

王毅,郑媛媛,张晓美,等. 夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型强对流天气的环境条件对比研究[J]. 气象,2012,38(12): 1473-1481.

夏季安徽槽前形势下龙卷和非龙卷型 强对流天气的环境条件对比研究^{*}

王毅¹ 郑媛媛² 张晓美³ 郝莹² 曹卫卫²

1 国家气象中心,北京 100081

2 安徽省气象台,合肥 230031

3 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

提 要: 利用NCEP再分析资料,对安徽省夏季高空槽前形势下两类强对流天气各5次个例的环流特征、热力和动力条件进行了对比分析。结果表明:以大风、短时强降水天气为主的非龙卷类表现为高空的低槽比较深厚,而龙卷的产生多是由于较浅的短波槽引起的,并且低层有西南急流存在,导致较强的垂直风切变。通过比较热力和动力物理量平均场的分布特征发现:在槽前形势下水汽条件都比较好,夏季整层大气可降水量平均在55 mm以上,但出现龙卷时中低层的垂直风切变非常强,龙卷类0~1 km垂直风切变大约是非龙卷类的3倍。由于存在较强的垂直风切变,龙卷类低层的风暴相对螺旋度也强于非龙卷类。从动力和热力条件综合来看,出现龙卷时的对流有效位能并不是很大,但能量螺旋度很大,即风暴相对螺旋度上差异更加明显。因此在预报槽前类龙卷天气时,应重点关注环境风场的垂直切变和风暴相对螺旋度。

关键词: 强对流天气, 龙卷, 垂直风切变, 螺旋度

The Contrastive Research on Environmental Conditions for Tornadic and Nontornadic Severe Convective Weather Under Ahead of Trough Pattern During Summer in Anhui Province

WANG Yi¹ ZHENG Yuanyuan² ZHANG Xiaomei³ HAO Ying² CAO Weiwei²

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

3 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on NCEP ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) reanalysis data, the large-scale circulation features as well as thermal and dynamic conditions for two types (5 cases for each type) of severe convective weathers under ahead of trough pattern during summer in Anhui Province are analyzed. The results show that: the nontornadic type mainly causes strong wind and short-time heavy rainfall which is characterized by deep upper trough. However, the tornado is usually triggered by short wave trough with the low-level jet which causes strong vertical wind shear. By comparing the composite thermal and dynamic parameters, it is demonstrated that the moisture condition is good for both types of severe convective weathers and the average precipitable water during summer is above 55 mm. However, the vertical wind shear at middle-to-low levels is very strong when tornado occurs and the 0—1 km vertical wind shear is about 3 times higher than that of non-tornadic type. Because of larger vertical wind shear, the storm relative helicity (SRH) of tornadic type is

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200906003和GYHY201006002)、国家自然科学基金(41175043)和全国强对流预报专家团队共同资助

2012年2月24日收稿; 2012年8月28日收修定稿

第一作者:王毅,主要从事天气预报研究.Email:kevin617@gmail.com

stronger than that of nontornadic type. According to the thermal and dynamic conditions, the CAPE of tornadic type is not very large while the energy helicity is large and significant differences are found in storm relative helicity. Therefore, more attention should be paid to the vertical wind shear and SRH in forecasting the tornado under ahead of trough pattern.

Key words: severe convective weather, tornado, vertical wind shear, helicity

引 言

强对流天气是影响安徽省的主要灾害性天气之一,主要包括雷雨大风、冰雹、龙卷和短时强降水,具有强度大、时间短、破坏力强等特点。近几年安徽省出现了多次龙卷天气,造成了大量人员伤亡和财产损失。

随着探测手段的发展,多普勒雷达等观测设备的应用使得对强对流天气的认识不断深入。针对安徽省的龙卷天气,不少专家学者利用多种资料进行了诊断分析^[1-5]。另一方面,随着数值预报产品的广泛应用,一些利用物理量参数的预报方法和系统也在业务中陆续建立。郝莹等^[6]利用 T213 数值预报产品计算的物理量进行雷暴潜势预报。梁爱民等^[7]利用 NCEP 再分析资料分析了北京雷暴大风日各物理量平均场的特征。陈艳等^[8]通过对对流有效位能的计算检验发现其对强对流天气的发生有较好的指示作用。赵培娟等^[9]通过计算大气动力和热力学参数分别建立了河南省区域性冰雹、雷雨大风和短时强降水的客观预报方程。上述研究主要针对的是单一类型的强对流天气,但是目前业务上对于不同强对流天气的分类预报仍是个难题,特别是对龙卷的预报还有很大的困难^[10]。其原因在于不同大尺度环流背景下,强对流天气的触发机制不同,水汽条件、不稳定层结、抬升触发机制和风垂直切变等要素的作用不尽相同,产生的强对流天气类型也不相同^[11]。因此研究产生不同类型强对流天气环境条件的差异,对于提高灾害性天气的短期、短时预报水平,具有十分重要的意义。目前,关于不同强对流天气的对比分析研究逐步增多。雷蕾等^[12]分析了多种物理参量在冰雹、雷暴大风和短时暴雨天气下的差异。郑媛媛等^[11]根据安徽省典型强对流天气的大尺度环流背景场,将 500 hPa 形势场分为冷涡槽后类和槽前类,分别研究其物理机制和环境场特征,可以有效提高预报针对性,减少空报和漏报。作者指出安徽省龙卷主要发生在槽前类大尺度环流背景

