 \sim 6 \text{ km}$ 垂直风切变接近超级单体风暴所需的风切变下限, $0 \sim 1 \text{ km}$ 达到上限。

对于华南地区的龙卷, 从合成的平均 500 hPa 高空场(图 2a)来看, 高空位于副高西北侧边缘。中低空有一暖高压(图 2b), 局地处于急流中心附近, 700 hPa 龙卷发生地附近风速超过 13 m s^{-1} , 且局地为明显气旋性风场, 称华南适于龙卷发生的形势场为“副高外缘暖高前缘型”。华南地区利于龙卷发生的形势场与华东地区不同, 因而环境场特征与之也有不同。平均对流有效位能略小于华东; $0 \sim 6 \text{ km}$ 水平风垂直切变小于华东为 $2.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 也接近超级单体风暴所需的风切变下限; $0 \sim 1 \text{ km}$ 水平风垂直切变为 $6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, 达到超级单体风暴所需的风切变下限。另外, 中低层湿度都较大(图 2c、2d), 并伴随西南暖湿气流, 向龙卷发生地输送了大量的热量和水汽, 从而增加了发生地的不稳定。

由于 2004~2009 年间, 中国其他地区龙卷个例偏少, 没有可以做平均合成分析的条件, 在此不着重分析。

由此可见, 适宜龙卷发生的地区有属于自己的天气形势场。华东地区为“副高外缘冷涡型”, 华南地区为“副高外缘暖高前缘型”, 但都形成了有利于龙卷发生的环境场特征, 包括空气湿润、层结不稳定、有一定潜在不稳定能量、达到超级单体风

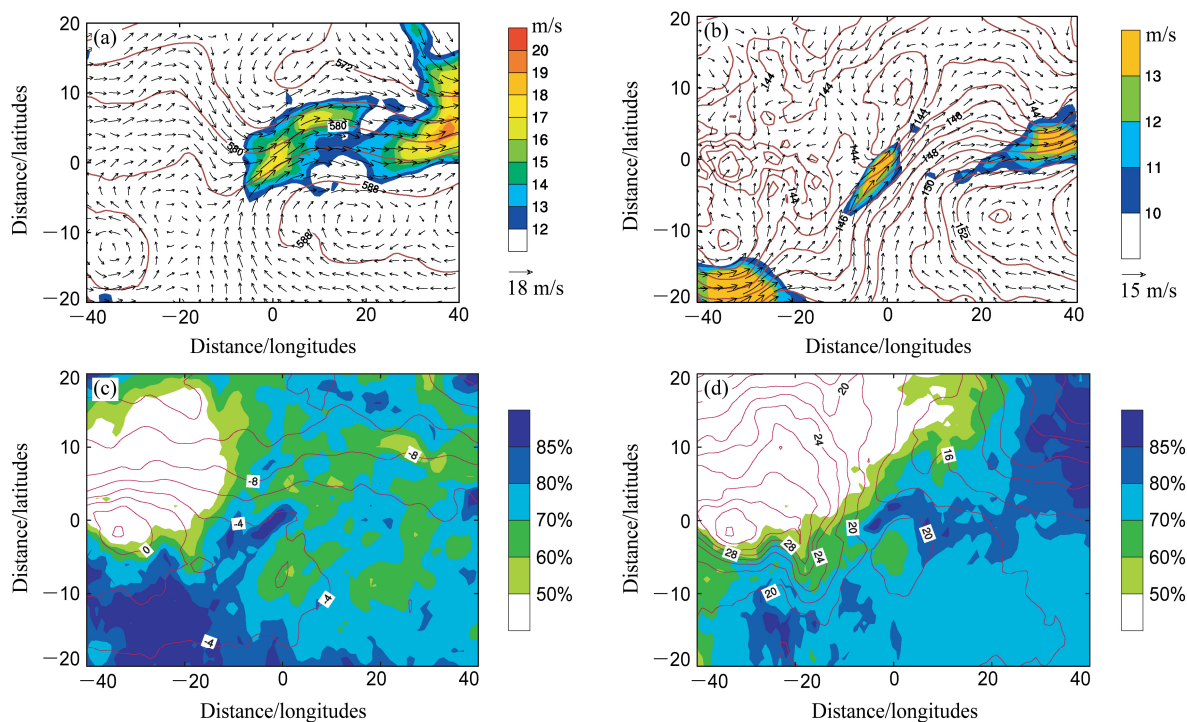


图1 华东地区 (a) 500 hPa 和 (b) 850 hPa 位势高度场 (单位: dagpm)、全风速 (填色)、风场 (箭头); (c) 500 hPa 和 (d) 850 hPa 等温线 (单位: °C)、相对湿度 (填色)

Fig. 1 Geopotential heights (dagpm), full wind speeds (shadings), and wind fields (vectors) at (a) 500 hPa and (b) 850 hPa and isotherm (°C) and relative humidity (shadings) at (c) 500 hPa and (d) 850 hPa in East China

