

湖南省永州市 2006 年 4 月 10 日龙卷分析

唐小新¹ 廖玉芳²

(1. 南京大学大气科学系, 210093; 湖南省永州市气象台; 2. 湖南省气候中心)

提 要: 利用灾后调查资料、常规天气图及永州多普勒雷达资料, 分析 2006 年 4 月 10 日凌晨发生在湖南省双牌县理家坪乡出现的严重风灾。结果表明: 这是永州市自有气象记载以来首次确认的龙卷灾害; 该龙卷为超级单体龙卷, 具有非常经典的钩状回波特征; 强的水平风垂直切变和热力不稳定环境促使了超级单体中的中气旋的产生, 中低层的辐合最终在中气旋中形成龙卷。

关键词: 龙卷 超级单体 钩状回波 涡度

An Analysis of a Tornado in Yongzhou, Hunan Province

Tang Xiaoxin¹ Liao Yufang²

(1. Atmospheric Science department of Nanjing University, Nanjing 210093, China; Meteorological Observatory of Yongzhou city, Hunan Province; 2. Climate Center of Hunan Meteorological bureau.)

Abstract: The severe wind which took place in the morning of April 10, 2006 in Lijiaping town, Shuangpai County, Hunan Province was analyzed based on the post-disaster inspection data, conventional weather data and Yongzhou Doppler radar data. It shows that the severe wind was the first confirmed tornado in Yongzhou City in normal meteorological records. It was a supercell tornado, and had classical tornado hook characteristics in the radar base reflectivity. The strong vertical wind shear and thermodynamic instability resulted in a meso-cyclone in the supercell. The convergence of on low and middle-level atmosphere in the mesocyclone resulted in the tornado finally.

Key Words: tornado supercell hook echo vorticity equation

引 言

在我国, 长江三角洲、苏北、鲁西南、豫东等平原、湖沼区以及雷州半岛等地为龙卷易

发区^[1]。总体上说, 龙卷出现的频率不高, 例如鹿世瑾在分析福建龙卷风的活动特点时, 在 1949—1996 年只找到 12 个龙卷个例^[2], 平均 4 年 1 例; 又如山东省在 1950—2000 年共有 351 次龙卷^[3], 平均每年不足 7

个。在 2006 年以前,湖南省永州市甚至没有 1 例龙卷灾害的气象记载^[4]。长期以来,由于我国监测手段比较落后,因而龙卷难以观测,很多与龙卷相关的天气现象有时被蒙上神秘色彩(如 2006 年 1 月 23 日 21:58 CCTV-10《走近科学》栏目播出的贵州省名噪一时的“空中怪车”事件)。新一代多普勒天气雷达布网以后,提高了对强对流风暴的监测预警能力^[5],这种状况开始得到改善,使得龙卷灾害能够更多地被认识和研究。

我国对龙卷个例的研究较多,有些龙卷与热带风暴有关^[6-8],有些与超级单体有关^[9-10],有些则与飚线有关^[11-13]。本文利用永州新一代多普勒天气雷达(CINRAD/SB)的资料,研究 2006 年 4 月 10 日凌晨出现在湖南省双牌县理家坪乡的严重风灾。

1 龙卷的确认

2006 年 4 月 10 日 2 时左右,在永州市双牌县南部的理家坪乡(25.66°N, 111.66°E)发生了较严重的风灾,根据灾情调查(来自双牌县气象局),风灾从理家坪乡新市场开始,向东北方向经乡中学,到达中心小学,然后折向东南方向的田野,呈一条狭长的向右斜的“厂”字形路径分布(图 1)。灾情是在一阵闪电之后发生的,沿着这条路径,有篮球架被吹离原位、小船被吹沉,毁坏的物品有十几处屋顶和围墙、成片的通讯及供电水泥杆、变压器和卫星电视天线也有损坏,折断的树干、树枝和连根拔起的浅根大树更是随处可见。受灾点之间均相隔有十几到几十米不等的距离,这与浙江省洪家国家基准气候站经历的一次龙卷非常相似^[14]。灾情图片显示(图略),有些受损物向路径的偏左方向倾倒,而有些则是往偏右方向倾倒。调查表明,这次风灾沿一条宽度不足 20m、长度超过 2.5km 的路径呈长条形折线分布,沿途受损

