吴涛,许冠宇,李双君,等,2023.一次春季江淮气旋混合型对流天气特征及成因分析[J].气象,49(1):27-38. Wu T, Xu G Y, Li S J, et al, 2023. Characteristics and causes of a mixed-type convective weather during the formation and development of a Jianghuai cyclone in spring[J]. Meteor Mon, 49(1):27-38(in Chinese).

一次春季江淮气旋混合型对流天气特征及成因分析*

吴 涛 许冠宇 李双君 魏 凡

武汉中心气象台,武汉 430074

提 要: 采用天气雷达、高空地面观测、1°×1° NCEP再分析场资料,分析一次春季江淮气旋形成发展过程中混合型(冰雹、大风、短时强降水)对流天气特征,初步解释了不同类型对流天气形成发展的原因。结果表明:不同类型强对流天气在时空分布和对流特征上存在差异,其中局地冰雹主要由气旋形成阶段离散对流线产生,带状短时强降水由气旋形成阶段人字形对流线上及发展阶段S形对流线后部的列车线/邻接层状云类中尺度对流系统(MCS)产生,大范围大风主要由江淮气旋发展阶段S形对流线上尾随层状云降水类MCS产生。江淮气旋是大尺度天气系统斜压发展的结果,对流活动使锋面低层辐合增强,对气旋形成发展有加强作用。强对流天气的产生与江淮气旋动力热力场有密切关系。气旋形成阶段,西南涡结合山区地形提供了有利于鄂西南大冰雹形成的环境场,暖式切变线以及气旋发展阶段受南支槽影响的冷式切变线,提供有利于风暴列车效应形成的环境场而产生短时强降水;气旋发展阶段,冷式切变线提供有利于后部入流急流形成的环境场而产生大范围大风。

关键词: 江淮气旋,混合型对流天气,中尺度对流系统(MCS)

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.111801

Characteristics and Causes of a Mixed-Type Convective Weather During the Formation and Development of a Jianghuai Cyclone in Spring

WU Tao XU Guanyu LI Shuangjun WEI Fan

Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

Abstract: By using weather radar, upper-level and ground observations and NCEP 1°×1° reanalysis data, this paper analyzes the characteristics of mixed-type convective weather during the formation and development of Jianghuai cyclone in spring, and the reasons why different types of convective weather occur and intensify. The results show that there are differences in spatio-temporal distribution and convective characteristics of different types of severe convective weather. The localized hail is mainly produced by discrete convective line in the formation stage of cyclone, the banded short-time severe precipitation is produced by TL/AS MCS which is located on herringbone convective line in the formation stage of cyclone and behind the S-shaped convective line in the development stage of cyclone, and the large-scale gale is produced by TS MCS on the S-shaped convective line in the development stage of Jianghuai cyclone. Jianghuai cyclone is the result of the baroclinic development of the large-scale weather systems, convective activities enhance the convergence of the low-level front, strengthening the formation and development of cyclone. The generation of severe convective weather is closely related to the dynamic and thermodynamic field of Jianghuai cyclone.

* 湖北省气象局科技发展基金项目(2022Z01-01)资助

2021年8月26日收稿; 2022年11月5日收修定稿

第一作者:吴涛,主要从事强对流天气分析预报、雷达资料开发应用. E-mail:sywutao@163.com

In the cyclone formation stage, the southwest vortex combined with the mountainous terrain provides the environmental field conducive to the formation of hail in the southwest of Hubei Province. The warm shear line in the cyclone formation stage and the cold shear line affected by the south branch trough in the cyclone development stage provide the environmental field conducive to the formation of storm train effect which produces short-time severe precipitation. In the cyclone development stage, the cold shear line provides the environmental field conducive to the formation of the rear inflow jet, which is the main factor of gale formation.
Key words: Jianghuai cyclone, mixed-type convective weather, mesoscale convective system (MCS)

引 言

江淮气旋属于温带气旋的一种,所引发的对流天气具有多样性。根据不同的天气学成因,斯公望(1980)将温带气旋内部具有对流性质的中尺度降水带分为五种类型:暖锋型、暖区型、冷锋型、锋前冷空气爆流型及锋后型。江淮气旋暖锋(暖式切变线)附近不稳定性较强时有对流发展,强的锋生、辐合及正涡度等作用有利于产生大范围暴雨(张晓红等,2016;沈阳等,2019)。在西南暖湿急流推动下,暖区暴雨北抬可转换为暖锋前暴雨(黄士松等,1976)。因冷暖空气交汇导致的斜压锋生作用,冷锋附近常形成有组织的线状对流系统并产生大风、暴雨等强对流天气(陈永林等,2013;孙继松等,2014),而斜压性较弱的江淮气旋冷锋在南压过程中转为东西走向,风暴移动出现"列车效应"而产生极端降水(张家国等,2018)。近年来锋前暖区极端降水引起研究人员的重视,由于环境场层结不稳定性强和水汽充足,中尺度对流系统发展活跃易产生极端强降水,其触发发展机制与地形、边界层辐合线等关系密切(雷蕾等,2020;黄美金等,2022)。

20世纪以来,天气雷达大量应用于揭示中尺度对流系统结构及活动规律。赵宇等(2018)探测到冬季江淮气旋逗点云区中来自不同性质气团的多条气旋式旋转、拉长的中尺度强降水带。丁治英等(2019)观测到江淮气旋暖锋上由重力波触发的多条平行对流回波带。Bluestein and Jain(1985)、Parker and Johnson(2000)、Schumacher and Johnson(2005)、王晓芳和崔春光(2012)、张小玲等(2014)、王珏等(2019)基于中尺度对流性系统(MCS)的雷达观测事实,根据MCS组织结构及运动特征总结出基本的MCS模态,主要包括尾随层状云降水(简称TS)类、平行层状云降水(简称PS)类、前导层状云降水(简称LS)类、列车线/邻接层状云降水(简称TL/AS)类、准静止/后向建立(简称QS/BB)类、涡旋(简称VS)类、合并类等。MCS组织结构与风暴相对气流的垂直分布、中尺度天气系统、地形等有密切关系,其中TS类MCS与飑线有关(Houze,1997),TL/AS类MCS与静止锋有关(Schumacher and Johnson,2005),而涡旋类MCS与中尺度涡旋(气旋)密切相关(吴涛等,2017;梁建宇和孙建华,2012;易笑园等,2011)。

当前开展江淮气旋引发暴雨的雷达观测特征及机制分析较多,而对春季江淮气旋所引发混合型对流天气的分析相对较少,江淮气旋作为斜压性明显的α中尺度涡旋系统,在生命史各阶段中尺度对流系统演变特征、不同类型对流天气特点及形成机制还不够清楚。此外,多数研究成果基于大尺度天气形势分析江淮气旋成因(朱乾根等,2007),而较少分析中尺度对流活动对江淮气旋的作用,实际上两者往往是协同发展的,中尺度对流活动所发挥的作用值得重视。

2019年4月8—9日,受江淮气旋影响,长江中下游及江淮地区经历了一次较大范围的短时强降水、冰雹、大风混合型对流天气过程,然而主要对流天气出现的时段及对流特征有所不同,开展相关问题的分析很有必要。本文使用新一代天气雷达、区域自动气象站资料、高空/地面天气图、1°×1°空间分辨率/6 h间隔GFS再分析场,从雷达观测角度揭示由江淮气旋形成过程中不同类型对流天气和MCS形成发展特征,并初步解释对流天气成因。

1 强对流天气特征

分析自动气象站及灾情资料可知,在江淮气旋形成发展阶段,短时强降水(3 h降水量≥50 mm)、对流大风(瞬时极大风速≥17.2 m·s^{-1},需满足雷达组合反射率因子≥40 dBz,以下大风均指对流大风)和冰雹(灾情信息结合雷达资料,组合反射率因子≥60 dBz)天气均有出现(图1a~1c),影响时间近24 h,且各类对流天气的时空分布存在差异。

