

# 中国东北龙卷研究:环境特征分析<sup>\*1</sup>

王秀明 俞小鼎 周小刚  
WANG Xiuming YU Xiaoding ZHOU Xiaogang

中国气象局气象干部培训学院,北京,100081  
CMA Training Centre, Beijing 100081, China  
2014-08-19 收稿,2015-01-06 改回.

王秀明,俞小鼎,周小刚. 2015. 中国东北龙卷研究:环境特征分析. 气象学报, 73(3):425-441

Wang Xiuming, Yu Xiaoding, Zhou Xiaogang. 2015. Study of Northeast China tornadoes: The environmental characteristics. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(3):425-441

**Abstract** The Northeast region of China is one of the favorable regions for tornadoes. In order to improve the understanding of the environment favorable for tornado within the Northeast region of China, the environmental elements of the 13 tornadoes of this region which occurred in the past decade are investigated, and the physical processes that dominate the change of the environmental condition are investigated. The study is based on the conventional data, Automatic weather station (AWS) data, satellite data and numerical model analysis data. The environmental characteristics of Northeast China tornadoes are as follows. (1) Tornadoes occurred around the northeast cold vortex, directly affected by the sub-scale short-wave trough at the south part of cold vortex, and often occurred in the trough or behind the forward tilt trough. (2) Compared with tornadoes occurred at summer over the Yangtze-Huaihe river basin and South China, the lapse rate is greater for Northeast China tornadoes, with the temperature difference between 700 hPa and 500 hPa being 20–22 °C, and the difference between 850 hPa and 500 hPa being 30–33 °C. (3) The low level moisture is often not significant with the moist depth thin, the surface dew point as low as 13 °C, the moisture layer often less than 1.5 km, and the dew point at 850 hPa often below 8 °C. And (4) the low-level and middle troposphere jet are strong, 850–925 hPa wind speed is 16–20 m/s, 500 hPa wind speed is 20–25 m/s, and the middle level jet is usually accompanied by dry downdraft. Therefore, the low and deep vertical wind shear are strong, the low-level wind shear is about  $12.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , and the deep vertical wind shear is greater than  $4.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ . Convective storms which produce tornadoes are usually triggered by the boundary convergence line, in which the temperature difference near the convergence line is not obvious, but the dew point difference is distinct. That's to say, northeast China tornadoes are mainly triggered by strong dryline and its associated convergence. Tornadoes usually occur around evening, and the environmental conditions at the morning usually are not favorable for tornadoes, with the environmental parameters changing significantly a few hours before tornadoes occur. The 500 hPa jet and the low-level strong jet are crucial environmental conditions to Northeast China tornadoes. With the strengthening of 500 hPa northwesterly air flow, it transports the high lapse rate layer to its east, and overlaps to the low level moisture area. The low level jet transports warm moisture air, which humidifies the atmosphere significantly and enhances the temperature lapse rate. The tornado positions are usually in the dry section at morning as shown by the 08:00 sounding data, which are away from low level moist tongue about 100 km at its northwestern side, whereas tornadoes mostly occur near the moist tongue around evening as a result of the moist-air advection northwest and the middle level high lapse rate air advection eastward from the Da-xing'an-ling Mountain.

**Key words** Northeast China tornadoes, Environmental conditions, Low level jet, Dryline, Low level moisture increasing

\* 资助课题:国家自然科学基金项目(41175043,41475042)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406002)、国家重点基础研究计划项目(2013CB430103)。

作者简介:王秀明,主要从事雷暴与强对流天气短时临近预报、中尺度数值模拟研究。E-mail: wangxm@cma.gov.cn

通讯作者:俞小鼎,主要从事雷暴和强对流天气临近预报及多普勒天气雷达应用研究。E-mail: xdyu1962@126.com

**摘要** 东北地区是中国龙卷相对多发区之一。为了了解中国东北龙卷发生的环境特征,基于常规观测资料、卫星观测资料、地面加密观测资料和模式分析资料分析了近十年发生在东北的13个龙卷个例的环境特征及龙卷环境形成的物理过程。结果表明,东北龙卷发生的环境具有如下特点:(1)龙卷多发生在东北冷涡背景下,直接影响系统为冷涡南侧次天气尺度短波槽,且常出现在槽区或前倾槽后;(2)较之夏季江淮流域和华南龙卷,东北龙卷环境温度直减率较大,700—500 hPa 温差为20—22℃,850—500 hPa 温差为30—33℃;(3)低层水汽含量及湿层厚度比江淮及华南龙卷显著偏低,地面露点温度可低至13℃,湿层厚度常在1.5 km 以下,850 hPa 露点温度多在8℃以下;(4)龙卷环境中常出现强低空急流(850—925 hPa 风速16—20 m/s)和对流层中层急流(500 hPa 风速20—25 m/s),且对流层中层急流通常与干下沉气流相伴。因此,低层(0—1 km)和深层(0—6 km)风垂直切变均强,低层风垂直切变约 $12.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,深层风垂直切变大于 $4.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。产生龙卷的对流风暴一般由边界层辐合线所触发,辐合线两侧温差不明显而露点差异明显,常表现为干线。也就是说,东北地区龙卷风暴主要由干线及其伴随的强边界层辐合触发。龙卷通常发生在傍晚前后,而从早晨的环境条件通常看不到龙卷可能发生的迹象,龙卷发生前几小时环境参数变化显著。有利于龙卷的环境条件形成过程中500 hPa 急流和强低空急流的存在至关重要:随着500 hPa 西北急流的增强,在中空西北急流的平流下温度直减率大值区东移,叠加到低层湿区之上;低空急流对暖湿空气的输送使低层显著增湿且温度直减率增大。傍晚发生的龙卷通常处于08时探空显示的低空湿舌西北侧100 km 左右的干区中,傍晚龙卷发生时则位于当时的湿舌边缘。

**关键词** 东北龙卷, 环境条件, 低空急流, 干线, 低层增湿

**中图法分类号** P445

## 1 引言

龙卷是最猛烈的对流天气现象,产生的最大地面风速可达125—140 m/s (Davies-Jones, et al, 2001),可造成重大的人员伤亡和财产损失。在中国,龙卷是一种低概率高影响天气,虽然近十年来平均每年F2级以上的强龙卷(Fujita, 1981)仅2—3次,但一旦出现F2级以上的强龙卷,只要经过有人居住的地方,即造成重大人员伤亡和财产损失(俞小鼎等,2006a,2008;刘娟等,2009)。东北地区是中国龙卷多发区之一,几乎每年都有龙卷出现,其中2005年出现了3次F2级以上的强龙卷,分别出现在6月10日辽宁朝阳县、7月15日内蒙古呼伦贝尔市扎兰屯、7月16日黑龙江甘南和纳河。1987年东北也出现了3次F2级以上的强龙卷事件(徐良炎,1988)。中国国家气象信息中心提供的中国地面天气现象逐日数据集记录的龙卷事件信息(1980—2009年)也表明东北地区是中国龙卷多发区之一(冯婧等,2012),有必要对中国东北龙卷进行研究。

由龙卷与中气旋的关系可分为超级单体龙卷和非超级单体龙卷,超级单体龙卷发生在深厚持久中气旋内部;非超级单体龙卷常产生在伴有明显风切变的出流边界、地面辐合线等热力边界附近(Doswell, et al, 1993; 俞小鼎等,2006b,2012)。超级单体出流边界附近也有可能产生龙卷,为非中气旋龙卷,因此严格来说应该称为中气旋龙卷和非中气旋

龙卷(Markowski, et al, 2010)。非中气旋龙卷低层小尺度涡旋的来源主要为气团边界的强水平风切变不稳定产生的垂直小涡旋(Lee, et al, 1997)。中尺度对流系统冷池附近的斜压涡管(水平涡度)平流及垂直运动的扭曲也会产生小尺度的垂直涡偶(Straka, et al, 2007)。绝大部分F2级以上的强龙卷都与超级单体中气旋有关。超级单体能否产生强龙卷与两个重要环境参数关系密切:低层高的相对湿度(对应低的抬升凝结高度)和强的低层风垂直切变(Craven, et al, 2004)。美国龙卷等灾害性天气频发,因此美国强天气中心根据超级单体龙卷产生的环境条件开发了显著龙卷(即F2级或以上龙卷,下同)综合参数(简称STP)(Thompson, et al, 2003, 2005),该参数综合了对流有效位能、抬升凝结高度、风垂直切变和风暴相对螺旋度等5个参数,为了归一化,设定了每个参数的阈值。

随着观测资料的增加,特别是多普勒天气雷达的布设,关于中国龙卷的研究也逐渐增多。中国龙卷主要分布在中国东部的平原地区和珠江三角洲及广东、海南沿海平原丘陵地区(丁一汇,2008),发生最频繁的是江淮平原地区,尤其是江苏、安徽北部;其次是珠江三角洲、闽东、闽西和海南岛沿海地区;两湖平原、华北平原和东北平原也是龙卷相对多发区。江淮地区东部的龙卷以苏北、皖北为中心,多发生在雨季,常发生在梅雨期间,伴随强降水(俞小鼎等,2006a,2008;刘娟等,2009;郑媛媛等,2009;姚叶

青等,2012;张一平等,2012;吴芳芳等,2013),其发生的环境特征为副热带高压(副高)外围西风槽前,低层水汽充沛,常存在低空急流,0—6 km 深层风垂直切变在  $3.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  以上,对流有效位能大。此外,苏北地区龙卷偶尔发生在4月,环境背景具有比7—8月更强的深层风垂直切变,最大反射率因子很大,基本在 65 dBz 以上甚至超过 70 dBz,相应的超级单体具有典型的雹暴特征,除了产生龙卷,还伴随大冰雹和直线型大风,降水往往不剧烈。华南是中国另一个龙卷多发地带。根据现有的研究个例(沈树勤,1990;何彩芬等,2006;蒋义芳等,2009;郑峰等,2012),华南强龙卷一半以上发生在台风外围飑线中,华南前汛期偶尔会出现 F2 级以下的小龙卷。台风外围水汽充沛,低空急流强,且处在大尺度涡旋环境中,环境条件有利于龙卷产生。

Brooks 等(2003)基于 NCEP 再分析资料对有利于龙卷产生的环境参数分析表明,龙卷常发生在大地形以东且南面临海的区域。中国东北平原位于大兴安岭以东渤海湾以北,从地形分布看亦有利龙卷产生,但由于纬度偏北,水汽含量较之华南和美国大平原地区显著偏低,又不利于龙卷产生。近年来已有一些东北龙卷个例的初步研究(刘宁微等,2007;金巍等,2009;方丽娟等,2009;乌文奇等,2010;张晰莹等,2010,2013;严华等,2011),表明龙卷发生前后多存在明显低空急流。刘宁微等(2007)研究表明,2005年6月10日发生在辽宁朝阳的龙卷环境温度直减率大。目前尚无对东北龙卷环境条件的系统性分析,为了研究何种环境条件有利东北龙卷发生,本研究收集了2002年以来的13次F1级以上的东北龙卷个例,综合多种观测资料及模式再分析资料,分析龙卷发生临近时刻的大气层结稳定度、水汽状况、风垂直切变及龙卷风暴触发机制,并在此基础上通过典型个例进一步分析龙卷环境条件形成的主要物理过程及预报着眼点。

## 2 个例信息及资料处理方法

表1给出了所分析的13个龙卷个例发生的时间(北京时,下同)、地点及龙卷等级。由于龙卷风和雷暴大风导致的损害常常难以区分,媒体有时会将直线型雷暴强风报道为龙卷风,文中确定的龙卷个例主要根据灾情描述和目击报告确定,龙卷等级划分基于目击报告和灾情描述,根据 Fujita(1981)提