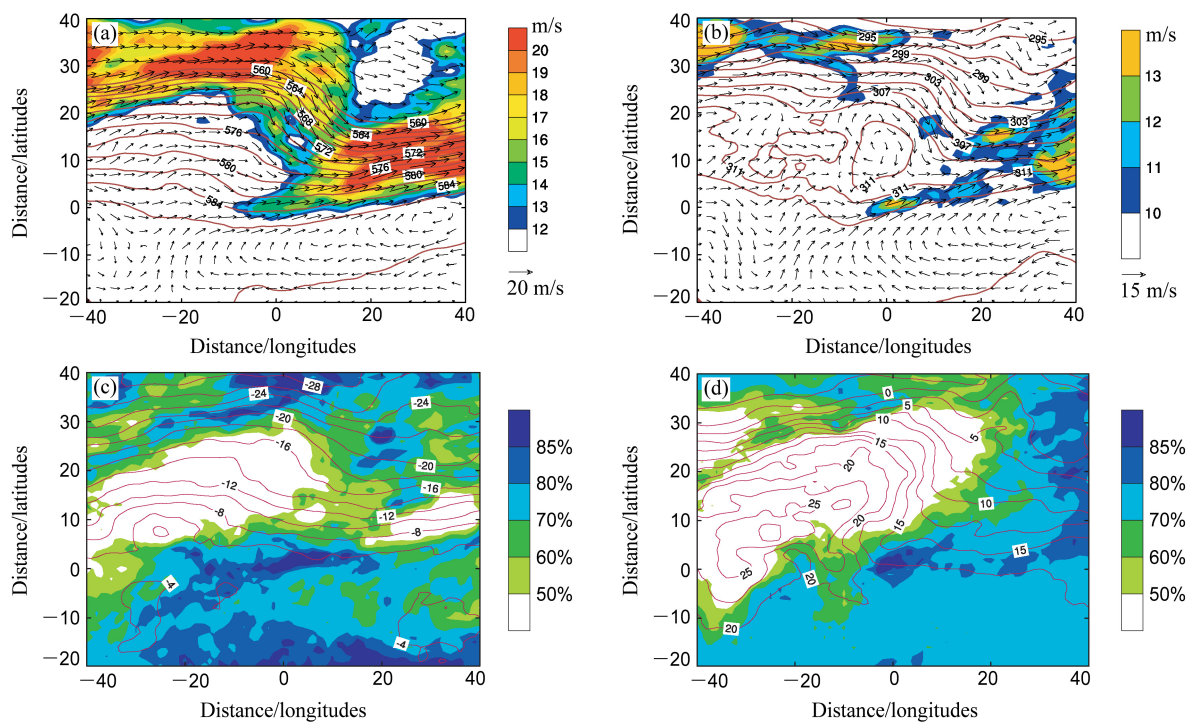


图2 华南地区 (a) 500 hPa 和 (b) 700 hPa 位势高度场 (单位: dagpm)、全风速 (填色)、风场 (箭头); (c) 500 hPa 和 (d) 850 hPa 等温线 (°C)、相对湿度 (填色)

Fig. 2 Geopotential heights (dagpm), full wind speed (shadings), and wind field (vectors) at (a) 500 hPa and (b) 700 hPa and isotherm (°C) and relative humidity (shadings) at (c) 500 hPa and (d) 850 hPa in South China

暴所需的风切变。因为综合达到了上述条件,才发生了龙卷。特殊的天气背景提供了适合龙卷发生的环境,同样达到一定的环境参数水准,可以预报龙卷的发生,两者相辅相成。

3.1.2 龙卷预报指数的建立

建立预报指标的具体方法为综合各类因子,同时用 FNL 资料计算这些因子,与实际探空以及没有龙卷发生的平均环境场特征进行对比分析,挑出适用的因子做参数、确定阈值并初步建立适合中国预报龙卷的通用指标。每个龙卷发生地不发生龙卷的平均场(非龙卷)为龙卷发生地各个参数在 2004~2009 年每一年间除去发生时次的年平均,即 121 个龙卷对应 121×6 个非龙卷状态。

由上节可知,高的对流有效位能和大的垂直风切变是龙卷发生有利且必要条件。又有 Brooks et al. (2003) 曾指出,对于强雷暴及龙卷,有利的环境条件有 3 个: 1) C_{APE} 大于 100 J kg^{-1} ; 2) 中层 700~500 hPa 温度递减率 $\geq 6.5 \text{ K km}^{-1}$; 3) C_{APE} 和 0~6 km 风切变的组合在公式 (1) 中大于 8.36:

$$2.86 \lg S_6 + 1.79 \lg C_{APE} = 8.36, \quad (1)$$

其中 S_6 (单位: m s^{-1}) 为 0~6 km 垂直风切变。龙卷的发生首先要满足强雷暴的这 3 个条件。在中国 (见图 3), C_{APE} 值普遍很大,有无龙卷的最适区分点在 550 J kg^{-1} 附近,统计得出龙卷个例有 79% 的 C_{APE} 值达到 550 J kg^{-1} , 非龙卷情况只有 3% 达到此值,百分比差异达到最大;温度递减率在 $5 \sim 6 \text{ K km}^{-1}$ 的占大多数,但与美国相比其数值偏小,有无龙卷的区分点在 5.8 K km^{-1} , 只可惜两者重叠面积大,有无龙卷的区别并不明显,因此我们认为该指标在我国无实际作用。0~6 km 风切变需要结合 C_{APE} 值,图 4 中指标线 1 (细直线) 对应公式 (1), 尽管所有非龙卷个例都在指标区下,但也只有 56% 的龙卷个例位于指标区上,有无龙卷百分比之差未达到最大。为使指标能更好地地区分中国地区有无龙卷的状况,建立一个新指标 (图 4 中粗直线):

$$1.637 \lg S_6 + 2.316 \lg C_{APE} = 8.30, \quad (2)$$

在新指标下,71% 的龙卷个例位于指标区上,而非龙卷仅有 0.3% 在指标区上,有无龙卷百分比之差达到最大。对于某个时刻某个单点其环境参数在粗直线右上方,表示更有利于强雷暴、龙卷的发生。

对于龙卷,除了要满足以上指标外,Brooks et al. (2003) 指出还需要考虑 0~1 km 垂直风切变和抬升凝结高度。并且,地面以上最低 1 km 风垂直切

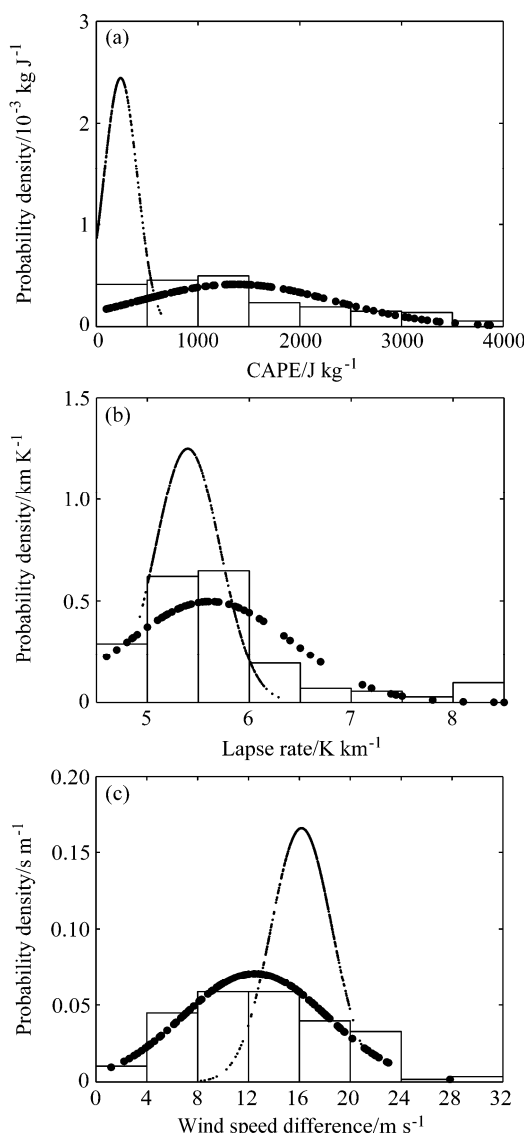


图 3 2004~2009 年间 (a) CAPE 和 (b) 700~500 hPa 温度递减率、(c) 0~6 km 风切变的概率密度 (直方图和粗线代表龙卷, 细线代表非龙卷的平均态)

Fig. 3 Probability density distributions of (a) convective available potential energy (CAPE), (b) 700~500 hPa lapse rate, and (c) vertical wind shear between the surface and 6 km height during 2004~2009 (histograms and thick lines represent tornadoes while the thin lines represent the average non-tornadoic situations)

变和抬升凝结高度的组合可以有效地区分强雷暴中龙卷和非龙卷环境,即在公式 (3) 中两者组合大于 250 (Craven et al., 2002a, 2002b):

$$150S_1 - L_{mLC} = 250, \quad (3)$$

其中, S_1 代表 0~1 km 垂直风切变 (单位: m s^{-1}), L_{mLC} 表示抬升凝结高度 (单位: m)。将 0~1 km 垂直风切变和抬升凝结高度以散点图形式表示,可以清楚地看出两者与龙卷环境的关系 (图 5)。有无

龙卷的百分比分别为 52%~19%，仅相差 33%。用与修正公式 (1) 相同的方法修正公式 (3)，找出在中国区分龙卷与非龙卷的指标 (图 5 中粗直线):

$$250S_1 - L_{\text{mLLC}} = 1000. \quad (4)$$

使用该指标线区分有无龙卷的百分比分别为 43%~0.8%，两者之差达到最大。对于某个时刻某个单点其环境参数在图 5 中粗直线左上方，表示更倾向于龙卷性环境。再单看两个量，我国有无龙卷的抬升凝结高度都普遍低于 1000 m (图 6a)，可能抬升凝结高度这个指标在中国与美国的情况有差异。根据国内外最近的研究和分析发现，抬升凝结高度高于 1200 m 会大大降低龙卷产生的概率，Thompson et al. (2002b) 统计发现产生 F2 级以上强