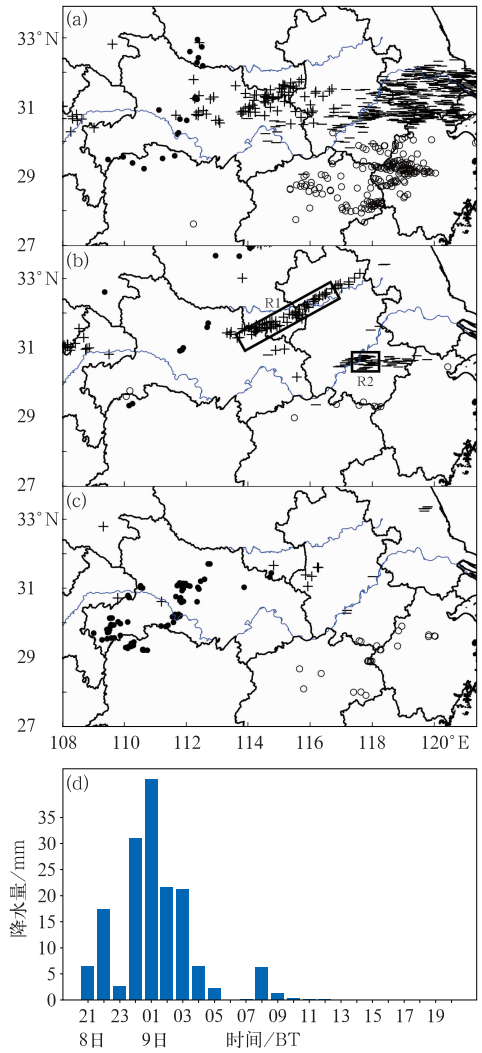


图 1　2019 年 4 月 8 日 20 时至 9 日 20 时逐 6 h(a)大风、(b)短时强降水、(c)冰雹位置分布和(d)河南南部 Q8233 自动气象站 8 日 21 时至 9 日 20 时逐小时降水量演变(图 1a 中“·、+、−、o”分别表示 20—02、02—08、08—14、14—20 时大风位置;图 1b 中时间标记同图 1a,天气类型为短时强降水,矩形框 R1、R2 表示 24 h 降水量≥100 mm 的主要区域;图 1c 中时间标记同图 1a,天气类型为冰雹)

Fig. 1　Spatial distribution of (a) gale, (b) short-time heavy precipitation, (c) hail every six hours from 20:00 BT 8 to 20:00 BT 9 April 2019 and (d) the hourly rainfall evolution diagram of No. Q8233 automatic weather station in southern Henan from 21:00 BT 8 to 20:00 BT 9 April 2019 (“·, +, −, o” in Fig. 1a represent gale location in 20:00−02:00 BT, 02:00−08:00 BT, 08:00−14:00 BT, 14:00−20:00 BT; time markers in Fig. 1b are same as those in Fig. 1a, weather type is short-time severe precipitation, and rectangle represents the region with 24 h precipitation ≥100 mm; time markers in Fig. 1c are same as those in Fig. 1a, severe weather type is hail)

大风主要出现在江淮气旋发展阶段,自西向东影响东长江中下游及江南北部地区,51 个区域自动气象站极大风速超过 25 m·s^{-1},从范围和强度看,此次大风过程符合我国 Derecho 事件(陈晓欣等,2022)的特征。此外,主要大风区与短时强降水区不重叠,表明产生大风与短时强降水的对流系统不同。

两条不同走向的强降水雨带 R1、R2 分别出现在江淮气旋形成及发展阶段,其中 R1 长度明显大于 R2。两条雨带上均出现大暴雨,其中 R1 上局部降水量达 150 mm,小时降水强度达 40 mm·h^{-1},连续 4 个时次的小时降水强度超过 20 mm·h^{-1}(图 1d),这在春季江淮地区并不多见。

此外,零散分布的冰雹主要出现在 8 日夜间鄂西南山区及江汉平原西部地区。

2　中尺度对流系统演变特征

中尺度对流系统是雷暴大风、冰雹、短时强降水天气的直接制造者。根据雷达观测的中尺度对流系统形态演变特征分三个阶段进行分析,其中不同阶段的天气类型有所不同。

2.1　离散线状对流阶段

8 日 20 时至 9 日 00 时,鄂西南至豫南一带有东北—西南走向的离散线状对流发展,主要产生局地冰雹、大风天气。

8 日 20 时,鄂西南山区有局地强风暴发展,向东北方向移动。随鄂西南风暴进入江汉平原,以及鄂东北一带风暴发展,多个零散分布的对流风暴构成一条结构松散的线状对流线(图 2a)向东偏北移动。这种结构的风暴也称为断裂线状 MCS(Gallus et al,2008),一般出现在线状 MCS 初期阶段,其中鄂西南山区局地对流具有强雹暴特征,组合反射率因子达 60 dBz,灾情调查表明该区域出现直径超过 2 cm 的地面降雹且伴有大风。

2.2　人字形对流阶段

9 日 00—08 时,离散线状 MCS 发展为具有冷暖锋结构的人字形对流线,其中暖锋扰动 TL/AS 类 MCS 发展旺盛,因对流线沿自身走向移动的列车效应导致短时强降水发展,后期冷锋扰动 TS 类 MCS 发展并产生大风。

00 时后,离散对流线南段移出鄂西南后,由东北西南走向转为近南北走向,而北段对流线走向维持不变,01 时整个对流线呈人字形(图 2b),且风暴单体通过合并相互连接,结构趋于完整。人字形对流常由气旋扰动产生(易笑园等,2011;梁建宇和孙建华,2012),其中两条对流线 L1、L2 分别对应冷、暖锋式扰动,对流模态特征及天气不同。对流线 L2

北侧为大片层状云降水，南侧有不断有 45～55 dBz 的雷暴新生发展，原地维持近 5 h，因对流线沿自身走向移动而产生明显的列车效应，属 TL/AS 类 MCS 模态，对应短时强降水雨带 R1；而对流线 L1 快速东移逐渐北收，05 时移至鄂东北已发展出弓形回波结构，对流移向几乎垂直于其走向，属 TS 类 MCS 模态(图 2c)，主要产生大风天气。

2.3 S 形涡旋对流阶段

9 日 08—20 时，人字形对流线在江淮地区演变成 S 形涡旋对流线，其中冷锋 TS 类 MCS 发展，东移南压影响长江中下游地区，产生大范围大风、局地短时强降水及冰雹天气，而暖锋 TL/AS 类 MCS 上列车效应不明显，强降水减弱。

与人字形回波结构类似，S 形涡旋对流由对流线 L1、L2 共同构成，然气旋性弯曲结构更明显，且 L1 后部弱回波区(缺口)扩大，整个尺度大于人字形回波(图 2d)。这种 S 形结构对应强度较强的涡旋环流，气旋后部偏北气流的侵入导致出现回波缺口(吴涛等，2017)。

冷锋对流线上不同位置的对流模态不同，导致产生的对流天气不同。其中冷锋中北部对流线 L1 维持 TS 类 MCS 模态，快速东移中导致与 L2 的连接断开，在长江中下游地区产生大范围的偏西大风(图 2e)。而这一阶段前期，L1 后部的对流线呈近东西走向(图 2d)，表现出 TL/AS 类 MCS 模态特征，对应短时强降水雨带 R2，后期加快南压，转换为东北—西南走向的 TS 类 MCS(图 2f)，产生大风和