出的龙卷等级判据给出。由图1可以看出,龙卷主要发生在地势平坦的东北平原,其中内蒙古乌兰布盟的两次龙卷虽然发生在海拔1000 m以上的高原地区,但从局部地形看,商都县和察右前旗均位于地势相对平坦区。发生在2005年8月10日的辽宁营口弱龙卷位置最偏南,下文分析表明其发生的环境条件不同于一般东北龙卷,类似江淮盛夏期间雨季龙卷。

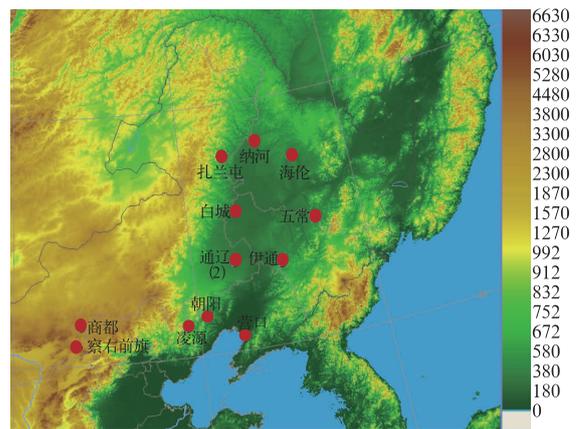


图1 所研究的东北龙卷分布(地形高度单位:m)  
Fig.1 Distribution of the Northeast China tornadoes  
(topography shaded, unit: m)

龙卷环境分析所采用的资料包括常规地面高空观测、地面加密观测、卫星观测资料、NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$  实时分析资料(简称“NCEP 资料”)、日本气象厅区域谱模式(RSM)20 km 分辨率的再分析资料(简称“JMA 资料”)。由于雷暴大多发生在傍晚前后(表1),对环境参数的估计一般不能直接用20时探空资料,故文中采取的方式为:以20时未被雷暴影响的下游地区探空为基础,结合14时、17时地面观测,对探空进行订正;当龙卷发生时间为上午或20时探空不可用时,以08时上游探空站为基础探空进行订正。为了更清晰地表示低层温、湿度参量,结合14时NCEP资料,如对流有效位能(CAPE)、温度直减率、低空急流、水汽含量等,考虑到NCEP资料低层变量误差较大(王秀明等,2012),故仅参考其低层变量随时间的变化趋势而不是变量数值本身。由于龙卷强对流天气发生在上下不同性质气团交汇区,用单一探空一般不能表征龙卷环境特征,因此其环境物理量亦综合龙卷发生区上下游探空:温度直减率、干层及高空风用龙卷发生地上游探空站观测值;低层水汽、温度和风用下游探空站的观测

值。高层干层用相对湿度和温度露点差表征,低层湿度用露点温度和比湿表征。总体原则为以距离龙卷发生地时间和空间最近且未受风暴影响的观测资料为主。为了考察龙卷环境形成的物理过程,同时分析了 500、700 和 850 hPa 的 12 h 变温和低层水汽变化。由于直接影响龙卷事件的 500 hPa 系统常

为水平尺度 1000 km 以下的系统,所以变温采用 12 h 而不是 24 h 变温。干侵入通常位于离对流区一定距离的西侧急流中,因此诊断对流层中层(摩擦层顶至 6 km 左右,代表层为 500 hPa 或 700 hPa)干燥程度的物理量,如 700 和 500 hPa 温度露点差和相对湿度一般由龙卷风暴西侧急流区测站得到。

表 1 东北龙卷个例信息表  
Table 1 List of the Northeast China tornado cases

| 序号 | 个例编号     | 发生地          | 发生时间           | 等级      |
|----|----------|--------------|----------------|---------|
| 1  | 20020630 | 内蒙古乌兰察布盟察右前旗 | 18 时           | F2      |
| 2  | 20050522 | 辽宁朝阳凌源市      | 12 时 30 分      | F2      |
| 3  | 20050610 | 辽宁朝阳县乌兰和硕乡   | 16 时 05 分      | F3      |
| 4  | 20050715 | 内蒙古扎兰屯       | 17 时 03 分      | F3      |
| 5  | 20050716 | 黑龙江纳河        | 21 时 30 分;23 时 | F1; F2  |
| 6  | 20070808 | 吉林伊通         | 20 时 50 分      | F2      |
| 7  | 20080523 | 黑龙江五常        | 19 时 20 分      | F2      |
| 8  | 20080917 | 内蒙古通辽        | 19 时 30 分      | F1      |
| 9  | 20090716 | 内蒙古通辽        | 17 时           | F1      |
| 10 | 20100515 | 黑龙江绥化        | 17 时 30 分      | F2      |
| 11 | 20120612 | 吉林白城         | 16 时 15 分      | F1      |
| 12 | 20130730 | 内蒙古乌兰察布商都县   | 17 时 20 分      | F1 - F2 |
| 13 | 20050810 | 辽宁营口         | 16 时           | F0 - F1 |

### 3 东北龙卷环境特征

#### 3.1 影响系统分析

东北龙卷事件几乎均发生在冷涡背景下(图 2),直接影响系统为冷涡后部下流的横槽或冷涡底

部低槽(表 2),尺度在 1000 km 以下,比一般天气尺度小,可以称为中间尺度系统(陶诗言,1980)或次天气尺度系统(陈秋士,1987)。为了具体说明系统尺度,基于 NCEP 资料计算的 500 hPa 槽或 850 hPa 切变低涡附近的涡度值减少至中心涡度值的 1/10 为

表 2 东北龙卷风暴影响系统及其特征(尺度、涡度和中层相对湿度)  
Table 2 The influencing systems of the Northeast China tornadoes and their characteristics (scale, vorticity and RH at the middle level)

| 个例编号     | 系统          |               | 涡度( $10^{-5} s^{-1}$ ) |         | 尺度( $^{\circ}$ ) |         | 500 hPa 相对湿度( $T - T_d$ ) |
|----------|-------------|---------------|------------------------|---------|------------------|---------|---------------------------|
|          | 500 hPa     | 850 hPa       | 500 hPa                | 850 hPa | 500 hPa          | 850 hPa |                           |
| 20020630 | 冷涡前倾槽后      | 辐合线,干线,涡      | 12                     | 12      | 11               | 7       | 22%(16)                   |
| 20050522 | 冷涡横槽下摆      | 辐合线,干线        | 12                     | 6       | 9                | 9       | 8%(23)                    |
| 20050610 | 冷涡前倾槽,西北急流  | 辐合线,干线,涡      | 8                      | 12      | 9                | 5       | 18%(17)                   |
| 20050715 | 冷涡底部前倾槽     | 涡,辐合线,低空急流,干线 | 12                     | 10      | 12               | 5       | 14%(20)                   |
| 20050716 | 冷涡后部,偏西急流   | 涡,辐合线,低空急流,干线 | -                      | 12      | -                | 7       | 14%(21)                   |
| 20070808 | 冷涡中心环流东南侧   | 锋面,辐合线,低空急流   | 20                     | 20      | 12               | 6       | 2%(39)                    |
| 20080523 | 冷涡底部低槽      | 辐合线,干线,暖锋     | 18                     | 15      | 11               | 5       | 6%(27)                    |
| 20080917 | 前倾槽         | 辐合线,干线        | 14                     | 15      | 8                | 6       | 4%(31)                    |
| 20090716 | 冷涡后部横槽下流    | 辐合线,干线        | 12                     | 15      | 7                | 5       | 1%(42)                    |
| 20100515 | 深槽,略前倾      | 辐合线,干线        | 10                     | 10      | 10               | 7       | 1%(38)                    |
| 20120612 | 冷涡中心环流东北侧切变 | 涡,辐合线,干线      | 15                     | 15      | 13               | 5       | 13%(20)                   |
| 20130730 | 发展中的冷涡底部前倾槽 | 干线,弱辐合线,涡     | 10                     | -       | 10               | -       | 1%(41)                    |
| 20050810 | 副高外围低涡底部槽前  | 低空显著偏南气流      | 8                      | -       | 12               | -       | 无                         |

注: 涡度系统尺度指东西向水平尺度(单位:度);“-”表示无明显涡度系统;中心涡度和系统尺度分析基于 NCEP 资料。

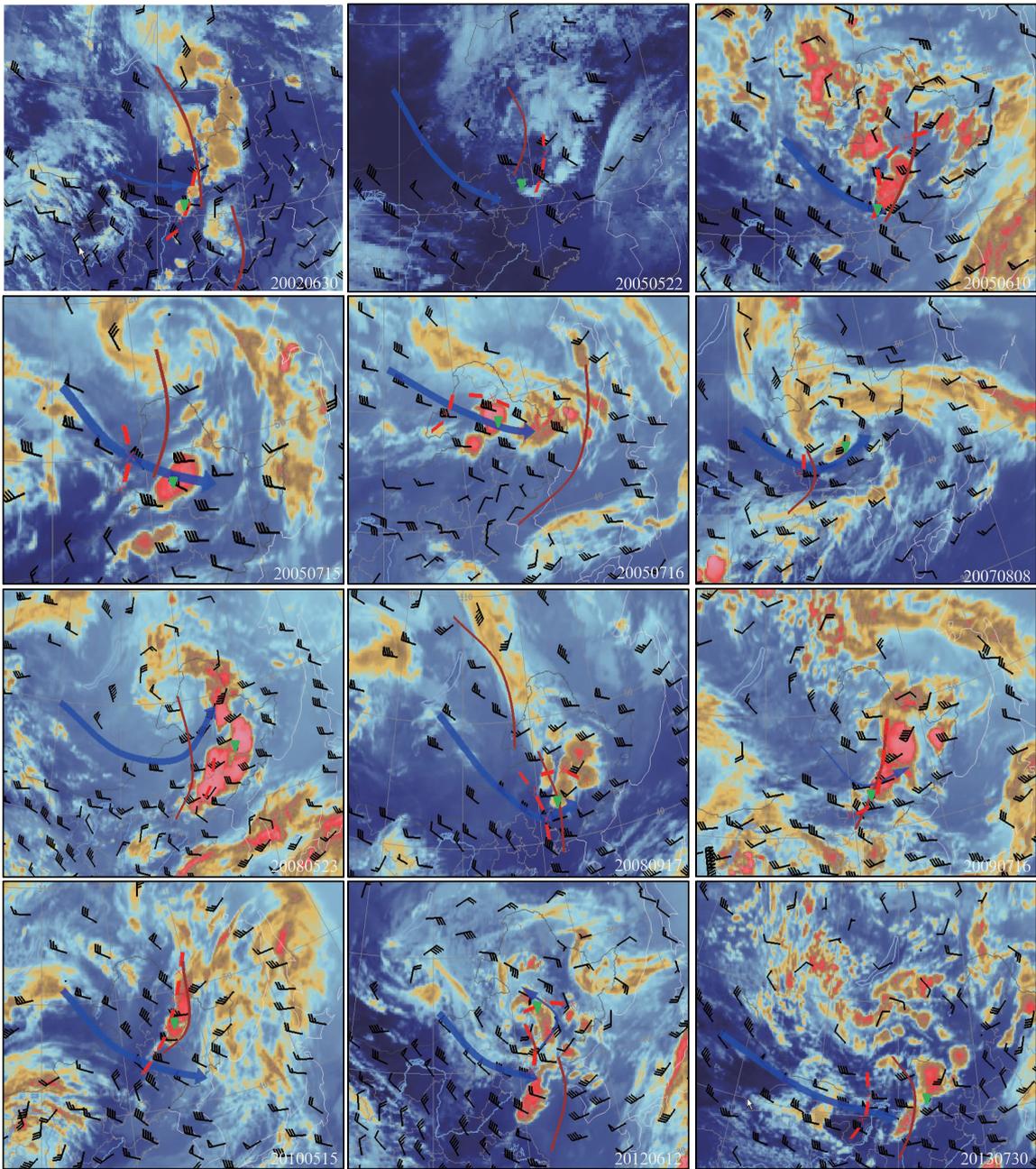


图2 东北龙卷发生的环流背景

(龙卷发生时(表1)的红外云图,龙卷发生前后500 hPa 风矢、槽线(棕实线)和急流/显著流线(蓝色▶/→), 850 hPa 辐合线(红色—×—×),绿色倒三角标记龙卷发生地)

