王霁吟, 陈宝君, 郑凯琳, 等. 2019. 云滴数浓度对超级单体龙卷影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 43(6): 1413-1423. WANG Jiyin, CHEN Baojun, ZHENG Kailin, et al. 2019. A Numerical Study of the Influence of the Droplets Number Concentration on Supercell Tornadoes [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1413-1423. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18241

# 云滴数浓度对超级单体龙卷影响的数值模拟研究

王霁吟1 陈宝君2 郑凯琳2 花少烽2

1浙江省气象台,杭州310021
2南京大学大气科学学院,南京210023

**摘 要** 为了探讨云滴数浓度对于龙卷发生、发展的影响,利用ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模式,通过调整云滴数浓度(分别取高3000 cm<sup>-3</sup>、中1000 cm<sup>-3</sup>和低100 cm<sup>-3</sup>)的变化,对2003 年7月8日安徽省 无为县超级单体龙卷进行理想模拟试验。研究表明:三组试验都模拟出超级单体风暴的特征结构如钩状回波和V 型入流缺口;云滴数浓度高的试验中上升气流更强、风暴较先发展且持续时间长,近地面涡度也较其他两组试验 更大;从三组试验中找到4个龙卷涡旋,其中云滴数浓度高的试验中有两个,涡旋总持续时间接近30 min,最大 近地面风速为46.93 m s<sup>-1</sup>,最大涡度值为0.42 s<sup>-1</sup>;高云滴数浓度情况下地面冷池弱,更有利于龙卷产生,并对龙 卷的发生、发展有促进作用。

关键词 云滴数浓度 超级单体龙卷 ARPS (Advanced Regional Prediction System)模式 数值模拟
文章编号 1006-9895(2019)06-1413-11 中图分类号 P445 文献标识码 A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18241

## A Numerical Study of the Influence of the Droplets Number Concentration on Supercell Tornadoes

WANG Jiyin<sup>1</sup>, CHEN Baojun<sup>2</sup>, ZHENG Kailin<sup>2</sup>, and HUA Shaofeng<sup>2</sup>

*1 Zhejiang Province Meteorological Observatory, Hangzhou* 310021
*2 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing* 210023

**Abstract** Numerical simulations with the Advanced Regional Prediction System (ARPS) model were performed to investigate the impact of DNC (droplets number concentration) on tornadogenesis in the supercell tornado over Wuwei County, Anhui Province on 8 July 2003. The three different droplets number concentrations were 3000 cm<sup>-3</sup>, 1000 cm<sup>-3</sup>, and 100 cm<sup>-3</sup>. Results showed that features of supercell tornado such as hook echo and V-type inflow gap were found in all experiments. However, the thunderstorm in the high DNC experiment with the strongest updraft and vortex developed first and lasted for a significant time. Four tornado vortices were found in the three numerical experiments. Two cases in the high DNC experiment lasted for nearly 30 min, with a maximum near-surface wind speed of 46.93 m s<sup>-1</sup> and a maximum vortex of  $0.42 \text{ s}^{-1}$ . These findings suggest that higher droplets number concentration have a positive effect on

收稿日期 2018-10-24; 网络预出版日期 2019-04-13

作者简介 王霁吟, 1989年出生, 硕士研究生、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

**资助项目** 国家自然科学基金项目41175118、41775132,浙江省气象科技项目2018QN15,浙江省科技厅重大项目2017C03035,浙江省气象科技重点项目2016ZD17

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41175118 and 41775132), Meteorological Science and Technology Project of Zhejiang Province (Grant 2018QN15), Major Project of the Science and Technology Department of Zhejiang Province (Grant 2017C03035), Major Meteorological Science and Technology Project of Zhejiang Province (Grant 2016ZD17)

the occurrence and development of tornadoes due to the attendant weaker cold pool.