下,但是相似的槽前形势下也经常只出现雷雨大风(非龙卷大风)和短时强降水,而不出现龙卷天气,因此有必要对槽前形势下出现龙卷天气的环境条件和物理机制做深入和有针对性的研究。

与以往对安徽省龙卷的分析不同,本文主要是基于安徽近年来几次发生在高空槽前形势下的龙卷个例进行合成分析,从平均场中寻找这些过程的共性,并与槽前形势下未出现龙卷,只出现大风、短时强降水的个例进行对比分析,试图得出龙卷天气发生的环境场特征以及热力学和动力学条件,以期为今后判别此类天气提供参考。

1 资料和方法

对安徽省 2002—2008 年强对流天气大尺度环流背景进行分析,在槽前形势环流背景中选取了 5 次未出现龙卷,只出现大风、短时强降水天气的个例(简称为非龙卷类)和相似形势下产生龙卷天气(简称为龙卷类)的 5 次个例。表 1 给出了这 5 个龙卷过程的发生日期、地点及龙卷等级。虽然龙卷的尺度很小,但从表 1 可以看出,5 次龙卷天气发生的位置比较接近,第 2、3 和 5 次过程发生在淮北东部,第 4 次过程发生在江淮之间,第 1 次过程出现在沿江江北,因此对这 5 次个例进行合成分析的结果对龙卷的预报有直接的参考价值。

本文采用每天 4 次 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的 NCEP 再分析资料,分别计算非龙卷类和龙卷类的大尺度环流形势和物理量特征。在计算合成平均场的时候选取距离强对流发生前最近时次的资料进行计算,代表强对流发生前后的大气环境条件。

表 1 龙卷类 5 次个例的时间,地点和等级
Table 1 The time, location and grades of 5 tornadic type cases

序号	日期	时次和地点	龙卷等级
1	2003 年 7 月 8 日	22:10 庐江 23:20 无为	F1 级 F2~F3 级
2	2005 年 7 月 30 日	11:30 灵璧	F3 级
3	2006 年 6 月 29 日	06:45 泗县	F2 级
4	2007 年 7 月 3 日	16:47 天长	F3 级
5	2008 年 6 月 20 日	14:26 灵璧	F2 级

2 环流形势特征对比分析

图 1a 和图 1b 分别是非龙卷类和龙卷类发生前的 200 hPa 流场的合成图。从图中可以看到,非龙卷类的高层环流特征是在内蒙古中部到四川东部有气旋式流场,安徽处于槽前西南气流的分流区中。对于龙卷类,不难看出南亚高压较非龙卷类偏东,中心位于 28°N 附近,且在 35°N 以北有宽广而平直的高空急流存在,风速超过 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急流轴呈西北—东南走向,安徽位于急流中心出口区的南侧,有

辐散场与之配合(图略)。

非龙卷类的对流层中层 500 hPa 位势高度显示(图 1c),从山西到四川东部有一清楚的低槽存在,并且有温度槽相配合。此高空槽在 200 hPa 上的流场也有表现,说明非龙卷类的高空槽比较深厚。非龙卷类的西太平洋副高势力较为强大,588 dagpm 线最西端伸至 112°E ,最北端位置达到 33°N 以北,安徽南部地区受 588 dagpm 线控制。相对于非龙卷类,龙卷类对应的中纬度环流比较平直(图 1d), $35^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$ 有较浅的短波槽活动,且低槽所对应的温度场落后于高度场,因此有较强的冷平流将使低