Fig. 2 Circulation background of Northeast China tornadoes

(Infrad satellite image at the time when tornadoes occur, the wind barb, trough (brown solid line) and jet/significant stream (bule ▶/→) at 500 hPa, convergence line at 850 hPa (red —×—×), and the green inverted triangle sign for the torando location of genesis)

涡度系统范围(表2),可看出低槽平均水平尺度约11个经度距,以45°N 经距估计,水平尺度800—900 km。槽中心区垂直涡度大多超过 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ,比一般

天气尺度涡度大,是东北冷涡的涡度和动量的集中带。这一点与影响华南强对流的短波槽有显著差异,华南短波槽中心涡度一般很小。另外有两次龙

卷出现在冷涡中心环流区附近。低层影响系统为强辐合线,辐合线附近流场存在次天气尺度低涡或切变,其气旋性环流显著,对应涡度系统平均水平尺度400—500 km,低层辐合切变线中心大多超过 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (表2),且龙卷发生地位于涡度中心附近,说明龙卷发生在低层垂直涡度较大环境中。2005年7月的两次强龙卷即在山前地面显著中尺度低涡附近触发。另外,辐合线附近露点差异显著而温度对比不明显,有11个个例辐合线附近干湿差异显著(称为干线或露点锋),辐合线与干线位置不完全重合,这一点将在下文详述。

从高空槽与边界层辐合线的相对位置(图2)可见,500 hPa 低压槽或超前于低层边界(俗称“前倾槽”)或上下系统几乎重叠,为有利于对流性天气发生的环流形势。与江淮地区盛夏龙卷多发生在槽前强偏南气流中(俞小鼎等,2006a,2008;刘娟等,2009;姚叶青等,2012)不同,东北龙卷常发生在槽后西北气流或槽底强偏西气流中,槽后西北或偏西气流较强,多为急流。在龙卷发生地上游地区500 hPa 常存在干区,干区风速较大,温度露点差在 $15^\circ\text{C}$ 以上,大多大于 $25^\circ\text{C}$ ,对应相对湿度在10%以下,即存在显著干区。干区对应红外或水汽卫星云图的暗区(高温区),为下沉运动区,说明这是一支动量集中的偏西下沉气流。这支干下沉气流对产生龙卷的对流风暴及东北冷涡外围强对流风暴的形成非常重要,将在下一节详细讨论。产生龙卷的中尺度对流系统(MCS)在卫星云图上呈现明显的带状(图2),龙卷多出现在带状中尺度对流系统的南端。中尺度对流系统多在边界层辐合线等边界(如冷锋和干线等)附近触发,这或许是中尺度对流系统呈现带状的原因。龙卷大多位于500 hPa 风速较大区(图2),深层(0—6 km)风垂直切变大,亦有利于龙卷超级单体风暴形成。

### 3.2 环境参数特点及其相应物理过程分析

#### 3.2.1 环境温、湿度参量

研究表明,显著龙卷多产生在条件不稳定且低层水汽充沛的环境下(Brooks, et al, 2003),上述两个要素的结合表征大气深厚湿对流发生的潜势,通常用对流有效位能和对流抑制能量(CIN)表示。对流有效位能越大,对流抑制能量越小,深厚湿对流(雷暴)就越容易产生。由于对流有效位能受抬升气块(低层)的温度和水汽影响显著,此处所给出的对

流有效位能均根据龙卷发生前龙卷发生地附近的地面温度、露点进行了订正。由表3可知东北龙卷事件环境的对流有效位能一般大于或接近 $1000 \text{ J/kg}$ ,但均在 $3000 \text{ J/kg}$ 以下,属于中等大小。700—500 hPa温差( $\Delta T_{75}$ )通常大于 $20^\circ\text{C}$ ,500—700 hPa厚度为2.6—2.7 km,相当于环境温度直减率为 $7.4\text{—}7.6^\circ\text{C/km}$ ;850—500 hPa 温差( $\Delta T_{85}$ )大于 $30^\circ\text{C}$ 。Craven等(2004)给出的美国显著龙卷及强风暴的500—700 hPa 的温度直减率 $\gamma$ 一般小于 $7.5^\circ\text{C/km}$ ,中值为 $6.9^\circ\text{C/km}$ (表4)。由此可见,东北龙卷发生时其对流层中低层大气温度直减率大。由表4东北F2级以上强龙卷环境对流有效位能与Craven等(2004)的统计结果看似相当,但表3为从地面抬升气块的对流有效位能(简称CAPE<sub>sfc</sub>)。而表4美国龙卷环境对流有效位能(Craven, et al, 2004)为混合层对流有效位能(MLCAPE)。由于湿层不厚,水汽随高度下降,而对流有效位能受水汽影响明显,CAPE<sub>sfc</sub>与MLCAPE值差异明显。以2005年7月15日探空为例,CAPE<sub>sfc</sub>约 $2200 \text{ J/kg}$ ,而MLCAPE约 $1300 \text{ J/kg}$ 。所以实际上东北龙卷环境对流有效位能比美国小,原因是低层水汽含量低且湿层相对浅薄。850 hPa 露点大多在 $12^\circ\text{C}$ 以下,F2级以上的强龙卷850 hPa 露点最大值为 $13^\circ\text{C}$ ,均值为 $7.4^\circ\text{C}$ (表3),而Grams等(2012)统计的美国448个F2级强龙卷850 hPa 露点中值(50%的个例)为 $13^\circ\text{C}$ ,75%的个例在 $11^\circ\text{C}$ 以上,显然,与Grams等(2012)的统计结果相比,东北850 hPa 水汽含量很低。实际上其整层水汽含量都不高,半数以上的个例大气可降水量(PW)在30 mm以下,除辽宁营口龙卷事件外,东北龙卷大气可降水量均在45 mm以下(表3)。地面露点多在 $20^\circ\text{C}$ 以下,8个F2级以上的强龙卷平均地面露点为 $17.1^\circ\text{C}$ ,而美国强龙卷地面露点统计均值为 $18.8^\circ\text{C}$ (Grams, et al, 2012)。2010年5月15日黑龙江绥化F2级龙卷发生时地面露点温度仅为 $12^\circ\text{C}$ 。定义湿层厚度如下:当低层存在露点温度迅速降低的气层时,露点骤降的起始高度即为湿层厚度(扣除地形高度);当不存在露点突变层时,取比湿不小于 $8 \text{ g/kg}$ 的气层厚度。东北龙卷事件湿层厚度不厚(多在1.5 km以下),且湿层平均比湿不高(多在 $12 \text{ g/kg}$ 以下)。2010年5月15日以 $8 \text{ g/kg}$ 为阈值的湿层厚度仅0.3 km,1.5 km以下平均比湿为 $7.5 \text{ g/kg}$ 。一般来

说,抬升凝结高度在 900 m 以下有利于龙卷产生 (Grams, et al, 2012),东北 F2 级以上龙卷平均抬升凝结高度为 800 m(表 3),虽不似江淮梅雨锋附近的龙卷那样抬升凝结高度低至 500 m 以下(郑媛媛

等,2009),仍有利于龙卷发生。综上所述,东北龙卷发生的环境温、湿特点为温度直减率大且低层“干”,对流有效位能中等。龙卷发生前一般前期都存在逆温,表 3 中“弱”逆温指等温层或近等温层。

表 3 环境参数  
Table 3 The environmental parameters for the cases of tornado

| 个例编号     | $\Delta T_{75}$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | $\Delta T_{85}$<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 对流有效位能<br>( $\text{J}/\text{kg}$ ) | 对流抑制能量<br>( $\text{J}/\text{kg}$ ) | 逆温 | 低层切变<br>( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ) | 深层切变<br>( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ) | 湿层厚度<br>( $\text{km}$ ) | 平均比湿<br>( $\text{g}/\text{kg}$ ) | 8(6)g/kg 高度<br>( $\text{km}$ ) | 地面露点<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 可降水量<br>( $\text{mm}$ ) | 850 hPa 露点<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 抬升凝结高度<br>( $\text{m}$ ) |
|----------|---|---|------------------------------------|------------------------------------|----|------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 20020630 | 23  | 29  | 2100                               | 110                                | 有  | 6                                  | 4.6                                | 0.8                     | 12                               | 1.2(2.0)                       | 16                             | 20—25                   | 12                                   | 700                      |
| 20050522 | 20  | 30  | 900                                | 0                                  | 无  | 11                                 | 3.5                                | 0.4                     | 8.5                              | 0.4(1.0)                       | 13                             | 10—15                   | -1                                   | 400                      |
| 20050610 | 21  | 31  | 2000                               | 138                                | 有  | 7.8                                | 3.8                                | 1.5                     | 10.5                             | 1.5(2.1)                       | 18                             | 20—25                   | 2                                    | 1000                     |
| 20050715 | 19  | 34  | 2200                               | 252                                | 有  | 12.5                               | 6.8                                | 1.0                     | 12.5                             | 1.3(2.0)                       | 22                             | 30—35                   | 6                                    | 1000                     |
| 20050716 | 21  | 33  | 2800                               | 272                                | 有  | 13                                 | 7.0                                | 1.4                     | 16                               | 2.2(2.8)                       | 24                             | 45—50                   | 13                                   | 600                      |
| 20070808 | 14  | 22  | 300                                | 7                                  | 弱  | 13.2                               | 3.8                                | 2.2                     | 10.5                             | 2.2(3.4)                       | 19                             | 40—45                   | 11                                   | 500                      |
| 20080523 | 21  | 30  | 850                                | 100                                | 有  | 16.9                               | 5.6                                | 2.4                     | 8.5                              | 1.8(2.4)                       | 13                             | 20—25                   | 10                                   | 1400                     |
| 20080917 | 23  | 33  | 1000                               | 300                                | 有  | 13.6                               | 3.9                                | 1.0                     | 11                               | 1.4(1.4)                       | 17                             | 25—30                   | 6                                    | 700                      |
| 20090716 | 20  | 34  | 2500                               | 176                                | 有  | 17.1                               | 5.4                                | 1.0                     | 14                               | 1.6(2.8)                       | 21                             | 40—45                   | 10                                   | 800                      |
| 20100515 | 20  | 32  | 800                                | 100                                | 弱  | 14.3                               | 5.4                                | 1.3                     | 7.5                              | 0.3(1.7)                       | 12                             | 15—20                   | 6                                    | 1000                     |
| 20120612 | 19  | 29  | 1300                               | 50                                 | 弱  | 5.8                                | 2.8                                | 1.1                     | 8.5                              | 1.1(1.5)                       | 15                             | 25—30                   | 5                                    | 700                      |
| 20130730 | 22  | -   | 1600                               | 16                                 | 有  | 4.4                                | 2.9                                | 1.7                     | 9.5                              | 2.1(2.9)                       | 15                             | 25—30                   | -                                    | 1500                     |
| 20050810 | 15  | 24  | 700                                | 40                                 | 无  | 7.35                               | 1.75                               | 3.5                     | 12.5                             | 3.5(4.5)                       | 24                             | 55—60                   | 15                                   | 300                      |