Keywords Droplets number concentration, Supercell tornado, ARPS (Advanced Regional Prediction System) model, Numerical simulations

## 1 引言

龙卷是一种强烈的对流性灾害天气,其所经之 处常造成重大的人员伤亡和财产损失。龙卷分为超 级单体龙卷和非超级单体龙卷(Wilson,1986), 强烈的龙卷多数为超级单体龙卷。由于龙卷生命史 短、尺度小、破坏力大,提前做出预警和预报,并 采取适当手段干预龙卷过程以降低其所造成的影响 和损失,是目前中小尺度天气学难点和重点问题 之一。

目前,国内外都建立了通用的龙卷潜势预报指 标。Brooks et al. (2003)利用 NCEP 再分析资料, 采取临近探空(proximity soundings)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,其对龙卷有很好的 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, 2004)。王霁吟等(2015)结 合国内外已有指标,对2004~2009年中国发生的 龙卷进行整合分析,确定了在中国适合龙卷发生的 大气环境条件,并初步建立了一个适用于中国的龙 卷潜势预报通用指标,检验效果较好。然而,上述 研究单纯从热力、动力方面考虑尚不够,龙卷的发 生、发展可能还与微物理的因素有关。国内外的学 者已经进行了一些关于云微物理过程对超级单体龙 卷的影响研究。Gilmore et al. (2004a, 2004b) 运用 高分辨率的数值模拟探讨云微物理过程对超级单体 风暴的影响,结果表明风暴的各种特征,包括动力 结构、发展演变过程和降水都会随着模拟中选取的 云微物理参数化方案和方案中降水粒子谱的不同发 生很大变化。Snook and Xue(2006)通过改变Lin et al. (1983) 的三冰相参数化方案中的雨滴、雪和 冰雹粒子谱分布的截距,探讨了降水粒子谱分布特 征对超级单体风暴和龙卷的影响,发现截距较大 时,雨水蒸发和冰雹融化过程增强,易形成更大冷 池,进而影响阵风锋与风暴入流之间的配置关系, 最后形成龙卷的潜势减小。Rosenfeld et al. (2008, 2010)指出,大气气溶胶引起的云滴数浓度的变化 会影响云微物理过程,进而影响强对流系统;在暖 湿地区, 高云滴数浓度有利于大冰粒子产生, 因而 减少了融化和蒸发致冷,冷池变弱,这可能有利于 龙卷产生。国内也有少量关于云微物理过程对强风 暴的影响研究:许焕斌和魏绍远(1995),孙凌峰 等(2003)研究表明,云微物理过程在下沉气流发 展中起重要作用,尤其是水成物的拖曳、蒸发和融 化过程。Zheng and Chen (2014)利用 ARPS 模式 模拟研究了降水粒子谱变化对超级单体龙卷发展演 变的影响,发现高浓度的小雨滴会产生更强的蒸发 致冷,因而不利于龙卷的发展。另外,现有的观测 结果已显示,超级单体风暴中水成物粒子谱的特征 以及云微物理过程对风暴的影响会因风暴生成的区 域不同而发生改变(Rosenfeld and Ulbrich, 2003; Xie et al., 2010).

本文利用 ARPS 模式,通过调整云滴数浓度, 进行不考虑地形、地表和科氏力作用等过程的理想 数值模拟,探究云滴浓度变化相关的云微物理过程 对于龙卷发生、发展的影响。为龙卷的潜势预报提 供动力、热力条件以外的参考,并为未来采取适当 的手段干预龙卷过程以降低龙卷所造成的影响和损 失提供方法。

## 2 个例观测背景介绍

研究对象为2003年7月8日15:30(协调世界时,下同)发生在安微省无为县的龙卷超级单体(EF2级以上)。合肥多普勒天气雷达观测纪录了此次风暴的整个过程(图1):从13时合肥市西南侧的大片层状云降水区开始,13:30已经发展成为一条明显的南北向线状对流雨带,南段随时间消散,北段加强形成一个团状降水回波;14时,此团状降水回波区的后侧(西侧)有一条新生成的南北向对流雨带,逐渐接近原来的团状降水区(14:30时红圈区域和紫圈区域),于15:30合并后继续向东移动,最后移出安徽省。15:30前后,袭击无为县的龙卷即生成于这个对流系统中原来团状降水区南端的一个超级单体。

6期

No. 6 WANG Jiyin et al. A Numerical Study of the Influence of the Droplets Number Concentration on Supercell Tornadoes 1415



图 1 2003 年 7 月 8 日 13 时到 17 时每隔半小时 0.5° 仰角上的雷达回波图 Fig. 1 Radar echo reflectivity at 0.5° elevation every half hour from 1300 UTC to 1700 UTC on 8 July 2003