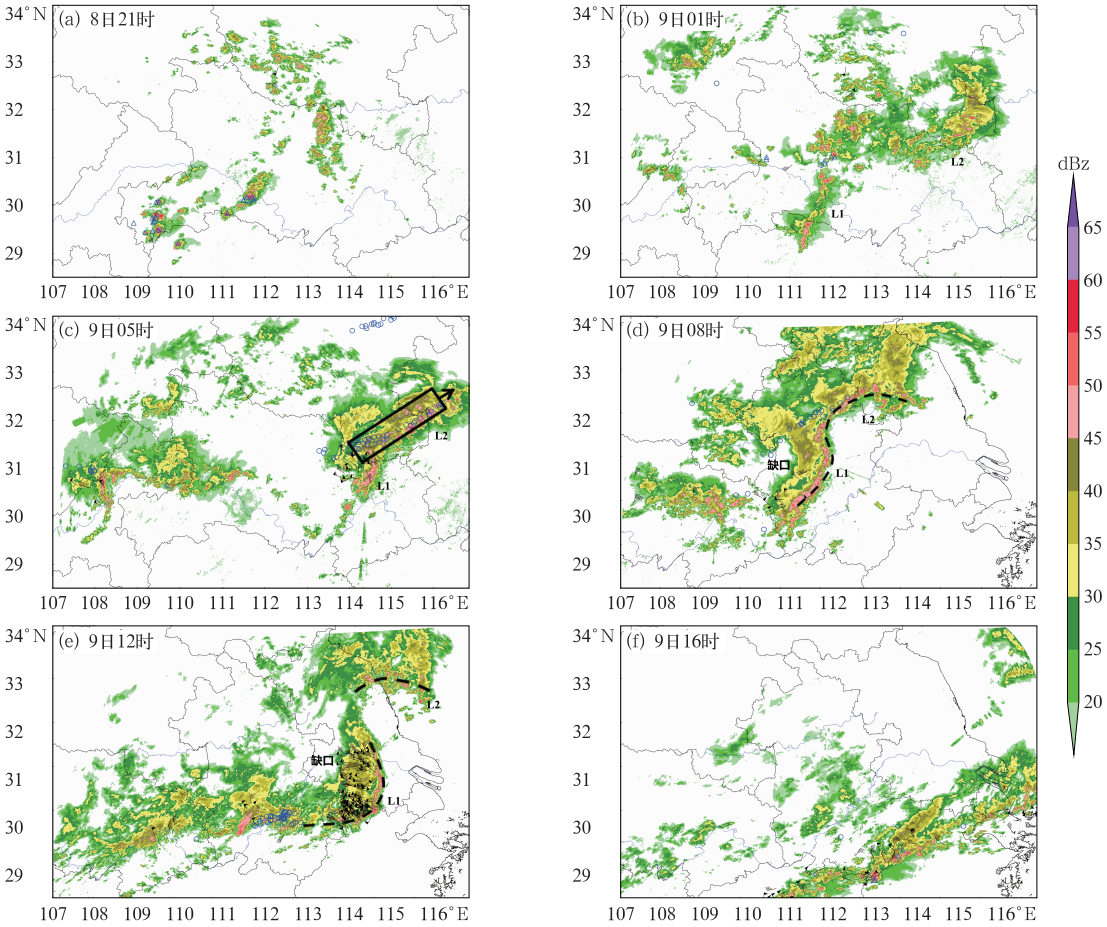


图 2 2019 年 4 月 8 日 21 时至 9 日 16 时雷达组合反射率因子演变
(三角形表示冰雹，圆圈表示短时强降水，风杆表示大风；图 2d，2e 中虚线表示对流线形状；图 2c 中方框表示列车效应区域，箭头表示对流线移动方向)

Fig. 2 Evolution of radar composite reflectivity factor from 21:00 BT 8 to 16:00 BT 9 April 2019
(Triangles represent hail, circles represent short-time severe precipitation, barbs represent strong wind; dashed lines in Figs. 2d, 2e represent convective line pattern; in Fig. 2c box represents the area with the train effect, arrow presents the moving direction of convective line)

局地冰雹。

此外,随向北的气旋性运动加强,暖锋对流线 L2 由直线型转为向北凸起的弧状。由于风暴单体移向不再平行于对流线,列车效应消失,短时强降水逐渐减弱。

2.4　不同类型天气风暴的垂直结构

分析反射率因子垂直剖面可知,产生不同类型天气(冰雹、短时强降水、大风)风暴的强度和结构有明显区别。

从对流发展强度看,离散线状阶段雹暴的强度最强,55 dBz 反射率因子的顶部超过−20℃高度(8 日 20 时宜昌探空显示,−20℃高度约为 7.5 km)(图 3a),风暴体显著倾斜,表明雹暴内部上升运动剧烈,属超级单体强雹暴(恩施雷达径向速度图中有中气旋特征,图略)。人字形阶段,对流线 L2 上短时强降水风暴的强度明显弱于雹暴,呈直立结构,多个风暴单体沿西南—东北方向排列且高度升高(图 3b)。而对流线 L1 产生大风的弓形回波后部有大片层状云降水回波(图 3c),是 TS 类 MCS 的典型结构特征。值得注意的是,与冰雹、短时强降水相比,沿弓形回波顶点方向的对流发展强度最弱,强回波高度未超过 6 km(图 3c),这不同于强烈发展并产生大风的脉冲风暴(俞小鼎等,2006)。

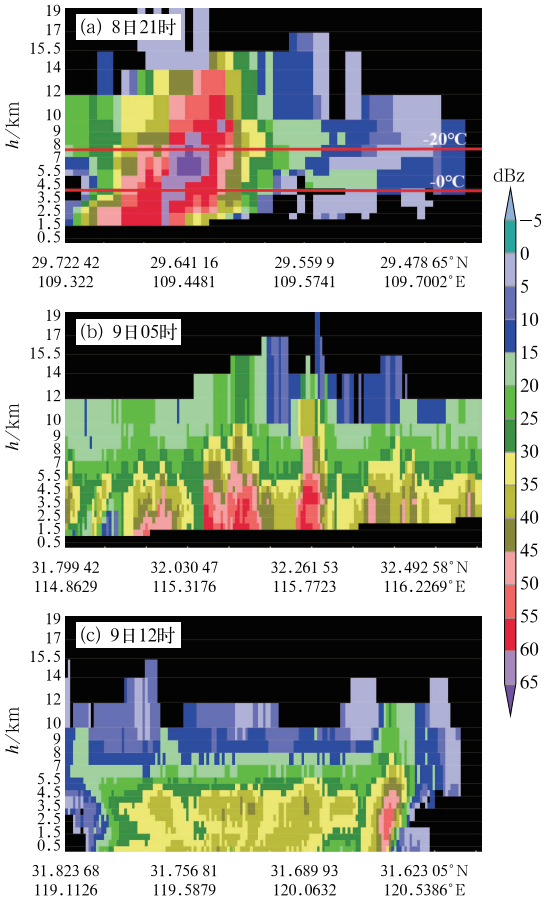


图 3　2019 年 4 月(a)8 日 21 时沿(29.722°N、109.322°E)和(29.440°N、109.761°E)雹暴雷达反射率因子剖面(两条红线分别表示 0℃、−20℃层高度),(b)9 日 05 时沿(31.799°N、114.863°E)和(32.580°N、116.398°E)短时强降水风暴雷达反射率因子剖面,(c)9 日 12 时沿(31.824°N、119.113°E)和(31.597°N、120.722°E)弓形回波风暴雷达反射率因子剖面

Fig. 3　Vertical profile of radar reflectivity factor of (a) hail storm along (29.722°N, 109.322°E) to (29.440°N, 109.761°E) at 21:00 BT 8 April (The two red lines respectively represent the height of 0℃, −20℃ level); (b) short-term severe precipitation along (31.799°N, 114.863°E) to (32.580°N, 116.398°E) at 05:00 BT 9 April; (c) bow-echo storm along (31.824°N, 119.113°E) to (31.597°N, 120.722°E) at 12:00 BT 9 April 2019

3　江淮气旋形成发展成因

3.1　大尺度天气系统作用

由大尺度天气形势分析可知,江淮气旋形成发展是大气斜压发展的结果,与高空槽、西南涡暖倒槽及北方高压有密切关系。在高空槽东移形势下,西南涡前侧低层暖倒槽切变线发展,与北方高压结合部有明显锋区形成,且高压底部小股冷空气侵入暖倒槽,随高空槽东移,强斜压性气旋在倒槽切变线中形成发展。

8 日 20 时,有利于江淮气旋形成的大尺度形势场已建立。高空图上(图 4a,4b),500 hPa 南支槽与北支槽接近于同位相叠加,冷平流有利于低槽加深,我国中东部地区受深厚高压脊控制,脊后西南急流深厚且低层暖平流明显。925～850 hPa,西南低涡前侧暖式切变线控制江淮地区(图 4c),与北方高压之间的温度等值线密集,高压底部小股东北冷空气侵入暖式切变线西段(图4d)。地面图上(图5a)华北小股冷空气沿太行山东侧侵入暖倒槽。8 日夜间,随南支槽缓慢东移,西南涡暖倒槽切变线发展,同时冷空气进一步侵入暖倒槽产生气旋性扰动。