注:可降水量是基于 NCEP/NCAR  $1^{\circ}\times 1^{\circ}$  实时分析资料计算,其他物理量由订正探空计算。

表 4 F2 级以上强龙卷主要参数对比

Table 4 The comparison of the environmental parameters for the significant tornadoes between China an the U. S.

|      | 700—500 hPa $\gamma$ 的中值<br>( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ) | 对流有效位能均值<br>( $\text{J}/\text{kg}$ ) | 低层切变均值<br>( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ) | 深层切变均值<br>( $10^{-3}\text{s}^{-1}$ ) |
|------|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 东北龙卷 | 7.4—7.6  | 1500 (CAPE <sub>sf</sub> )           | 11.8                                 | 4.4                                  |
| 美国龙卷 | 6.9  | 1500—1700 (MLCAPE)                   | 11.5                                 | 3.9                                  |

注:美国龙卷环境参数参考 Craven 等(2004)。

### 3.2.2 热力参量演变分析

东北龙卷常发生在午后到傍晚(表 1),龙卷发生前几个小时大气热力稳定度变化显著,特别是水汽增加显著(表 5)。从地面露点看,低层水汽的显著增加在东北龙卷个例中比较普遍,几乎所有的个例地面露点温度均有  $2^{\circ}\text{C}$  以上的增幅,有 6 个个例地面露点温度增幅超过  $4^{\circ}\text{C}$ (表 5),有 4 个个例 925 和 850 hPa 亦有显著增湿,露点温度增加达  $5\text{—}10^{\circ}\text{C}$ ,说明地面湿度增加的同时湿层亦增厚。下面试分析不稳定层结建立的物理过程。大气层结不稳定的建立或通过温度直减率增加,或通过低层水汽增加,少数情况下两种物理过程同时存在。美国东部大平原区位于落基山脉东侧,墨西哥湾北侧,是世界强龙卷高发区,其不稳定层结建立的物理过程为:温度直减率大值区向东平流到低层高温高湿区(由墨西哥湾暖湿气流向北平流形成)之上(Markows-

ki, et al, 2010)。图 3a 给出了类似物理过程:在偏西风急流平流下,08—20 时,“ $\Delta T_{75}$ ”大于  $20^{\circ}\text{C}$  的区域显著东伸至东北平原上空(08 时橘黄色实线包围区域,20 时橘黄色阴影区);在低空急流输送下,低层湿区显著北伸(绿色实线为 08 时湿区,绿色阴影为 20 时湿区),龙卷事件发生在温度直减率大值区与湿区叠加处,一般位于湿舌北部边缘有辐合抬升处(黑色倒三角)。对流层中层偏西风急流与中层干层对应,是一支下沉气流。偏西风急流对温度直减率  $\gamma$  大值区向东平流或许很重要,图 3 上  $\gamma$  大值区大多位于 500 hPa 急流的下风方。图 3 给出的 6 个龙卷事件,相应的环境场 500 hPa 等压面上均存在偏西急流,除图 3b 中温度直减率大值区为重建外,其余 5 个个例均为东移。下面基于 NCEP 资料,通过一个个例具体说明西北下沉气流对龙卷环境的影响。2010 年 5 月 15 日黑龙江绥化龙卷事件位置大

致为  $47.5^{\circ}\text{N}$ ,  $126.5^{\circ}\text{E}$ , 发生时间为 17 时 30 分, 因此选择  $47^{\circ}\text{N}$  的剖面。由图 4a 可以看出, 14 时槽后强偏西北气流区  $\Delta T_{75}$  明显比槽前大, 且沿着西风减小, 说明将有明显的温度直减率  $\gamma$  大值区向东平流。实际上 700—500 hPa 温差 14—20 时明显增大,  $122.5^{\circ}\text{E}$  以东地区 20 时的  $\Delta T_{75}$  (图 4a 红色粗实线) 均高出 14 时  $2^{\circ}\text{C}$  左右。槽后强西北气流区为下沉区 (图 4 红色细实线), 且高层风速较低层明显大, 有动量向下向东南传, 从图 4 中也看到相对强下沉区低层水平风速明显比其东西两侧大。动量下传使得中低层风速增大, 从而使中低层风垂直切变增大。龙卷发生地附近 1000—850 hPa 的风垂直切变 (图

5) 由 08 时的  $3.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  增大至 14 时的  $5.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ , 20 时更骤增至  $10.0 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ , 最大的增幅出现在高空槽影响的 14—20 时。两个时刻高空槽均前倾, 因而使得高空西风急流叠加在低层偏南风之上, 从 NCEP 资料计算的地面至 500 hPa 风垂直切变看, 高空槽后西北气流与低层槽前叠置区风垂直切变 6 h 增幅为  $0.8 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ 。实际上这种叠加也增加了大气不稳定性。而层结不稳定性增大和低层强风垂直切变均是有利于形成超级单体等有组织风暴的环境条件, 特别是低空风切变的增加, 与龙卷环境直接相关。

表 5 08—20 时环境参数的变化

Table 5 The changes in the environmental parameters from 08:00 to 20:00 BT for the cases of tornado

| 个例编号     | 500 hPa<br>温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 700 hPa<br>温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 850 hPa<br>温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 地面<br>$T_d$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 925 hPa<br>$T_d$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 850 hPa<br>$T_d$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | 500 hPa<br>风速 ( $\text{m/s}$ ) |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|---|---|--------------------------------|
| 20020630 | 0                                    | -2                                   | +3                                   | 12→16                              | -                                       | 12→13                                   | 8→18                           |
| 20050522 | -3                                   | -3                                   | -2                                   | 12→13                              | 无                                       | 无                                       | 18→19                          |
| 20050610 | +1                                   | +1                                   | +2                                   | 16→19                              | 无                                       | 9→2                                     | 12→22                          |
| 20050715 | +3                                   | +2                                   | +6                                   | 18→22                              | 18→22                                   | -5→6                                    | 17→27                          |
| 20050716 | -1                                   | -4                                   | -1                                   | 19→24                              | 19→24                                   | 1→13                                    | 17→29                          |
| 20070808 | -2                                   | -3                                   | -5                                   | 无                                  | 19→17                                   | 15→11                                   | 16→25                          |
| 20080523 | 0                                    | +4                                   | +6                                   | 7→13                               | 7→12                                    | 0→10                                    | 19→27                          |
| 20080917 | 0                                    | +3                                   | +5                                   | 8→17                               | -                                       | 11→6                                    | 14→22                          |
| 20090716 | -1                                   | -2                                   | -                                    | 19→21                              | 7→16                                    | -1→10                                   | 17→27                          |
| 20100515 | -4                                   | 1                                    | 5                                    | 10→12                              | 9→8                                     | 5→6                                     | 16→23                          |
| 20120612 | +1                                   | +2                                   | +3                                   | 13→15                              | 8→10                                    | 4→5                                     | -                              |
| 20130730 | 0                                    | -1                                   | +6                                   | 12→15                              | -                                       | -                                       | 7→17                           |
| 20050810 | +2                                   | +2                                   | +1                                   | 22→24                              | 无                                       | 无                                       | 18→10                          |

由于东北低涡通常为冷心涡旋, 业务预报中通常关注 500 hPa 附近的冷空气活动。从 500 hPa 变温看 (表 5), 仅有 3 例出现了  $-2^{\circ}\text{C}$  以上的显著降温, 说明虽然对流层中层冷空气扰动是导致大气条件 (静力) 不稳定的因子之一, 但不是必要因素, 也不是主导因素, 大多数龙卷个例中层并没有明显降温, 甚至出现  $3^{\circ}\text{C}$  显著升温。而 850 hPa 变温表明 (表 5), 低层增温显著, 故温度直减率的增大亦与低层增温有关。

### 3.2.3 低层水汽演变分析

由于东北龙卷的环境湿层不厚, 低层水汽分析用 925 hPa 露点比较合适。由图 3a—d 可见, 925 hPa 等压面上存在偏南急流, 湿区位置和强度变化显著, 湿区向北伸展明显, 从露点温度看, 湿舌北伸达 3—5 个纬距。图 3a、b、d、f 龙卷发生在 08 时 925 hPa 天气图上湿区 (绿色实线) 西侧, 这与湿舌西

伸有关。下面用日本 JMA  $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$  高分辨率数值预报再分析资料具体分析 2008 年 5 月 23 日黑龙江五常 F2 级龙卷环境水汽的演变。五常龙卷地面露点温度  $13^{\circ}\text{C}$ , 大气可降水量 20—25 mm, 水汽条件较差, 水汽演变是关键因子。由图 6a 可见, 14 时 925 hPa 湿区较 08 时显著北伸并略有西移, 从  $8 \text{ g/kg}$  范围看, 湿舌北伸达 3—4 个纬距, 且水汽含量显著增加, 龙卷发生地增加 1—2  $\text{g/kg}$ , 龙卷发生地西南侧湿中心增幅超  $3 \text{ g/kg}$ 。随着冷涡低槽东移, 20 时湿舌较 14 时略东移, 湿舌北伸特征仍显著, 6 h 北伸 1 个纬距, 龙卷发生地处在湿舌中。位于龙卷发生地西南侧的湿中心达  $12 \text{ g/kg}$ , 该湿中心与西侧干区对比显著, 干湿对比较之 14 时显著增强。从  $8 \text{ g/kg}$  区域可看到湿舌 6 h 约北伸 150 km,  $10 \text{ g/kg}$  湿舌午后到傍晚北伸距离近 5 个纬距 (图 6c); 08—14 时湿舌先西展 ( $8 \text{ g/kg}$  西边界西移约 5