从雷达回波和径向速度图(图2)来看,14:55 风暴的结构呈现出经典超级单体的特征:水平剖面 上有钩状回波和明显的"V"型入流缺口以及地面 阵风锋;垂直剖面上有弱回波区和悬垂回波结构。 在对流雨带前沿的速度切变线上新生成的中γ尺度 的涡旋(图2a中用白线圈出)迅速发展,很快达 到中等中气旋强度(在0.5°仰角上,其旋转速度约 为18 m s<sup>-1</sup>(俞小鼎等,2006)),同时,对流单体 的反射率因子很快增强(图2c中用"A"标出), 最大反射率因子超过55 dBZ; 15:12 该超级单体的 气旋垂直涡度值为2.3×10<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>,达到强中气旋标 准,并向地面发展,风暴发展为低质心风暴,8 min 后即15:20,龙卷爆发;15:29中气旋正、负速 度差约有47 m s<sup>-1</sup>,其尺度也较半小时前增大(图 2b)。由于雷达数据分辨率局限性,龙卷涡旋特征 (TVS)不是特别清晰,但确实存在于图2d中用黑 虚线圈出的位置,一共持续了10 min左右(15:20 ~15:30)。

由于雷达观测资料分辨率的局限性,很难进一步开展对龙卷结构和演变特征的研究,更不用说云 微物理过程对龙卷过程的影响,故需要借助高分辨 数值模拟来更多地了解龙卷超级单体的发生、发展 过程以及云微物理过程对它的影响。



图2 2003年7月8日(a、c)14:55和(b、d)15:29 0.5°仰角上的(a、b)雷达径向速度(单位: m s<sup>-1</sup>)和(c、d)雷达反射率因子(单位: dBZ)。白色圆圈区域:γ尺度的涡旋;A: 与γ尺度涡旋对应的反射率因子大值区;B:A北侧的对流单体;黑色实线圆圈区域:低层入流;黑色虚线圆圈区域:龙卷涡旋发生位置

Fig. 2 (a, b) Radar radial velocity (units:  $m s^{-1}$ ) and (c, d) radar echo reflectivity (units: dBZ) at 0.5° elevation at (a, c) 1455 UTC, (b, d)1529 UTC on 8 July 2003. White circle areas:  $\gamma$ -scale vortex; A: high radar echo reflectivity areas corresponding to the  $\gamma$ -scale vortex; B: convective cell on the north side of A; black solid areas: inflow at the lower level; black dashed circle areas: location of the tornado vortex

## 3 模式设置

#### 3.1 ARPS 模式简介

ARPS(Advanced Regional Prediction System) 模式是由美国俄克拉荷马大学风暴分析与预报中心 (Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS) 研究开发的三维、非静力平衡的区域数值预报系统 (Xue et al., 2000, 2001, 2003)。ARPS模式采用 可压缩流体的框架,采用广义地形坐标系统,并提 供了多种体积水云微物理参数化方案供选择。 ARPS模式适用于时空尺度很小的中小尺度和风暴 尺度的天气系统如龙卷、超级单体风暴等的模拟和 预报。

#### 3.2 试验设计

模拟个例是2003年7月8日发生在安徽省无为 县的超级单体龙卷过程。本文采用Zheng and Chen (2014)的探空进行数值模拟。Zheng and Chen (2014) 参考 Dawson II et al. (2010) 方法,从3 km 网格的实测资料模拟结果中提取单点探空作为 初始场,提取探空的地点选取在个例发生的上游, 处于成熟阶段的某个对流单体的入流区内,其经过 多次探空提取、特征分析和模拟测试后,最终提取 12 时安徽省六安市附近的探空数据用于理想模拟 试验,实现了本次龙卷过程的数值模拟。

探空中对流有效位能(CAPE)为2135 J kg<sup>-1</sup>, 抬升凝结高度为828 m,地面为东南风,风场随高 度明显顺时针旋转,0~6 km和0~1 km垂直风切 变分别为21.3 m s<sup>-1</sup>和6.6 m s<sup>-1</sup>,垂直切变形成水平 涡度,水平涡度在强垂直上升气流的倾斜作用下形 成了最初的中层垂直涡度,热力和动力环境满足指 标有利于超级单体产生。控制试验(Nc1000)中 云滴数浓度为1000 cm<sup>-3</sup>是正常的环境大气,敏感 性试验采用 3000 cm<sup>-3</sup>(Nc3000)和 100 cm<sup>-3</sup> (Nc100)分别表征云滴数浓度高与低两种大气条 件。为模拟出龙卷尺度的超级单体风暴,水平格距为100 m,模拟域大小为64 km×64 km×20 km。 垂直方向采用拉伸网格,最低层的垂直格距为10 m,模拟域顶层的垂直格距为500 m,一共81层, 平均垂直格距为250 m,12 km以上为海绵层。