龙卷的平均抬升凝结高度低于 981 m，弱龙卷的平均抬升凝结高度为 1179 m，若抬升凝结高度大，较低的边界层湿度导致蒸发冷却，下沉出流加强，低层中气旋会被切断。为排除不利于龙卷生成的风暴环境，根据图 5a 剔除 L_{mLLC} 大于 1000 m 的情况。0~1 km 风切变略小，有无龙卷的概率密度分布曲线的交点在稍大于 6 附近，但此值将遗漏较多龙卷个例。为了使指标减少漏报的情况，对于单个指标需半数以上个例达标，其他各指标均超过半数，实际 S_1 定为 5 m s^{-1} 时，龙卷个例有超过 50% 达标且此值接近国外统计出现强龙卷的 0~1 km 垂直风切变下限。总体来说，龙卷主要发生在较低抬升凝结高度和较大低层垂直风切变的条件下。与美国相

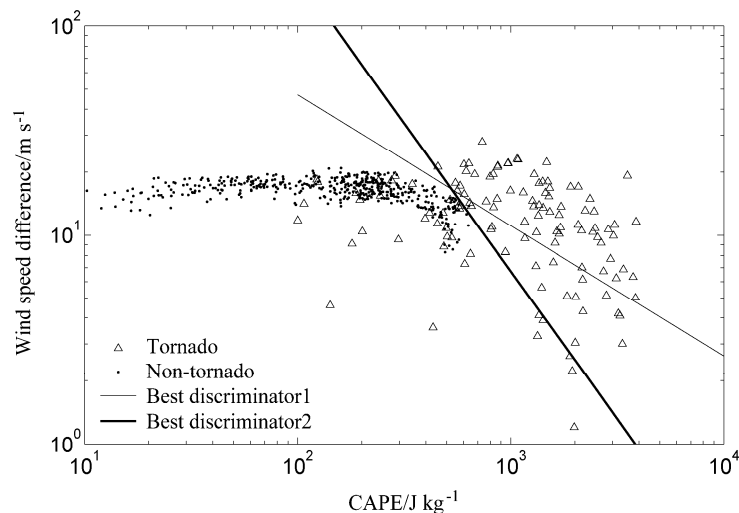


图 4 2004~2009 年间龙卷与非龙卷 0~6 km 风切变和 CAPE 散点式分布。指标线 1 即公式 (1)，指标线 2 即公式 (2)

Fig. 4 Magnitude of vertical wind shear between the surface and 6 km and CAPE for tornadoes and the average non-tornadic situations in China during 2004–2009. Best discriminator 1 and 2 are Equations (1) and (2), respectively

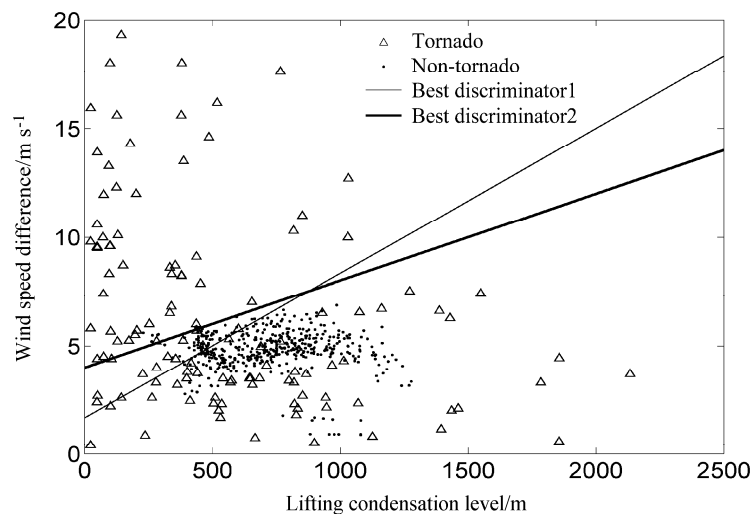


图 5 同图 4，但为 0~1 km 风切变和抬升凝结高度

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for vertical wind shear between the surface and 1 km and lifting condensation level