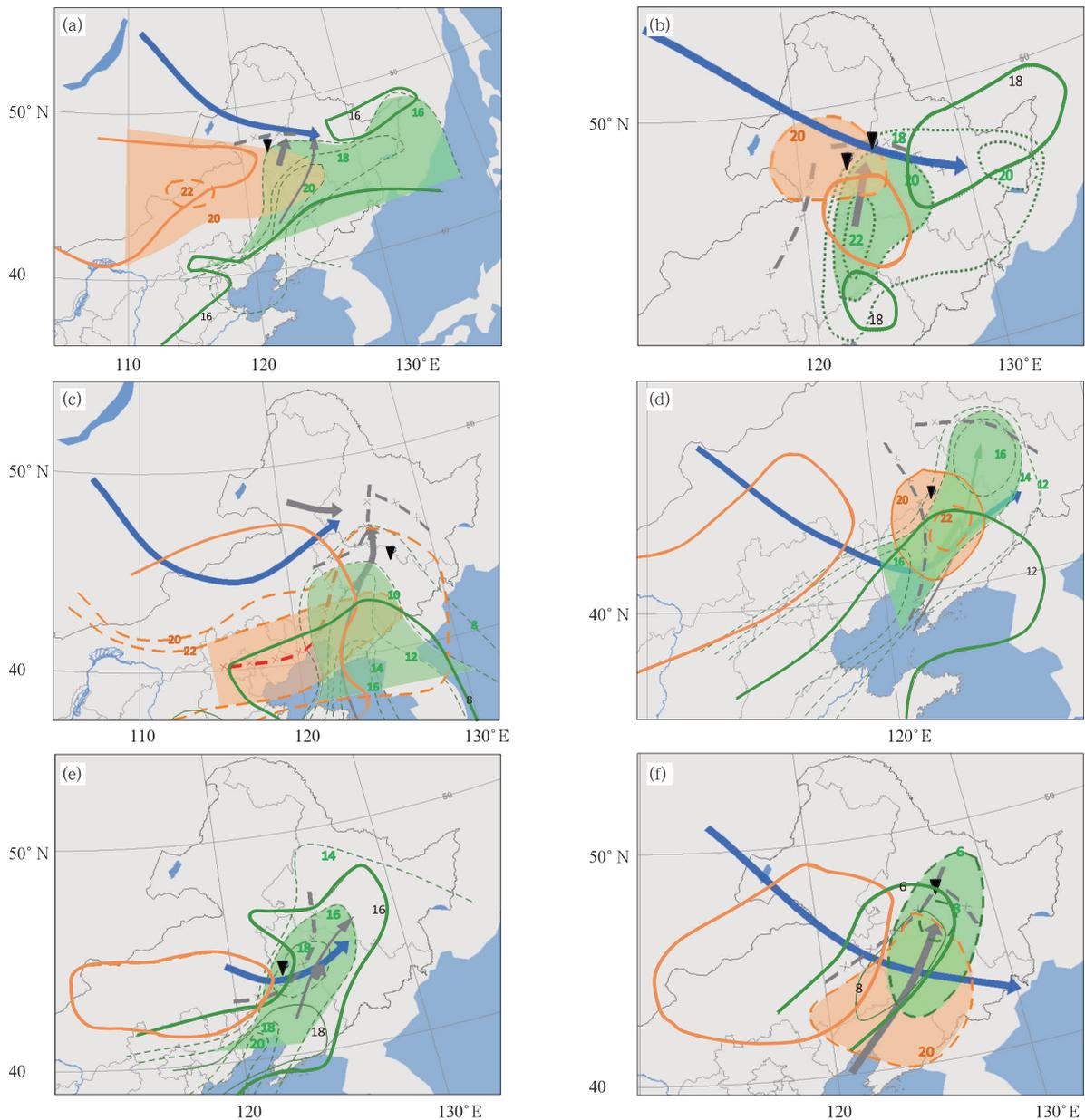


图3 龙卷个例的综合分析

(a. 2005年7月15日, b. 2005年7月16日, c. 2008年5月23日, d. 2008年9月17日, e. 2009年7月16日,

f. 2010年5月15日; 黑色倒三角表示龙卷发生地, 桔色与绿色粗实线为08时700—500 hPa温差20℃线和925 hPa露点线, 露点值用黑色数字标记, 单位:℃, 其他均为20时分析; 绿色阴影表示925 hPa湿区,

露点值用绿色数值标记, 桔色阴影表示700—500 hPa温差大值区, 值用桔色数字标记, 单位:℃;

蓝色“→”表示500 hPa急流, 灰色“→、→、—×—×”分别表示925 hPa急流、显著流线、

辐合线(若850 hPa辐合线更显著则加画850 hPa辐合线, 用红色表示))

Fig. 3 Composite analysis map for the cases of tornado (a. 15 July 2005, b. 16 July 2005, c. 23 May 2008,

d. 17 September 2008, e. 16 July 2009, f. 15 May 2010; the black inverted triangle sign for the tornado location of genesis, orange and green solid lines are " $\Delta T_{75}$ " (20℃) that stands for the temperature difference between

700 and 500 hPa, and moist tongue at 925 hPa at 08:00 BT (black digit sign is for the dew point, unit:℃).

Other analyses are all for those at 20:00 BT, green shade is moist tongue, green dashed line is dew point

contoured every 2℃, orange shade sign is for the high lapse rate area, orange dashed line is " $\Delta T_{75}$ " contoured

every 2℃, blue "→" is 500 hPa jet, gray "→、→ and —×—×" are 925 hPa jet, significant streamline

and convergence line (if 850 hPa convergence line is significant then it is drawn with red color))

个经距),后东移(8 g/kg 东边界东移约 4 个经距)。从垂直剖面上看(图 6c、d),湿舌显著增厚,8 g/kg 高度略高于 850 hPa 高度,湿区厚度比 08 时有显著增大。与实况相比,JMA 资料 925 hPa 湿中心比湿

偏高 1—2 g/kg,湿舌北界偏北。由于湿区的北伸西展,东北午后龙卷发生的位置往往位于 08 时 925 hPa 天气图上湿区西北侧几百千米(图 3a—d)的干区内,因此基于 08 时的高空探测资料分析龙卷

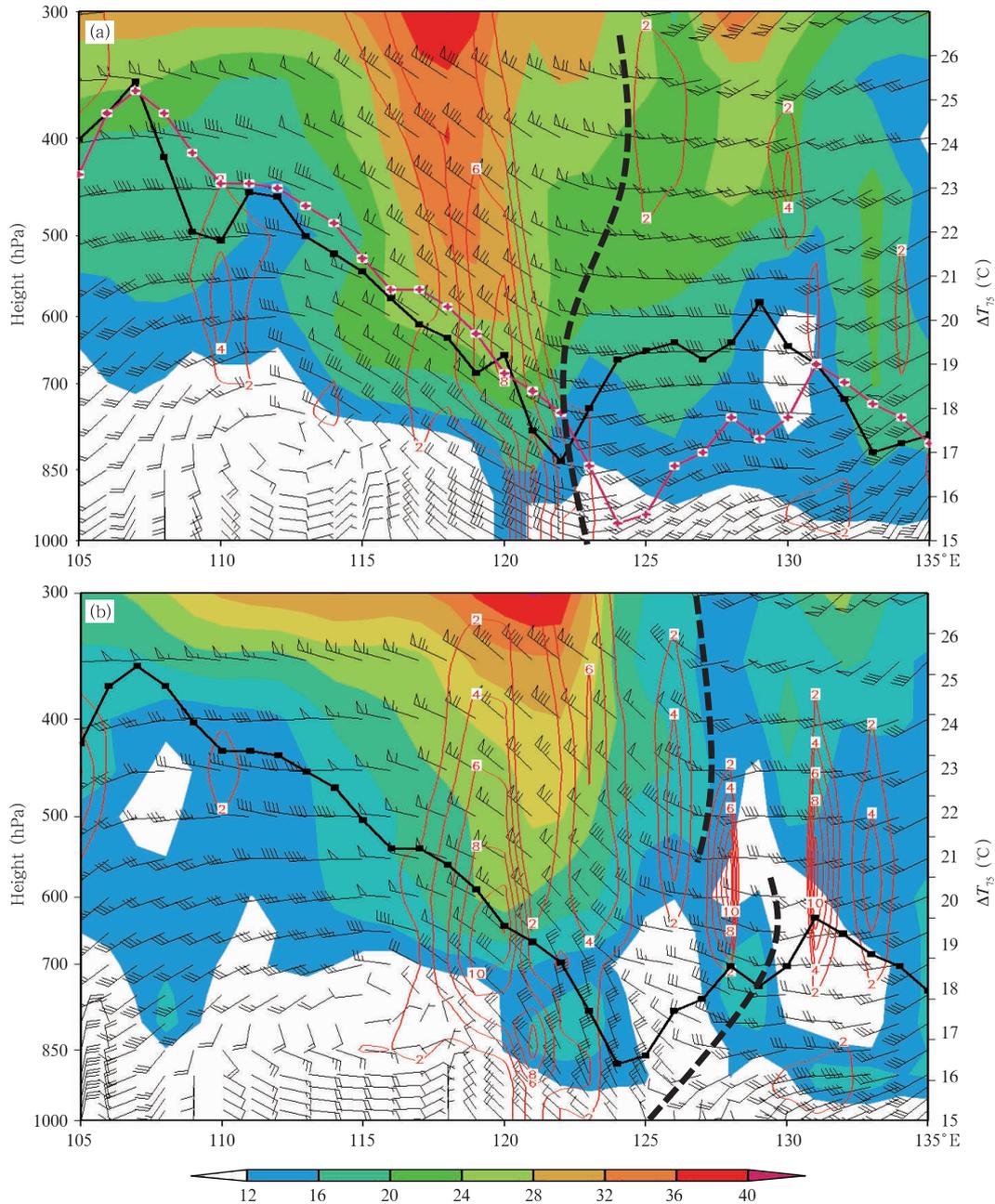


图 4 2010 年 5 月 15 日 14 时(a)和 20 时(b)47°N 垂直剖面

(阴影为水平风速,单位:m/s;粗黑虚线为槽线;粗实线为 700 hPa 与 500 hPa 温差,单位:°C,其中(a)中黑(红)色线表示 14 时(20 时);红色细实线为垂直速度,单位: $10^{-1}$ Pa/s)

Fig. 4 Vertical cross section along 47°N on 15 May 2010 at 14:00 (a) and 20:00 BT (b)

(shaded area is for the horizontal wind speed (m/s) more than 12 m/s, the black thick dashed line is the trough, thick solid line is 700 - 500 hPa temperature difference (°C), black (red) line is for that at 14:00 (20:00) BT in Fig4a, and red thin isoline is for the vertical velocity contoured at  $2 \times 10^{-1}$  Pa/s intervals)

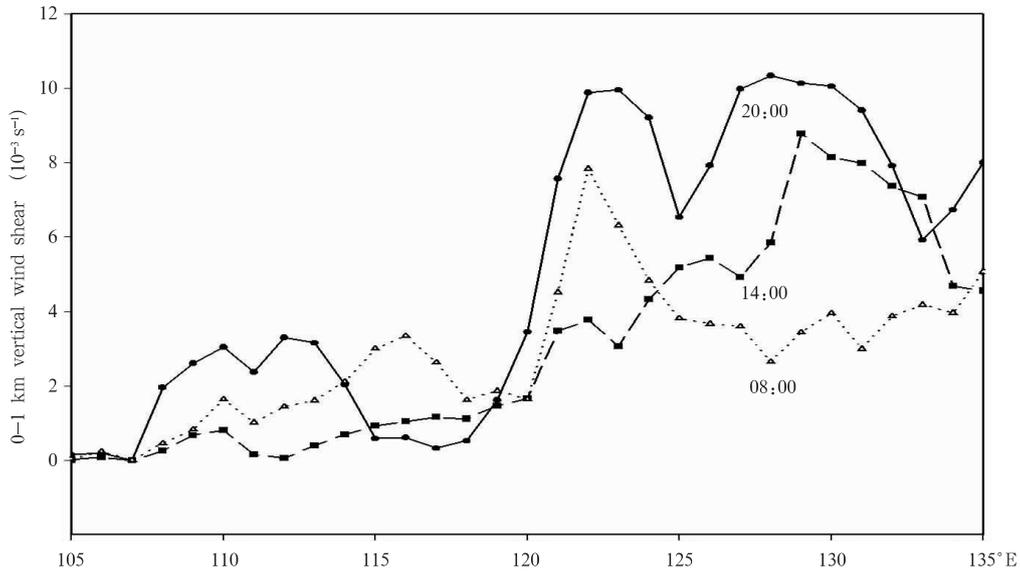


图5 2010年5月15日08时(点线)、14时(长虚线)和20时(实线)47°N  
1000—850 hPa 风垂直切变

Fig. 5 Vertical wind shear between 1000 and 850 hPa along 47°N at 08:00  
(dot line), 14:00 (long dashed line) and 20:00 BT (solid line) 15 May 2010