物的倾倒方向显示出一定程度的风向旋转特征,这些特征与龙卷非常相似。

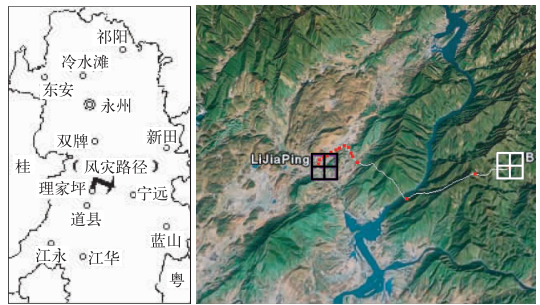


图 1 2006 年 4 月 10 日理家坪龙卷路径

左图箭矢和右图白色线条表示龙卷的路径,

右图中深色“田”字框为理家坪位置,

浅色“田”字框为龙卷结束位置

永州雷达在理家坪的正北略偏西方向,距离 63km,4 月 10 日 01 时 56 分永州雷达在理家坪乡探测到了中气旋及 TVS 特征;6 分钟后这些特征迅速向东移过了双牌水库,移动距离 8km,其中的中气旋特征则减弱成三维相关切变;再过 12 分钟它们均减弱消失(图略)。从整个过程看,TVS 的位置和演变特征与风灾的情况十分一致,表明发生了龙卷。

结合灾后调查和多普勒雷达实况图像,可以确认,湖南永州市双牌县理家坪乡在 2006 年 4 月 10 日 1 时 56 分到 2 时 08 分发生了龙卷,根据灾害受损的具体情况,对照 Fujita 的龙卷等级标准^[15],当属 F₀ 级,是一个 F₀ 级的陆龙卷。

2 天气背景

2.1 大尺度天气环境

这是一次冷空气影响的天气过程,4 月 9 日 20 时 850hPa 高空图(图 2a)上,在重庆与长沙之间有一低值中心,该中心的南侧为冷切变、东侧为暖式切变;在上海的西北也有一个“人”形切变;广东中南部到福州有 $12\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

的低空急流。在500和700hPa的天气图上,槽线和切变的位置与850hPa一致(图略)。4月10日2时的地面图(图2b)上显示,冷锋位

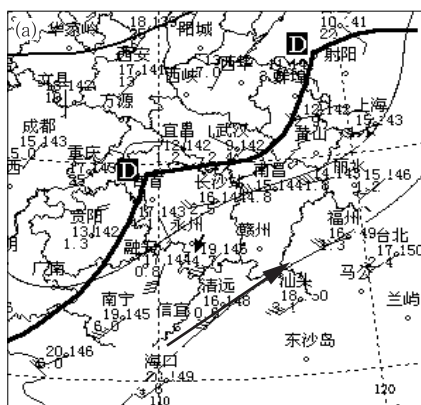


图2a 2006年4月9日20时850hPa天气图

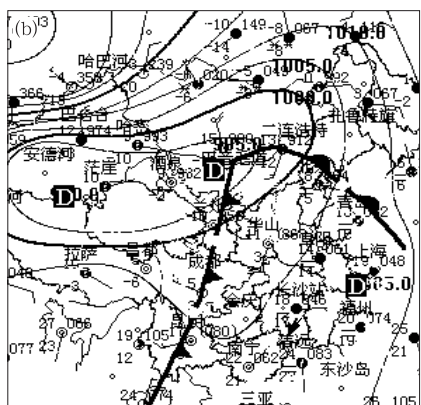


图2b 2006年4月10日2时地面天气图
(图中箭头为理家坪)

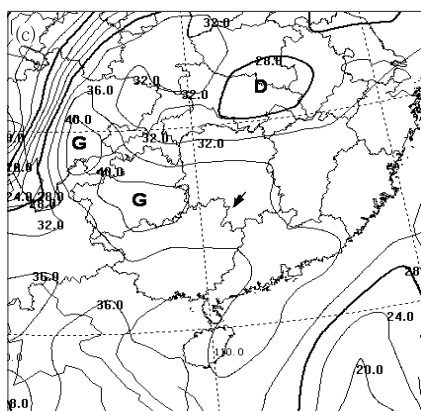


图2c 2006年4月9日20时KI指数分析图
(箭头为理家坪)

于二连浩特西侧至昆明一线(冷锋前后的温差有 $7\sim 8^{\circ}\text{C}$),二连浩特到济南一线有一暖锋。由4月9日20时的KI指数分析图(图2c)可见,湖南南部的KI值均超过 36°C ,理家坪附近更是接近 40°C ,积累了大量的热力不稳定能量。可见,在龙卷发生前,理家坪处于深厚的暖区、低空急流的左侧,这种天气形势,促使了强对流的形成和发展,触发了理家坪乡的龙卷。

