

李佳, 陈葆德, 张旭, 等. 2017. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷的高分辨快速更新同化预报与分析 [J]. 大气科学, 41 (6): 1221–1233. Li Jia, Chen Baode, Zhang Xu, et al. 2017. High-resolution rapid refresh analysis and prediction of the tornado occurring in Funing on 23 June 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1221–1233, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17144.

2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷的高分辨快速更新同化预报与分析

李佳^{1,3} 陈葆德^{2,3} 张旭^{2,3} 黄伟^{2,3}

1 南京信息工程大学, 南京 210044

2 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

3 中国气象局台风数值预报重点实验室, 上海 200030

摘 要 基于 3 km 水平分辨率的第二代华东快速更新循环同化预报模式系统, 对 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁龙卷个例预报结果进行了分析, 通过螺旋度的时间演变等讨论了龙卷母体—对流单体的发展过程, 并对比了有无同化的预报结果。结果表明, 快速更新循环同化系统在阜宁附近模拟出了类似龙卷母体的涡旋结构, 同时伴随有剧烈的上升运动, 模拟的发生时间与发展过程与实况基本吻合。但模拟的涡旋发生在江苏阜宁北侧, 与观测相比偏差 20 多公里, 且最大地面风速较实况小。进一步分析表明, 该对流单体从中层上升运动开始, 随着上升区向上和向下发展, 首先在中高空出现剧烈的上升运动, z 螺旋度增大, 高层辐散加强, x 螺旋度增大, 随后中低空的垂直运动也增强, y 螺旋度增大, 低层辐合增强, 最后随着高层辐散和垂直运动的减弱, 低层涡旋减弱并消散。北京时间 14:00 没有进行观测资料同化预报结果中, 在阜宁附近没有预报出类似的对流单体, 表明逐小时循环同化对此次龙卷天气的模拟起着关键作用。

关键词 龙卷 数值预报 螺旋度 快速更新

文章编号 1006-9895(2017)06-1221-13

中图分类号 P458

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1707.17144

High-Resolution Rapid Refresh Analysis and Prediction of the Tornado Occurring in Funing on 23 June 2016

LI Jia^{1,3}, CHEN Baode^{2,3}, ZHANG Xu^{2,3}, and HUANG Wei^{2,3}

1 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, Shanghai 200030

3 Key Laboratory of Numerical Modeling for Tropical Cyclone, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

Abstract The tornado occurring on June 23 2016 in Funing County, Jiangsu Province was simulated using the operational Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System. The parent storm of the tornado was identified near Funing in the model output, which occurred in the area with very strong convective activities. Its development and timing agreed well with observations. However, the simulated vortex was 20 km north of its observed location with weaker surface winds. Further analysis indicated that a supercell was initialized within the updraft in the

收稿日期 2017-03-27; 网络预出版日期 2017-07-17

作者简介 李佳, 女, 1978 年出生, 硕士, 副研究员, 主要从事数值天气预报研发应用等研究。E-mail: lij@typhoon.org.cn

通讯作者 陈葆德, E-mail: baode@typhoon.org.cn

资助项目 国家重点研发计划“政府间国际科技创新合作”重点专项 2016YFE0109700, 国家自然科学基金项目 41575101、41505087

Funded by National Key Research and Development Plan “Inter Governmental Cooperation in International Scientific and Technological Innovation” Key Projects (Grant 2016YFE0109700), National Natural Science Foundation of China (Grants 41575101, 41505087)

middle level prior to the occurrence of the storm, and extended upward and downward following the expansion of the updraft. With significantly enhanced updraft and increased z -helicity in the middle and upper levels, the x -helicity started to increase along with the intensified divergence in the upper level. In lower levels, the updraft and convergence both strengthened and the y -helicity increased. Following the weakening of divergence and updraft in the upper level, the cyclonic vortex eventually diminished and dissipated. In a comparative simulation without rapid data refresh, the supercell didn't exist, suggesting that the hourly data assimilation played a key role in successful simulation of the tornado.

Keywords Tornado, Numerical prediction, Helicity, Rapid refresh

1 引言

龙卷是一种小范围的强烈涡旋,属于小尺度天气系统,具有突发性强、强度大、尺度小、生命史短、危害严重等特点。对龙卷的分析研究多以灾情调查估计、多普勒雷达观测的个例分析,以及天气背景统计分析为主,数值模拟分析的数量相对有限(Rasmussen and Blanchard, 1998; Gaffin and Parker, 2006; 俞小鼎等, 2006, 2008; 郑媛媛等, 2009; Schumacher et al., 2010; 吴芳芳等, 2010; 李改琴等, 2014; 周后福等, 2014; Xue et al., 2014, 2016; Hanley et al., 2016; 张小玲等, 2016)。王红燕等(2013)、李改琴等(2014)利用多普勒雷达分析的龙卷天气具有强回波、低层较强垂直风切变和中尺度气旋涡旋等特征。俞小鼎等(2006, 2008)分析了2003年7月8日发生在安徽无为县和2005年7月30日发生在安徽灵璧县的强烈龙卷天气过程,认为中等程度的对流有效位能和深层的强垂直风切变有利于超级单体风暴产生;而低层强垂直风切变、较低的抬升凝结高度、以及地面阵风锋的存在则有利于F2级以上强龙卷的产生。Xue et al. (2014)采用了网格间距为9 km、1 km、100 m和50 m的嵌套网格,利用ARPS(Advanced Regional Prediction System)模式模拟2003年8月俄克拉荷马城的一个龙卷风超级单体。试验表明,100 m和50 m两个网格能捕获龙卷涡旋发展过程,预测风速较实况略弱,且移动路径与观测路径平行,但向北偏8 km。要真实地模拟龙卷的细致结构和演变特征可能需要百米级分辨率的模式,但这样高分辨的模式模拟目前大多限于理想试验,以及少量的实际龙卷个例模拟,实现业务化还存在很多困难(Hanley et al., 2016)。

近年来,国内外针对强对流天气系统短时临近业务预报发展了快速更新循环同化数值预报系统,水平分辨率仍为千米级。美国NCEP(National Centers of Environmental Prediction)的快速更新同化预报系统RUC(Rapid Update Cycle)1994年业

务化,其后又进行了多次改进与升级,2012年业务化的快速更新同化预报系统RAP(Rapid Refresh)水平分辨率为13 km,2016年业务化的快速更新同化预报系统HRRR(High-Resolution Rapid Refresh)水平分辨率为3 km(Benjamin et al., 2004, 2016)。随着我国观测系统的不断完善,包括上海台风研究所、广州热带海洋气象研究所、北京城市气象研究所、国家气象中心等在内的一些科研和业务机构对快速更新循环同化与短时临近预报系统也开展了大量研究与业务运行(陈子通等, 2010; 陈敏等, 2011; 魏东等, 2011; 王叶红等, 2011; 郝民等, 2011; 徐枝芳等, 2013; 陈葆德等, 2013; 李泽椿等, 2014)。虽然千米级的水平分辨率不足以分辨龙卷的精细环流结构,但实践表明仍然可为龙卷的预报提供较为准确的信息(Hu and Xue, 2007; Xue et al., 2014; Hanley et al., 2016)

目前国内外应用业务高分辨数值预报系统对龙卷进行预报和分析的研究很少,而另一方面,随着业务中尺度天气预报模式的分辨率不断提高,资料同化方式与物理过程不断改进,提高强对流天气系统短时临近预报精度的需求也不断增长。为了考察现有高分辨数值预报模式对龙卷等剧烈对流天气的预报能力,并为进一步发展强对流天气系统短时临近预报模式提供帮助,本文利用3 km水平分辨率的第二代华东快速更新循环同化预报系统,对2016年6月23日发生在江苏盐城阜宁的龙卷天气过程进行模拟预报,对模拟结果进行了诊断分析,了解龙卷天气发生发展的过程,并通过对比分析以探讨物理成因。另外,还对比了有无同化的预报结果。

2 天气过程概述与方法、资料介绍

2.1 天气过程概述

2016年6月23日区域自动站、目击者灾情报告和雷达资料的综合监测[见张小玲等(2016)的图3]显示,江苏盐城的龙卷发生于阜宁县城西南方,向东略偏北方向移动,发生时间推测为14:15~