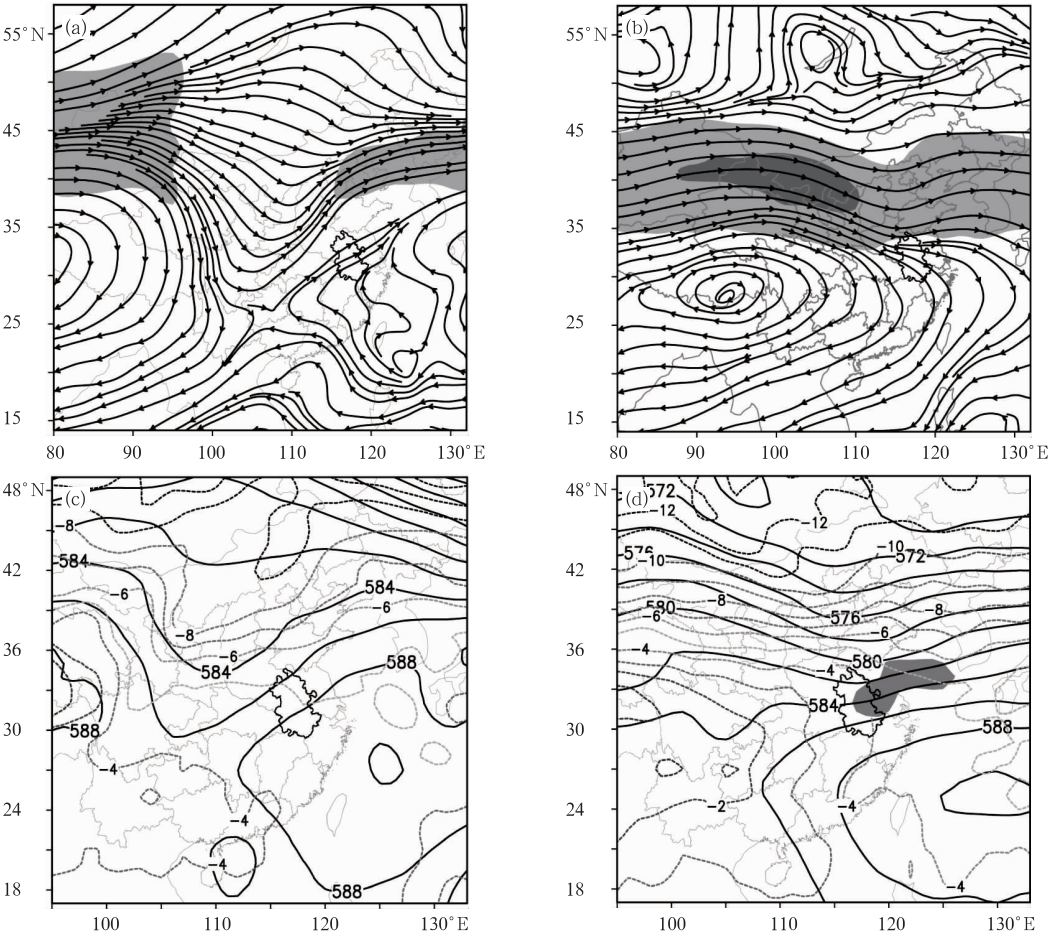


图 1 非龙卷类(a)和龙卷类(b)的 200 hPa 流场
(浅色阴影区代表风速大于 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 区域,深色阴影代表风速大于 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 急流);
非龙卷类(c)和龙卷类(d)的 500 hPa 位势高度(单位: dagpm)和温度场(单位: $^{\circ}\text{C}$)
(阴影区代表风速大于 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 急流)

Fig. 1 The 200 hPa stream fields for (a) nontornadic type and (b) tornadic type
(wind speed greater than $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ is shaded with light grey, wind speed greater
than $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ is shaded with dark gray); and the 500 hPa geopotential height
fields (unit: dagpm) and temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) for (c) nontornadic
type and (d) tornadic type (wind speed greater than $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ is shaded)

槽发展东移。另外值得注意的是,龙卷类的中层偏西风风速较大,在安徽东部及江苏中部上空超过 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。龙卷类的副热带高压(以下简称副高)位置相对于非龙卷类偏西偏南,588 dagpm 线最西端伸至 110°E 以西,最北端位置在 30°N 以南,安徽中部受 584 dagpm 线控制。

非龙卷类和龙卷类的概念模型见图 2。可以看出,非龙卷类从低层到高层安徽都受到槽前一致的西南风控制。龙卷类的环流特点是 200 hPa 上安徽北部处于分流区,500 hPa 上有偏西风气流,低层存在较强的西南急流,风随高度顺转,高层辐散低层辐合的形势有利于龙卷的发生。

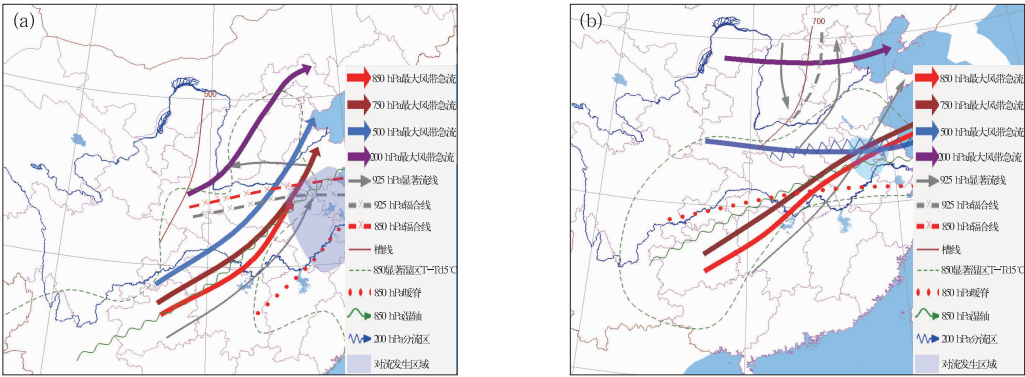


图 2 非龙卷类(a)和龙卷类(b)天气尺度概念模型及对流发生区域
Fig. 2 The conceptual pattern and area of convective weather of
(a) nontornadic type and (b) tornadic type

3 物理量特征对比分析

下面利用 NCEP 资料分析非龙卷类和龙卷类的水汽条件、动力条件以及能量和不稳定条件,目的是考察哪些条件有助于判别槽前形势下龙卷的发

生。由于 5 次龙卷个例主要发生在淮北东部这一区域,为了更好地揭示以上各条件对龙卷天气的预报意义,我们选取龙卷发生所在的格点区域($31^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$),分别计算了该区域非龙卷类和龙卷类 9 个物理量。计算方法是先计算各个个例的物理量,再进行合成平均,结果见表 2。

表 2 非龙卷类和龙卷类的一些物理量在龙卷发生区域($31^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)的平均值
Table 2 Average values of physical parameters for nontornadic type and tornadic type over the tornadoes occurred area ($31^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ}\sim 118^{\circ}\text{E}$)