2.2 垂直风切变和温度平流

由4月9日20时的高空资料,可求得永州东侧最近的探空站郴州的抬升凝结高度为836.8hPa,西侧最近的桂林站的抬升凝结高度为886.1hPa,可见对流云可能被触发的高度很低,而郴州和桂林的CAPE值均很大,分别为 $803.0\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2253.6\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图略),说明大气是极不稳定的。图3d为永州雷达生成的4月9日21时13分至21时31分的风廓线图,从中可见在3.4km以下的中低层永州的风速都很大(在 $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上),且风向由SSE到SSW再到SW,随高度呈顺时针旋转。根据Brooks等的定义^[16],当垂直风切变小于 0.005s^{-1} 时为弱,在 $0.005\sim 0.015\text{s}^{-1}$ 时为中等强度,大于 0.015s^{-1} 时为很强。在21时31分时,2.4~2.7km高度上的垂直风切变值达到了 0.01667s^{-1} 。因此,在龙卷发生前,永州市有非常强的垂直风切变,有利于对流风暴的产生和发展。在4月9日20时500hPa、700hPa和850hPa的温度平流图上(图3a—3c),湖南西南方向有正中心,其值超过 $8\times 10^{-5}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$,而理家坪附近的温度平流均大于 $4\times 10^{-5}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$,为强的暖平流,促进了热力不稳定能量增加。强的中层垂直风切变和中低层强的暖平流,既有利于对流风暴的发生,又可促进风暴有组织地向强风暴发展。

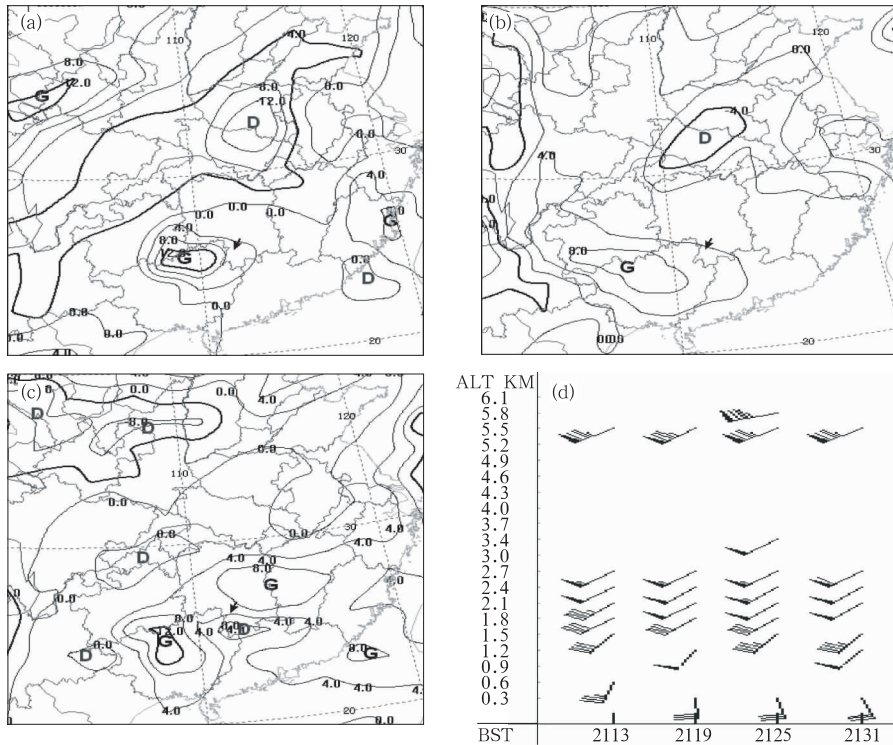


图 3 2006 年 4 月 9 日 20 时 500hPa(a)、700hPa(b)、850hPa(c)温度平流
(单位为 $\times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, 箭头指示理家坪)和龙卷发生 4.5 小时前的永州雷达风廓线(d)

3 雷达资料分析

3.1 大范围回波特征

对永州雷达 4 月 9—10 日的基数据进行回放发现,从 4 月 9 日 21 时 44 分到 4 月 10 日 4 时 30 分,两条东北—西南向长度各为 300 km 以上的飢线自西北向东南影响了永州市所辖的所有 11 个县(区)(永州出现了范围较广的强冰雹、局部的大风和短时暴雨天气),飢线中有多个普通风暴和至少 3 个超级单体,其中的一个超级单体于 4 月 10 日 1 时 50 分移动到了理家坪西北(25.73°N 、 111.63°E),并于 1 时 56 分在理家坪产生龙卷。