9 日 08 时,南支槽仍位于四川盆地,而北支槽东移至江淮地区,强斜压性江淮气旋形成,海平面气压场上有 1002 hPa 的闭合等值线区域形成(图 5b)。

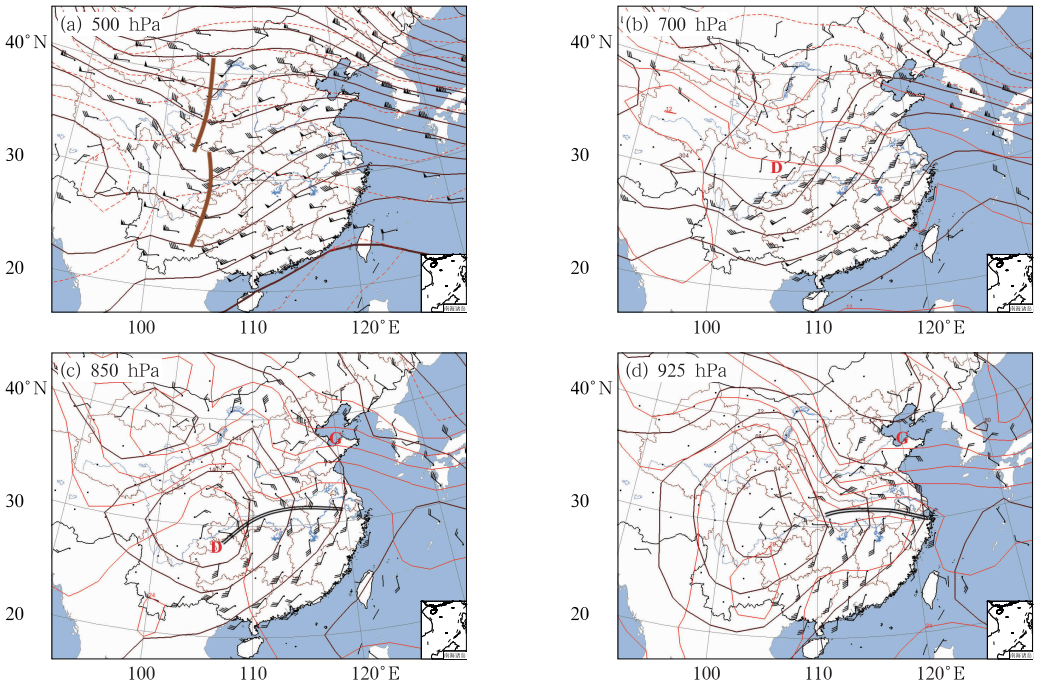


图 4 2019 年 4 月 8 日 20 时(a)500 hPa,(b)700 hPa,(c)850 hPa,(d)925 hPa 高空天气图
(棕色等值线表示位势高度,间距 4 dagpm;红色等值线表示温度,间距 4 ℃;
棕色粗实线表示槽线;双细线表示切变线;D 表示西南涡,G 表示北方高压)

Fig. 4 (a) 500 hPa,(b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) 925 hPa synoptic chart at 20:00 BT 8 April 2019
(Brown isolines represent geopotential height with 4 dagpm interval, red isolines represent temperature with 4 ℃ interval, thick solid brown lines represent high trough, double thin lines represent shear line, D represents southwest vortex and G represents high pressure in North China)

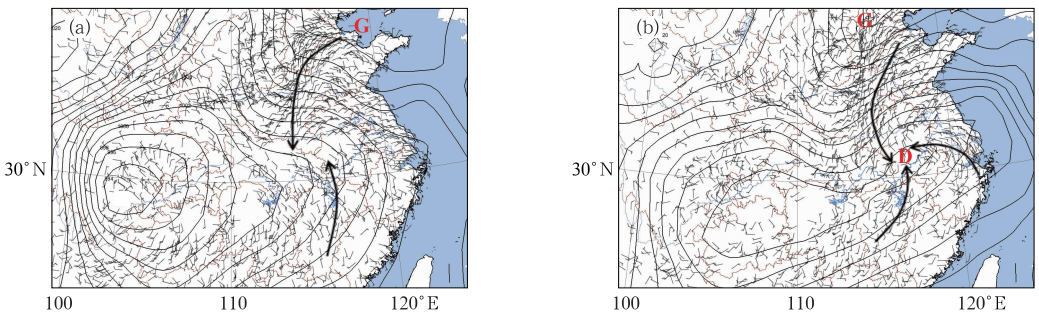


图 5 2019 年 4 月(a)8 日 20 时和(b)9 日 08 时地面图
(等值线表示海平面气压,间隔 2 hPa;D 表示江淮气旋,G 表示北方高压;带箭头线条表示地面气流)

Fig. 5 Surface map (a) at 20:00 BT 8 and (b) 08:00 BT 9 April 2019
(Isolines represent sea level pressure with 2 hPa interval, D represents the Jianghuai cyclone, G represents high pressure in North China, and line with arrows represent the surface airflow)

从气旋动力和热力垂直结构看(图 6),与气旋相关的涡度大值区主要位于 600 hPa 以下,且涡度中心和锋区均向北明显倾斜,具有典型温带气旋的强斜压性特征,预示气旋将发展(熊秋芬等,2016)。在高空槽引导下江淮气旋发展并向东北移动,14 时位于沿海,而西南涡被气旋后部的冷空气填充(图略)。

3.2 中尺度对流系统作用

以上分析表明大尺度天气形势对江淮气旋形成发展的根本作用,实际上江淮气旋是在中尺度对流活动中形成发展的,中尺度对流系统由 β 中尺度发展至 α 中尺度,在空间尺度上已具备影响江淮气旋

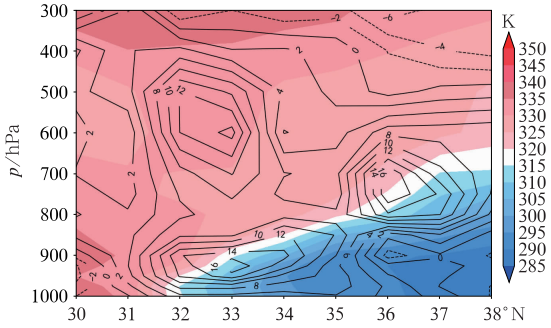


图 6　2019 年 4 月 9 日 08 时沿 117°E 方向的江淮气旋涡度(等值线,单位:10^{-5} s^{-1})和假相当位温(填色)垂直剖面

Fig. 6　Vertical profile of vorticity (isoline, unit: 10^{-5} s^{-1}) and pseudo-equivalent potential temperature (colored) in Jianghuai cyclone along 117°E at 08:00 BT 9 April 2019

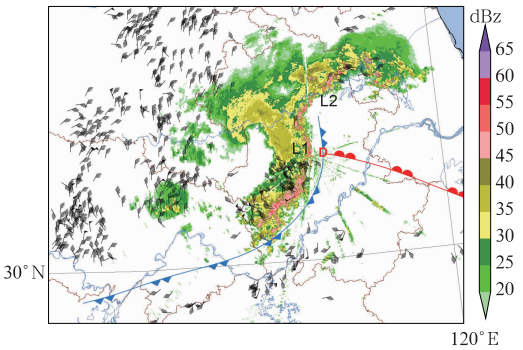


图 7　2019 年 4 月 9 日 08 时合肥雷达 0.5°仰角基本反射率因子(填色)叠加地面 7 级以上大风(瞬时极大风≥13.9 m·s^{-1})

(D 表示地面气旋位置,L1、L2 分别表示冷锋、暖锋对流线)

Fig. 7　Superposition diagram of the base reflectivity factor (colored) of Hefei Radar at 0.5° elevation and the max wind speed above 13.9 m·s^{-1} on the ground at 08:00 BT 9 April 2019

(D represents the position of the ground cyclone, L1 and L2 represent the convective lines on the cold front and the warm front, respectively)