	K / $^{\circ}\text{C}$	$CAPE$ / $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$T_{850-500}$ / $^{\circ}\text{C}$	$\theta_{se850-500}$ / K	$SHR_0-1\text{km}$ / 10^{-3} s^{-1}	$SHR_0-3\text{km}$ / 10^{-3} s^{-1}	$SHR_0-6\text{km}$ / 10^{-3} s^{-1}	PW / mm	LCL / m
非龙卷	37.95	2435.66	25.56	14.26	2.85	2.97	1.87	56.15	1011.45
龙卷	38.76	1271.38	23.55	7.61	8.72	5.11	2.55	63.95	582.65

3.1 水汽条件

强对流系统得以发生、发展和维持,必须有丰富的水汽供应。图 3a 和图 3b 分别是非龙卷类和龙卷类沿 117°E 的比湿的垂直剖面图。由图可见,龙卷类和非龙卷类对流层低层(850 hPa 高度以下)水汽条件较好,平均比湿都大于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在 850 hPa 高度以上,龙卷类的比湿均大于非龙卷类,特别是在 $700\sim 500\text{ hPa}$ 之间,龙卷类的比湿比非龙卷类大 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,说明龙卷类的湿层相对于非龙

卷更加深厚。此外,龙卷类的比湿等值线在对流层低层 36°N 以北向低层倾斜,表明龙卷类相对于非龙卷类在安徽以北地区较干。从两者比湿垂直分布的差值可以看出(图略),龙卷类在 850 hPa 以下 $34^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$ 之间比湿低于非龙卷类 $1\sim 2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,而在 34°N 以南略高于非龙卷类,说明龙卷类多发地区以北地区相对较干,以南地区相对较湿,相对于非龙卷类水汽的南北对比差异更为明显。

从表 2 可以看出,对于龙卷发生的区域来说,非龙卷类大气可降水量(PW)平均为 56.15 mm,而龙

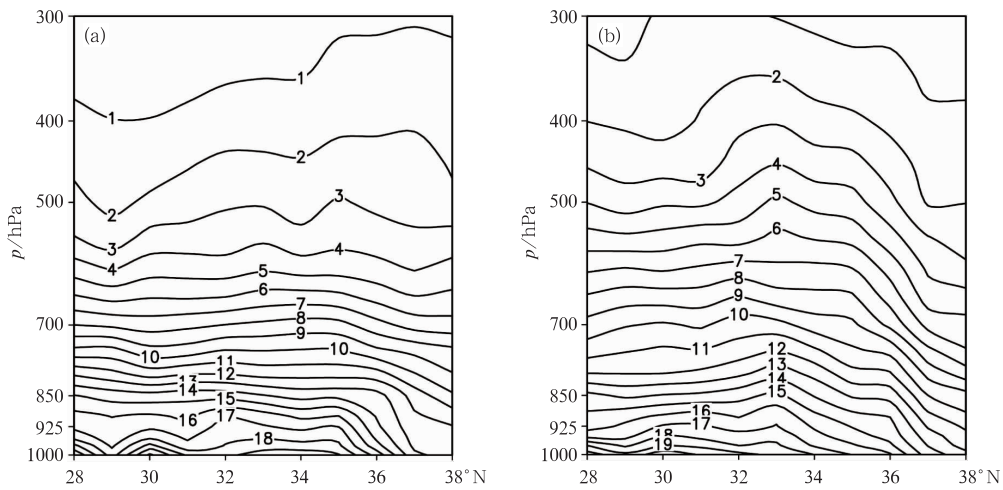


图 3 非龙卷类(a)和龙卷类(b)沿 117°E 比湿垂直剖面图(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Fig. 3 Vertical cross sections of specific humidity along 117°E (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
for (a) nontornadic type and (b) tornadoic type

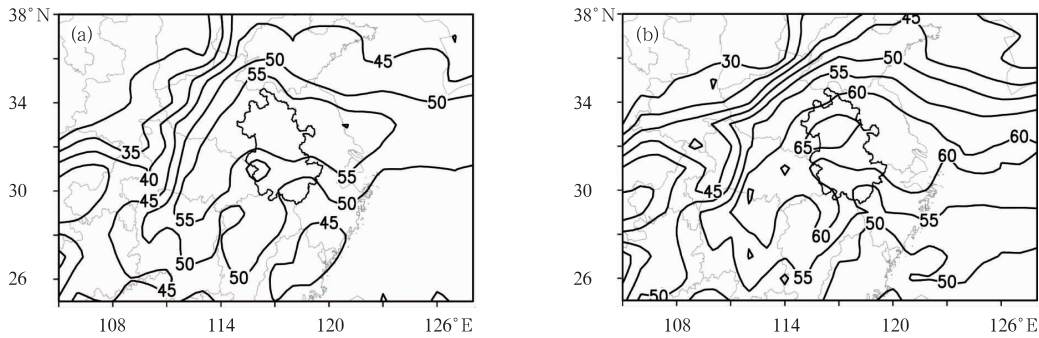


图 4 非龙卷类(a)和龙卷类(b)的大气可降水量(单位: mm)
Fig. 4 The precipitable water (unit: mm) for (a) nontornadic type and (b) tornadoic type

卷类 PW 平均为 63.95 mm,两者都呈现出湿对流风暴的特征。普查这 10 次强对流天气个例发现,除了非龙卷类 2007 年 8 月 2 日和龙卷类 2008 年 6 月 20 日这两次个例以外,其他个例都伴有短时强降水的出现。从大气可降水量的空间分布可知(图 4a 和图 4b),非龙卷类安徽省大部分地区大气可降水量在 55 mm 以上,而龙卷类则在 60 mm 以上。

