

高拴柱, 2020. 2018 年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析[J]. 气象, 46(6): 792-800. Gao S Z, 2020. Characteristics analysis on the severe convective spiral rainband of Typhoon Rumbia (2018)[J]. Meteor Mon, 46(6): 792-800 (in Chinese).

2018 年台风温比亚的强对流螺旋雨带观测特征分析*

高拴柱

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 利用中央气象台中尺度地面降水观测资料、气象雷达观测资料和 NCEP FNL 资料, 以及中国气象局上海台风研究所台风最佳路径资料, 研究了 2018 年台风温比亚深入内陆后造成华东地区强降水的雨带结构和演变特征及天气尺度背景环境。结果表明:“温比亚”登陆后的雨带在皖豫鲁交界和山东中南部两度表现为多条短螺旋雨带合并发展为单一长雨带的特征;雨带的维持和形态演变主要是“温比亚”台风环流和强度维持及其与副热带高压的停滞西伸加强的相互作用决定的;由于低层垂直风切变的加强, 两条长雨带分别在其起端的安徽北部和山东南部两度表现出显著的对流特征, 并都伴有龙卷的发生。

关键词: 台风温比亚, 强对流螺旋雨带, 雨带结构演变

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.006

Characteristics Analysis on the Severe Convective Spiral Rainband of Typhoon Rumbia (2018)

GAO Shuanzhu

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Based on densely-observed surface and radar data and NCEP FNL data as well as the best track data from Shanghai Typhoon Institute/CMA, this article examines the structure and evolution of the rainbands of Typhoon Rumbia that caused torrential rain in East China after Rumbia moved far into inland. The results show that the rainbands twice manifested evolutions from multiple short rainbands into a single long rainband respectively around the boundaries between Shandong, Henan and Anhui provinces as well as mid-southern Shandong Province. The maintenance and evolution of the rainbands were determined mainly by the sustaining of typhoon circulation and intensity and its interaction with the stagnation and westward extension of subtropical high. Because of the intensification of low-level vertical wind shear, the rainbands displayed apparent convective features with embedded tornadoes in northern Anhui and south Shandong.

Key words: Typhoon Rumbia, severe convective spiral rainband, rainband structure evolution

引 言

据统计,西北太平洋(包括南海)平均每年有 27 个台风生成,其中约 7 个左右在我国东部或南部沿

海登陆(高拴柱等, 2018)。登陆台风带来的强降水是我国最严重的灾害性天气之一(陈联寿和丁一汇, 1979; Dong et al, 2010)。台风强降水可以划分为台风环流内和台风环流外的强降水(陈联寿等, 2017)。台风环流内的强降水可分为眼壁降水和螺旋雨带降

* 国家自然科学基金面上项目(41675044 和 41575063)共同资助

2019 年 5 月 1 日收稿; 2019 年 11 月 7 日收修定稿

作者:高拴柱, 主要从事台风研究和预报. Email: gaosz@cma.gov.cn

水;台风环流外的强降水可分为台风外围飑线(Meng and Zhang, 2012)和远距离强降水(Wang et al, 2009; Moore et al, 2013)。对于深入内陆的台风而言,由于地面摩擦的作用以及干冷空气的侵入,台风眼壁降水的强度明显地减弱,台风的螺旋雨带往往变得模糊,而环境场可导致台风非对称结构的发展,一般台风东侧和北侧对流层低层为较强辐合,如果有高层辐散和较强水汽输送的配合,则有利于强降水的产生(杨舒楠等, 2019; 梁军等, 2015; Dong et al, 2010; Gao et al, 2009)。由于台风涡旋的内部结构和外围环流、台风与其他天气系统相互作用和下垫面地形的强迫等诸多方面的差异,强降水往往呈现出非对称分布特征(Yang et al, 2008; Zhu et al, 2016; Kim et al, 2018),且具有较大的不确定性。不同的登陆台风和同一台风的的不同阶段,由于影响因子的不同,其强降水的落区和大小也各不相同。前人关于登陆台风强降水的研究多关注的是24 h 累计雨量的分布和演变以及相关天气尺度系统特征。而要准确预报登陆台风造成强降水的精细时空变化,详细分析造成登陆台风强降水的雨带结构和演变特征十分重要。