15:00 (北京时, 下同)。事件造成 99 人死亡, 864 人受伤 (张小玲等, 2016)。大风主要出现在阜宁县西南部长 25 km、宽 10 km 的范围内, 阜宁县新沟镇等地出现 34.6 m s^{-1} (12 级以上, 时间为 14:29) 瞬时大风。自动站雨量监测显示, 14:00~15:00 1 小时降水量在 10~50 mm, 最强在涟水县石湖镇镇政府站 56 mm; 盐城北部地区 14:00~20:00 6 h 累积降水量在 40~90 mm, 最强在滨海县天场镇中心小学站, 累积 102 mm。14:30 左右, 阜宁县城北、陈集镇一带出现冰雹天气 (张小玲等, 2016; Xue et al., 2016; Lyu et al., 2017)。盐城雷达 (距阜宁 26 km) 14:31, 0.5° 仰角的雷达回波和径向速度图 [见张小玲等 (2016) 的图 10] 上钩状回波清晰可见; 钩状回波顶端的阜宁境内, 径向速度呈现出明显的旋转特征。

进一步分析表明, 此次龙卷的天气尺度背景为典型的梅雨期暴雨环流。22~23 日, 西北太平洋副热带高压北抬, 其西侧低层西南急流明显加强, 向江苏北部地区持续输送水汽和热量; 与此同时, 东北冷涡东移南压, 冷涡后部携带强冷空气南下, 并逐渐影响江苏北部。受冷空气和西南暖湿气流共同影响, 江苏中北部附近地区汇聚了大量的水汽, 在强不稳定能量和垂直切变等条件下, 23 日午后江苏北部出现强龙卷, 伴有强风、暴雨和冰雹天气 (张小玲等, 2016; 曹艳察和张涛, 2016)。

2.2 华东快速更新循环同化预报模式系统

2009 年, 上海针对短时临近预报建立了第一代华东快速更新循环同化系统 SMS-WARRV1.0 (Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System, Version 1.0; 陈葆德等, 2013), 并于 2014 年开始对系统进行升级, 研发了第二代快速更新循环同化数值预报模式系统 SMS-WARRV2.0 (Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System, Version 2.0), 模式主要参数如表 1 所示。SMS-WARRV2.0 系统水平分辨率为 3 km, 垂直层次为 51 层, 预报区域如图 1 所示。系统每小时启动一次预报, 预报时效为 12 h; 冷启动在 02:00 进行, 背景场由华东区域中尺度模式 SMS-WARMSV2.0 (Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Model System, Version 2.0, 水平分辨率为 9 km) 20:00 的 6 h 预报场提供; 热启动的背景场取自循环系统上一时次的 1 h 预报; 整个循环时段的侧边界来自 SMS-WARMSV2.0 模式预报。系统逐小时进行资

料同化, 观测资料包括常规地面天气观测、机场地面报、船舶、自动站、飞机报、探空、S 波段雷达反射率、FY-2G 静止气象卫星红外和可见光辐射率资料。2014 年和 2015 年汛期对比检验结果表明, SMS-WARRV2.0 相较于 SMS-WARRV1.0 有了显著的进步, 尤其是系统循环后期起报时次的预报效果有了较大的提高, 系统预报性能更加稳定。

表 1 SMS-WARRV2.0 模式参数

Table 1 Parameters of SMS-WARRV2.0 model system

模式参数	参数化方案
中心位置	30°N , 119°E
水平分辨率	3 km
水平格点数	793×853
垂直层次	51
冷启动时间	02:00
起报频次	每小时一次
预报时效	12 h
模式系统	WRF3.5.1
同化系统	ADAS5.3.3
背景场及边界条件	SMS-WARMSV2.0 20:00
边界条件更新	3 h
微物理过程参数化	Thompson (Thompson et al., 2004)
长波辐射参数化	RRTMG (Iacono et al., 2008)
短波辐射参数化	RRTMG
陆面过程参数化	Noah (Tewari et al., 2004)
地表过程参数化	Monin-Obukhov (Janjic Eta) (Monin et al., 1954).
边界层参数化方案	MYJ (Mellor et al., 1982)
积云对流参数化方案	无

2.3 试验设计和资料介绍

控制试验取自 2016 年 06 月 23 日 02:00 至 24 日 01:00 循环, 23 日 14:00 起报的 12 h 预报。同化的观测资料包括常规地面天气观测、机场地面报、船舶、自动站、飞机报、探空、S 波段雷达反射率、FY-2G 静止气象卫星红外与可见光辐射率资料 (表 2)。

表 2 2016 年 06 月 23 日 14:00 SMS-WARRV2.0 同化的观测资料

Table 2 Observations at 1400 BT (Beijing time) 23 June 2016 used in SMS-WARRV2.0

观测资料类型	数量
常规地面观测	1602
机场地面	21
船舶观测	15
自动气象站	20496
飞机观测	2422
探空	19
小球测风	0
雷达 (反射率)	53
FY2G 静止气象卫星红外和可见光 (辐射率)	红外 1 个通道, 可见光 1 个通道

在试验结果分析中,将各个雷达反射率观测资料从极坐标插值到模式网格点形成拼图数据以验证预报的雷达反射率。

3 预报结果

3.1 最大雷达反射率

图 2 给出了 2016 年 6 月 23 日 14:00 SMS-WARRV2.0 模式初始场和 1 h 预报场中最大雷达反射率与观测的比较。14:00 雷达回波实况(最大雷达反射率)显示,在山东南部、江苏北部等地存在大范围的降水云系,江苏北部一带的回波强度可达 50 dBZ 以上(图 2a)。14:00 的模式初始场最大雷达反射率的分布与实况接近,较好地把握了江苏北部的强回波(图 2b)。14:00 起报的 1 h 预报场(图 2d)中江苏北部强回波位置已经向东移动,位于阜宁(图中黑色点)东侧,与实况(图 2c)基本一致。阜宁龙卷产生于大片降雨云系中对流雨带南端,这与俞小鼎等(2006)分析的 2003 年 7 月 8 日发生在江淮梅雨期暴雨天气背景下的一个龙卷过程类

似。

3.2 底层位涡与流场

图 3 给出分析区域 200 m 高度上位涡和流场时间演变。可以看到,在 14:20(图 3a),阜宁站西北侧 10 多公里处为南风 and 东南风,有小的正位涡区存在;14:20~14:30(图 3a、b 和 c),阜宁站西北侧 10 多公里处有西南风和东南风交汇,位涡开始持续增大;14:30~14:50(图 3c、d、e、f 和 g)阜宁站西北方 10 多公里处风开始明显旋转,形成涡旋,涡旋中心向东略偏北方向移动,同时位涡也迅速增大,14:50 左右达到最大值。14:50~15:00(图 3g、h 和 i)位涡大值区开始减弱并继续向东北移动,逐渐远离阜宁。底层涡旋 14:20 至 14:55 大致向东略偏北移动了 5 个网格点,向北移动了 2 个网格点(图 4),约 20 公里,这与该龙卷向东略偏北的移动路径较一致,但位置向北偏离,位于阜宁县城的北部。

3.3 雷达反射率

图 5 给出 23 日 14:45 1200 m 高度的雷达反射

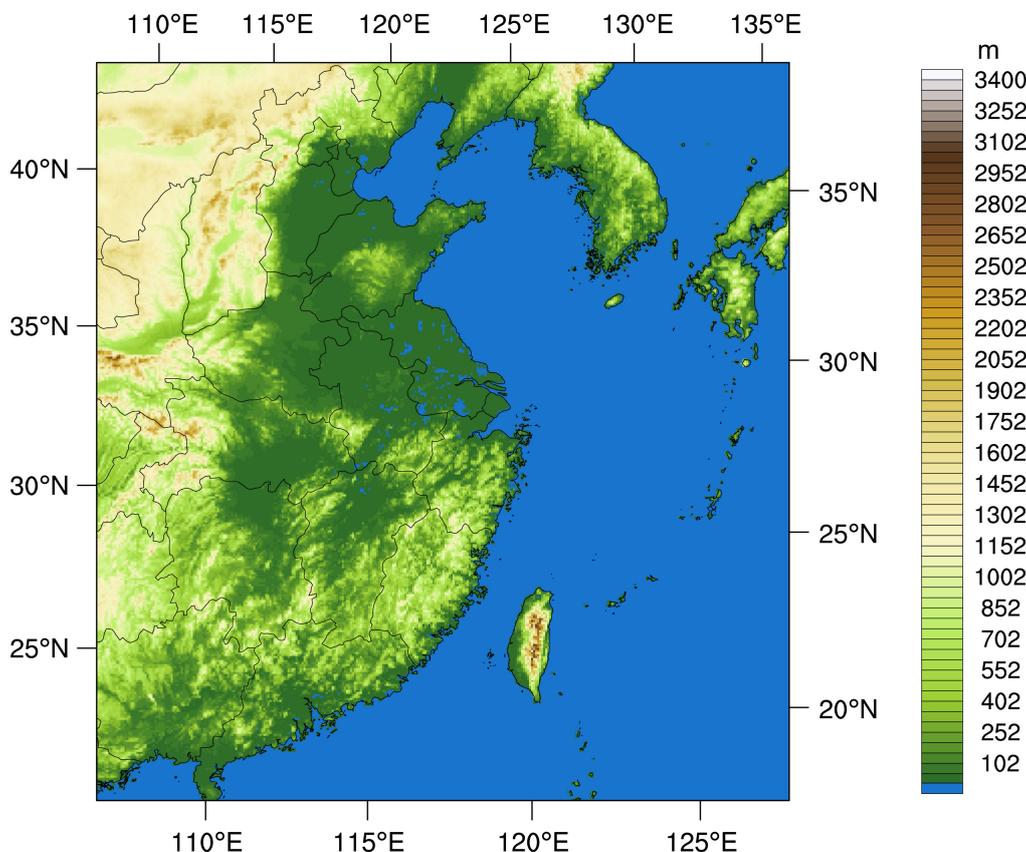


图 1 第二代华东快速更新循环同化系统预报区域(阴影表示地形高度,单位:m)