采用热泡扰动的方法激发初始对流。热泡为椭 球形,长轴(水平)与短轴(垂直)半径分别为 10 km 和 1.5 km。中心扰动位温为4 K,并从中间 向两边减弱,到椭球边缘将为0 K,扰动中心位于 距地面 1.5 km 高度处。模式模拟不考虑地形、地 表和科氏力等影响。选用 Lin et al. (1983)三冰相 云微物理参数化方案。侧边界采用开放式的边界条 件,上下边界都采用刚性边界。积分时间步长为 0.2 s,一共积分3 h (10800 s),每分钟输出一次模 拟结果。为了保持风暴一直处于模拟区域的中心, 模式坐标系统中扣除纬向风 $u=10 \text{ m s}^{-1}$ 、经向风v=6 m s<sup>-1</sup>的风速(Xue et al., 2001; Caya et al., 2005; Gao and Xue, 2008; Lerach and Cotton, 2012; Zheng and Chen, 2014)。

## 4 模拟结果

#### 4.1 风暴结构和演变

图3为三组试验模拟的风暴在距地面2km高 度上不同阶段(生成、发展、成熟和消亡)的结 构。1800 s时,最初的对流单体已经形成,但是初 始对流单体很快分裂成两个子单体,其中右侧的子 单体不断发展演变,呈现出类似经典超级单体的结 构特征, 而龙卷涡旋便是形成于该单体中。3600 s 时,目标风暴从最初的对流单体分裂出来,处于快 速发展阶段。风暴的范围比1800s时明显扩大,呈 现出类似于经典超级单体的钩状结构和"V"型入 流缺口,尤其是Nc3000试验发展更为迅速也更为 强烈。同时,强垂直上升区出现在钩状结构前侧。 近地面干冷下沉出流与暖湿入流交汇形成阵风锋 (图略)。5400 s时模拟风暴进入成熟阶段,经过半 小时的发展演变,模拟风暴的回波强度进一步加 大,最大值超过60 dBZ。风暴水平范围扩大,钩 状结构明显,钩状附近出现明显的气旋性风场,上 升流也继续加强(大于20 m s<sup>-1</sup>)。5400 s 以后风暴 进入消亡阶段,风暴面积扩大的同时强度也在减 弱。回波减弱,"V"型缺口逐渐被填塞,上升气 流范围缩小强度减弱。

总体上,三组试验都能再现出超级单体风暴的 演变过程,与实际观测十分接近,并呈现出经典超 级单体的几个主要特征。初步得到Nc3000试验风 暴发展较为迅速且持续时间略长。

#### 4.2 龙卷涡旋的特征

图4给出风暴内低层最大上升速度(单位: m s<sup>-1</sup>)、最大垂直涡度(单位: s<sup>-1</sup>)和最小扰动压强 (单位: hPa) 随高度和时间的变化(每一个时次在 每一层上取最大值)。上升气流速度逐渐加大, 1500 s 以后, 3 km 高度上模拟风暴的上升运动一直 维持在40 m s<sup>-1</sup>的强度。5000 s 左右开始, Nc1000 与Nc3000试验在2km以下的低层,上升运动突然 明显增强,最大值超过30 m s<sup>-1</sup>, Nc100 试验中在 4800 s 以后也有加强,相比其他两组上升运动弱一 些。与之相对应的近地面垂直涡度也有一个明显的 增强过程, Nc100试验的涡度在5460 s达到0.3 s<sup>-1</sup>, Nc1000 试验在 5580 s 前后均超过 0.35 s<sup>-1</sup>, 而 Nc3000试验中1 km以下涡度值在4000 s以后的20 min内一直很强,在4500 s和4980 s时接近0.4 s<sup>-1</sup>。 相应地,地面气压场有明显的降压。Nc100试验降 压的时刻与上升速度加大对应在4500 s 左右, Nc1000试验在5580 s前后,2 km以下压强最大扰 动降压10hPa以上,近地面形成强低压中心, Nc3000试验在4400 s开始2 km 高度以下降压明显。 压强降低的过程加速了2 km 以下的垂直上升运动。 上升运动过程中释放潜热产生的浮力项恰好能与2 km以上向下的气压梯度相平衡。同时低层强上升 运动更有利于倾斜近地面的水平涡度为垂直涡度, 再进一步通过拉伸作用增大近地面垂直涡度,最终 形成强龙卷涡旋。综上, Nc100试验的风暴发展相 对弱, Nc1000与Nc3000试验的风暴在近地面降压 的带动下都有强上升运动和大的涡度。从时间上来 看,三组试验都着重研究4300s以后的时次,寻找 龙卷过程。