的能力。以下分析可知,对流活动使锋面低层辐合增强,对气旋形成发展有加强作用。

由 9 日 08 时合肥雷达组合反射率和 8 级以上极大风站点分布图(图 7)可知,S 形涡旋对流线 L1 位于冷锋后侧,具有明显弓形结构,所产生的大风远离气旋后部的冷空气大风区,可见对流大风产生的阵风锋与气旋冷锋叠加,明显增强了低层辐合。在图 12 雷达径向速度图上,对流区域的水平辐合区从近地层伸展至 3 km 高度,伴有后部入流急流,低层辐合强度可能大于大尺度天气系统产生的辐合。从 9 日 05、08、12 时雷达图看(图 2),对流线 L1 上地面大风的范围随弓形回波尺度增大而不断扩大,表明阵风锋不断发展,对应这期间江淮气旋形成发展。由于辐合使气旋性涡度加强(朱乾根等,2007),因此阵风锋的辐合有利于江淮气旋形成发展。

4　强对流天气成因

对比中尺度对流系统与江淮气旋形成发展过程可知,离散线状、人字形对流出现在江淮气旋形成阶段(8 日 20 时至 9 日 08 时),而 S 形涡旋对流出现在江淮气旋发展阶段(9 日 08 时之后),两个阶段对流产生的主要天气类型有明显区别。以下分析可知,这种区别与江淮气旋的动力热力特征以及地形有密切关系。

4.1　西南涡结合山区地形提供有利于鄂西南强冰雹形成的环境场

江淮气旋形成阶段初期,西南涡暖倒槽切变线发展,涡前有大范围偏南急流(图 8),850 hPa 暖脊(图 9)且 700 hPa 暖平流明显(图略),有利于在鄂西南地区建立不稳定层结和强垂直风切变。实况探空分析表明,该地区环境场具有一定到中等强度的不稳定能量和强垂直风切变,有利于强风暴形成。由于 8 日 20 时恩施附近雷暴发展,相邻的宜昌实况探空图(图 8)上,地面温度 26℃,高于当月的日最高气温气候平均值(22℃),850 hPa 与 500 hPa 温差为 26℃,对流有效位能为 1387.6 J·kg^{-1},K 指数为 36℃,具有中等强度的不稳定能量。虽然夜间地面温度降低使对流有效位能下降,但低层暖平流仍可维持层结不稳定。并且 500 hPa、700 hPa 风速分别

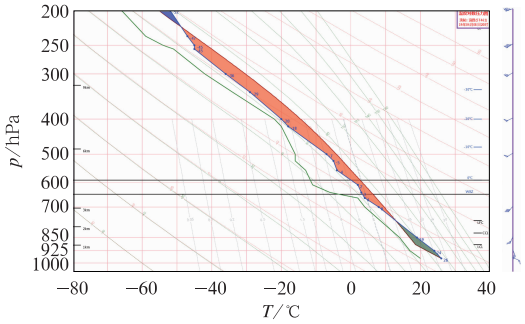


图 8　2019 年 4 月 8 日 20 时宜昌探空图

Fig. 8　Sounding chart of Yichang at 20:00 BT 8 April 2019

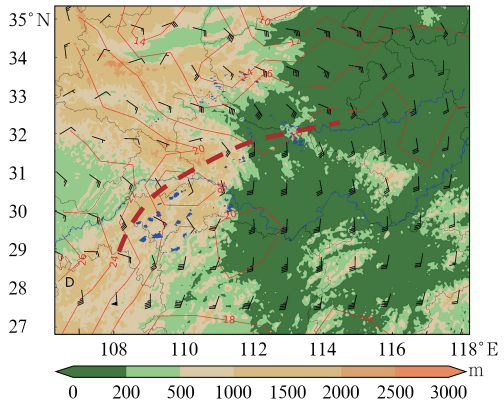


图 9 2019 年 4 月 8 日 20 时雷达组合反射率因子叠加 850 hPa GFS 再分析场
(等值线表示温度,间隔 2℃,粗虚线表示切变线,蓝色填色区表示组合反射率因子超过 30 dBz 的区域,填色表示地形高度,D 表示西南涡)

Fig. 9 Superposition diagram of radar composite reflectivity factor and 850 hPa GFS reanalysis field at 20:00 BT 8 April 2019
(Isolines represent temperature with interval 2℃, thick dashed lines represent shear line, blue colored represents area with composite reflectivity factor exceeding 30 dBz, colored area represents terrain height, and D represents southwest vortex)

达 20 m·s^{-1}、16 m·s^{-1},具有强的深层(0～6 km 高度)和低层(0～3 km 高度)垂直风切变,考虑到鄂西南位于多山地区,实际的垂直风切变应更强。

从风暴触发条件看,发展西南涡前侧受地形影响的辐合有利于强风暴触发。20 时 850 hPa GFS 再分析场上(图 9),西南涡前偏南急流出口位于鄂西南山区,风速辐合明显。显然,辐合与地形阻挡有密切关系,并且辐合随西南涡发展而增强,为风暴提供了抬升触发条件,导致 20 时后分散风暴在该区域初生发展。

从强冰雹形成环境条件看,鄂西南温度层结及山区地形有利于强冰雹形成。8 日 20 时宜昌实况探空图(图 8)中,0℃度层高度约为 4.4 km,湿球 0℃层高度约为 3.6 km,考虑到鄂西南东部山地海拔高度超过 1.0 km,实际湿球 0℃层距地面高度小于 3 km。合适的 0℃度和湿球 0℃层高度,不仅有利于冰雹粒子在高空增长,并且由于下落融化时间较短,更容易在地面形成强冰雹(俞小鼎等,2006)。从气候特征看,湖北冰雹主要出现在西部山区,可能与山区湿球 0℃层高度低于平原地区有关。

4.2 气旋形成阶段暖式切变线以及发展阶段受南支槽影响的冷式切变线提供有利于风暴列车效应形成的环境场而产生短时强降水

从降水环境场条件看,江淮气旋形成发展阶段,暖区低层水汽和层结不稳定有利于产生较高降水强度。夜间暖锋强降水对流线 L2 主要位于河南南部,上游地区的武汉探空图(图略)中,850 hPa 比湿为 11 g·kg^{-1},略低于江淮地区短时强降水(小时降水强度≥30 mm·h^{-1})的气候阈值 13 g·kg^{-1}(郝莹等,2012),K 指数为 34℃表明大气层结不稳定,可通过浮力上升运动向风暴供应水汽从而提高降水强度(孙继松,2017)。9 日白天冷锋对流线 L1 东移至长江下游,08 时安庆探空图(图略)中 850 hPa 比湿为 13 g·kg^{-1},K 指数为 39℃,水汽和不稳定均有利于短时强降水生成。

江淮气旋形成阶段,925 hPa 暖式切变线发展,冷暖空气交汇有利于对流线 L2 发展,其中暖式切变线中西段的中低层风场配置有利于对流线 L2 出现列车效应,是雨带 R1 上大暴雨主要成因之一。分析 9 日 02 时 GFS 再分析场和雷达图(图 10a,10b)可知,发展的 925 hPa 暖式切变线附近等温线密集,两侧均有急流配合,且大尺度分析表明地面冷空气侵入暖倒槽,斜压发展有利于对流线 L2 上加强。受冷高压底部东北气流阻挡影响,切变线中西段呈西南—东北走向,且该区域上空一致的 700 hPa 西南急流平行于切变线走向。由于对流线 L2 沿切变线组织发展,在强西南引导气流下风暴单体沿对流线移动、整个对流线沿自身走向移动而产生列车效应,这种列车效应在极端降水个例中较多见(苟阿宁等,2019)。而在气旋发展阶段,强烈涡旋运动使 925 hPa 暖式切变线大部转为近东西走向,因 700 hPa 西南引导气流不再平行于对流线导致列车效应不明显,且北抬过程中层结不稳定条件变差,短时强降水减弱消失。