Fig. 1 Forecast area of SMS-WARRV2.0 (Shanghai Meteorological Service-WRF ADAS Rapid Refresh System, Version2.0; shadings denote terrain height, units: m)

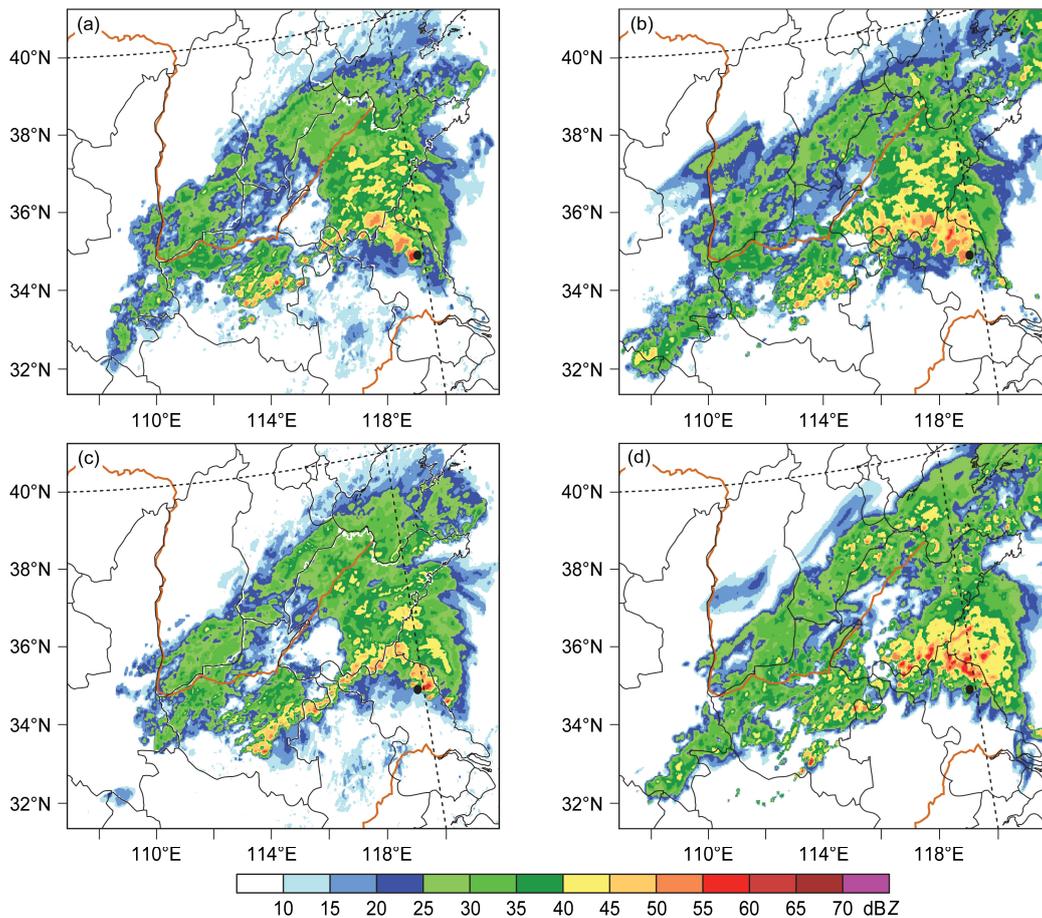


图2 2016年06月23日最大雷达反射率(单位: dBZ, 黑色点表示阜宁站): (a) 14:00 雷达回波实况; (b) 模式 14:00 初始场; (c) 15:00 雷达回波实况; (d) 模式 14:00 起报 1 h 预报场

Fig. 2 Maximum radar reflectivity (units: dBZ) on 23 June 2016 (the black dot indicates the Funing station): (a) Observation at 1400 BT (Beijing time); (b) SMS-WARRV2.0 initial field at 1400 BT; (c) observation at 1500 BT; (d) SMS-WARRV2.0 1 h forecast initialized at 1400 BT

率和对对应时刻的 200 m 高度的流场, 这时底层涡旋已经有较强发展(如图 3f)。由图 5 可见, 阜宁东北侧 10 多公里处 200 m 高度涡旋中心北侧有强雷达回波区, 强度超过 60 dBZ。同时紧邻着涡旋中心西南侧, 呈现出钩状结构, 与雷达回波观测相似。

3.4 地面风和降水

从 14:20 到 14:40, 阜宁站北侧和东北侧预报的地面 10 米风速逐步增大(图略); 14:40~14:55, 地面出现明显的涡旋结构, 涡旋北侧的地面 10 米风最大预报值达到 21 m s^{-1} (图 6a), 较实况偏小。

14:00~15:00, 预报的 1 h 累积降水中心位于阜宁北侧, 最大值超过 50 mm(图 6b), 与实况中报告的强降水站点累积值(1 h 累积降水大约 50 mm)基本吻合。14:00~20:00 预报的 6 h 累积降水(图略)中心位于阜宁东北侧, 最大值超过 200 mm,

对降水强度的预报偏大。

4 发生机制探讨

4.1 螺旋度分布与演变(动力场演变)

螺旋度定义为风速矢量和全涡度矢量的点积:

$$h = \mathbf{V} \cdot (\nabla \times \mathbf{V}) = u \left(\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (1)$$

其中, h 表示螺旋度, 单位为 m s^{-2} ; $\nabla \times \mathbf{V}$ 是涡度, 单位为 s^{-1} ; \mathbf{V} 为速度, u 、 v 、 w 分别为 Z 坐标系中速度 \mathbf{V} 的 x 、 y 、 z 分量, 单位为 m s^{-1} 。螺旋度值的正负代表反映了涡度和速度方向的配置情况, 可以用来衡量空气质点是否发生螺旋运动及其强度。由公式(1)可看出, 螺旋度可认为是 x 、 y 、 z 三个方