发生潜势几乎是不可能的。低层水汽在08时以后的变化主要是湿舌的西移北伸和低层水汽含量的显著增大。这一方面与边界层急流水平输送有关,另一方面也与边界层辐合线强迫的垂直运动导致水汽垂直输送有关。低层水汽明显增加是有利于龙卷的环境条件形成的重要因素。主导低层水汽改变的主要是中尺度过程,如低空急流、边界层的干线、锋面、辐合线、低涡倒槽等是影响水汽变化的主要系统。由于东北地区湿层浅薄,监测地面露点和风的变化或许是短时临近预报监测低层水汽变化直接有效的方法,模式预报的湿舌移动趋势可供参考,但位置和强度有偏差。龙卷发生前8 g/kg湿层厚度多在850 hPa以下,在上述个例中850 hPa等压面上露点温度普遍偏低,一般不能较好地反映低层的水汽变化,因此低层水汽代表层宜选择925 hPa。

### 3.2.4 风垂直切变分析

龙卷发生在强的深层和低层风垂直切变环境下。对于东北地区龙卷,低层风垂直切变多在 $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上,最强达 $17 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ;0—6 km 深层风垂直切变多在 $3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 以上,最强达 $7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,如果只看F2级以上的龙卷,东北龙卷低层风垂直切变均值为 $11.8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,深层风垂直切变均值为 $4.4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,低层风垂直切变与Craven等

(2004)统计结果相当而深层风垂直切变均值略大(表4)。需要指出的是,基于不同的数据集,美国龙卷环境参数统计结果不同,Grans等(2012)统计的2000—2008年的结果与Craven等(2004)有明显不同,其0—1 km 低层风垂直切变75%以上在 $11.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,中值为 $15.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ,文中没有给出均值,但可以推断其均值应明显大于Craven等(2004)的 $11.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。在东北地区,龙卷发生前高低空风变化显著。13例中有10个个例500 hPa 偏西风显著增强,从08时至20时平均增幅达10 m/s,最大增幅12 m/s(表5)。由于模式对对流层中层风的预报能力较强(李佳英等,2006;王秀明等,2012),500 hPa 西风显著增强这一特征大多数情况下可以通过数值预报得到。大多数个例中低层暖湿气流(一般为偏南风急流)在龙卷风暴发生前同样有明显增强,形成几百千米的中尺度急流(图3灰色粗箭头)。低空暖湿气流的增强一方面输送水汽和暖空气使得对流有效位能增大,另一方面加强了低层辐合线,使得湿层增厚,抬升增强,同时也使得低层风垂直切变增强。

2007年8月8日发生在冷涡中心环流附近的龙卷事件与上述情况不同。龙卷发生位置整层处于涡旋环流中,位于低层湿舌北端。其相应环境的温

度直减率小,对流有效位能仅 300 J/kg 且集中在 500 hPa 以下。产生该龙卷的中尺度对流系统的云顶亮温高,反射率因子小于 40 dBz,说明对流云发展高度不高,上升气流不强,各方面综合判断该龙卷不是超级单体龙卷。强烈的涡旋环境下,环境涡度在积云发展区集中或许是这次龙卷形成的主要物理过程,类似于非超级单体龙卷产生机制。此外,2005

年 8 月 10 日发生在副高外围低槽中的伴随强降水的弱龙卷也不同于上述东北龙卷的典型形势,更类似于江淮流域的夏季龙卷的偏南暖湿气流型:自由大气温度直减率小,低层水汽含量高且湿层深厚,其大气可降水量为 55—60 mm,整层大气处于高温高湿气团中且对流有效位能从早晨到晚上没有增加,对流层中层无负变温和干层,低层正变温亦不明显。

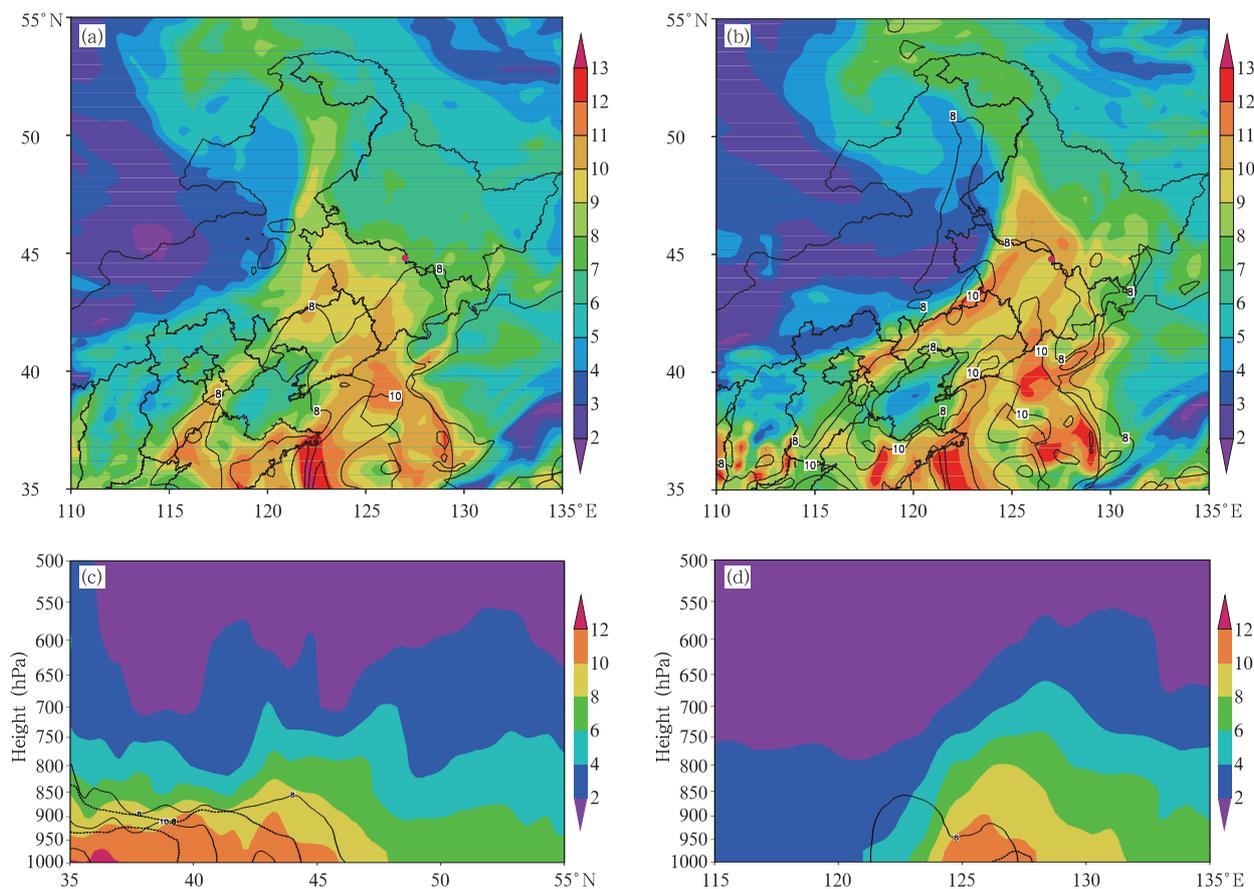


图 6 2008 年 5 月 23 日 14 时(a)和 20 时(b)925 hPa 比湿(g/kg)以及 20 时湿舌垂直剖面(阴影), 123°—128°E 平均的纬向垂直剖面(c)和 42°—48°N 平均的经向垂直剖面(d) (黑色实线表示 6 h 前比湿,紫红色实心点为龙卷发生地(a,b),黑色虚线表示 12 h 前比湿(c,d))

Fig. 6 Specific humidity on 925 hPa at 14:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 23 May 2008, and the moisture tongue vertical cross section at 20:00 BT (shaded), and, the longitude-height plot averaged over from 123°E to 128°E (c), and the latitude-height plot averaged over from 42°E to 48°E (d) (black solid line is for the specific humidity six hour before, dot line is for the specific humidity twelve hours before, and, purple red dot denotes the location of tornado of genesis)

### 3.3 干线为主的龙卷风暴触发机制简析

3.1 节提到 13 个个例中有 11 个龙卷风暴在干线附近触发(表 2),虽然有些个例不能确定是否主要由干线触发,但大部分龙卷风暴在干线附近触发

说明干线是东北龙卷的主要触发因子之一。图 7 给出了龙卷风暴触发前后的地面干线,图中干线两侧露点差异一般在 10℃ 以上,其中图 7b 中干线两侧露点差最大,在 15℃ 以上,而温度差仅 2—3℃。干

线一般位于山麓(图 7a、b、d),也有位于高原的干线(图 7c)。干线西侧偏西气流显著,风速约 8 m/s,东侧为偏南气流。偏西风与偏南风形成的辐合线与干线有时不完全重合。干线是露点差异显著的气团边界,是一种长几百千米,宽几十千米的低层中尺度边界,又被称为干锋或露点锋(Schaefer, 1986; Ziegler, et al, 1993; Markowski, et al, 2010)。干线在中国并不少见,2009 年 6 月 3 日在河南商丘产生 11 级大风的风暴就是在干线附近触发的(王秀明等, 2012)。梅雨锋也常表现为干湿边界。2010 年 5 月 15 日傍晚黑龙江绥化 F2 级龙卷风暴有学者认为是由冷锋触发(张晰莹等, 2013)。图 7a 表明,地面干线西侧为干暖气团,东侧为湿冷气团,在雷暴尚未影响的南段干线两侧露点差超过 10℃,且西侧干空气温度比东侧湿空气高约 4℃,为干暖气团与湿冷气

团的交界线,因此属于典型的干线而不是冷锋。图 8 给出了这次干线触发雷暴的过程。13 时前湿区西边界位于大兴安岭山麓,与地形等高线几乎重合,没有明显东移。其西侧内蒙古境内的干区逐渐东伸,且在干区存在等温线密集带,温度脊区位于湿区西侧的干区内。13 时等温线密集带及锋面(图 8a 桔色虚线)仍位于暖舌西缘的内蒙古境内,而干线位于黑龙江、吉林西部(图 8 黑色虚线),说明锋面位于干区以西,与干线不重合。星下点 5 km 分辨率的可见光云图上已可见干线附近与干线走向基本一致的积云细线(图 8a 蓝色实线处),积云细线位于干线东侧湿区内。30 min 后,在积云线略偏东的位置,出现了明显的积云带(图 8a 蓝色虚线处),说明该积云带由干线触发。值得一提的是,13—14 时干线附近均为偏南风,除积云带北端有偏西风与偏南风气旋