为了定量描述整个龙卷过程,以10m高度上 最大涡度值为水平中心,定义一个4km×4km×2 km的龙卷涡旋潜在区域,然后统计此龙卷潜在区 中最大垂直涡旋、最大水平风速等量。评判标准建 立在Wicker and Wilhelmson(1995)方法的基础 上,满足以下三个条件即认为有龙卷涡旋存在: (1)选定立方体内最大垂直涡度大于0.1 s<sup>-1</sup>;(2) 有高度辐合旋转的风场沿狭窄的路径前进(Fujita, 1981)和最大近地面风速超过29m s<sup>-1</sup>(Fujita et



图3 模拟风暴在近地面(2km高度)的水平结构随时间的演变。彩色阴影:反射率(单位:dBZ);箭头:水平风场(单位:ms<sup>-1</sup>);红 色圆圈区域:强垂直上升气流区(速度大于15ms<sup>-1</sup>);黑色三角:龙卷发生位置

Fig. 3 Evolution of thunderstorm structure at near-surface (2-km height) level. Color shadings: reflectivity (units: dBZ); arrows: horizontal wind (units:  $m s^{-1}$ ); red circle areas: strong vertical updraft; black triangles: locations of the tornado

al., 1970); (3) 低层(0~3 km) 有明显的中气旋。
根据上述标准,三组试验都有龙卷性质涡旋产
生,但是发展的时间、生命史、强度等有差别(表)

1)。Nc3000试验的龙卷涡旋最先发展,较其他两 组试验提前10多分钟,且找到2个符合条件的龙卷 涡旋; Nc100试验龙卷涡旋强度弱、持续时间短;



图4 Nc100(左)、Nc1000(中)、Nc3000(右)试验中(a、b、c)最大上升气流(单位: m s<sup>-1</sup>)、(d、e、f)最大垂直涡度(单位: s<sup>-1</sup>) 和(g、h、i)最强扰动气压(单位: hPa)随时间和高度的演变

Fig.4 Evolution of (a, b, c) maximum updraft (units:  $m s^{-1}$ ), (d, e, f) maximum vertical vorticity (units:  $s^{-1}$ ), and (g, h, i) maximum disturbance pressure (units: hPa) with time and altitude in experiment Nc100 (the droplets number concentration is 100 cm<sup>-3</sup>, left), experiment Nc1000 (the droplets number concentration is 3000 cm<sup>-3</sup>, right)

Table 1     Characteristics of tornadic vortex						
试验名称	最大垂直涡度/s-1	近地面最大风速/m s <sup>-1</sup>	龙卷等级	持续时长/min		
Nc3000(1)	0.42	44.3	EF1	17		
Nc3000(2)	0.39	46.93	EF1	15		
Nc1000	0.39	45.7	EF1	13		
Nc100	0.29	39.89	EF1	12		

表1	龙礼	<b>卷性质涡旋的特征</b>	
Table	1	Characteristics of tornadic	vort

注: 持续时长为连续同时满足龙卷性涡旋近地面最大风速超过29 m s<sup>-1</sup> (EF0) 和最大垂直涡度大于0.1 s<sup>-1</sup>。

Nc1000 试验中的龙卷过程介于前两者之间。 Nc3000 试验中第一个龙卷涡旋(称NC3000(1))从 4320 s开始持续17 min,在4500 s有最大涡度值 0.42 s<sup>-1</sup>,在4920 s有最大风速44.3 m s<sup>-1</sup>;另外一个 龙卷涡旋(称NC3000(2))持续时间稍短但强度略 强,从4680 s开始持续15 min,在4860 s有最大近 地面风速46.93 m s<sup>-1</sup>,4920 s涡度达到0.39 s<sup>-1</sup>,在 4980 s发展到最旺盛,此刻也有次大的涡旋(0.37 s<sup>-1</sup>)与风速(45.8 m s<sup>-1</sup>)相对应。若把两者合起来 看,有接近30 min的龙卷过程。Nc1000 试验符合