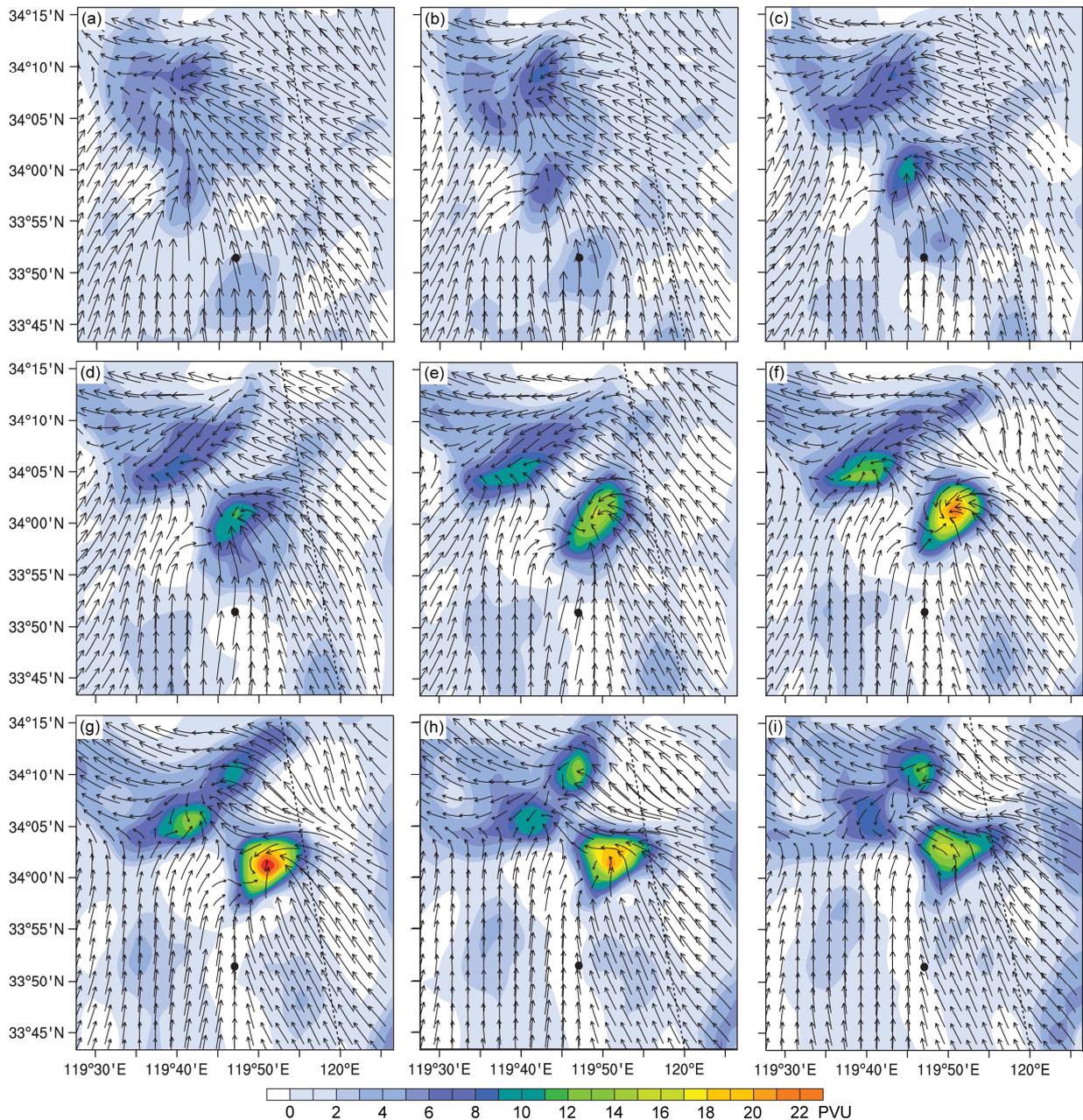


图3 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 起报 200 m 高度位涡 (单位: PVU) 和流场 (单位: m s^{-1}) 时间演变 (黑色点表示阜宁站): (a) 14:20; (b) 14:25; (c) 14:30; (d) 14:35; (e) 14:40; (f) 14:45; (g) 14:50; (h) 14:55; (i) 15:00

Fig. 3 Temporal evolution of potential vorticity (units: PVU) and wind vectors (units: m s^{-1}) at 200 m above the ground initialized at 1400 BT 23 June 2016 (the black dot indicates the Funing station): (a) 1420 BT; (b) 1425 BT; (c) 1430 BT; (d) 1435 BT; (e) 1440 BT; (f) 1445 BT; (g) 1450 BT; (h) 1455 BT; (i) 1500 BT

向分量的和 (高守亭和周非凡, 2006), 分别称为 x 螺旋度、 y 螺旋度和垂直螺旋度 (或 z 螺旋度)。根据图 2 中 200 m 高度涡旋各时刻所在的位置, 图 7 给出了涡旋中心附近 10×10 个网格点 (网格距为 3 km) 范围内 0~16 km 高度, 间隔为 200 m 的 x 、 y 、 z 螺旋度分布。14:10 (图 7a) 涡旋附近中层首先出

现正的 z 螺旋度, 表明此处开始有空气质点向上螺旋运动。到了 14:25 (图 7b), z 螺旋度显著增强, 且向上发展和向下延伸, 向上的高度接近 16 km, 中高层上升运动非常强烈 (图 8)。而中高层强烈的上升运动在其南北两侧分别导致较强的向东 x 涡度 ($\partial w / \partial y > 0$) 与较强的向西 x 涡度 ($\partial w / \partial y < 0$),

与局地的气旋性环流（南部西风 $u > 0$ ；北部东风 $u < 0$ ）相配合，高层出现了明显的 x 螺旋度大值区。同时中高层较大的南北风垂直切变（图 9a、b）会影响 x 螺旋度， $-\partial v / \partial z > 0$ 导致向东 x 涡度增强， $-\partial v / \partial z < 0$ 导致向西 x 涡度增强。此时涡旋中心附近低层的 y 螺旋度也有所增强，但尚不明显。到

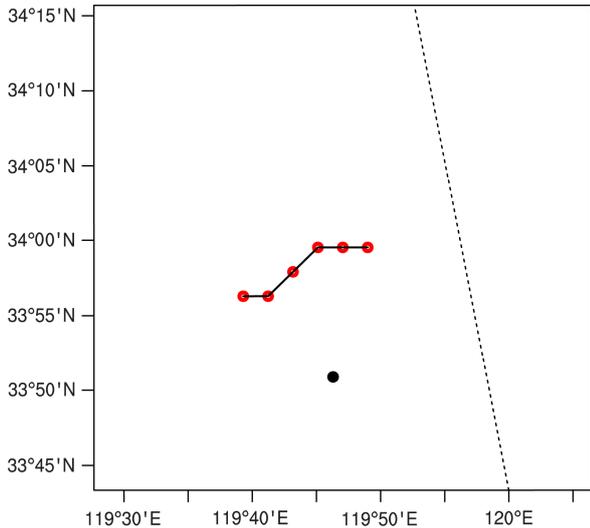


图 4 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 起报 200 m 高度涡旋中心 14:20~14:55 时间演变（红色圆圈表示涡旋中心，黑色点表示阜宁站）

Fig. 4 Temporal evolution of the vortex center at the 200 m height during 1420 BT–1455 BT simulated by SMS-WARRV2.0 initialized at 1400 BT 23 June 2016 (red circle indicates the vortex center; black dot denotes the Funing station)

14:45（图 7c），涡旋中心附近的 z 螺旋度和高层的 x 螺旋度较 14:25 继续维持，此时涡旋中心附近向上 z 螺旋度 2~5 km 高度积分得到的上升螺旋度（updraft helicity，简称 UH），达到本次 1 h 预报中

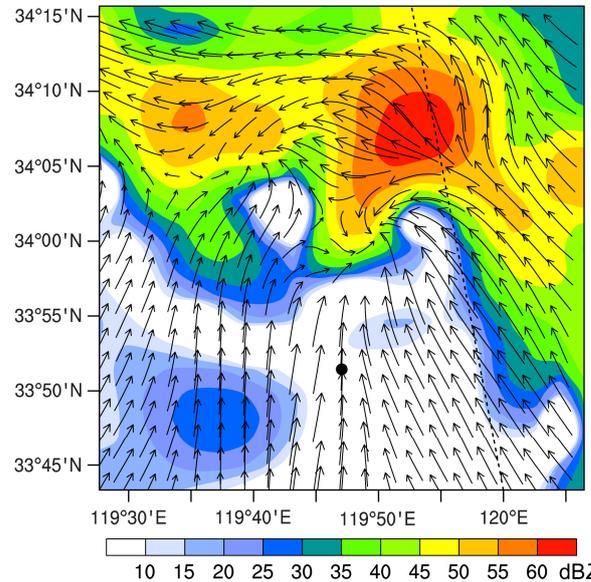


图 5 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 起报 14:45 1200 m 高度雷达反射率（单位：dBZ）和 200 m 高度流场（单位： m s^{-1} ；黑色点表示阜宁站）

Fig. 5 Radar reflectivity (units: dBZ) at 1200 m height and wind vectors (units: m s^{-1}) at 200 m height at 1445 BT predicted by SMS-WARRV2.0, which was initialized at 1400 BT 23 June 2016 (black dot denotes the Funing station)