江淮气旋发展阶段前期,受南支槽缓慢东移影响,冷式切变线底部的中低层风场配置也有利于冷锋对流线 L1 底部出现列车效应,是雨带 R2 上大暴雨主要成因之一。分析 08—14 时 925 hPa、700 hPa 风场和雷达图(图 10c,10d)可知,对流线 L1 底部位于 925 hPa 冷式切变线后部,呈近东西走向且南压不明显,这可能与南支槽缓慢东移有关。由于南支槽位于气旋后部,槽前西南急流阻挡气旋后部西北

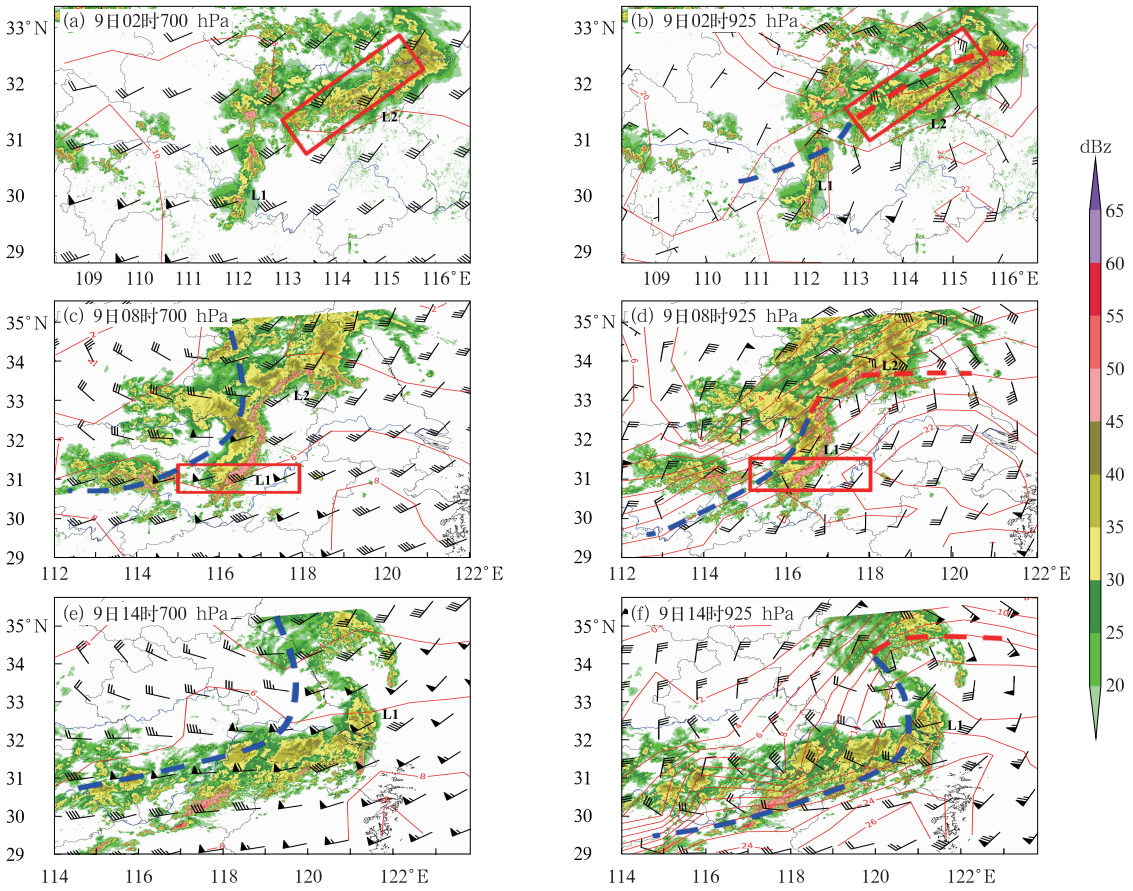


图 10　2019 年 4 月 9 日(a,b)02 时、(c,d)08 时、(e,f)14 时雷达组合反射率因子(填色)叠加 GFS 再分析场(a,c,e)700 hPa,(b,d,f)925 hPa 风场(风羽)和温度场(等值线,间距 2℃)
(蓝色/红色粗虚线表示冷锋/暖锋切变线,方框表示列车效应出现区域,L1、L2 表示对流线)

Fig. 10　Superposition diagram of radar composite reflectivity factor and GFS reanalysis field of wind (barb) and temperature field lisoline with the 2℃ interval at (a, c, e) 700 hPa, (b, d, f) 925 hPa at (a, b) 02:00 BT, (c, d) 08:00 BT and (e, f) 14:00 BT 9 April 2019
(The blue/red thick dotted lines represent the cold front/warm front shear line, and the boxs show the area with the train effect, L1 and L2 represent convective lines)

气流南下,从而使对流线底部不呈近南北走向,并且因 700 hPa 高空风平行于对流线,造成对流向偏东移动的列车效应。后期随冷空气加强南下,对流线 L1 底部转为东北—西南走向,列车效应消失。

4.3　气旋发展阶段冷式切变线提供有利于后部入流急流形成的环境场而产生大范围对流大风

江淮气旋发展阶段,环境场具有一定到中等强度的不稳定能量和强垂直风切变,且中层偏西风急流与对流线的配置有利于后部入流急流(rear inflow jet,RIJ)形成,从而有利于 TS 类 MCS 在长江中下游产生大范围对流大风。

江淮气旋随北支槽东移而发展,主要表现为涡旋环流、冷锋斜压性加强以及地面降压,有利于对流线 L1 组织发展。从 9 日 08—14 时低层风场和温度场变化(图 10f)看,925～700 hPa 西南急流加强北抬,而 925 hPa 气旋后部偏北气流转为西北气流,气旋性环流更加闭合,温度等值线更密集,冷空气进一步侵入使得冷锋锋区向前凸起,表明大气斜压性增强。地面图上,08—14 时气旋中心海平面气压下降(图略)也表明气旋发展。发展斜压气旋的冷锋有利于大范围雷暴形成并组织成线状外形。

从环境场条件看,冷式切变线前侧具有一定到中等强度的不稳定能量和强的垂直风切变,有利于风暴发展。9 日 08—14 时 NCEP 再分析场对流有效位能 CAPE 图上(图 11),冷式切变线前侧的 CAPE 呈北低南高分布,大值区主要位于江南地区,且随午后地面升温 CAPE 最大达 1650 J·kg^{-1}。需要指出的是,GFS 再分析场低估了长江沿线及北岸地区时段(08—14 时)的不稳定状态,将 08 时南京探空图中地面温度订正为 25℃后,CAPE 为 145 J·kg^{-1}(图略)。从垂直风切变看,受冷式切变线前

侧深厚西南急流影响，0～3 km 和 0～6 km 高度垂直风切变达到中等强度以上，有利于强风暴发展。

从中低层风场配置及对流动力结构看，中层风向垂直于对流线有利于 RIJ 形成，而 RIJ 下降对地面大风及线状对流维持有重要作用。以上风暴演变分析可知长江沿线一带的大范围大风由较弱风暴产生，由此提出大风成因问题。从对流大风形成机制看，除下击暴流外，动量下传也是地面大风形成的主要原因之一（王秀明等，2012），Fujita（1978）指出 RIJ 下降到地面导致了大风。分析对流线 L1 上弓形回波垂直结构（图 12）可知，RIJ 在接近风暴过程中高度呈下降趋势。结合 1.5°、0.5°仰角基本径向速度图（图略）可知，从 B 点到 A 点，20 m·s^{-1}大值区高度由 1.6 km 下降至 0.5 km，A 点径向速度基本代表了近地层水平风分量。由于风暴发展不高，对流下沉气流在 A 点产生的水平辐散风可能不强，因此 A 点大风可能主要由 RIJ 通过对流下沉运动下传至近地层所造成的，这种高水平动量下降至近地面的现象也出现在 2009 年 6 月 3 日河南飑线过程中（王秀明等，2012）。数值模拟和观测表明后部入流与中尺度过程密切相关（Weisman，1992；Gallus and Johnson，1995；康红等，2016），然而其强弱与环境场关系密切。从环境风场（图 10c，10e）来看，对流线上方 700 hPa 为偏西风急流，风向与对流线的夹角较大，尤其在弓形回波区域，风向几乎垂直于回波线走向，即与 RIJ 风向接近一致，风向与对流线的这种配置有利于高动量的环境风卷入风暴内部，从而有利于 RIJ 形成。