图5 Nc100、Nc1000、Nc3000试验的垂直涡度(填色,单位: s<sup>-1</sup>)、垂直速度(黑色等值线,单位: m s<sup>-1</sup>)、风场(箭头,单位: m s<sup>-1</sup>) 和冷池(位温扰动小于-2K的红色虚线)过涡度最大值点的垂直剖面

Fig. 5 Vertical section of vertical vortex (shadings, units:  $s^{-1}$ ), vertical velocity (black contours, units:  $m s^{-1}$ ), wind (vectors,  $m s^{-1}$ ), and cold pool (red dashed lines, perturbation potential temperature  $\leq -2$  K) through the strongest vortex center for experiments Nc100, Nc1000, Nc3000

条件的龙卷涡旋从 5160 s 开始出现至 5940 s 减弱消失,一共持续 13 min,在 5520 s 涡度最大为 0.39 s<sup>-1</sup>,在 5580 s 出现最大风速 45.7 m s<sup>-1</sup>。Nc100 试验 模拟出的龙卷涡旋略弱,持续时间也短,5040~ 5760 s 总共 12 min,涡度和最大近地面风速分别达 到 0.29 s<sup>-1</sup>和 39.89 m s<sup>-1</sup>。

图5是三组试验四个龙卷性质涡旋发展至最成 熟时刻的垂直剖面(过涡度最大值点)图。从涡度 来看,龙卷发生地附近都是以显著的气旋性涡度发 展,最大垂直涡度接近或超过0.3 s<sup>-1</sup>,属于强旋转 涡旋。发展的高度从地面延伸至3 km附近, Nc1000和Nc3000试验涡旋涡度发展较强,涡度超 过0.3 s<sup>-1</sup>的区域发展至地面1 km以上,Nc100试验 的涡度最小且发展高度最低,大值区都在1 km以 下。从垂直运动看,龙卷发生地及上空一般为上升 运动,3个试验的中层上升气流区(垂直速度大于 15 m s<sup>-1</sup>)都处于地面阵风锋前沿的上方,风暴移 动方向为龙卷的右侧即向东,龙卷后方下沉气流比 较明显,尤其是Nc3000试验。从冷池来看,云滴 数浓度高的试验冷池发展弱,龙卷涡旋更易出现于 冷池相对较弱的风暴中。

## 5 云微物理过程和冷池对龙卷的影响

以上试验结果表明,云滴浓度增加有利于强龙 卷的形成和维持。分析各种云微物理过程的转化率 (单位: kg kg<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>),发现对冷池贡献最大的是雨水 蒸发和霰/雹融化两个过程,其他吸热过程的贡献 至少比前两者要小2个量级,所以可近似忽略。图 6为龙卷涡旋成熟阶段附近6km范围内,雨水、 霰/雹混合比和雨滴蒸发率、霰/雹粒子融化率的垂 直分布。云滴数浓度最小的Nc100试验在5km以 下有更多的雨水,而随着云滴数浓度的增加,龙卷 发生区域4km以上形成了更多的霰/雹。再分析雨 水蒸发和霰/雹融化两个过程,发现前者的转换率



图6 Nc100、Nc1000、Nc3000试验龙卷发展旺盛时期(a)雨水含量混合比(单位: kg kg<sup>-1</sup>)、(b)霰/雹含量混合比(单位: kg kg<sup>-1</sup>)、 (c)雨滴蒸发转换率(单位: 10<sup>-5</sup> g kg<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)、(d)霰/雹融化转换率(单位: 10<sup>-5</sup> g kg<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)的垂直分布

Fig.6 Vertical profiles of (a) mixing ratio of rainwater (units: kg kg<sup>-1</sup>), (b) mixing ratio of graupel/hail (units: kg kg<sup>-1</sup>), (c) conversion rate of rain evaporation (units:  $10^{-5}$  g kg<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>), (d) conversion rate of graupel/hail melting (units:  $10^{-5}$  g kg<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>) at the strongest moment of tornadic vortex for experiments Nc100, Nc1000, Nc3000