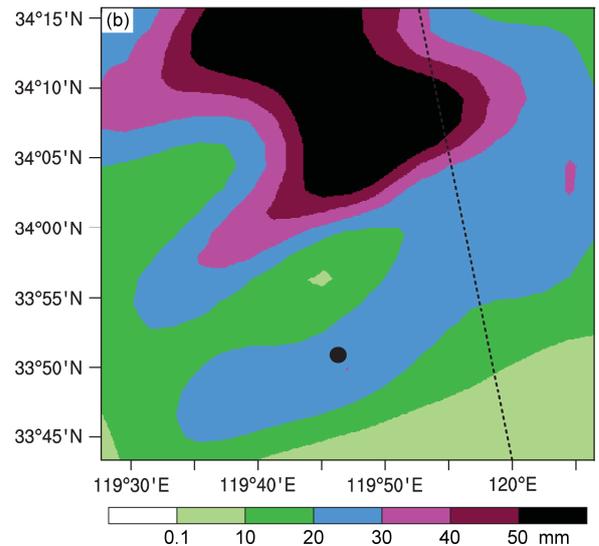
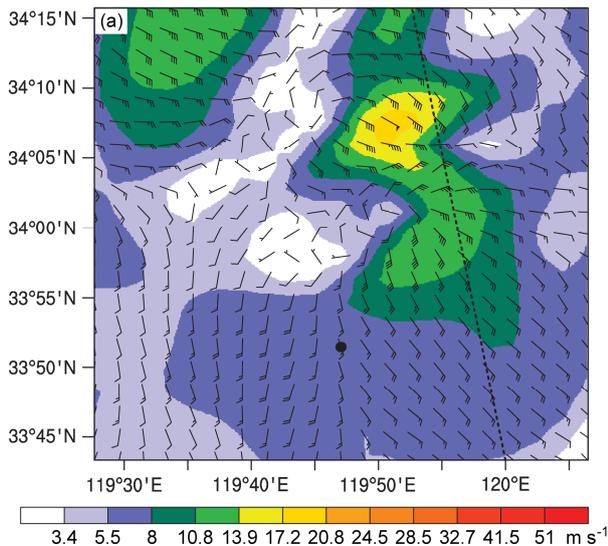


图 6 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 起报 (a) 14:50 地面 10 m 高度的风场（单位： m s^{-1} ）以及 (b) 14:00~15:00 1 h 的累积降水量（单位：mm）。黑色点表示阜宁站

Fig. 6 (a) 10 m-height wind (units: m s^{-1}) at 1450 BT and (b) 1-h accumulated precipitation (units: mm) during 1400 BT–1500 BT predicted by SMS-WARRV2.0, which was initialized at 1400 BT 23 June 2016 (black dot indicates the Funing station)

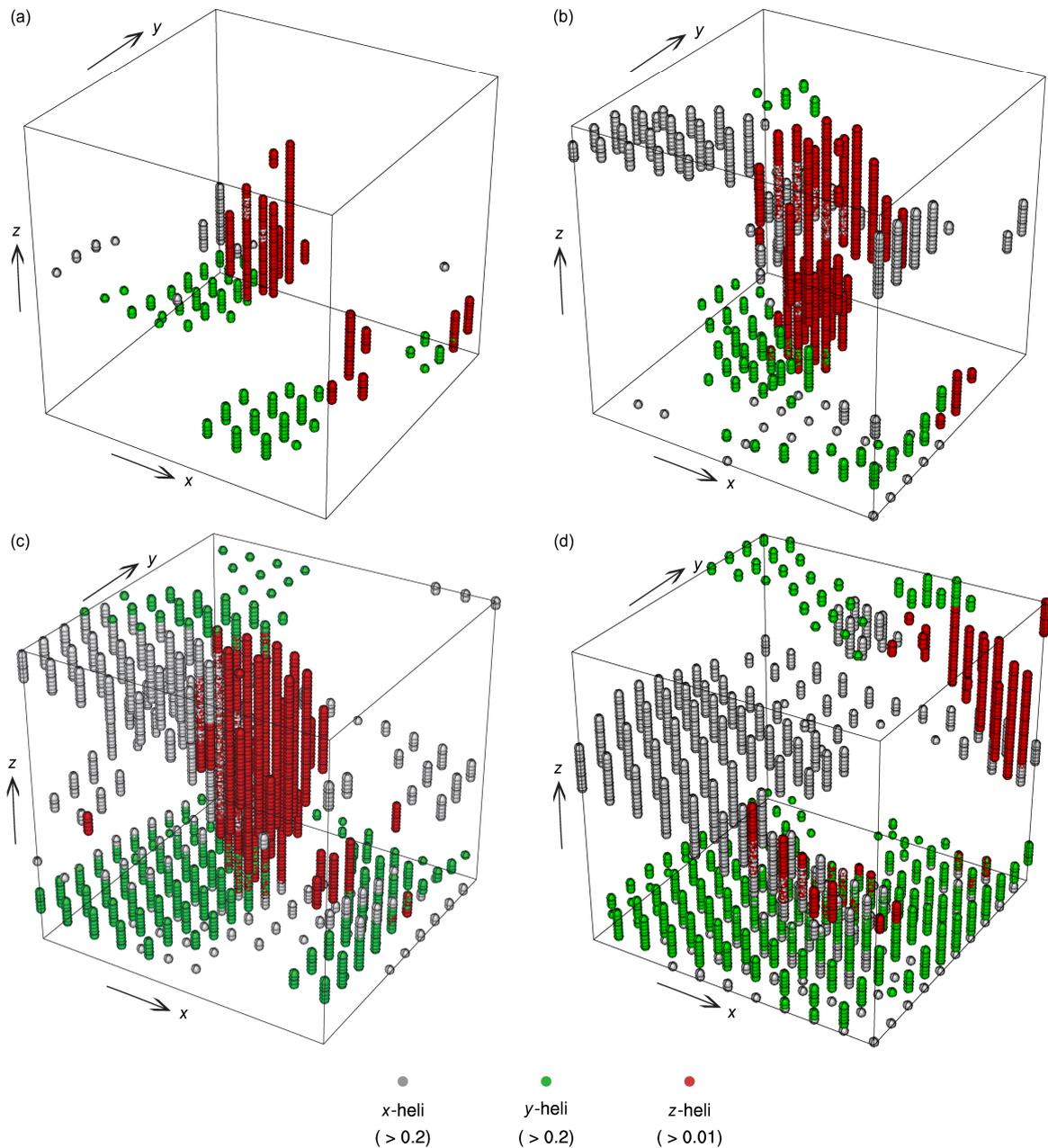


图 7 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 起报涡旋中心附近 10×10 网格点 $0 \sim 16$ km 高度的 x 、 y 、 z 螺旋度分布 (单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$, 垂直间隔 200 m): (a) 14:10; (b) 14:25; (c) 14:45; (d) 15:00

Fig. 7 3-D distributions of x -, y -, z -helicity (units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) within 10×10 grid points from 0 to 16 km height (vertical interval is 200 m) around the vortex predicted by SMS-WARRV2.0, which was initialized at 1400 BT 23 Jun 2016: (a) 1410 BT; (b) 1425 BT; (c) 1445 BT; (d) 1500 BT

的最大值 $56.6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (Kain et al., 2008), Sobash et al. (2008) 的研究指出 $2 \sim 5$ km 的上升螺旋度极值对强天气预报中与龙卷等密切相关的对流单体的诊断非常有效, 并通过统计给出了 $54 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 的参考值, 本次预报中上升螺旋度极值已略超过该参考值, 表明中低层有非常强烈的对流运动发展; 同时低层正 y 螺旋度显著增强, 表明在涡旋的西侧,

$-\partial w / \partial x < 0$ 与北风相配合形成正 y 螺旋度, 同样在涡旋的东侧 $-\partial w / \partial x > 0$ 与南风相配合也形成正 y 螺旋度。同时中低层较大的东西风垂直切变(图 9b、c) 会显著影响 y 螺旋度, $\partial u / \partial z > 0$ 导致向南 y 涡度增强, $\partial u / \partial z < 0$ 导致向北 y 涡度增强。从图 7d 看出, 15:00 涡旋中心附近高层的 x 螺旋度减弱明显, 中层 x 螺旋度增加, z 螺旋度基本消失, 对流

减弱; 涡旋中心附近低层的 y 螺旋度维持, 涡旋中心结构变得松散。从时间演变来看, 14:15~14:25, z 螺旋度主要位于中高层; 14:25~14:55, z 螺旋度大值区逐渐延伸到地面; 在 14:45 左右, 近地面的 z 螺旋度达到最大, 这与图 3 中 200 m 位涡和流场的时间演变基本吻合。从高空剧烈的垂直运动发展, 到地面涡旋增强再减弱, 持续时间大约 30 多分钟。