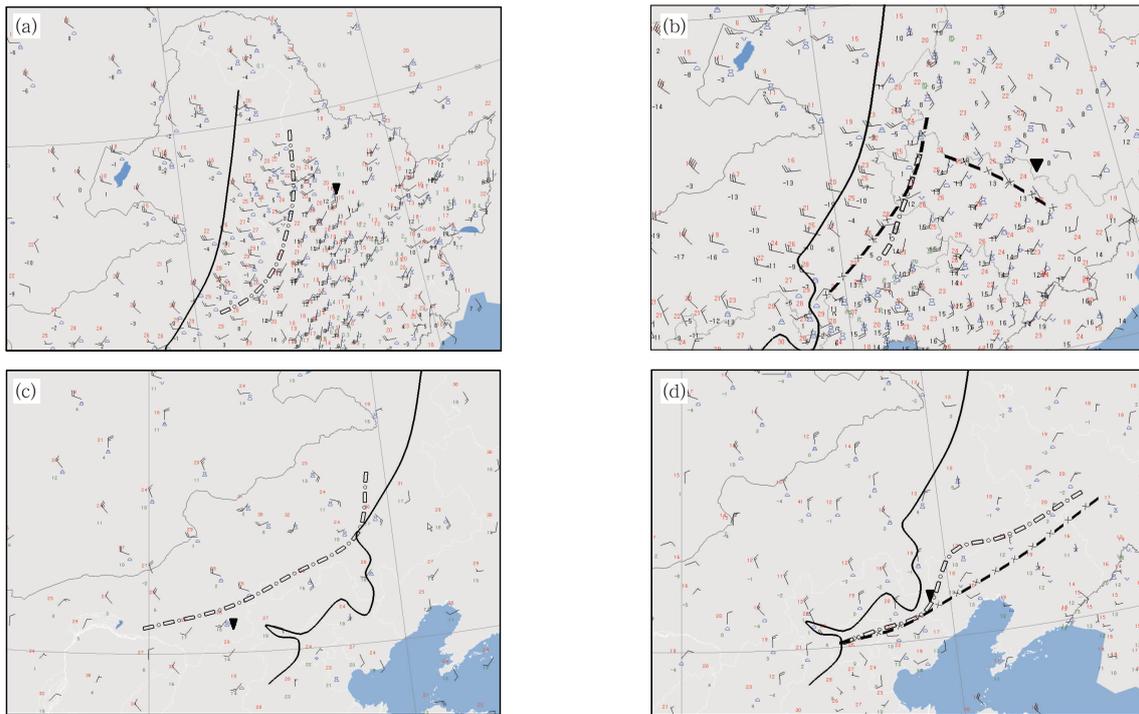


图 7 地面干线分析

(a. 2010 年 5 月 15 日 14 时, b. 2008 年 5 月 23 日 17 时, c. 2002 年 6 月 30 日 17 时, d. 2005 年 5 月 22 日 11 时; 黑色倒三角为龙卷发生地, “□○□○”和 “—×—×” 分别表示地面干线和辐合线, 黑色粗实线为 1000 m 地形等高线, 红(绿)色数字为地面温度(露点), 单位:℃)

Fig. 7 Surface dryline analysis

(a. 14:00 BT 15 May 2010, b. 17:00 BT 23 May 2008, c. 17:00 BT 30 July 2002, d. 11:00 BT 22 May 2005; the black inverted triangle sign is for the tornado location of genesis, “□○□○” and “—×—×” indicate surface dryline and convergence line, black solid line is 1000 m topographic height, and red and green digits are surface temperature and dew point, respectively, unit: °C)

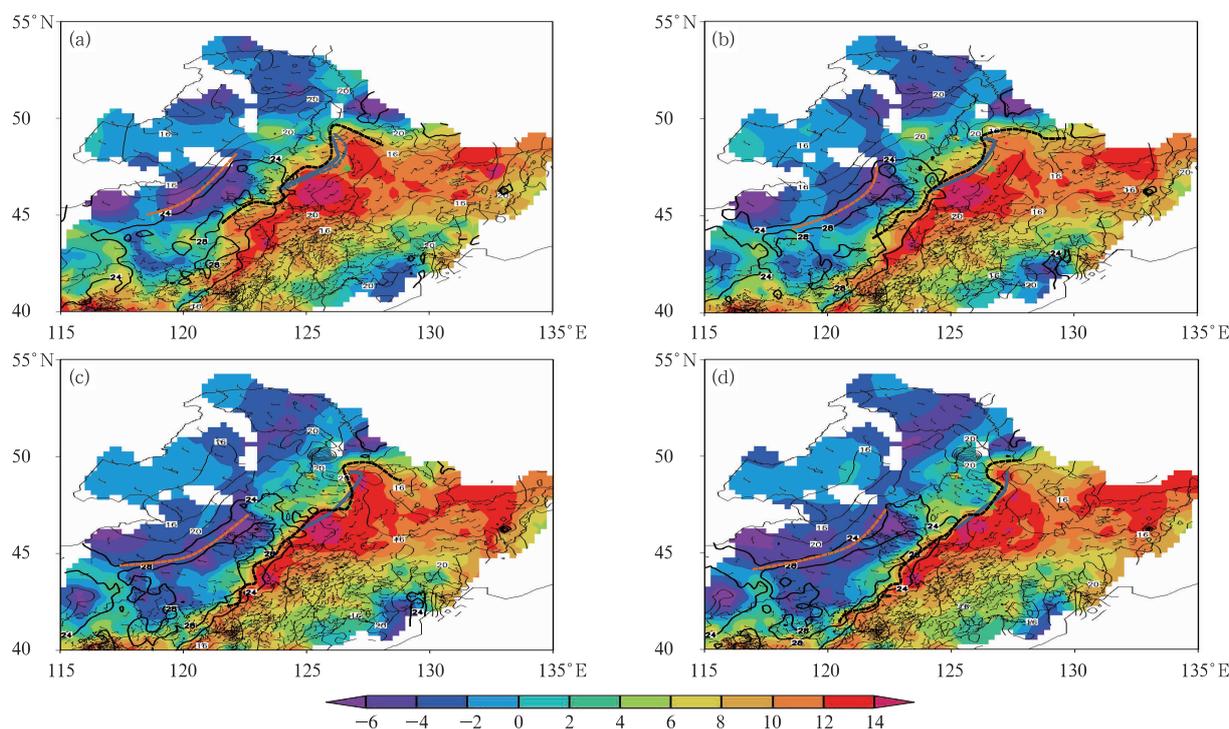


图 8 2010 年 5 月 15 日龙卷发生前地面加密自动站观测

(a. 13 时, b. 14 时, c. 15 时, d. 16 时; 阴影为露点, 黑色实线为温度, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ,

(a) 中蓝色实线为积云细线位置, 虚线为半小时后积云发展位置,

(b, c, d) 中蓝色实线为龙卷风暴位置, 黑粗虚线为干线,

桔色虚线为锋面位置, 绿色三角为龙卷发生地)

Fig. 8 Surface automatic weather station observations before the tornadoes occur on 15 May 2010

(a. 13:00, b. 14:00, c. 15:00, d. 16:00 BT; dew pint are shaded in color, black solid is isotherms contoured at  $2^{\circ}\text{C}$  intervals, blue solid thick line sign is for the location where the cumulus thin line begins, dashed line is for the location where the cumulus line development 30 min later in (a), and blue solid thick line sign is for the tornaoto location in (b), (c), (d), black thick dot line is dryline, orange thick dot line is front, and green triangle sign is for the tornado location of genesis)

式辐合外, 其他位置没有明显的辐合(图 8a、b)。13—16 时随着锋面(图 8 桔色虚线)东移, 地面暖舌略东移, 等温线密集带仍在内蒙古境内。14—16 时暖舌以北的干区东移明显, 干线两侧干湿对比明显, 需要指出, 干湿区没有明显的温度梯度。16 时干线西侧转为西北风, 与东侧偏南气流形成辐合线, 龙卷风暴在干湿交界处强烈发展, 龙卷发生地(绿色三角)紧靠干线, 此时距离龙卷发生时间还有 90 min。

美国最常见的干线为翻越落基山的大陆性气团与墨西哥湾暖湿气流的交汇处, 出现在美国中部落基山东坡与大平原交界附近。也有与地形无关的由中纬度气旋动力作用形成的干线, 其主要物理过程为干空气下沉导致水平动量下传形成干湿边界及边界移动(<http://glossary.ametsoc.org/wiki/>

Dryline, Electronic version of the 2nd Edition of the Glossary of Meteorology)。影响东北风暴的干线多由越过大兴安岭等山脉的大陆性气团与平原地区的偏南暖湿气流交汇形成(图 7a、b、d), 海拔 1000 m 以上的蒙古高原上也会有干线形成(图 7c), 干区由起源于对流层中层的西北气流下沉形成。冷涡东北象限的偏东气流有时相对南侧气流干, 如图 7b 中龙卷风暴附近的辐合线北侧偏东气流比南侧偏南气流露点温度低  $4\text{--}6^{\circ}\text{C}$ , 虽达不到干线的标准, 但也有明显的干湿差异。冷且相对干的气流经过高原或下山时, 干绝热下沉增温和晴空辐射增温的共同作用使气团增温显著, 与其前方的湿气团相比温度差不明显, 有时还更高。有些研究(Schaefer, 1986; Ziegler, et al, 1993)表明, 干线能强迫较强的垂

直运动,量级可达 1 m/s。随着干线增强,垂直速度相应增大。数值模拟表明,当有小的地形扰动时干线附近垂直速度可达 4—5 m/s(Campbell, et al, 2014)。干线附近有明显的辐合线,且随着干线增强,辐合线两侧风速也在增强,东侧的暖湿区常常出现几百千米的中尺度低空急流(图 3 中灰色箭头)。在干线和辐合线附近触发的龙卷风暴多呈带状。由于高空偏西风较强,干线上触发的雷暴平流到湿区一侧强烈发展。

理论上来说,触发雷暴所需要的抬升强度由对流抑制能量决定,江淮地区夏季龙卷环境的对流抑制能量常在 50 J/kg 以下,而东北地区由于低层水汽含量较低,龙卷环境的对流抑制能量并不小:有 8 个个例在 100 J/kg 以上。因而必须有较强的抬升才能触发雷暴。有 9 个个例由于干线及其伴随的强辐合线触发雷暴,另外 3 次龙卷风暴的抬升机制为锋面,其中 2005 年 7 月 15 日为明显的冷锋,16 日为冷暖锋交界的三叉点,而这两次过程雷暴触发位置以西有干线存在,是否干线在雷暴触发过程中起作用尚难以确定。2007 年 8 月 8 日为冷锋。2005 年 8 月 10 日辽宁营口弱龙卷类似江淮龙卷,处于深厚偏南气流中,水汽充沛,对流抑制能量小,抬升触发系统可能是偏南风脉动造成的南风风速辐合。

#### 4 结论与讨论

综上所述,东北龙卷发生环境的主要特征如下:

(1) 东北龙卷多发生在冷涡背景下,直接影响系统为冷涡后部伴随干侵入的横槽等次天气尺度扰动。环境参数特点为:大的环境温度直减率、高低空强风垂直切变以及低层较干的环境(相对于美国及中国其他地区)。风暴抬升触发系统常为干线及其伴随的边界层强辐合。当“ $\Delta T_{75}$ ”大于  $20^{\circ}\text{C}$ ，“ $\Delta T_{85}$ ”大于  $30^{\circ}\text{C}$ ，0—6 km 风垂直切变大于  $4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，0—1 km 风垂直切变大于  $10 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ，且有明显的低空急流和干线时,需要考虑出现龙卷的可能性。

(2) 水汽、深层和低层风垂直切变、温度直减率以及干线或冷锋触发机制是龙卷风暴发生与否的几个关键因子。午后发生龙卷的位置通常处于 08 时探空显示的低空湿舌西北侧 100 km 左右的干区中,而湿舌推进的速度难以准确估计。有利于龙卷发生的环境条件预报的关键点不是业务预报中常关注的“高空冷空气扰动”而是边界层水汽变化。可以