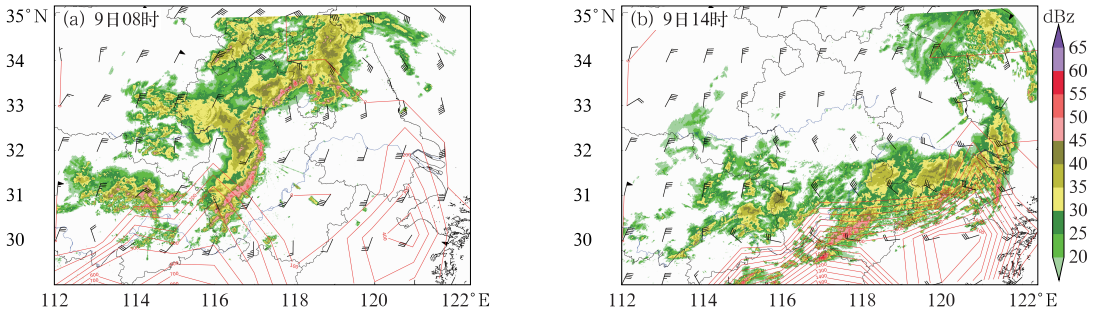


图 11 2019 年 4 月 9 日(a)08 时和(b)14 时雷达组合反射率因子(填色)叠加 GFS 再分析场
(风杆表示 925 hPa 风；等值线表示对流有效位能，间距为 100 J·kg^{-1})

Fig. 11 Superposition diagram of radar composite reflectivity factor (colored) and GFS reanalysis field at (a) 08:00 BT and (b) 14:00 BT 9 April 2019
(Wind barbs represent 925 hPa wind, isolines represent CAPE with the 100 J·kg^{-1} interval)

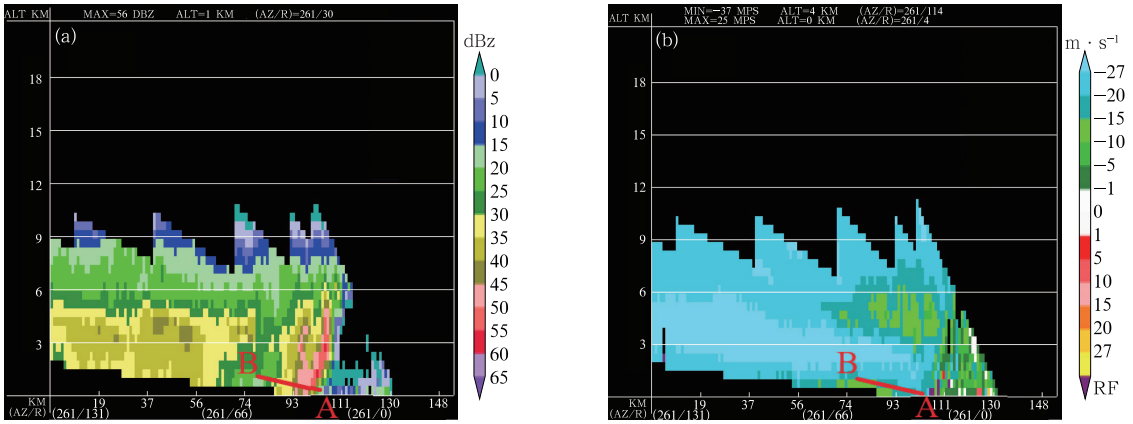


图 12 2019 年 4 月 9 日 10:55 以常州雷达为中心(261°，131.5 km)至(0°，0 km)连线上的风暴垂直剖面
(a)雷达反射率因子，(b)雷达径向速度
(图中 A 位置为相对雷达：261°，27.9 km，海拔高度：0.5 km；B 位置为相对雷达：261°，94 km，海拔高度：1.6 km)

Fig. 12 Vertical profile of windstorm on the line from (261°, 131.5 km) to (0°, 0 km) to Changzhou Radar at 10:55 BT 9 April 2019
(a) reflectivity factor, (b) radial velocity
(A: location 261°, 27.9 km to radar; sea level height: 0.5 km; B: location 261°, 94 km to radar; sea level height: 1.6 km)

5　结　论

使用天气雷达、常规高空地面观测、地面加密观测、1°×1° NCEP 再分析场资料,分析一次春季江淮气旋形成发展过程中混合型(冰雹、大风、短时强降水)强对流天气特征,初步解释了不同类型对流天气形成发展的可能原因,结论如下:

江淮气旋引发的大风、短时强降水、冰雹天气在时空分布和对流特征上存在差异。局地冰雹主要由气旋形成阶段离散对流线产生,带状短时强降水由气旋形成阶段人字形对流线及发展阶段 S 形对流线后部的列车线/邻接层状云类 MCS 产生,大范围大风主要由江淮气旋发展阶段 S 形对流线上尾随层状云降水类 MCS 产生。三种天气类型的风暴中,雹暴强度最强,短时强降水风暴强度次之,弓形回波强度最弱。

江淮气旋是大尺度天气系统斜压发展的结果,中尺度对流活动对气旋形成发展有加强作用。大尺度天气系统与高空槽、西南涡暖倒槽及北方高压有密切关系,在高空槽东移形势下,西南涡前侧低层暖倒槽切变线发展,与北方高压结合部有明显锋区形成,且高压底部小股冷空气侵入暖倒槽,随高空槽东移,强斜压性气旋在倒槽切变线中形成发展。大尺度天气系统演变过程伴有中尺度对流系统活动,对流使冷锋低层辐合增强,对气旋形成发展有加强作用。

强对流天气与江淮气旋动力热力场有密切关系。离散线状、人字形对流线主要位于江淮气旋形成阶段,随江淮气旋发展演变成 S 形涡旋对流线。气旋形成阶段,西南涡结合山区地形提供有利于鄂西南强冰雹形成的环境场,暖式切变线以及发展阶段受南支槽影响的冷式切变线,提供有利于风暴列车效应形成的环境场从而产生短时强降水;气旋发展阶段冷式切变线,提供有利于后部入流急流形成的环境场而产生大范围大风。

致谢:感谢武汉中心气象台张家国首席预报员对本文分析提出的指导意见,浙江舟山气象局赵海林提供的部分雷达资料。

参考文献

陈晓欣,俞小鼎,王秀明,2022. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究:时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. 气象学报,80(1):67-81. Chen X X,Yu X D,Wang X M,2022. Investigation of derechos in China:spatiotemporal distribution,environmental characteristics,and morphology of Derechos producing convective systems[J]. Acta Meteor Sin,80(1):67-81(in Chinese).

陈永林,曹晓岗,刘敏,等,2013. 一次源于高原东侧低涡的江淮气旋形成及结构分析[J]. 热带气象学报,29(5):793-802. Chen Y L,Cao X G,Liu M,et al,2013. An analysis on the generation and structure of a cyclone over Yangtze-Huaihe River Valleys associated with the vortex on the east side of Tibetan Plateau[J]. J Trop Meteor,29(5):793-802(in Chinese).

丁治英,刘瑾,赵向军,等,2019. 江淮气旋暖锋上多条对流带的组织结构及成因分析[J]. 大气科学学报,42(5):778-789. Ding Z Y,Liu J,Zhao X J,et al,2019. Analysis of the cause and structure of multiple convective zones of a Jiang-Huai cyclone's warm front[J]. Trans Atmos Sci,42(5):778-789(in Chinese).

苟阿宁,王玉娟,张家国,等,2019. 一次梅雨锋附近"列车效应"致灾大暴雨过程观测分析[J]. 气象,45(8):1052-1064. Gou A N,Wang Y J,Zhang J G,et al,2019. Analysis on heavy rainfall event caused by "train effect" in a Meiyu front of Hubei Province[J]. Meteor Mon,45(8):1052-1064(in Chinese).

郝莹,姚叶青,郑媛媛,等,2012. 短时强降水的多尺度分析及临近预警[J]. 气象,38(8):903-912. Hao Y,Yao Y Q,Zheng Y Y,et al,2012. Multi-scale analysis and nowcasting of short-time heavy rainfall[J]. Meteor Mon,38(8):903-912(in Chinese).