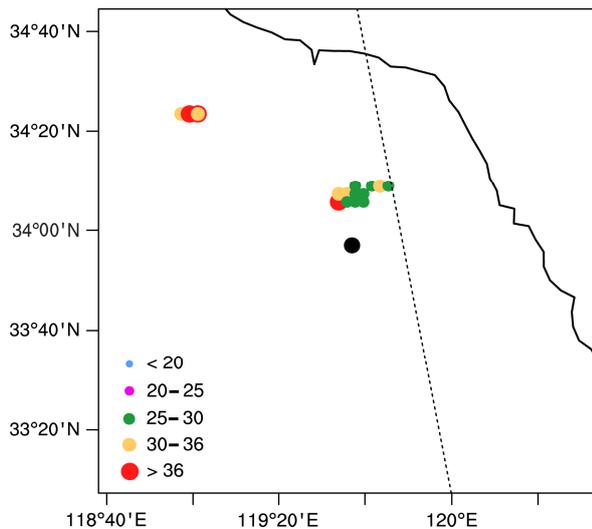


图 8 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 起报 14:10~15:00 每分钟模式区域最大垂直速度位置分布和数值区间 (单位: m s^{-1} , 黑色圆点表示阜宁站)

Fig. 8 Positions and ranges (units: m s^{-1}) of the strongest updraft within the 3-D model domain at 1-min interval between 1410 BT and 1500 BT predicted by SMS-WARRV2.0, which was initialized at 1400 BT 23 Jun 2016 (black dot indicates the Funing station)

图 8 是 14:00 起报的 14:10~15:00 输出中, 每分钟在模式的三维格点上, 上升垂直速度出现最大的格点位置与数值区间。最强上升运动在 50 min 内全部发生在大片降雨云系范围内 (见图 2)。14:17~14:46 最强上升运动位于阜宁北部和东北部, 距离阜宁为 10 多公里, 持续了近 30 min, 其中 30 m s^{-1} 以上的上升运动从 14:17~14:24 持续了 7 分钟, 最大 37.2 m s^{-1} 发生在 14:19, 高度在 12 km 附近; 14:47 以后模式范围内最强上升运动的位置远离图 8 中的区域。

图 9 给出了 14:00 起报的 14:25 各层水平风, 可以看到, 在 12 km 高度 (图 9a), 涡旋中心附近有较强的西北风和西南风交汇; 而在中层 6 km 高度 (图 9b) 为西南风; 底层 0.05 km 高度 (图 9c) 有东南风和西南风交汇。涡旋南侧高层为西北风, 中层为西南风, 涡旋东侧中层为西南风, 低层为东南风, 垂直风切变较大。

4.2 温度距平和气压扰动 (热力场与质量场)

图 10 是沿涡旋中心南北各 30 个格点的温度距平 (相对于同高度 60 个格点的平均温度) 与气压扰动 (相对于基准态气压) 高度剖面图。由图 10a 可见, 14:00 (初始场) 涡旋中心及其南侧的下层是正温度距平, 对流层中高层则是负温度距平, 表现出明显的大尺度静力不稳定特征, 冷暖交汇剧烈。而在涡旋中心北侧底层, 此时有冷空气与南边较暖的空气在涡旋中心附近形成冷暖交汇。14:10 (图 10b) 较强的对流单体出现在涡旋中心上空, 由于凝结潜热的释放, 在 8 km 附近形成正温度距平中

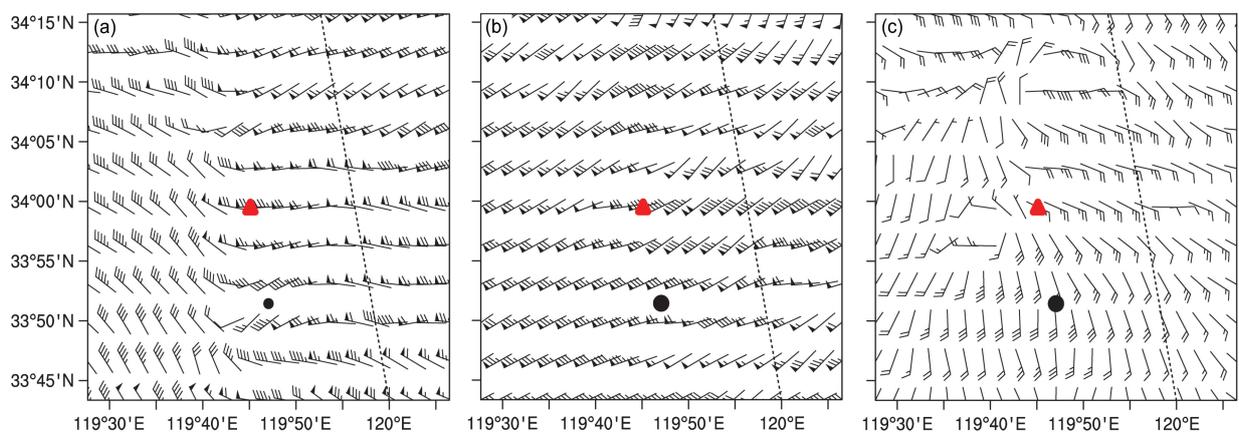


图 9 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 起报 14:25 水平风 (单位: m s^{-1} , 红色三角形表示涡旋中心, 黑色圆点表示阜宁站): (a) 12 km; (b) 6 km; (c) 0.05 km

Fig. 9 Horizontal wind (units: m s^{-1}) at 1425 BT predicted by SMS-WARRV2.0, which was initialized at 1400 BT 23 Jun 2016 (red triangle denotes the vortex center, black dot indicates the Funing station): (a) 12 km; (b) 6 km; (c) 0.05 km

心；与此同时，由于上升运动增强，抽吸作用在对流单体下层两侧使得大气质量减少，形成低气压中心，而在高层涡旋中心高层，大气质量堆积形成高气压距平。从气压扰动的分布可以看出，强对流单

体的上升运动造成局地空气质量重分布。距主对流单体大约 10 个格距 (30 km)，南北各有一个对流单体存在。到了 14:25 (图 10c)，涡旋中心附近的温度正距平向上向下扩展；这时中低层空气向中心

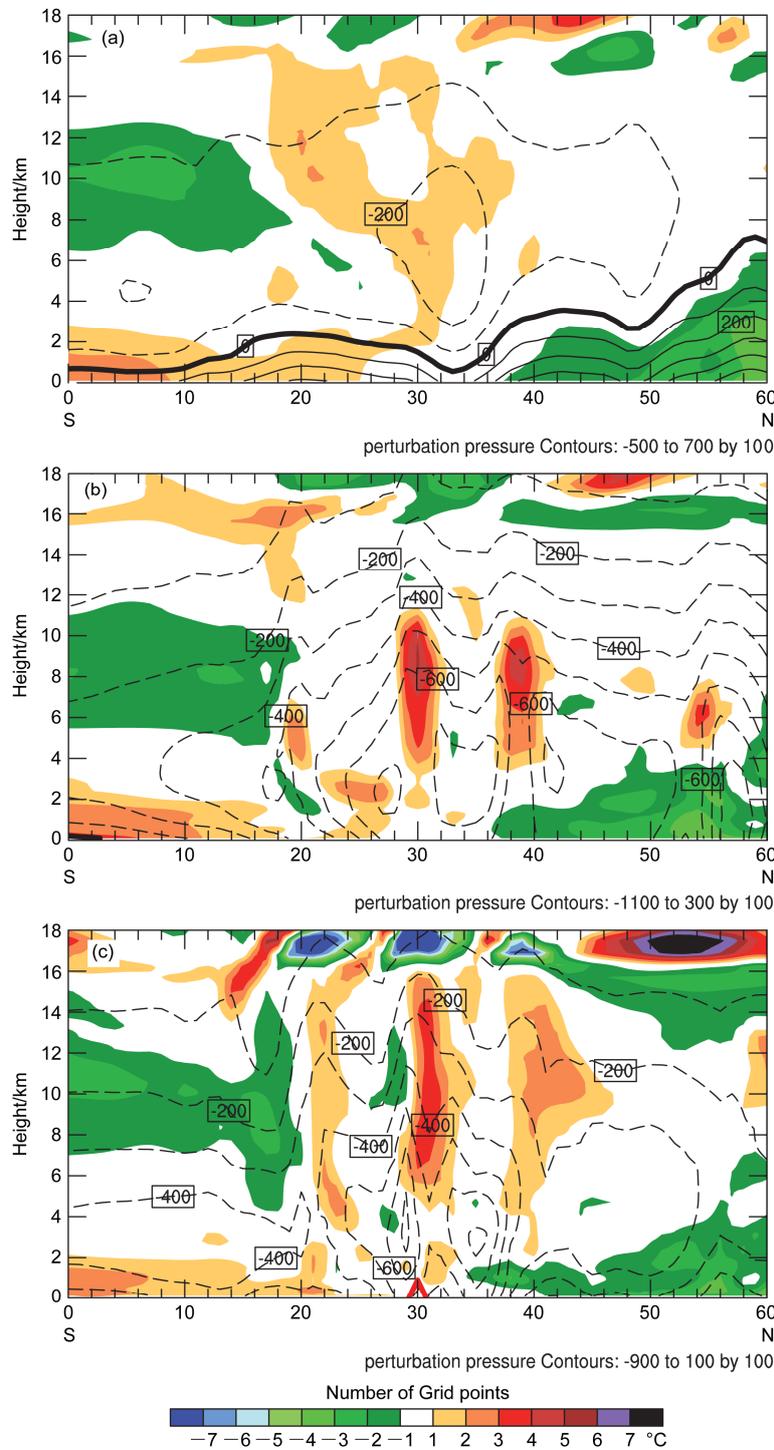


图 10 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 起报的涡旋中心附近的温度距平和气压扰动南—北剖面 (阴影为温度距平, 单位: °C; 虚线为气压扰动, 单位: Pa; 红色三角形为涡旋中心, 网格距是 3 km): (a) 14:00; (b) 14:10; (c) 14:25