通过多普勒天气雷达速度方位显示风廓线(VWP)观察低空急流变化,同时监测地面露点和地面湿度平流观察水汽条件变化,为龙卷潜势预报和预警提供重要线索。

(3) 龙卷发生在傍晚前后,其环境参量 08—20 时的 12 h 内变化显著:500 hPa 风速平均增幅达 10 m/s,低空风速和水汽亦显著增大。层结不稳定(明显的对流有效位能)的建立由温度直减率大值区东移和低层湿舌西伸北扩至二者叠置造成。与发生在美国南部大平原地区有利于强对流环境的形成非常类似,只是范围要小得多。

(4) 在 13 例龙卷中,有 2 例出现在冷涡中心环流区,其中一例为非超级单体(非中气旋)龙卷,该个例中近风暴环境的垂直涡度很大,而雷暴内强烈上升气流的拉伸作用使垂直涡度大大加强,这或许是这类非超级单体风暴中龙卷形成的关键物理过程之一。

东北地区龙卷发生同时伴随其他强对流天气,如雷暴大风和冰雹,偶尔还会出现短时强降水,本文选择的个例未剔除在出现龙卷的同时伴有龙卷以外的强对流天气的案例。区分龙卷和非龙卷强对流风暴环境需要选择更多的个例做进一步的对比研究。

#### 参考文献

- 陈秋士. 1987. 天气和次天气尺度系统的动力学. 北京: 科学出版社, 166pp. Chen Q S. 1987. The Dynamics of Synoptic and Subsynoptic Systems. Beijing: Sciences Press, 166pp (in Chinese)
- 丁一汇. 2008. 中国气象灾害大典: 综合卷. 北京: 气象出版社, 948pp. Ding Y H. 2008. The Dictionary of China Meteorological Disaster: Comprehensive Volume. Beijing: China Meteorological Press, 948pp (in Chinese)
- 方丽娟, 姬菊枝, 陶国辉. 2009. 一次超级单体风暴中龙卷的天气过程分析及龙卷强度判定. 自然灾害学报, 18(2): 167-172. Fang L J, Ji J Z, Tao G H. 2009. Weather analysis and grade determination of a tornado occurring in a single super-storm. J Natural Disasters, 18(2): 167-172 (in Chinese)
- 冯婧, 周伟灿, 徐影. 2012. 1980—2009 年我国龙卷事件变化. 气候变化研究进展, 8(3): 183-189. Feng J, Zhou W C, Xu Y. 2012. Change characters of tornados in China in 1980 - 2009. Adv Climate Change Res, 8(3): 183-189 (in Chinese)
- 何彩芬, 姚秀萍, 胡春蕾等. 2006. 一次台风前部龙卷的多普勒天气雷达分析. 应用气象学报, 17(3): 370-375. He C F, Yao X P, Hu C L, et al. 2006. Analyses on a tornado event in front of typhoon. J Appl Meteor Sci, 17(3): 370-375 (in Chinese)

- 蒋义芳, 吴海英, 沈树勤等. 2009. 0808 号台风凤凰前部龙卷的环境场和雷达回波分析. 气象, 35(4): 68-75. Jiang Y F, Wu H Y, Shen S Q, et al. 2009. Analysis on environmental conditions and Doppler radar data for tornado events in front of Typhoon Fenghuang (0808). Meteor Mon, 35(4): 68-75 (in Chinese)
- 金巍, 曲岩, 安来友. 2009. 超级单体引发的龙卷天气过程分析. 气象, 35(3): 36-42. Jin W, Qu Y, An L Y. 2009. Analysis on the tornado weather process induced by a super-cell. Meteor Mon, 35(3): 36-42 (in Chinese)
- 李佳英, 俞小鼎, 王迎春. 2006. 用探空资料检验中尺度数值模式对强对流天气的诊断分析能力. 气象, 32(7): 13-17. Li J Y, Yu X D, Wang Y C. 2006. Evaluation of convective parameters derived from mesoscale numerical model by sounding data. Meteor Mon, 32(7): 13-17 (in Chinese)
- 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. 气象, 35(10): 32-39. Liu J, Zhu J J, Wei D B, et al. 2009. Doppler weather radar typical characteristics of the 3 July 2007 Tianchang supercell tornado. Meteor Mon, 35(10): 32-39 (in Chinese)
- 刘宁微, 马雁军, 刘晓梅等. 2007. 辽宁省“05-6”龙卷风过程的诊断与数值模拟. 自然灾害学报, 16(5): 84-90. Liu N W, Ma Y J, Liu X M, et al. 2007. Diagnosis and numerical simulation of a tornado course in Liaoning Province in June 2005. J Natural Disasters, 16(5): 84-90 (in Chinese)
- 沈树勤. 1990. 台风前部龙卷风的一般特征及其萌发条件的初步分析. 气象, 16(1): 11-15. Shen S Q. 1990. Analysis of the general characteristics and genesis conditions of tornado in front of typhoon. Meteor Mon, 16(1): 11-15 (in Chinese)
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiy-an. 1980. Heavy Rainfalls in China Beijing: Science Press, 225pp (in Chinese)
- 王秀明, 俞小鼎, 朱禾. 2012. NCEP 再分析资料在强对流环境分析中的应用. 应用气象学报, 23(2): 139-146. Wang X M, Yu X D, Zhu H. 2012. The applicability of NCEP reanalysis data to severe convection environment analysis. J Appl Meteor Sci, 23(2): 139-146 (in Chinese)
- 吴芳芳, 俞小鼎, 张志刚等. 2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征. 气象学报, 71(2): 209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al. 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu. Acta Meteor Sinica, 71(2): 209-227 (in Chinese)
- 乌文奇, 佟建华, 邹艳东等. 2010. 通辽市一次强对流天气的环流背景和雷达回波分析. 内蒙古气象, (3): 13-15. Wu W Q, Tong J H, Zou Y D, et al. 2010. Circulation background and radar echo analysis of a severe convective weather in Tongliao city. Meteor J Inner Mongolia, (3): 13-15 (in Chinese)
- 徐良炎. 1988. 一九八七年我国龙卷灾害. 灾害学, (2): 60-62. Xu L Y. 1988. The tornado disasters on 1987. J Catastr, (2): 60-62 (in Chinese)
- 严华, 董长海. 2011. 科左后旗甘镇一次龙卷风的天气过程分析. 内蒙古气象, (6): 18-19. Yan H, Dong C H. 2011. Analysis on the weather process of tornado in Gan Town of Horqin Left Wing Rear Banner. Meteor J Inner Mongolia, (6): 18-19 (in Chinese)
- 姚叶青, 郝莹, 张义军等. 2012. 安徽龙卷发生的环境条件和临近预警. 高原气象, 31(6): 1721-1730. Yao Y Q, Hao Y, Zhang Y J, et al. 2012. Synoptic situation and pre-warning of Anhui tornado. Plateau Meteor, 31(6): 1721-1730 (in Chinese)
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民等. 2006a. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析. 高原气象, 25(5): 914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al. 2006a. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar. Plateau Meteor, 25(5): 914-924 (in Chinese)
- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南等. 2006b. 多普勒天气雷达原理与业务应用. 北京: 气象出版社, 314pp. Yu X D, Yao X P, Xiong T N, et al. 2006b. Principles and Operational Application of Doppler Weather Radar. Beijing: China Meteorological Press, 314pp (in Chinese)
- 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. 大气科学, 32(3): 508-522. Yu X D, Zheng Y Y, Liao Y F, et al. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm. Chin J Atmo Sci, 32(3): 508-522 (in Chinese)
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明. 2012. 雷暴与强对流临近天气预报技术进展. 气象学报, 70(3): 311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. Acta Meteor Sinica, 70(3): 311-337 (in Chinese)
- 张晰莹, 吴英, 王承伟等. 2010. 东北地区 MCC 雷达回波特征分析. 气象, 36(8): 32-39. Zhang X Y, Wu Y, Wang C W, et al. 2010. Analysis on MCC echo characters of Dopple radar in Northeast China, Meteor Mon, 36(8): 32-39 (in Chinese)
- 张晰莹, 吴迎旭, 张礼宝. 2013. 利用卫星、雷达资料分析龙卷发生的环境条件. 气象, 39(6): 728-737. Zhang X Y, Wu Y X, Zhang L B. 2013. Analysis of tornado ambient conditions based on the FY-2 satellite and radar data. Meteor Mon, 39(6): 728-737 (in Chinese)
- 张一平, 俞小鼎, 吴蓁等. 2012. 区域暴雨过程中两次龙卷风事件分析. 气象学报, 70(5): 961-973. Zhang Y P, Yu X D, Wu Z, et al. 2012. Analysis of the two tornado events during a process of regional torrential rain. Acta Meteor Sinica, 70(5): 961-973 (in Chinese)
- 郑峰, 钟建锋, 张灵杰. 2012. 超强台风“圣帕”引发温州类龙卷的特征分析. 高原气象, 31(1): 231-238. Zheng F, Zhong J F, Zhang L J. 2012. Analysis on a severe storm of Wenzhou similar tornado in the outer-region of the super typhoon Sepat. Plateau Meteor, 31(1): 231-238 (in Chinese)
- 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. 高原气象, 28(3): 617-625. Zheng Y Y, Zhu H F, Fang X, et al. 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm. Plateau Meteor, 28(3): 617-625 (in Chinese)
- Brooks H E, Lee J W, Craven J P. 2003. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global re-analysis data. Atmos Res, 67-68: 73-94
- Campbell P C, Geerts B, Bergmaier P T. 2014. A dryline in Southeast Wyoming. Part I: Multiscale analysis using observation and model on 22 June 2010. Mon Wea Rev, 142(1): 268-289
- Craven J P, Brooks H E. 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection. Natl Wea Dig, 28: 13-24
- Davies-Jones R, Trapp R J, Bluestein H B. 2001. Tornadoes and tornadic storms. Meteor Monogr, 28(50): 167-222
- Doswell C A III, Burgess D W. 1993. Tornadoes and tornadic storms-A review of conceptual model// Church C, Burgess D, Doswell C, et al. The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards, Geophysical Monograph 79. Washington DC: Amer Geophys Union, 161-172
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downburst in the context of general planetary scales. Mon Wea Rev, 38: 1511-1534
- Grams J S, Thompson R L, Snively D V, et al. 2012. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States. Wea Forecasting, 27(1): 106-123
- Lee B D, Wilhelmson R B. 1997. The numerical simulation of non-supercell tornado genesis. Part I: Initiation and evolution of pre-tornadic mesocyclone circulations along a dry outflow boundary. J Atmos Sci, 54: 32-60
- Markowski P, Richardson Y. 2010. Mesoscale Meteorology in Mid-latitudes. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell Publication, 406 pp
- Schaefer J T. 1986. The dryline// Ray P S. Mesoscale Meteorology and Forecasting. San Antonio: Amer Meteor Soc, 549-572
- Straka J M, Rasmussen E N, Davies-Jones R P, et al. 2007. An observational and idealized numerical examination of low-level counter-rotating vortices in the rear flank of supercells. Electron J Severe Storms Meteor, 2(8): 1-22
- Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al. 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. Wea Forecasting, 18(6): 1243-1261
- Thompson R L, Edwards R, Mead C M. 2005. An update to the supercell composite and significant tornado parameters// Preprints, 22nd Conf. Severe Local Storms, Hyannis, MA: Amer Meteor Soc
- Wakimoto R M, Wilson J W. 1989. Non-supercell tornadoes. Mon Wea Rev, 117(6): 1113-1140
- Ziegler C L, Hane C E. 1993. An observational study of the dryline. Mon Wea Rev, 121(4): 1134-1151