3.2 龙卷的回波特征

在 4 月 10 日 01 时 56 分的基本反射率图

上,可在理家坪乡的位置见到 TVS 和中气旋标志,将此处的回波放大(图 4a,见彩页),发现这是一个最大强度超过 61dBz 的强回波区,其南侧有一个非常明显的钩状回波,而理家坪(箭头所指处)就处在这个钩状回波的内侧。

这个强回波区的最大反射率因子值 61dBz,超过 30dBz 的回波面积为 30km^2 左右,远大于 5km^2 (图中 1 个马赛克的面积是 1km^2),达到了风暴单体的标准^[17]。在 4 月 10 日 1 时 56 分的平均径向速度图上(图 4b,见彩页),以理家坪为中心,在 $0.5\sim 2.4^\circ$ 的 3 个低仰角,均可见正负速度对,呈气旋式旋转且有辐合,在直径 5km 的范围内转动速度约为 $25\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,大于 $22.5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的标准,说明确实存在中气旋。因此,这块强回波区是有中气旋相伴的风暴单体,具有超级单体的最主要特征。过它的强中心沿西北—东南方向(过图 4a 中的 A、B 两点,图中用 \times 标注,见

彩页)作反射率因子垂直剖面图(图 4c,见彩页)发现,强中心位于 2km 高空,回波向东南方向有非常明显的穹隆,回波顶高超过 12km,具有很清晰的超级单体形态。很明显,这个强回波区确实是超级单体,具有非常经典的超级单体回波特征^[18]。

3.3 龙卷的演变

龙卷产生于超级单体的中气旋中,4 月 10 日 1 时 50 分在理家坪的西北(图 5,见彩页中 A 点)有较弱的中气旋发展,正负速度相距较远,有明显辐合,超级单体此时形成;当中气旋在 1 时 56 分移动到理家坪时(图 5,见彩页中 B 点),急剧发展,直径明显缩小,正负速度中心相距仅 3km,有辐合,旋转加强,表现出很强的气旋式旋转上升,此时 TVS 得到充分的发展,出现 TVS 特征,通过查看 TVS 的匹配产品(图略),得知在 TVS 的最大涡旋切变为 0.068s^{-1} ,高度仅为 520m,涡旋向下传播,点地后形成龙卷;龙卷继续向东移动,2 时 02 分到达双牌水库的东侧(图 5,见彩页中 C 点),正负速度对相距约为 5km,旋转直径扩大,仍有辐合,最大涡旋切变约为 0.026s^{-1} ,所在高度为 850m,说明旋转迅速减弱,并与龙卷东移时上山爬坡抬升的实况一致;再东移后(图 5,见彩页中 D 点)到了 2 时 08 分,正负速度对相距达 6~7km,而辐合特征也不再明显,此时龙卷减弱到了最后阶段,只有很弱的 TVS;到 2 时 14 分,回波图像中已不见 TVS 和中气旋特征,表明此时龙卷完全消失。

4 理论分析

考虑小尺度的无摩擦运动,可得如下形式的涡度方程^[19]:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} \approx -\left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} + w \frac{\partial \zeta}{\partial z}\right) - \zeta \left(\frac{\partial u}{\partial x} +$$

$$\frac{\partial v}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x}\right) + \left[\frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial(1/\rho)}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\partial(1/\rho)}{\partial x}\right] \quad (1)$$

式(1)中的 ζ 为涡度, u 、 v 、 w 分别为纬向、经向和垂直方向的风速, ρ 为大气密度。右端第一项为涡度平流项,第二项为散度项,第三项为扭转项,第四项为力管项。

扭转项可表示为:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x}\right) = \frac{\partial w}{\partial x} \zeta_x + \frac{\partial w}{\partial y} \zeta_y = \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial z} \times \text{grad} w\right]_z \quad (2)$$

式(2)中的 ζ_x 和 ζ_y 分别为纬向和经向的水平涡度,最右边的式子表示的是水平风矢随高度的变化与垂直速度分量的水平梯度的矢乘在垂直轴 Z 上的投影。此式说明,水平涡度在水平分布不均匀的垂直速度作用下,可扭转成垂直涡度,而强烈的水平风垂直切变可以产生强烈的水平涡度。

力管项可表示为:

$$\frac{\partial p}{\partial x} \frac{\partial(1/\rho)}{\partial y} - \frac{\partial p}{\partial y} \frac{\partial(1/\rho)}{\partial x} = [\text{grad} p \times \text{grad}(1/\rho)]_z \quad (3)$$