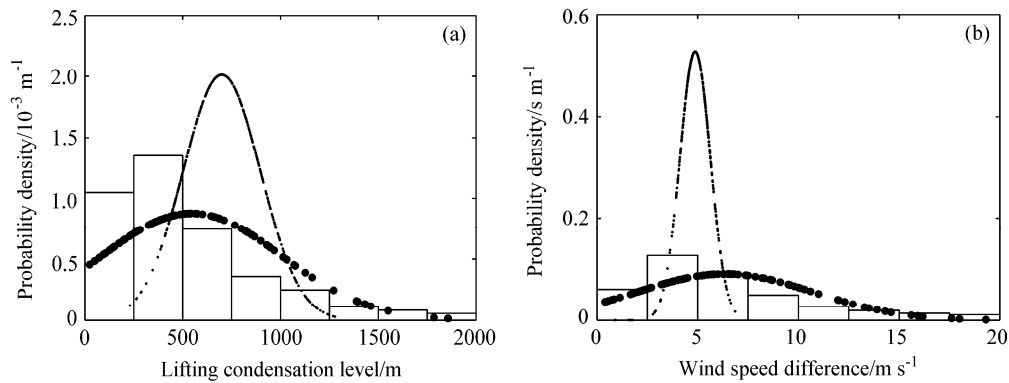


图6 2004~2009年间(a)抬升凝结高度、(b)0~1 km风切变的概率密度(直方图和粗线代表龙卷,细线代表非龙卷的平均态)
Fig. 6 Probability density distribution of (a) the lifted condensation level and (b) the vertical wind shear between the surface and 1 km during 2004–2009 (histograms and the thick lines represent tornadoes while the thin lines represent the average non-tornadoic situation)

比,都需要较低的抬升凝结高度,但低层垂直风切变明显没有美国大。

3.2 结果与检验

3.2.1 通用指标

做龙卷预报时,对于单个站点或者格点首先要满足有利于雷暴系统产生的条件,即同时满足 C_{APE} 和0~6 km风切变的组合在公式(2)中大于8.30和对流有效位能大于 550 J kg^{-1} (见图7中第一个方框内容),如果有一个不满足,就不用再判别其他量,环境不适合龙卷发生;如果此方框条件符合,再看是否在0~1 km风切变和抬升凝结高度的组合线上方,并排除0~1 km风切变小于 5 m s^{-1} 和抬升凝结高度大于1000 m的情况(第二个方框内容),满足时则预警此处将有龙卷发生。实际运用时可结合雷达图、卫星图、当地地形等进一步判定。

3.2.2 结果检验

对年鉴上的龙卷进行研究后发现:一天中,午后为高发时段;一年中,集中在春、夏两季,春季在华南易发生,夏季在东北、华北、江淮等地易发生。从空间分布来看,90%以上个例发生在我国东部地区,集中在华东、华南和东北地区(图8),这些地区也是我国的龙卷多发地。由于建立指标时用的是2004~2009年的龙卷个例,本文对其后两年进行检验与对比分析。

用FNL资料及通用指标对2010~2011年间56个龙卷做检验,表1列出了通用指标和各条件满足情况, C_{APE} 命中百分比为70%,小于2004~2009年的79%; C_{APE} 、 S_6 的结合命中率为66%,小于2004~2009年5个百分点,其余指标命中率接近。最后,在所有龙卷事件中,2010~2011年间利用此

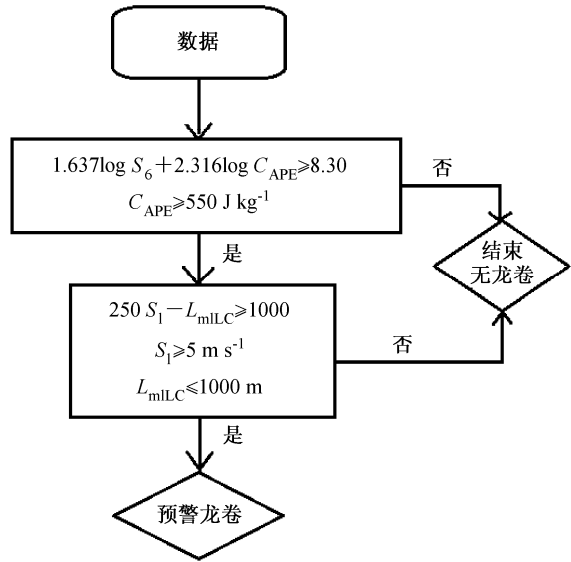


图7 龙卷预警流程
Fig. 7 Flow diagram of tornado forecasting

表1 通用龙卷指标及其对2004~2011年中国实际龙卷个例的检验
Table 1 Universal tornadoic indexes and their tests in China during 2004–2011

指标	达标数		命中率	
	2004~	2010~	2004~	2010~
	2009年	2011年	2009年	2011年
指标1: 对流有效位能 $C_{APE} \geq 550\text{ J kg}^{-1}$	95	39	79%	70%
指标2: $1.637\lg S_6 + 2.316\lg C_{APE} \geq 8.30$	86	37	71%	66%
指标3: $250S_1 - L_{mLC} \geq 1000$	52	24	43%	43%
指标4: $S_1 \geq 5\text{ m s}^{-1}$	62	29	52%	52%
指标5: 抬升凝结高度 $L_{mLC} \leq 1000\text{ m}$	103	48	85%	86%
强雷暴: 同时满足指标1、2	85	35	70%	64%
龙卷: 同时满足指标1~5	27	13	22%	23%