另外,龙卷类的抬升凝结高度(LCL)平均为 582.65 m,非龙卷类的抬升凝结高度平均为 1011.45 m,说明较低的抬升凝结高度有利于龙卷的发生,这与姚叶青等^[2]统计的结果一致。

3.2 动力条件

分析 850 hPa 的涡度(图 5a 和图 5b)发现,非龙卷类在湖北东部至山东西部有一较强的正涡度区,中心值超过 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,而龙卷类超过 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度区范围明显大于非龙卷类,且主要分布

在安徽省北部,其中心值超过 $50 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,这与对流层低层淮北附近的气旋性涡旋有关。进一步分析沿 117°E 的涡度垂直剖面可知,龙卷类的正涡度带可以延伸至 500 hPa,而 500 hPa 以上为负涡度区,最大负涡度区位于 200 hPa,中心值小于 $-30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,正涡度区和负涡度区几乎呈垂直分布(图略)。当小尺度的对流风暴在对流层低层被激发后,移进正涡度区,对流风暴的气旋性涡度进一步发展,而上升运动的不均匀分布,会使沿风暴入流方向的水平涡度能够并入风暴的上升气流中扭转成垂直涡度,最终产生强烈的低层旋转导致龙卷涡旋的产生^[13]。由龙卷类 700 hPa 垂直速度场的分布(图 5d)可见,较强的上升运动区是与正涡度区相配合的。有研究表明^[5],对流层低层的水平涡度场越强,在上升气流中转换成的垂直涡度也越强,随后垂直涡度在上升气流中进一步被拉伸,从而有利于龙卷天气的出现。因此,较为深厚的正涡度区的存在

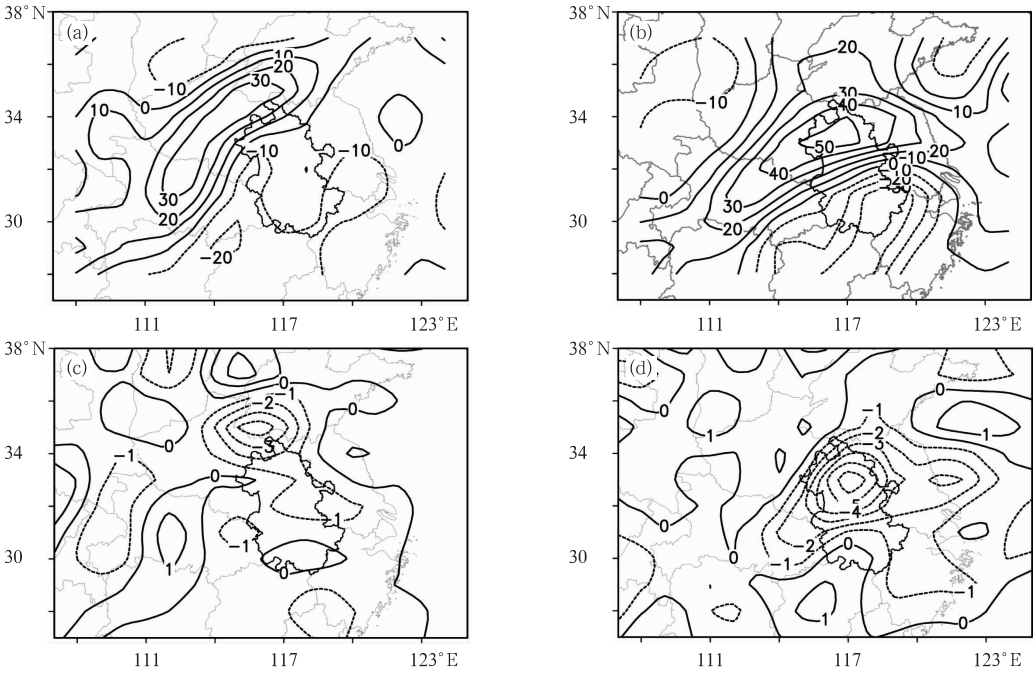


图 5 非龙卷类(a)和龙卷类(b)的 850 hPa 涡度场(单位: 10^{-5} s^{-1})及
非龙卷类(c)和龙卷类(d)的 700 hPa 垂直速度场(单位: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 The 850 hPa vorticity (unit: 10^{-5} s^{-1}) for (a) nontornadic type and (b) tornadic type; and
the 700 hPa vertical velocity (unit: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) for (c) nontornadic type and (d) tornadic type

是龙卷涡旋生成发展的一个重要背景条件。

研究表明^[10],垂直风切变是强对流发生、发展的必要条件。从图 2 可以看出,非龙卷类对流层从低层至高层以西南风为主。龙卷类在 500 hPa 以下为一致的西南风,500 hPa 及以上以偏西风气流为主,风向随高度顺转。

图 6a 和图 6b 分别是非龙卷类和龙卷类 0~1 km 的垂直风切变的分布图,可以看出龙卷类的垂直风切变明显强于非龙卷类,平均超过 $8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。另外,由表 2 可知,龙卷类的 0~1 km 垂直风切变