2018年有四个台风(“安比”“云雀”“摩羯”和“温比亚”)登陆华东,使本年度登陆江浙沪地区的台风个数突破了1949年以来的历史纪录,并且这些台风给华东、华北,甚至辽宁等地,带来了严重的强降水、雷暴大风和龙卷等强对流天气。第18号台风温比亚(英文名称:Rumbia, 编号:1818)带来的灾害尤其严重。受其影响,浙江、上海、江苏、安徽、湖北、河南、山东、辽宁等省(市)遭遇强降水,多地出现破记录暴雨,被称为年度“雨量之王”,江苏和山东遭遇三个龙卷(Bai et al, 2019)。受灾严重地区共有52人死亡,1人失踪,房屋倒塌1.5万间,不同程度损坏房屋12.2万间,直接经济损失369.1亿元。“温比亚”的灾害超过了2017年强台风天鸽(121亿元),与2016年超强台风莫兰蒂相当,是2016年以来我国致灾最严重的台风。本文将重点分析台风温比亚于8月18—19日在安徽、河南、山东交界和山东中南部造成强降水的雨带结构和演变特征。

1 台风温比亚降水特征

中国气象局上海台风研究所台风最佳路径资料

表明,“温比亚”在杭州湾曾一度最强达到 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强热带风暴级别,8月17日凌晨在上海沿海以热带风暴级别登陆。其庞大的环流体系和充足的水汽供应使台风维持一定的强度,没有迅速衰减。在其中心穿越上海、江苏、安徽,直至进入河南南部时,“温比亚”还保持着热带风暴级别,尔后才减弱为热带低压。19日凌晨减弱后的热带低压转向东北方向移动,20日早晨从山东北部出海加强,在渤海南部变性为温带气旋,最后在朝鲜半岛北部再次登陆(图1)。

本文利用中央气象台中心尺度地面降水观测资料对“温比亚”的降水特征做了分析。图1显示台风温比亚给江苏、安徽、河南、山东和辽宁多地造成了强降水。8月16—21日,累计雨量超过500 mm的站有河南商丘睢县(544 mm)、拓城县(522 mm),江苏徐州沛县(534 mm),山东泰安徂徕(511 mm),江苏无锡(591 mm),安徽合肥(501 mm);其中河南商丘睢县站在8月18日单日降水量达到505.6 mm。雨区分布表明,强降水集中区域位于安徽、河南和山东三省交界地带以及山东泰安以东(图1),是受“温比亚”影响的主暴雨区。

在“温比亚”中心登陆上海前后,陆上主要降水出现在台风中心附近,近似在台风路径两侧保持对称分布(图2a);在台风中心向西移动的过程中,台风强度仍然保持热带风暴级别,除中心附近小范围的降水外,在中心以北大约200~300 km处有一条西北西—东南东走向的、24 h雨量达100 mm以上的强降水带,其中个别站点的24 h雨量超过250 mm(图2b);18日08时至19日08时,台风逐渐减弱为热带低压,在其中心缓慢移动并由西北移向转为东北移向的过程中,主要降水出现在中心北部和东北部区域,24 h范围最广、强度最大的降水出现在这一时段,100 mm以上的降水范围呈东西约400 km、南北约300 km的片状形势,250 mm以上的降水区域具有东西走向的带状特征,暴雨主要出现在安徽北部、河南东部和山东西南部交界处,其中河南商丘24 h达505.6 mm的降水出现在这一时段(图2c);19日08时以后“温比亚”减弱为热带低压的中心快速地向东北方向移动,降水范围和强度都较前24 h减少(图2d)。

图2还表明,在台风范围内50 mm降水预报线包含了大部分的暴雨实况,100 mm降水预报的漏

报和空报都比较多,准确率明显减少。据中央气象台降水评分显示,图中4天的全国暴雨TS评分分别为0.25、0.21、0.47和0.39,这些数据明显高于过去几年的年度TS暴雨评分,说明对于大范围集中暴雨的预报常常可以取得较好的成绩。