黄美金,俞小鼎,林文,等,2022. 福建沿海冷锋前暖区和季风槽大暴雨环境背景与对流系统特征[J]. 气象,48(5):605-617. Huang M J,Yu X D,Lin W,et al,2022. Environmental background and convective system characteristics of the prefrontal and the monsoon trough torrential rains in Fujian coastal area[J]. Meteor Mon,48(5):605-617(in Chinese).

黄士松,林元弼,韦统健,等,1976. 江淮气旋发生发展和暴雨过程及有关预报问题的研究[J]. 大气科学,(1):27-41. Huang S S,Lin Y B,Wei T J,et al,1976. Studies of the Changjiang-Huaihe cyclogenesis and its development and the rainstorm process and the related forecast questions[J]. Sci Atmos Sin,(1):27-41(in Chinese).

康红,费建芳,黄小刚,等,2016. 一次弱弓形飑线后方入流特征的观测分析[J]. 气象学报,74(2):176-188. Kang H,Fei J F,Huang X G,et al,2016. The observational analysis of the characteristics of rear inflow in a weak-bow squall line[J]. Acta Meteor Sin,74(2):176-188(in Chinese).

雷蕾,邢楠,周璇,等,2020. 2018 年北京"7.16"暖区特大暴雨特征及形成机制研究[J]. 气象学报,78(1):1-17. Lei L,Xing N,Zhou X,et al,2020. A study on the warm-sector torrential rainfall during 15－16 July 2018 in Beijing area[J]. Acta Meteor Sin,78(1):1-17(in Chinese).

梁建宇,孙建华,2012. 2009 年 6 月一次飑线过程灾害性大风的形成机制[J]. 大气科学,36(2):316-336. Liang J Y,Sun J H,2012. The formation mechanism of damaging surface wind during the squall line in June 2009[J]. Chin J Atmos Sci,36(2):316-336(in Chinese).

沈阳,孙燕,蔡凝昊,等,2019. 一次引发极端降水事件的江淮气旋发生发展分析[J]. 气象,45(2):166-179. Shen Y,Sun Y,Cai N H,et al,2019. Analysis on the generation and evolution of a Jianghuai cyclone responsible for extreme precipitation event[J].

Meteor Mon,45(2):166-179(in Chinese).

斯公望,1980.温带气旋降水的中尺度组织和结构[J].气象,6(2):17-18. Si G W,1980. Mesoscale organization and structure in extratropical cyclone rainfall[J]. Meteor Mon,6(2):17-18(in Chinese).

孙继松,2017.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,36(6):498-506. Sun J S,2017. Differences and relationship between flash heavy rain and heavy rainfall[J]. Torr Rain Dis,36(6):498-506(in Chinese).

孙继松,戴建华,何立富,等,2014.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社:86-89. Sun J S,Dai J H,He L F,et al,2014. Basic Principles and Technical Methods of Severe Convective Weather Forecast[M]. Beijing:China Meteorological Press:86-89(in Chinese).

王珏,张家国,吴涛,等,2019.湖北省极端短时强降水MCS类型及特征分析[J].气象,45(7):931-944. Wang J,Zhang J G,Wu T,et al,2019. MCS classification and characteristic analyses of extreme short-time severe rainfall in Hubei Province[J]. Meteor Mon,45(7):931-944(in Chinese).

王晓芳,崔春光,2012.长江中下游地区梅雨期线状中尺度对流系统分析Ⅰ:组织类型特征[J].气象学报,70(5):909-923. Wang X F,Cui C G,2012. Analysis of the linear mesoscale convective systems during the Meiyu period in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Part Ⅰ:organization mode features[J]. Acta Meteor Sin,70(5):909-923(in Chinese).

王秀明,俞小鼎,周小刚,等,2012."6.3"区域致灾雷暴大风形成及维持原因分析[J].高原气象,31(2):504-514. Wang X M,Yu X D,Zhou X G,et al,2012. Study on the formation and evolution of "6.3" damage wind[J]. Plateau Meteor,31(2):504-514(in Chinese).

吴涛,张家国,牛奔,2017.一次强降水过程涡旋状MCS结构特征及成因初步分析[J].气象,43(5):540-551. Wu T,Zhang J G,Niu B,2017. Preliminary analysis of structure characteristics and causes for heavy-rain-producing vortex-shaped MCS[J]. Meteor Mon,43(5):540-551(in Chinese).

熊秋芬,张昕,陶祖钰,2016.一次温带气旋涡度场演变特征及气旋发生发展机制分析[J].气象,42(3):294-304. Xiong Q F,Zhang X,Tao Z Y,2016. An analysis of vorticity evolution and physics mechanism on an extratropical cyclone[J]. Meteor Mon,42(3):294-304(in Chinese).

易笑园,李泽椿,姚学祥,等,2011.一个锢囚状中尺度对流系统的多尺度结构分析[J].气象学报,69(2):249-262. Yi X Y,Li Z C,Yao X X,et al,2011. An analysis of the multi-scale structure and evolution of a meso-scale occluding convective system[J]. Acta Meteor Sin,69(2):249-262(in Chinese).

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:102-150. Yu X D,Yao X P,Xiong T N,et al,2006. Principle and Business Application of Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press: 102-150 (in Chinese).

张家国,王珏,吴涛,等,2018.长江中游地区极端降水主要天气系统类型分析[J].暴雨灾害,37(1):14-23. Zhang J G,Wang J,Wu T,et al,2018. Weather system types of extreme precipitation in the middle reaches of the Yangtze River[J]. Torr Rain Dis,37(1):14-23(in Chinese).

张晓红,罗静,陈兴,等,2016.一次春季江淮气旋形成发展特征及暴雨诊断分析[J].气象,42(6):716-723. Zhang X H,Luo J,Chen X,et al,2016. Formation and development mechanism of one cyclone over Changjiang-Huaihe River Basin and diagnostic analysis of rainstorm[J]. Meteor Mon,42(6):716-723(in Chinese).

张小玲,余蓉,杜牧云,2014.梅雨锋上短时强降水系统的发展模态[J].大气科学,38(4):770-781. Zhang X L,Yu R,Du M Y,2014. Evolution pattern of short-time intense precipitation-producing systems associated with Meiyu front[J]. Chin J Atmos Sci,38(4):770-781(in Chinese).

赵宇,蓝欣,杨成芳,2018.一次冬季江淮气旋逗点云区的雷达回波和气流结构分析[J].气象学报,76(5):726-741. Zhao Y,Lan X,Yang C F,2018. Radar echo and airmass structure of the comma head within a Jiang-Huai cyclone in winter[J]. Acta Meteor Sin,76(5):726-741(in Chinese).

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2007.天气学原理和方法:第4版[M].气象出版社:113-142. Zhu Q G,Lin J R,Shou S W,et al,2007. Synoptic Meteorology Principles and Methods[M]. 4th ed. Beijing:China Meteorological Press:113-142(in Chinese).

Bluestein H B,Jain M H,1985. Formation of mesoscale lines of precipitation:severe squall lines in Oklahoma during the spring[J]. J Atmos Sci,42(16):1711-1732.

Fujita T T,1978. Manual of downburst identification for project NIMROD[R]. Chicago:University of Chicago:104.

Gallus W A Jr,Johnson R H,1995. The dynamics of circulations within the trailing stratiform regions of squall lines. Part Ⅰ:the 10－11 June PRE-STORM system[J]. J Atmos Sci,52(12):2161-2187.

Gallus W A Jr,Snook N A,Johnson E V,2008. Spring and summer severe weather reports over the Midwest as a function of convective mode:a preliminary study[J]. Wea Forecasting,23(1):101-113.

Houze R A Jr,1997. Structure and dynamics of a tropical squall-line system[J]. Mon Wea Rev,105(12):1540-1567.

Parker M D,Johnson R H,2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev,128(10):3413-3436.

Schumacher R S,Johnson R H,2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev,133(4):961-976.

Weisman M L,1992. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems[J]. J Atmos Sci,49(19):1826-1847.

(本文责编:俞卫平)