($SHR_{0-1 \text{ km}}$),0~3 km 垂直风切变($SHR_{0-3 \text{ km}}$)和 0~6 km 垂直风切变($SHR_{0-6 \text{ km}}$)都大于非龙卷类,但是两者在 0~1 km 的垂直风切变的差别最为显著,龙卷类 $SHR_{0-1 \text{ km}}$ 大约为非龙卷类的 3 倍。强的中低层水平风垂直切变,为龙卷天气提供了旋转潜势。因此可以把 0~1 km 垂直风切变的强度作为槽前形势下龙卷出现与否的一个重要因子。Thompson 等^[14]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 0~1 km 垂直风切变平均值为 $9.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,下限为 $5.5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,

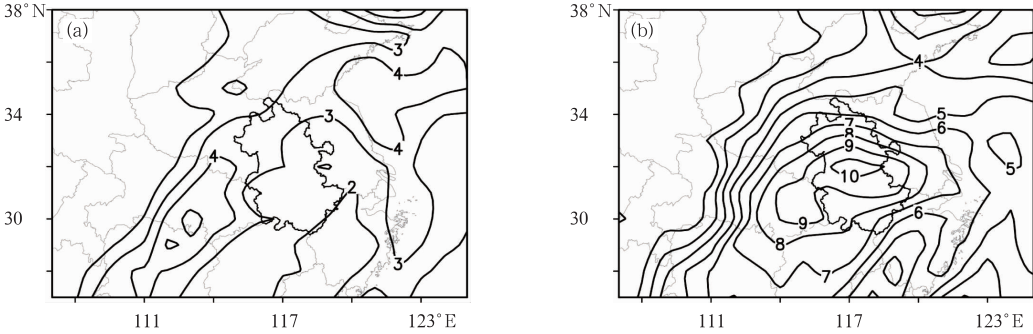


图 6 非龙卷类(a)和龙卷类(b)的 0~1 km 垂直风切变(单位: 10^{-3} s^{-1})

Fig. 6 The 0~1 km vertical wind shears (unit: 10^{-3} s^{-1})
for (a) nontornadic type and (b) tornadic type

与本文计算的结果比较一致。

3.3 能量和不稳定条件

对流有效位能 $CAPE$ 和 K 指数是日常强对流天气预报常用的两个判据。由表 2 可以看出,非龙卷类和龙卷类的 K 指数都超过 35°C ,两者之间的差异不是很大。 $CAPE$ 指数则是非龙卷类明显大于

龙卷类(图 7a),龙卷多发区平均达到 $2435.66\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表 2),这可能是由于非龙卷类的个例多发生在盛夏 7、8 月,中午气温升高导致 $CAPE$ 值较大。从龙卷类的 $CAPE$ 的空间分布可以看出(图 7b),淮北地区 $CAPE$ 的等值线比较密集,说明龙卷容易出现区域不是在 $CAPE$ 最大的地方,而是在 $CAPE$ 梯度最大的地方。

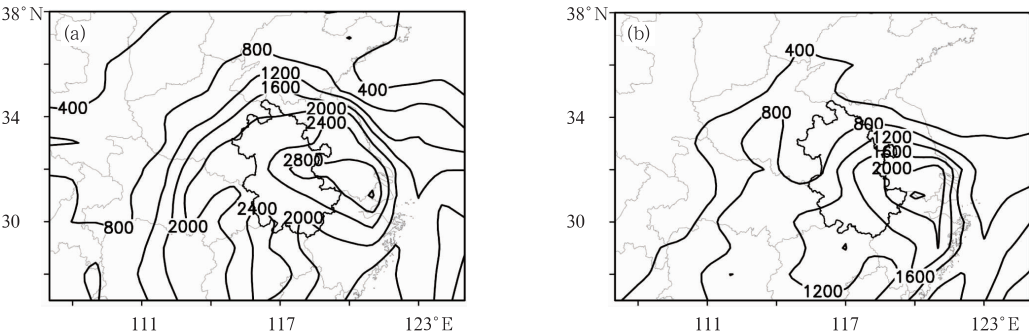


图 7 非龙卷类(a)和龙卷类(b)的对流有效位能($CAPE$, 单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Fig. 7 The $CAPE$ (unit: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) for (a) nontornadic type and (b) tornadic type

850 和 500 hPa 的假相当位温差($\theta_{se850-500}$)可以用来表示大气的不稳定的判据,由表 2 可以看出,非龙卷类均值约为 14.26 K ,而龙卷类均值为 7.61 K ,说明龙卷的发生不需要很高的不稳定条件。另外,非龙卷类和龙卷类的 850 和 500 hPa 的温度差($T_{850-500}$)都不是很大。郑媛媛等^[11]指出槽前形势下对流不稳定的建立不是由温度平流引起的,而主要是由湿度差动平流引起的。

3.4 螺旋度对比分析

风暴相对螺旋度(SRH)是诊断和预报对流灾害天气发生发展过程中十分有用的量^[15],它反映了一定气层厚度内环境风场的旋转程度和输入到对流体内环境涡度的多少,可以用于估算垂直风切变环境中风暴运动所产生的旋转潜势。本文利用 NCEP 资料计算了 1000~700 hPa 的风暴相对螺旋度。如图 8a 和图 8b 所示,非龙卷类的 SRH 在安徽大部分地区约为 $60\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,而龙卷类的 SRH 明显强于非龙卷类,安徽大部分地区超过 $160\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,且龙卷多发生在风暴相对螺旋度梯度的大值区。由风暴螺旋度的物理意义, SRH 值较大与较强的风垂直风切变密切相关,而强的垂直风切变又引起水平涡度的增加,因此 SRH 的大小也反映了垂直风切变的强弱^[16]。龙卷类低层的 SRH 较大与前文计算的