2 强对流螺旋雨带的演变

对应于安徽、河南、山东交界和山东中南部的强降水中心,台风温比亚的雨带在这两个地区分别于18日和19日两度表现为由多条短雨带向一条长对流性螺旋雨带演变的特征。

“温比亚”环流中心进入安徽后,其环流依然保持着比较对称的特征。基于中国气象局华东分区 0.5° 仰角雷达基本反射率的拼图(图3),发现雷达回波上螺旋雨带分布的轴对称特征比较明显(图3a,3b),台风中心北侧的回波略强,18日04:30在台风环流北侧出现了三条较强的螺旋雨带。从台风中心进入河南省境内开始,台风雨带开始表现出显著不对称分布,台风环流南侧的回波基本消失,北侧表现为多个弱螺旋雨带依次向东北方向排列展开(图3c)。商丘在这一时段内处于其中一条较强的雨带上,出现了93 mm的小时雨量极值(图略)。到18日11时北部雨区有减弱趋势(图3c,3d)。

18日12时开始,台风北部的多条短雨带合并为一条西北—东南向的雨带并发展加强(图3e,3f),从商丘一直延伸到淮南(图3e~3j)。该雨带自生成以后基本保持准静止状态,18日下午其东南端在相同的位置(图4中的黑色圆圈)不断有新的对流体发展并入,表现为后部增生型对流雨带特征(图4),这样的雨带往往造成局地强降水(Bluestein and Jain, 1985)。与前期台风北部的多条螺旋雨带相比,这条雨带具有更加明显的对流特征。从18日17时开始该雨带的结构变得十分复杂,由原来近似直线型的对流雨带演变为包含多个超级单体和弓形回波的对流线(图3g~3i)。徐州雷达 0.5° 仰角的基数据和江苏气象局现场调研(Bai et al, 2019)显示,其中的一个超级单体(图5a,5b)于18日18:45在江苏省徐州铜山区刘集镇张集矿附近造成了一个龙卷,徐州雷达 0.5° 仰角的径向风场上出现了 $27\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的龙卷涡旋(TVS)。该超级单体在向西北方向移动

的过程中,于18日19:46左右在丰县凤城街道谢集村附近又产生一个龙卷。这条长雨带在这段时间保持准静止并向南一直延伸到安徽省芜湖附近。商丘8月18日16—19时的强降水以及安徽北部和徐州的强降水就主要是这条雨带造成的。以后,强对流回波开始减弱、分散(图3k)。

19日04时这条长雨带开始向北收缩(图3l),19日白天山东中南部表现为多条近西北—东南向的雨带(图3m,3n)。到19日20时,随着台风快速向东北方向移动,多条近似平行的短雨带合并发展为一条南北向的长雨带,从山东的东营附近向南一直延伸到江苏的宿迁附近(图3o)。上述多条雨带是泰安过程雨量达511 mm的重要贡献者(图3)。临沂 0.5° 仰角的雷达基本反射率显示,这条雨带中临沂附近的回波最强(图5c),临沂气象局现场调研证实,19日19:35—19:41临沂市河东区汤头街道贾家官庄村出现了一个龙卷(Bai et al, 2019)(图5d)。之后该雨带逐渐东移出海,“温比亚”对华东地区的暴雨影响结束。

3 强对流螺旋雨带的形成背景

“温比亚”在华东造成的强降水雨带的结构和演变与其天气尺度背景密切相关。本文对NCEP FNL数据的分析显示,17日08时500 hPa副热带高压中心位于辽宁省南部,之后迅速南移,到18日08时已达到 34°N 的朝鲜半岛南侧。此后,副热带高压(以下简称副高)中心稳定少动(图6a,6b),强度有所增大,直到20日08时“温比亚”出海。由于“温比亚”登陆后环流一直比较完整、庞大,它和其右侧的副高之间形成了南北跨度很大的辐合线(图6c,6d),并伴随着宽广的低空急流(图7a~7c),向台风环流持续提供大量的暖湿空气(图8a,8b)。在水汽通量辐合大值区出现较强的上升运动(图8c,8d中的蓝色阴影),对应于两个阶段的强对流螺旋雨带(图8c,8d中的绿色等值线)。

18日00—11时台风北部的多条雨带主要由台风北侧倒槽造成,台风的强风速区在北侧范围很广,且具有显著的东西向对称分布特征(图7a)。多雨带的强度到18日11时前后有所减弱。相比于18日08时,台风18日14时在向北缓慢移动中强度略