Fig. 10 North-south cross sections of temperature anomalies (shaded, units: °C) and pressure perturbations (dashed lines, units: Pa) simulated by SMS-WARRV2.0, which was initialized at 1400 BT 23 Jun 2016 (red triangle indicates the vortex center, grid interval is 3 km): (a) 1400 BT; (b) 1410 BT; (c) 1425 BT

强烈的辐合上升,使得地面气压下降,并形成了很大的水平气压梯度力,导致了强烈的底层风加速。与此同时,北边的对流单体进一步抬升并开始消散,而南边的对流单体开始有中层冷空气入侵并减弱。另外由于强烈的对流活动,使得对流层高层的空气可达平流层,形成了图中 16 km 以上的温度负距平中心。这与张小玲等(2016)提到的该对流风暴整体发展高度可达 15 km 的实况接近。

前文分析表明,模拟的龙卷母体—对流单体位于江苏北部,此处受冷空气东移南压和低层西南暖湿气流共同影响,冷暖交汇剧烈。对流单体的发生和发展从中层上升运动开始,之后该上升区同时向上和向下伸展,中高空出现剧烈的上升运动,高层辐散加强,随后中低空的垂直运动也增强,低层辐合增强,在此期间抽吸作用在对流单体下层两侧使得大气质量减少,形成低气压中心,导致了强烈的底层风加速,涡旋增强。在对流单体低层存在入流,向上输送到高层。对流单体发展过程中伴随着强烈的上升运动,这种上升气流的加强与垂直涡度通过与环境垂直风切变之间的动力相互作用产生的向上的扰动气压梯度力直接相关(Klemp, 1987)。俞小鼎等(2008)在对一个伴随强龙卷的超级对流单体的研究中认为,上述上升气流的动力增强机制可使得对流单体的最大上升气流速度超过根据对流有效位能(CAPE)全部转换为上升运动动能得到的上升气流速度极限值。在发展阶段,上升气流不断加强,垂直风切变等产生的水平涡度扭曲成垂直涡度,并在不断加大的垂直拉伸作用下进一步增强,从而可能产生极端对流天气。

5 资料同化对预报结果的影响

为了了解资料同化对预报结果的影响,我们不同化任何表 2 中的观测资料,直接使用 13 时起报的 1 h 预报场作为初始场,进行 12 h 的预报。没有资料同化 14:00 起报的 14:10~15:00 最强上升运动出现在阜宁西北部 80 多公里处,速度在 25 m s^{-1} 左右(图 11)。最强上升运动的分布明显不同于进行了资料同化的结果(图 8),速度也偏小。由此可见,逐小时循环同化是决定这次龙卷天气预报效果的关键之一。

6 结论和讨论

本文基于第二代华东快速更新循环同化模式

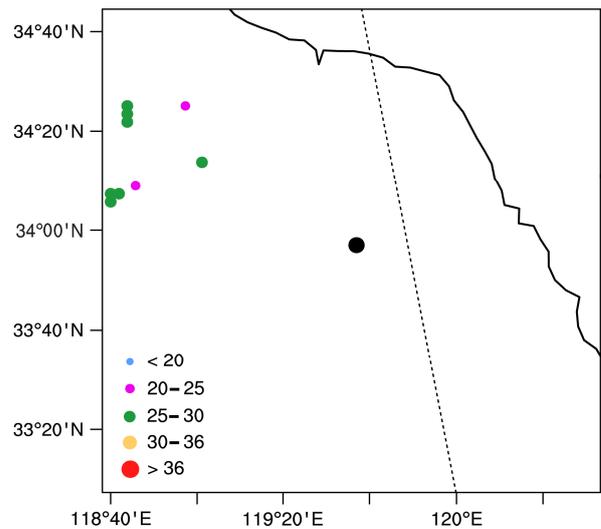


图 11 SMS-WARRV2.0 系统 2016 年 06 月 23 日 14:00 无资料同化起报 14:10~15:00 每分钟模式区域最大垂直速度位置分布和数值区间(单位: m s^{-1} ; 黑色圆点表示阜宁站)

Fig. 11 Positions and ranges (units: m s^{-1}) of the strongest updraft within the 3-D model domain at 1-min interval between 1410 BT and 1500 BT predicted by SMS-WARRV2.0, which was initialized at 1400 BT 23 Jun 2016 without data assimilation (black dot indicates the Funing station)

预报系统 SMS-WARRV2.0 的预报结果对 2016 年 6 月 23 日发生在江苏阜宁的龙卷天气个例进行了分析,探讨了此次龙卷母体—对流单体的发生发展机制。主要结论如下:

(1) 华东快速更新循环同化系统 23 日 14:00 起报的预报,在阜宁附近模拟出了类似龙卷母体的涡旋结构,其发生、发展的过程以及发生时间都与实况基本吻合。但涡旋发生在阜宁北侧,与观测相比偏差 20 多公里,且最大地面风速较实况小。

(2) 所模拟的涡旋,是极强的对流单体所伴随的剧烈上升运动所致;强烈的对流活动引起大气质量重新分布,涡旋南北两侧也有对流单体生成。

(3) 模拟结果显示,该对流单体从中层上升运动开始,随着该上升区向上和向下发展,先在中高空出现了剧烈的上升运动, z 螺旋度增大,高层辐散加强, x 螺旋度增大,随后中低空的垂直运动也增强, y 螺旋度增大,低层辐合增强,最后随着高层辐散和垂直运动的减弱,低层系统减弱并消散。在此期间,模式范围内的最大上升垂直速度在模拟龙卷发生地高空集中出现 30 分钟左右。

(4) 没有资料同化,在阜宁附近没有模拟出类似龙卷母体的结构,表明逐小时循环同化是决定这次龙卷天气预报效果的关键之一。

水平分辨率为 3 km 的模式系统, 虽然对龙卷天气过程具有一定的模拟能力, 但受限于水平分辨率, 还不足以分辨龙卷自身的环流和结构, 但可以为产生龙卷的对流单体提供较精确的预报。另外, 龙卷等强天气过程发生和维持的时间较短。因此, 提高模式的分辨率, 改进相应的物理过程, 增加快速更新循环的同化频次, 并加强对模式结果的释用等, 是提高龙卷此类强烈天气预报精度可能的有效途径。

参考文献 (References)