式(3)说明斜压大气可产生小尺度的垂直涡度。

在探测到龙卷之前,永州市位于冷锋前面,从永州雷达风廓线图(图 3b)上可见明显的水平风垂直切变,有利于产生较强的水平涡管,由于风暴各处的垂直速度相差很大,在扭转项的作用下,水平涡度转变为垂直涡度。从地面图(图 2b)上可见冷锋前缘有较明显的 ESE 方向的气压梯度和 SSE 方向的气温梯度,考虑力管项的作用,这种斜压状态也有利于产生垂直涡度。这些环境因素直接导致了较强的垂直涡度,使得冷锋前缘爬线中发展出超级单体,并在其中生成强中气旋。

较强垂直涡度产生后,在超级单体中的强烈上升气流又使得中气旋在中低层辐合,

此时散度项发挥作用,垂直涡度进一步增强,最终形成龙卷。龙卷经过理家坪乡后到达附近山地,强烈的地形摩擦很快消耗了龙卷的能量,龙卷只维持了短短的十几分钟。

5 结 论

(1) 利用灾后调查和多普勒天气雷达监测,有可能将龙卷从其他类型的风灾中区分出来,更好地揭示和解释天气现象,提高对小尺度风灾的认知能力。

(2) 多普勒雷达资料和理论分析表明,2006年4月10日1时56分至2时08分在湖南双牌县理家坪乡的龙卷是一个典型的超级单体龙卷,龙卷发生在超级单体的钩状回波处。强的垂直风切变和热力不稳定引发了小尺度较强的中气旋,中低层的辐合则最终在这个中气旋中发展出龙卷。在龙卷移动过程中,起伏较大的山地地形对它具有巨大的摩擦作用,因而龙卷维持时间很短。

(3) CINRAD/SB型多普勒雷达提供的中气旋和TVS产品可以真实反映风暴的旋转特征,可有效而快速地帮助预报员发现和确认雷达图像中的中气旋及龙卷,具有非常可靠的实用性。

致谢:对中国气象局培训中心的俞小鼎教授、双牌县气象局周丽珍女士的热心指导和帮助,在此谨致诚挚的感谢和敬意。

参考文献

- [1] 魏文秀,赵亚民. 中国龙卷风的若干特征[J]. 气象, 1995, 21(5): 36-40.
- [2] 鹿世瑾. 福建龙卷风的活动特点[J]. 气象, 1996, 22(7): 36-39.
- [3] 薛德强,杨成芳. 山东省龙卷风发生的气候特征[J]. 山东气象, 2003, 23(4): 9-11.
- [4] 温克刚,曾庆华,潘志祥,等. 中国气象灾害大典·湖南卷[M]. 北京:气象出版社,2006.
- [5] 俞小鼎,王迎春,陈明轩,等. 新一代天气雷达与强对流天气预警[J]. 高原气象, 2005, 24(3): 456-464.
- [6] 何彩芬,姚秀萍,胡春蕾,等. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 应用气象学报, 2006, 17(3): 370-375.
- [7] 徐继业,姚社庆. 登陆热带气旋引发的龙卷过程之个例分析[J]. 气象, 2001, 27(7): 27-29.
- [8] 陈永林. 上海一次龙卷风过程分析[J]. 气象, 2000, 26(9): 19-23.
- [9] 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.
- [10] 廖玉芳,俞小鼎,郭庆. 一次强对流系列风暴个例的多普勒天气雷达资料分析[J]. 应用气象学报, 2003, 14(6): 656-662.
- [11] 郑媛媛,俞小鼎,方翀等. 2003年7月8日安徽系列龙卷的新一代天气雷达分析[J]. 气象, 2004, 30(1): 38-40, 45.
- [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] 谢梦莉,黄京平,俞炳. 一次罕见的飏线天气过程分析[J]. 气象, 2002, 28(7): 51-54.
- [14] 牟重行,张昌记,潘兴发. 浙江省第一例器测龙卷风记录调查[J]. 浙江气象科技, 2001, 22(1): 41-43.
- [15] James R. McDonald. T. Theodore Fujita: His Contribution to Tornado Knowledge through Damage Documentation and the Fujita Scale[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2001, 82(1): 63-72.
- [16] H. E. Brooks, C. A. Doswell III, R. B. Wilhelmson. The Role of Midtropospheric Winds in the Evolution and Maintenance of Low-level Mesocyclones[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122: 126-136.
- [17] J. T. Johnson, Pamela L. MacKeen, Arthur Witt, et al. The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm[J]. Weather and Forecasting, 1998, 13(2): 263-276.
- [18] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006: 109.
- [19] 寿绍文,励申申,姚秀萍. 中尺度天气学[M]. 北京:气象出版社,2003:187-190.