0~1 km 垂直风切变较强是一致的。
Colquhoun 等^[17]指出对流天气既可以发生在低风暴相对螺旋度结合高对流有效位能的环境中,也可以发生在相反的环境中,两者之间存在一种平衡关系,他定义能量螺旋度指数($EH I$)为:
$$EH I = (CAPE \times SRH) / 1.6 \times 10^5$$
该指数有效地把强对流发生时动能和热力能量结合起来,并被用于超级单体和龙卷的预报,其数值越大,出现超级单体的可能性和强度就越大。图 8c 和图 8d 显示非龙卷类对应的 $EH I$ 较小,在安徽大部分地区不超过 1,而龙卷类的 $EH I$ 则较大,在安徽省中南部超过 2,中心最大值达到 3 以上,并且其梯度大值区对应了龙卷的多发地区。

进一步分析非龙卷类和龙卷类个例的 $CAPE$ 、 SRH 和 $EH I$ 三种指数表明(表 3),龙卷类的 SRH 普遍大于非龙卷类,5 次龙卷发生前 SRH 都超过 $160\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,平均值为 $258.89\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$,明显大于非龙卷类。 $CAPE$ 值在非龙卷和龙卷类之间的差异不是很明显。龙卷可以发生在中等对流有效位能,高风暴相对螺旋度的环境中,如 2006 年 6 月 29 日和 2007 年 7 月 3 日的两次龙卷, $CAPE$ 值都在 $1000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下,而 SRH 都超过了 $200\text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 。由此可见,龙卷的发生不一定需要很强的热力能量条件,但较强的动力条件特别是对流层中低层的垂

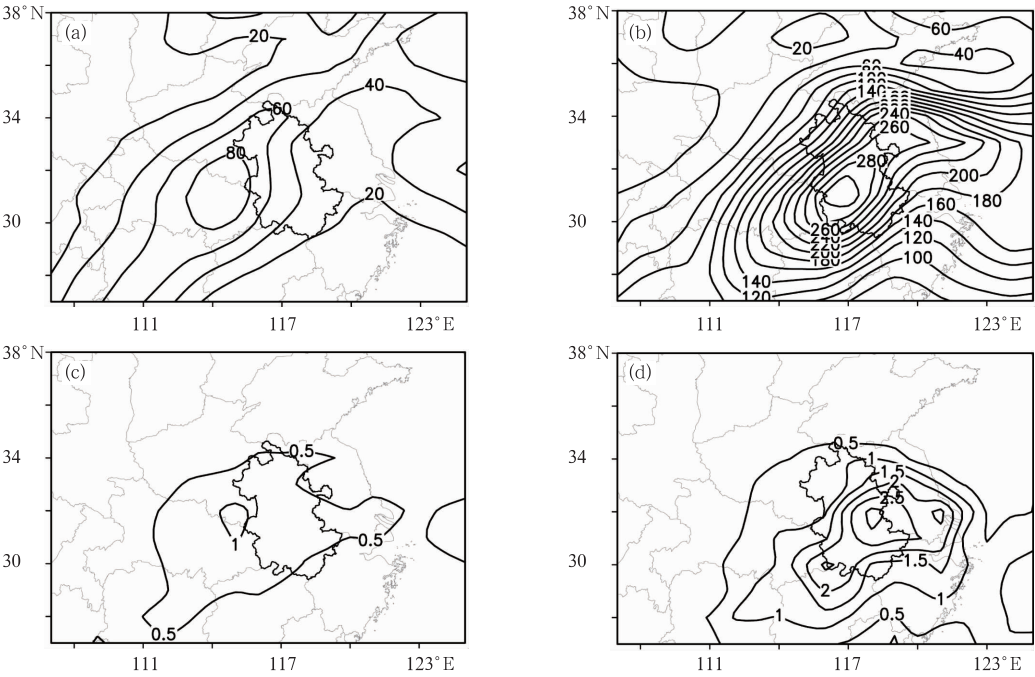


图 8 非龙卷类(a)和龙卷类(b)的风暴相对螺旋度(SRH,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$);
非龙卷类(c)和龙卷类(d)的能量螺旋度(EHI,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{J} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Fig. 8 The storm relative helicity (SRH, unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) for (a) nontornadic type
and (b) tornadic type; and the energy helicity index (EHI, unit: $\text{m}^2 \cdot \text{J} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$)
for (c) nontornadic type and (d) tornadic type

表 3 非龙卷类和龙卷类个例的 CAPE、SRH 和 EHI 及其平均值
Table 3 The CAPE, SRH and EHI parameters and their average
values for nontornadic type and tornadic type

个例时间		CAPE / $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	SRH / $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	EHI / $\text{m}^2 \cdot \text{J} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$
非龙卷	2002 年 8 月 24 日 14 时	3342.02	54.47	1.20
	2005 年 7 月 15 日 14 时	2507.33	65.66	1.06
	2006 年 8 月 3 日 14 时	2417.16	3.54	0.05
	2007 年 7 月 25 日 14 时	2151.52	40.78	0.39
	2007 年 8 月 2 日 14 时	1760.27	51.73	0.55
	平均值	2435.66	43.23	0.65
龙卷	2003 年 7 月 8 日 20 时	1144.98	378.91	3.19
	2005 年 7 月 30 日 14 时	2691.91	160.61	2.73
	2006 年 6 月 29 日 08 时	468.93	212.83	0.72
	2007 年 7 月 3 日 14 时	743.92	354.92	1.88
	2008 年 6 月 20 日 14 时	1307.14	187.16	1.46
	平均值	1271.38	258.89	2.00