比后者大一个量级,而且雨水越接近地面影响更直接明显,云滴数浓度最大的Nc3000试验雨水蒸发最少。高云滴浓度情况下,更多小云滴被输送到高层冻结,增强了云中的冰相降水过程,形成更多的大冰粒子(如霰和冰雹)。云中的暖雨碰并过程会受到抑制,雨水含量降低,因而地面降雨出现的时间和量都减少,近地面雨水蒸发过程对地面冷池的影响也小,导致地面冷池较弱,最后形成龙卷的潜势增大。所以相比Nc100和Nc1000试验Nc3000试验地面冷池相对弱,龙卷发展更剧烈且维持的时间更久。

## 6 结论

本文利用ARPS模式模拟研究了云滴浓度变化 对超级单体龙卷的影响,得到以下结论: (1) 三组试验都模拟出了超级单体风暴的结构 特征如钩状结构、V型入流缺口等。所有试验低层 在4000 s以后都有强烈的上升气流,且随着时间的 发展逐渐增强,与之配合的还有地面的降压。 Nc3000 试验中上升气流强、较先发展且持续时间 长,近地面涡度也较其他两组试验更大。

(2) Nc100试验模拟出的龙卷涡旋略弱,满足 龙卷涡旋三个判定条件的总时长为12 min,最大近 地面垂直涡度和最大近地面风速分别达到0.29 s<sup>-1</sup> 和39.89 m s<sup>-1</sup>; Nc1000试验的龙卷过程共13 min, 近地面垂直涡度最大为0.39 s<sup>-1</sup>,近地面最大风速 为45.7 m s<sup>-1</sup>。而Nc3000试验中找到两个符合要求 的龙卷涡旋过程,若把两者合起来看,时长接近 30 min,最大近地面风速46.93 m s<sup>-1</sup>(接近EF2级 别),最大涡度值0.42 s<sup>-1</sup>,且Nc3000试验的龙卷性 质涡旋比其他两组的提前发展12 min。

(3)初步得出云滴数浓度通过云微物理过程对 龙卷发展的作用:高云滴浓度情况下,云中的冰相 降水过程加强,形成更多的大冰粒子(如霰和冰 雹);云中的暖雨碰并过程受到抑制,雨水含量降 低,近地面雨水蒸发过程对地面冷池的影响也小, 形成龙卷的潜势增大。

通过本文研究,得到初步结论是云滴数浓度的 增加对龙卷的发生、发展有促进作用。如何把微物 理方面的条件加入龙卷潜势预报指标进而改进指 标,或通过手段干预龙卷过程以降低龙卷所造成的 影响和损失有待后续研究。

#### 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]. Atmos. Res., 67–68: 73–94. doi:10.1016/S0169-8095(03)00045-0
- Caya A, Sun J, Snyder C. 2005. A comparison between the 4DVAR and the ensemble Kalman filter techniques for radar data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 133(11): 3081–3094. doi:10.1175/MWR3021.1
- Craven J P, Brooks H E. 2004. Baseline climatology of sounding derived parameters associated with deep moist convection [J]. Nat. Wea. Digest, 28: 13–24.
- Dawson II D T, Xue M, Milbrandt J A, et al. 2010. Comparison of evaporation and cold pool development between single-moment and multimoment bulk microphysics schemes in idealized simulations of tornadic thunderstorms [J]. Mon. Wea. Rev., 138(4): 1152–1171. doi: 10.1175/2009MWR2956.1
- Fujita T T. 1981. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales [J]. J. Atmos. Sci., 38(8): 1511–1534. doi:10.1175/1520-0469(1981)038<1511:TADITC>2.0.CO;2
- Fujita T T, Bradbury D L, van Thullenar C F. 1970. Palm Sunday tornadoes of April 11, 1965 [J]. Mon. Wea. Rev., 98(1): 29–69. doi: 10.1175/1520-0493(1970)098<0029:PSTOA>2.3.CO;2
- Gao J D, Xue M. 2008. An efficient dual-resolution approach for ensemble data assimilation and tests with simulated Doppler radar data [J]. Mon. Wea. Rev., 136(3): 945–963. doi:10.1175/2007MWR2120.1
- Gilmore M S, Straka J M, Rasmussen E N. 2004a. Precipitation and evolution sensitivity in simulated deep convective storms: Comparisons between liquid-only and simple ice and liquid phase microphysics [J]. Mon. Wea. Rev., 132(8): 1897–1916. doi:10.1175/ 1520-0493(2004)132<1897:PAESIS>2.0.CO;2
- Gilmore M S, Straka J M, Rasmussen E N. 2004b. Precipitation uncertainty due to variations in precipitation particle parameters within a simple microphysics scheme [J]. Mon. Wea. Rev., 132(11): 2610–2627. doi:10.1175/MWR2810.1