综合指标能预报出来的占 23%，与建立指标的 2004~2009 年接近，虽然概率仍偏低但是较沿用前人的指标时准确率提升，指标也更符合我国情况。

用 FNL 资料及通用指标对全国的龙卷进行潜势预测（图 9），2010 年高发区（红色，一年中预测发生龙卷个数超过 12 个）主要在江苏中部、浙江北部、安徽东部、湖南湖北江西 3 省接壤地区，广东广西、海南以及福建沿海区域。次高发区（黄色，预测个数在 9~12 个；绿色，预测个数在 5~8 个）在上述这些省份的其他地区，我国东北、华北也有发生龙卷的可能（蓝色，有可能发生，预测个数在 1~4 个）。而实际情况，2010 年广东、江苏、黑龙江、安徽是龙卷发生最多的省份。其他涉及的地区和预测的基本一致，除了广西、浙江地区为空报，漏报较少。2011 年的潜势预测高发区在江

苏中南部、安徽中东部和广东广西南部。湖北、江西、山东和东北三省也有龙卷发生的可能。实际情况是江苏最多，广东次之，湖北居第三位，潜势预报除了四川、河北、内蒙古的龙卷不能预报出来，其他地区不漏报，而这些地区都是偏内陆，可能新的指标对于这些地区适用性没有东部和沿海的省份高。

4 结论与讨论

通过对 2004~2009 年间华东 10 个典型龙卷、华南 8 个典型龙卷事件的平均天气背景和环境场特征分析，找出在中国适合发生龙卷的参数条件。结合国内外已有参数，对 2004~2009 年间 121 个龙卷个例及 726 个非龙卷平均态进行分析，确定出适合中国所用的参数及区分有无龙卷的阈值，初步建立起一个适用于中国的龙卷潜势预报通用指标，并对 2010~2011 年进行预测检验。主要结论如下：

（1）有利于龙卷产生的平均态天气形势在华东为“副高边缘冷涡型”，在华南为“副高边缘暖高前缘型”。不同的天气形势都形成了适于龙卷发生的环境场特征：中低层湿润，下湿上干的不稳定层结，大的对流有效位能，0~6 km 风切变都接近超级单体风暴所需的风切变下限（ $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ），并且华东（ $2.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）略大于华南（ $2.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）；0~1 km 风切变超过超级单体风暴所需的风切变下限（ $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ），同样华东（ $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）大于华南（ $6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）。

（2）龙卷预报指标首先需要满足强雷暴的条

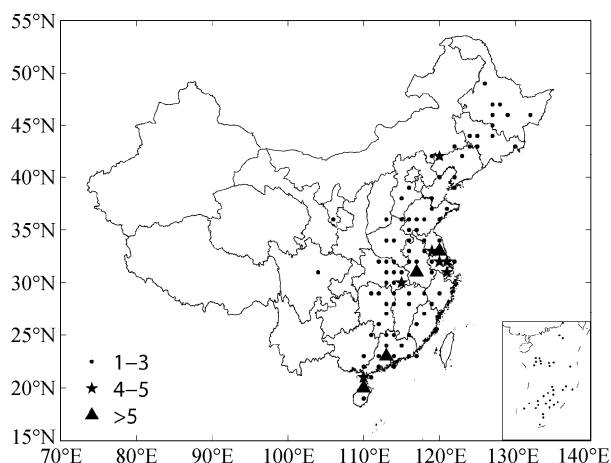


图 8 2004~2011 年龙卷发生个数

Fig. 8 Numbers of tornadoe in China during 2004–2011

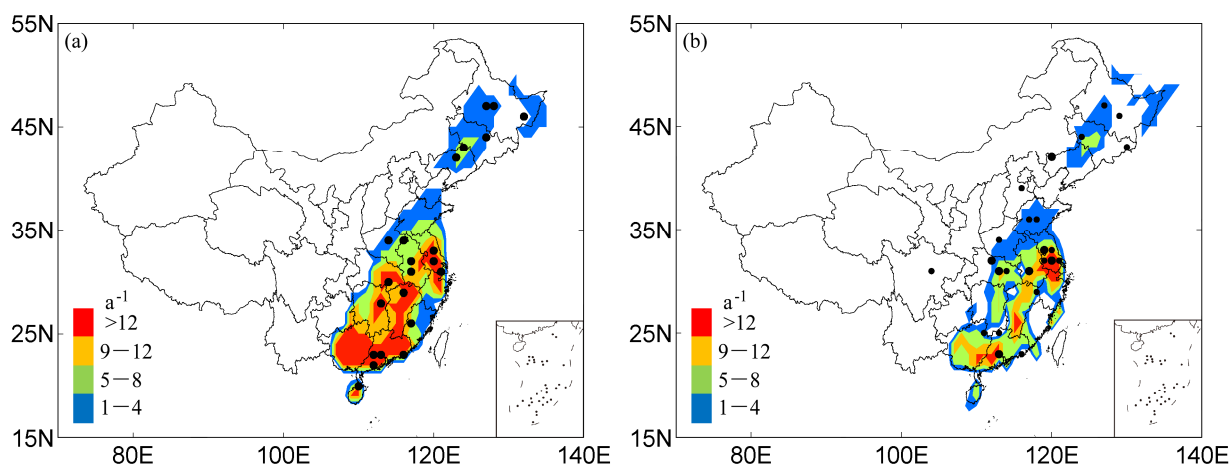


图 9 (a) 2010 年和 (b) 2011 年实际龙卷（点状）和指标预测环境潜势分布（填色）

Fig. 9 Distributions of observed tornadoes (dots) and forecast of universal tornado index (shaded) in (a) 2010 and (b) 2011