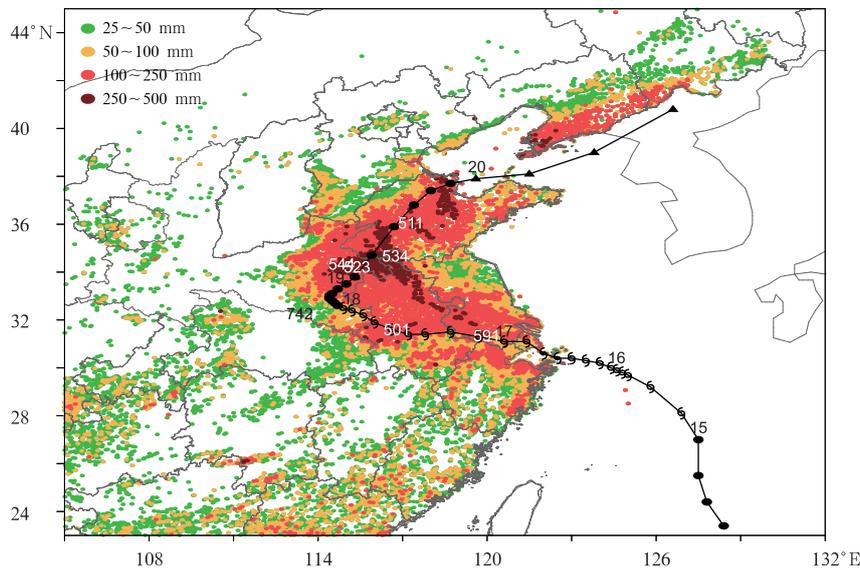


图 1 2018 年 8 月 16 日 08 时至 21 日 08 时台风温比亚的过程累计降水量(填色)及其全路径图
 (黑线,黑色圆点为“热带低压”,空心台风符号为“热带风暴级”,实心台风符号为“强热带风暴级”,实心三角为变性后的“温带气旋”,上方有数字的符号为当日 08 时位置,16 日 02 时至 20 日 08 时之间每 3 h 一个符号,其余时段每 6 h 一个符号)

Fig.1 Accumulated rainfall (colored) between 08:00 BT 16 and 08:00 BT 21 August 2018
 (The plotted is the best-track of Rumbia from Shanghai Typhoon Institute/CMA every 3 h between 02:00 BT 16 August and 08:00 BT 20 August and every 6 h in the rest periods. Solid black dot denotes tropical depression, empty typhoon symbol denotes tropical storm, solid typhoon symbol denotes severe tropical storm, solid triangle denotes subtropical cyclone after transition. The number over certain symbols denotes the position at 08:00 BT of the day given by the number)

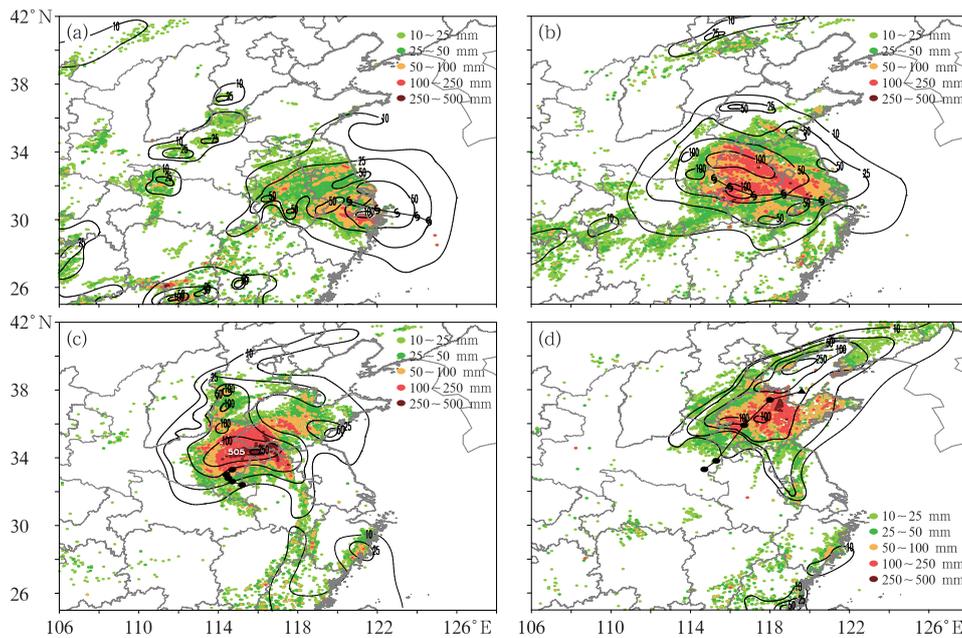


图 2 2018 年 8 月(a)16 日 08 至 17 日 08 时、(b)17 日 08 至 18 日 08 时、(c)18 日 08 至 19 日 08 时和(d)19 日 08 至 20 日 08 时 24 h 雨量实况(填色)和降水预报(黑色等值线,单位:mm)及相应时段的台风温比亚路径
 (黑色圆点为“热带低压”、空心台风符号为“热带风暴级”、实心台风符号为“强热带风暴级”、实心三角为变性后的“温带气旋”)