直风切变和风暴相对螺旋度对于龙卷的触发起着重要的作用。

4 结 论

利用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料对安徽省高空槽前形势下两类强对流天气进行了对比分析,重点揭示了以大风、短时强降水为主的强对流天气(非龙卷

类)和发生龙卷的强对流天气(龙卷类)在大尺度环流背景、水汽条件、垂直风切变以及不稳定能量等物理量上的异同,得出以下主要结论:

(1)两类强对流天气的共同特点是:大尺度环流形势上安徽都处于高空槽前,低层受暖低压控制,但是龙卷类的 500 hPa 低槽有明显的短波槽特征。非龙卷类 500 hPa 低槽比较深厚,表明对流层中层的冷空气势力较强。龙卷类相比非龙卷类,低层有较

强的西南急流,一方面提供了丰富的水汽条件,另一方面也造成了中低层较强的垂直风切变。同时,高层 500 和 200 hPa 有急流存在,为龙卷的发生创造了有利的动力抬升条件。

(2)在夏季槽前形势下两类强对流天气的水汽条件都比较好,整层大气可降水量平均在 55 mm 以上,850 hPa 高度以下平均比湿都大于 $10\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。但是在 850 hPa 高度以上,龙卷类的比湿均大于非龙卷类,表明龙卷易发生在整层较湿的环境中。此外,龙卷类的抬升凝结高度也明显低于非龙卷类。刘娟等^[18]分析 2007 年 7 月 3 日安徽龙卷时指出低空西南急流增加了水汽,有利于很低的凝结高度,使风暴具备很低的云底,因此,龙卷往往和暴雨或强降水天气相伴发生,本文的研究表明这是这一区域龙卷天气的重要特点。

(3)低空垂直风切变在龙卷类和非龙卷类之间差异明显,龙卷类 0~1 km 垂直风切变大约是非龙卷类的 3 倍。由于存在较强的垂直风切变,龙卷类低层的风暴相对螺旋度也明显强于非龙卷类。通过综合分析非龙卷类和龙卷类个例的热力能量和动力参数发现,龙卷可以发生在中等对流有效位能,高风暴相对螺旋度的环境中,因此动力条件特别是对流层中低层的垂直风切变和风暴相对螺旋度对于安徽省夏季龙卷的触发起着重要的作用。

参考文献

[1] 俞小鼎,郑媛媛,张爱民. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J]. 高原气象,2006,25(5):130-145.
 [2] 姚叶青,俞小鼎,郝莹,等. 两次强龙卷过程的环境背景场和多普勒雷达资料的对比分析[J]. 热带气象学报,2007,23(5):483-490.
 [3] 曹志强,方宗义,方翔. 2007 年 7 月皖苏北部龙卷风初步分析

[J]. 气象,2008,34(7):15-19.
 [4] 吴海英,沈树勤,蒋义芳. 龙卷诱发原因的实例分析[J]. 气象科学,2009,29(3):335-341.
 [5] 郑媛媛,朱红芳,方翔,等. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究[J]. 高原气象,2009,28(3):617-625.
 [6] 郝莹,姚叶青,陈焱. 基于对流参数的雷暴潜势预报研究[J]. 气象,2007,33(1):51-56.
 [7] 梁爱民,张庆红,申红喜,等. 北京地区雷暴大风预报研究[J]. 气象,2006,32(11):73-80.
 [8] 陈艳,寿绍文,宿海良. CAPE 等环境参数在华北罕见秋季大暴雨中的应用[J]. 气象,2005,31(10):56-61.
 [9] 赵培娟,吴蓁,郑世林,等. 河南省强对流天气诊断分析预报系统[J]. 气象,2010,36(2):33-38.
 [10] 郑永光,张小玲,周庆亮,等. 强对流天气短时临近预报业务技术进展与挑战[J]. 气象,2010,36(7):33-42.
 [11] 郑媛媛,姚晨,郝莹,等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J]. 气象,2011,37(7):795-801.
 [12] 雷蕾,孙继松,魏东. 利用探空资料判别北京地区夏季强对流的天气类别[J]. 气象,2011,37(2):136-141.
 [13] 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,2005:90-169.
 [14] Thompson R L, Edwards R, Hart J A, et al. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle[J]. Wea Forecasting,2003,18(6):1243-1261.
 [15] Davies-Jones J M. Hourly helicity, instability, and EHI in forecasting supercell tornadoes[M]. Preprints, 17th Conf on Severe Local Storms, St. Louis, MO: Amer Meteor Soc, 1993:107-111.
 [16] 王丽荣,胡志群,匡顺四. 应用雷达产品计算风暴相对螺旋度[J]. 气象,2006,32(4):45-51.
 [17] Colquhoun J R, Riley P R. Relationship between tornado and various wind and thermodynamic variable[J]. Wea Forecasting, 1996, 11(3):360-371.
 [18] 刘娟,朱君鉴,魏德斌,等. 070703 超级单体龙卷的多普勒雷达典型特征[J]. 气象,2009,35(10):32-39.