- Benjamin S G, D ev enyi D, Weygandt S S, et al. 2004. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 132 (2): 495–518, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0495:AHACTR>2.0.CO;2.
- Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2016. A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 144 (4): 1669–1694, doi:10.1175/MWR-D-15-0242.1.
- 曹艳察, 张涛. 2016. 2016 年 6 月大气环流和天气分析 [J]. *气象*, 42 (9): 1154–1160. Cao Yanca, Zhang Tao. 2016. Analysis of the June 2016 atmospheric circulation and weather [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42 (9): 1154–1160, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.013.
- 陈敏, 范水勇, 郑祚芳, 等. 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探 [J]. *气象学报*, 69 (1): 181–194.
- Chen Min, Fan Shuiyong, Zheng Zuofang, et al. 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (1): 181–194, doi:10.11676/qxxb2011.016.
- 陈葆德, 王晓峰, 李泓, 等. 2013. 快速更新同化预报的关键技术综述 [J]. *气象科技进展*, 3 (2): 29–35. Chen Baode, Wang Xiaofeng, Li Hong, et al. 2013. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 3 (2): 29–35, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.003.
- 陈子通, 黄燕燕, 万齐林, 等. 2010. 快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析 [J]. *热带气象学报*, 26 (1): 49–54. Chen Zitong, Huang Yanyan, Wan Qilin, et al. 2010. Rapid updating cycle assimilation and forecasting system and its experiments and analysis in flood seasons [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 26 (1): 49–54, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2010.01.007.
- Gaffin D M, Parker S S. 2006. A climatology of synoptic conditions associated with significant tornadoes across the southern Appalachian region [J]. *Wea. Forecasting*, 21 (5): 735–751, doi:10.1175/WAF951.1.
- 高守亭, 周非凡. 2006. 基于螺旋度的中尺度平衡方程及非平衡流诊断方法 [J]. *大气科学*, 30 (5): 854–862. Gao Shouting, Zhou Feifan. 2006. Mesoscale balance equation and the diagnostic method of unbalanced flow based on helicity [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 854–862, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.14.
- Hanley K E, Barrett A I, Lean H W. 2016. Simulating the 20 May 2013 Moore, Oklahoma tornado with a 100-metre grid-length NWP model [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 17 (8): 453–461, doi:10.1002/asl.678.
- 郝民, 徐枝芳, 陶士伟, 等. 2011. GRAPES RUC 系统模拟研究及应用试验 [J]. *高原气象*, 30 (6): 1573–1583. Hao Min, Xu Zhifang, Tao Shiwei, et al. 2011. Simulation study and application experiment of GRAPES RUC system [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (6): 1573–1583.
- Hu M, Xue M. 2007. Impact of configurations of rapid intermittent assimilation of WSR-88D radar data for the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic thunderstorm case [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (2): 507–525, doi:10.1175/MWR3313.1.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. *Journal Geophysical Research*, 113, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- Kain J S, Weiss S J, Bright D R, et al. 2008. Some practical considerations regarding horizontal resolution in the first generation of operational convection-allowing NWP [J]. *Wea. Forecasting*, 23 (5): 931–952, doi:10.1175/WAF2007106.1.
- Klemp J B. 1987. Dynamics of tornadic thunderstorms [J]. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 19: 369–402, doi:10.1146/annurev.fl.19.010187.002101.
- 李改琴, 许庆娥, 吴丽敏, 等. 2014. 一次龙卷风天气的特征分析 [J]. *气象*, 40 (5): 628–636. Li Gaiqin, Xu Qing'e, Wu Limin, et al. 2014. Characteristics analysis of tornado weather [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 40 (5): 628–636, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.014.
- 李泽椿, 毕宝贵, 金荣花, 等. 2014. 近 10 年中国现代天气预报的发展与应用 [J]. *气象学报*, 72 (6): 1069–1078. Li Zechun, Bi Baogui, Jin Ronghua, et al. 2014. The development and application of the modern weather forecast in China for the recent 10 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72 (6): 1069–1078, doi:10.11676/qxxb2014.090.
- Lyu H M, Wang G F, Cheng W C, et al. 2017. Tornado hazards on June 23 in Jiangsu Province, China: Preliminary investigation and analysis [J]. *Nat. Hazards*, 85 (1): 597–604, doi:10.1007/s11069-016-2588-2.
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Reviews of Geophysics*, 20 (4): 851–875.
- Monin A S, Obukhov A M. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere [J]. *Geophysics Institute, USSR Academy of Science*, 24 (151): 163–187, (Originally published in Russian, translated by John Miller, American Meteorological Society, 1959)
- Rasmussen E N, Blanchard D O. 1998. A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters [J]. *Wea. Forecasting*, 13 (4): 1148–1164, doi:10.1175/1520-0434(1998)013<1148:ABCOSD>2.0.CO;2.
- Schumacher R S, Lindsey D T, Schumacher A B, et al. 2010. Multidisciplinary analysis of an Unusual tornado: Meteorology, climatology, and the communication and interpretation of warnings [J]. *Wea. Forecasting*, 25 (5): 1412–1429, doi:10.1175/2010WAF2222396.1.
- Sobash R, Bright D R, Dean A R, et al. 2008. Severe storm forecast guidance based on explicit identification of convective phenomena in WRF-model forecasts [C]// Preprints, 24th Conference on Severe Local Storms. Savannah, GA: American Meteor Society, 11.3.
- Tewari M, Chen F, Wang W, et al. 2004. Implementation and verification of

- the unified NOAA land surface model in the WRF model [C]. 20th Conference on Weather Analysis and Forecasting/16th Conference on Numerical Weather Prediction. 11–15.
- Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis [J]. *Monthly Weather Review*, 132: 519–542.
- 王红燕, 王东平, 牛淑贞, 等. 2013. 河南长葛南席一次龙卷成因分析及雷达预警初探 [J]. *暴雨灾害*, 32 (3): 256–262. Wang Hongyan, Wang Dongping, Niu Shuzhen, et al. 2013. Analysis on the causes of a tornado in Nanxi, Change of Henan Province and the preliminary study on radar warning [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 32 (3): 256–262, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2013.03.009.
- 王叶红, 彭菊香, 公颖, 等. 2011. AREM-RUC 3 h 快速更新同化预报系统的建立与实时预报对比检验 [J]. *暴雨灾害*, 30 (4): 296–304. Wang Yehong, Peng Juxiang, Gong Ying, et al. 2011. Establishment and real-time forecasting verification of AREM-RUC 3 h rapid update assimilation and forecast system [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 30 (4): 296–304, doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2011.04.002.
- 魏东, 尤凤春, 杨波, 等. 2011. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)要素预报质量评估 [J]. *气象*, 37 (12): 1489–1497. Wei Dong, You Fengchun, Yang Bo, et al. 2011. Assessment and analysis of meteorological elements forecasted by Beijing rapid update cycle forecast system [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 37 (12): 1489–1497, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.12.003.
- 吴芳芳, 俞小鼎, 王慧, 等. 2010. 一次强降水超级单体风暴多普勒天气雷达特征 [J]. *大气科学学报*, 33 (3): 285–298. Wu Fangfang, Yu Xiaoding, Wang Hui, et al. 2010. A HP supercell case study with the data of Doppler weather radar detection [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (3): 285–298, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2010.03.004.
- 徐枝芳, 郝民, 朱立娟, 等. 2013. GRAPES_RAFS 系统研发 [J]. *气象*, 39 (4): 466–477. Xu Zhifang, Hao Min, Zhu Lijuan, et al. 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 39 (4): 466–477, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.009.
- Xue M, Hu M, Schenkman A D. 2014. Numerical prediction of the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data [J]. *Wea. Forecasting*, 29 (1): 39–62, doi:10.1175/WAF-D-13-00029.1.
- Xue M, Zhao K, Wang M J, et al. 2016. Recent significant tornadoes in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 33 (11): 1209–1217, doi:10.1007/s00376-016-6005-2.
- 俞小鼎, 郑媛媛, 张爱民, 等. 2006. 安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析 [J]. *高原气象*, 25 (5): 914–924. Yu Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Zhang Aiming, et al. 2006. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (5): 914–924, doi:10.3321/j.issn.1000-0534.2006.05.020.
- 俞小鼎, 郑媛媛, 廖玉芳, 等. 2008. 一次伴随强烈龙卷的强降水超级单体风暴研究 [J]. *大气科学*, 32 (3): 508–522. Yu Xiaoding, Zheng Yuanyuan, Liao Yufang, et al. 2008. Observational investigation of a tornadic heavy precipitation supercell storm [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (3): 508–522, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.03.08.
- 张小玲, 杨波, 朱文剑, 等. 2016. 2016 年 6 月 23 日江苏阜宁 EF4 级龙卷天气分析 [J]. *气象*, 42 (11): 1304–1314. Zhang Xiaoling, Yang Bo, Zhu Wenjian, et al. 2016. Analysis of the EF4 tornado in Funing county, Jiangsu Province on 23 June 2016 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42 (11): 1304–1314, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.002.
- 郑媛媛, 朱红芳, 方翔, 等. 2009. 强龙卷超级单体风暴特征分析与预警研究 [J]. *高原气象*, 28 (3): 617–625. Zheng Yuanyuan, Zhu Hongfang, Fang Xiang, et al. 2009. Characteristic analysis and early-warning of tornado supercell storm [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28 (3): 617–625.
- 周后福, 施丹平, 刁秀广, 等. 2014. 2013 年 7 月 7 日苏皖龙卷环境场与雷达特征分析 [J]. *干旱气象*, 32 (3): 415–423. Zhou Houfu, Shi Danping, Diao Xiuguang, et al. 2014. Analysis on environment field and radar echoes feature of a tornado in Jiangsu and Anhui Provinces on 7 July 2013 [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 32 (3): 415–423, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2014)-03-0415.