Fig.2 The 24 h accumulated rainfall observation (colored) and forecast (black contour, unit: mm) as well as the track of Typhoon Rumbia at (a) 08:00 BT 16 - 08:00 BT 17, (b) 08:00 BT 17 - 08:00 BT 18, (c) 08:00 BT 18 - 08:00 BT 19 and (d) 08:00 BT 19 - 08:00 BT 20 August 2018
 (Solid black dot denotes tropical depression, empty typhoon symbol denotes tropical storm, solid typhoon symbol denotes severe tropical storm, solid triangle denotes subtropical cyclone after transition)

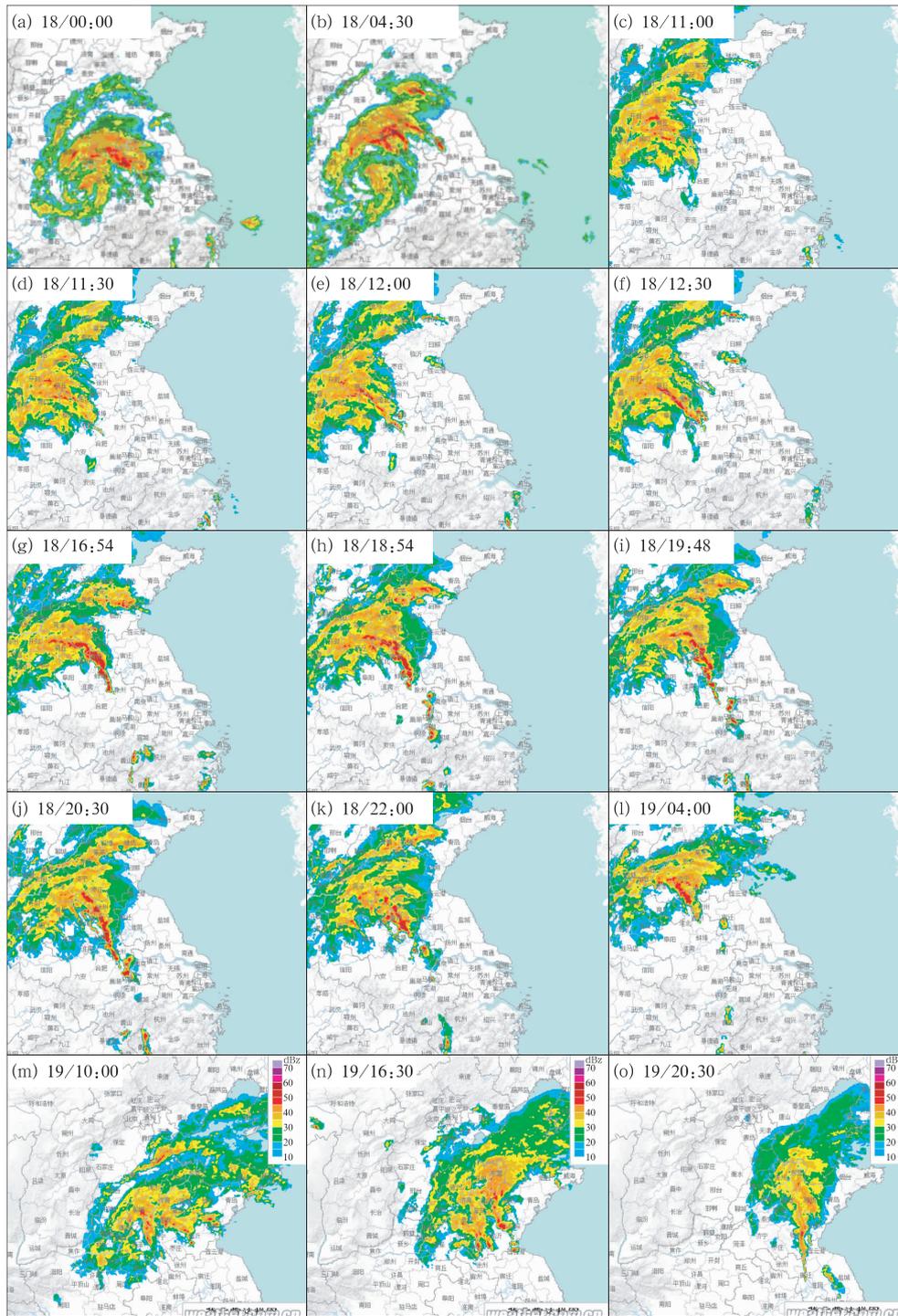


图 3 2018 年 8 月 18—19 日台风温比亚的雷达 0.5° 仰角基本反射率演变拼图
(图标表示日期/时间)