件, 即 1) $C_{APE} \geq 550 \text{ J kg}^{-1}$, 2) $1.637 \lg S_6 + 2.316 \lg C_{APE} \geq 8.30$; 在此基础上, 进一步引入区分强雷暴中龙卷与非龙卷的参数, 即 3) $250S_1 - L_{mLC} \geq 1000$, 4) $S_1 \geq 5 \text{ ms}^{-1}$, 5) $L_{mLC} \leq 1000 \text{ m}$ 。

(3) 从龙卷预警角度出发, 初步建立了一个适用于我国的龙卷通用指标, 满足通用指标参数即可发布龙卷预警。本文所建立的指标对龙卷的命中率在 23% 左右。从空间分布看, 在广西、浙江等省份空报较多, 当地的地形可能有影响; 内陆的一些省份有漏报的现象, 考虑是否有其他因素的影响, 致使对这些指标的要求可降低, 具体有待以后研究, 如在中国分区建立龙卷潜势预报指标等。

(4) 在中国不需要较大的中层温度递减率就可产生龙卷, 有无龙卷其抬升凝结高度都偏低, 而且低层垂直风切变没有美国大。究其原因: 一是美国的有利地形和地理位置形成大的温度递减率和大的风切变(落基山脉传输的干冷空气和春季加拿大的冷空气与南部墨西哥湾提供的暖湿水汽交汇使得同一垂直高度中大气温度存在着巨大差异, 平坦地形低层风速大系统容易维持), 二是中国东部处于太平洋西海岸, 湿度大, 不稳定能量相对来说堆积多, 加上潜热释放的影响, 致使产生同一种天气现象所需的条件不同。

(5) 利用 NCEP 再分析资料可能存在一些问题, 但是考虑到探空一天只有 2 次, 只能采用 NCEP 再分析资料的折中方案, 应该不影响所得出的定性结论。

中国幅员辽阔, 各地气候特征、地理地貌、城市发展都有差异, 本文所做的这个指标在整个中国范围内使用仍有一定的局限, 有待结合其它参数、资料(如雷达、卫星等)或大气环境因子(如气溶胶)等进一步完善指标; 另外, 未来也希望能对数据资料做订正, 旨在建立一套适用于中国的龙卷短时预警体系, 亦希望可以根据已有的各种数据分析更长年份, 对未来进行预估, 分析未来龙卷的发展趋势。

参考文献 (References)

- Brooks H E, Lee J W, Craven J P. 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data [J]. *Atmospheric Research*, 67–68: 73–94.
- 陈宝君, 郑凯琳, 郭学良. 2012. 超级单体风暴中大冰雹增长机制的模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 17 (6): 767–778. Chen Baojun, Zheng Kailin, Guo Xueliang. 2012. Numerical investigation on the growth of large hail in a simulated supercell thunderstorm [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (6): 767–778.
- Church C, Burgess D, Doswell C, et al. 1993. Tornado spin-up beneath a convective cell: Required basic structure of the near-field boundary layer winds [M]// Walko R L. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards*, 79: 89–95.
- Craven J P, Brooks H E, Hart J. 2002a. A baseline climatology of sounding-derived parameters associated with deep, moist convection [C]// 21st Conference on Severe Local Storms. San Antonio, Texas: Amer. Meteor. Soc., 643–646.
- Craven J P, Jewell R E, Brooks H E. 2002b. Comparison between observed convective cloud-base heights and lifting condensation level for two different lifted parcels [J]. *Weather and Forecasting*, 17 (4): 885–890.
- Craven J P, Brooks H E. 2005. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep, moist convection [J]. *Natl. Weat. Dig.*, 28: 13–24.
- 冯婧, 周伟灿, 徐影. 2012. 1980~2009 年我国龙卷事件变化 [J]. *气候变化研究进展*, 8 (3): 183–189. Feng Jing, Zhou Weican, Xu Ying. 2012. Change characters of tornados in China in 1980–2009 [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese)*, 8 (3): 183–189.
- 纪晓玲, 王式功, 穆建华, 等. 2010. 宁夏雷暴天气过程划分及环流分型和环境场特征 [J]. *应用气象学报*, 21 (3): 329–334. Ji Xiaoling, Wang Wugong, Mu Jianhua, et al. 2010. Classification of thunderstorm processes with the circumfluence types and environmental field characteristics in Ningxia [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (3): 329–334.
- Johns R H, Davies J M, Leftwich P W. 1990. An examination of the relationship of 0–2 km AGL “Positive” wind shear to potential buoyant energy in strong and violent tornado situation [C]// 16th Conference on Severe Local Storms. Kananaskis Park, Alberta, Canada: Amer. Meteor. Soc., 593–598.
- Lemon L R, Doswell III C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 107: 1184–1197.
- 刘娟, 朱君鉴, 魏德斌, 等. 2009. 070703 天长超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征 [J]. *气象*, 35 (10): 32–39. Liu Juan, Zhu Junjian, Wei Debin, et al. 2009. Doppler weather radar typical characteristics of the 3 July 2007 Tianchang Supercell Tornado [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 35 (10): 32–39.
- 刘勇, 刘子臣, 马廷标, 等. 1998. 一次飑线过程中龙卷及飑锋生成的中尺度分析 [J]. *大气科学*, 22 (3): 326–335. Liu Yong, Liu Zichen, Ma Tingbiao, et al. 1998. A meso-scale analysis of tornado and squall front forming in a squall line process [J]. *Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese)*, 22 (3): 326–335.
- MacGorman D R, Burgess D W. 1994. Positive cloud-to-ground lightning in tornadic storms and hailstorms [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (8): 1671–1679.
- Markowski P M, Richardson Y. 2010. *Hazards Associated With Deep Moist Convection [M]// Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*. Chichester, UK: John Wiley & Sons. Ltd, 273–292.
- Ostby F P. 1992. Operations of the national severe storm forecasting center [J]. *Wea. Forecasting*, 7: 546–563.