Lerach D G, Cotton W R. 2012. Comparing aerosol and low-level

moisture influences on supercell tornadogenesis: Three-dimensional idealized simulations [J]. J. Atmos. Sci., 69(3): 969–987. doi: 10. 1175/JAS-D-11-043.1

- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model [J]. J. Climate Appl. Meteor., 22(6): 1065–1092. doi: 10.1175/1520-0450(1983)022<1065: BPOTSF>2.0. CO;2
- Rosenfeld D, Ulbrich C W. 2003. Cloud microphysical properties, processes, and rainfall estimation opportunities [M]//Wakimoto R M, Srivastava R. Radar and Atmospheric Science: A Collection of Essays in Honor of David Atlas. Boston, MA: American Meteorological Society,237–258.doi:10.1007/978-1-878220-36-3\_10
- Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, et al. 2008. Flood or drought: How do aerosols affect precipitation? [J]. Science, 321(5894): 1309– 1313. doi:10.1126/science.1160606
- Rosenfeld D, Axisa D, Woodley W L, et al. 2010. A quest for effective hygroscopic cloud seeding [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 49(7): 1548–1562. doi:10.1175/2010JAMC2307.1
- Snook N, Xue M. 2006. Sensitivity of tornadogenesis in very-highresolution numerical simulations to variations in model microphysical parameters [C]//Proceedings of the 23rd Conference on Severe Local Storms. St. Louis, MO: American Meteorological Society.
- 孙凌峰, 郭学良, 孙立潭, 等. 2003. 武汉 "6•22" 空难下击暴流的三 维数值模拟研究 [J]. 大气科学, 27(6): 1077-1092. Sun Lingfeng, Guo Xueliang, Sun Litan, et al. 2003. A numerical study of the airplane disaster-producing microburst on 22 June 2000 in Wuhan [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(6): 1077-1092. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.11
- 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
- Wicker L J, Wilhelmson R B. 1995. Simulation and analysis of tornado development and decay within a three-dimensional supercell thunderstorm [J]. J. Atmos. Sci., 52(51): 2675–2703. doi: 10.1175/ 1520-0469(1995)052<2675:SAAOTD>2.0.CO;2
- Wilson J W. 1986. Tornadogenesis by nonprecipitation induced wind shear lines [J]. Mon. Wea. Rev., 114(2): 270–284. doi:10.1175/1520-0493(1986)114<0270:TBNIWS>2.0.CO;2
- Xie B G, Zhang Q H, Wang Y Q. 2010. Observed characteristics of hail size in four regions in China during 1980–2005 [J]. J. Climate, 23 (18): 4973–4982. doi:10.1175/2010JCLI3600.1
- 许焕斌, 魏绍远. 1995. 下击暴流的数值模拟研究 [J]. 气象学报, 53 (2): 168-176. Xu Huanbin, Wei Shaoyuan. 1995. The modeling study of downburst [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 53(2): 168-176. doi:10.11676/qxxb1995.019

Xue M, Droegemeier K K, Wong V. 2000. The advanced regional

prediction system (ARPS) —A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification [J]. Meteor. Atmos. Phys., 75(3–4): 161–193. doi:10.1007/s007030070003

- Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. 2001. The advanced regional prediction system (ARPS) —A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications [J]. Meteor. Atmos. Phys., 76(3-4): 143-165. doi: 10.1007/s007030170027
- Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. 2003. The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction

and data assimilation [J]. Meteor. Atmos. Phys., 82(1-4): 139-170. doi:10.1007/s00703-001-0595-6

- 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 2006. 多普勒天气雷达原理与业务应用 [M]. 北京: 气象出版社, 267-279 Yu Xiaoding, Yao Xiuping, Xiong Tingnan, et al. 2006. The Principle and Service Application of Doppler Weather Radar [M]. Beijing: China Meteorological Press, 267-279.
- Zheng K L, Chen B J. 2014. Sensitivities of tornadogenesis to drop size distribution in a simulated subtropical supercell over eastern China [J]. Adv. Atmos. Sci., 2014, 31(3): 657–668. doi: 10.1007/s00376-013-3143-7