Fig. 3 Evolution of radar reflectivity mosaic at 0.5° elevation angle of
Typhoon Rumbia during 18–19 August 2018
(The caption of each panel denotes date/time)

有增强(图 7a,7b),在这个加强过程中,台风环流东北部地面—500 hPa 的垂直风切变中心高值区有所

增大(图 7d,7e),925 hPa 上沿着台风和副高之间的辐合线自台风北部的强辐合中心向东南发展出一条

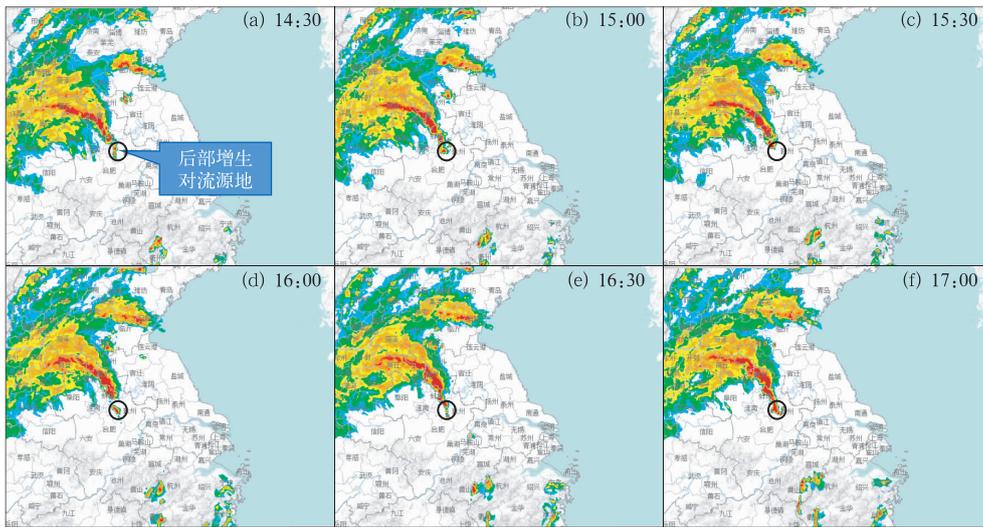


图 4 2018 年 8 月 18 日 14:30—17:00 雷达 0.5°仰角的基本反射率拼图演变
(黑圆圈表示台风温比亚雨带的后部增生特征)

Fig. 4 Evolution of radar reflectivity mosaic at 0.5° elevation angle of Typhoon Rumbia during 14:30–17:00 BT 18 August 2018
(Black circle represents the back-building feature of the rainband of Typhoon Rumbia)