- Ostby F P. 1999. Improve accuracy in severe storm forecasting by the severe storms unit during the lasting 25 years: Then versus new [J]. *Wea. Forecasting*, 14: 526–543.
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A. 2002b. An assessment of supercell and tornado forecast parameters with RUC-2 model close proximity, sounding [C]// San Antonio. Preprints 21st Conference on Severe Local Storm. San Antonio: Amer. Meteor. Soc., 595–598.
- 王笑芳, 丁一汇. 1994. 北京地区强对流天气短时预报方法的研究 [J]. *大气科学*, 18 (2): 173–183. Wang Xiaofang, Ding Yihui. 1994. Study on method of short-range Forecast of severe convective weather in Beijing area [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 18 (2): 173–183.
- 魏文秀, 赵亚民. 1995. 中国龙卷风的若干特征 [J]. *气象*, 21 (5): 36–40. Wei Wenxiu, Zhao Yamin. 1995. The characteristics of tornadoes in China [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 21 (5): 36–40.
- 吴海英, 沈树勤, 蒋义芳, 等. 2009. 龙卷诱发原因的实例分析 [J]. *气象科学*, 29 (3): 335–341. Wu Haiying, Shen Shuqin, Jiang Yifang, et al. 2009. Analysis on the inducing cause of the tornado [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 29 (3): 335–341.
- 谢建标, 林良勋, 颜文胜, 等. 2007. 广东 2005 年“3.22”强飚线天气过程分析 [J]. *应用气象学报*, 18 (3): 321–329. Xie Jianbiao, Lin Liangxun, Yan Wensheng, et al. 2007. Dynamic diagnosis of an infrequent squall line in Guangdong on March 22, 2005 [J]. *Journal of applied Meteorological Science* (in Chinese), 18 (3): 321–329.
- 许遐祯, 潘文卓, 缪启龙. 2010. 江苏省龙卷风灾害易损性分析 [J]. *气象科学*, 30 (2): 208–213. Xu Xiazhen, Pan Wenzhuo, Miao Qilong. 2010. Vulnerability analysis of tornado disaster in Jiangsu [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 30 (2): 208–213.
- 许小峰. 2005–2012. 冰雹与龙卷风 [M] //余卫平. 中国气象灾害年鉴. 北京: 气象出版社. Xu Xiaofeng. 2005–2012. Hail and tornado [M] //Yu Weiping. Year-book of Meteorological Disasters in China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press.
- 姚叶青, 魏鸣, 王成刚, 等. 2004. 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*, 27 (5): 587–594. Yao Yeqing, Wei Ming, Wang Chenggang, et al. 2004. A case analysis of tornado based on Doppler radar data and lightning location data [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 27 (5): 587–594.
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 2006. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析 [J]. *高原气象*, 25 (5): 914–924. Yu Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Zhang Aimin, et al. 2006. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 25 (5): 914–924.
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究 [J]. *大气科学*, 32 (3): 508–522. Yu Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Liao Yufang, et al. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (3): 508–522.
- 张玲, 张艳玲, 陆汉城, 等. 2008. 不稳定能量参数在一次强对流天气数值模拟中的应用 [J]. *南京气象学院学报*, 31 (2): 192–199. Zhang Ling, Zhang Yanling, Lu Hancheng, et al. 2008. Application of instability energy parameters to a severe convective storm forecast [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 31 (2): 192–199.
- 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究 [J]. *高原气象*, 28 (3): 617–625. Zheng Yuanyuan, Zhu Hongfang, Fang Xiang, et al. 2009. Characteristic analysis and early warning of tornado supercell storm [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 28 (3): 617–625.