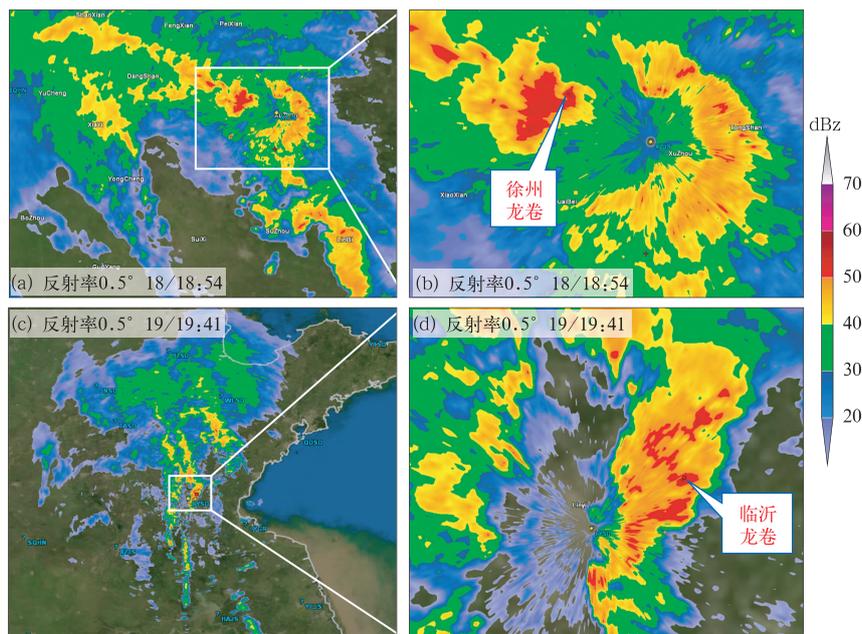


图 5 2018 年 8 月(a)18 日 18:54 徐州和(c)19 日 19:41 临沂
雷达范围内台风温比亚雨带的中尺度系统;

(b)图 5a 中白色方框的放大图,(d)图 5c 中白色方框的放大图

Fig. 5 (a) Mesoscale convective systems in the rainband of Typhoon Rumbia at 18:54 BT 18 August 2018 as shown by the 0.5° elevation angle radar reflectivity of Xuzhou Radar, (b) blow-up of the area in the white box in Fig. 5a; (c, d) same as Figs. 5a, 5b, but for Linyi Radar at 19:41 BT 19 August 2018

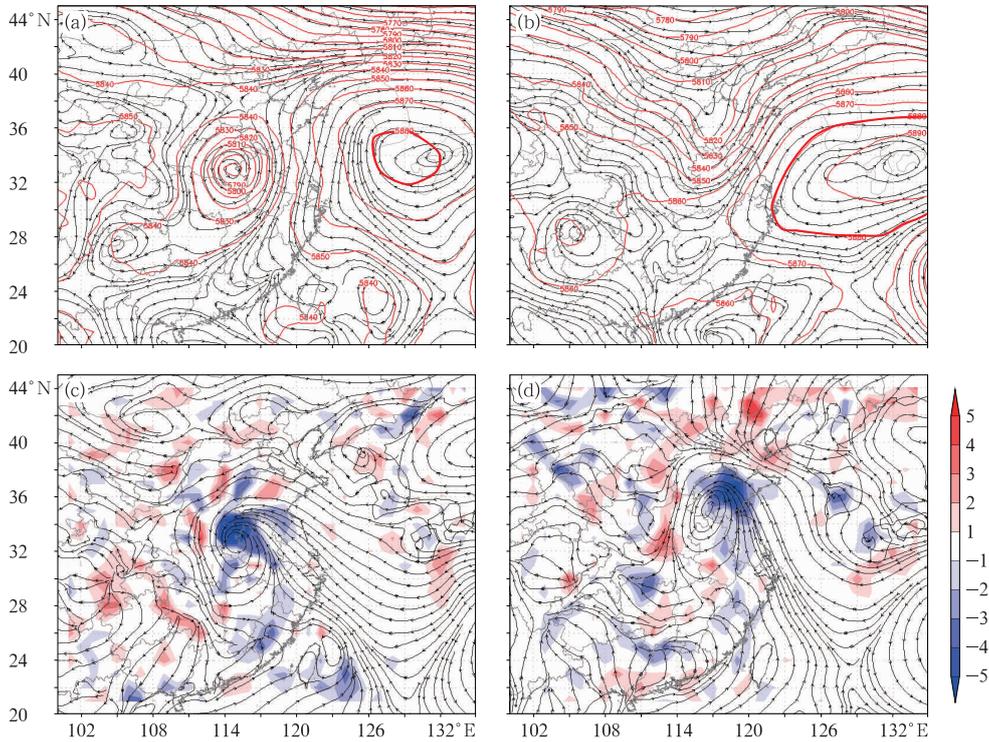


图 6 2018 年 8 月(a,c)18 日 14 时和(b,d)19 日 20 时

(a,b)500 hPa 位势高度(红色等值线,单位:gpm)

和流场,以及(c,d)925 hPa 散度(填色,单位: 10^{-5} s^{-1})和流场

Fig. 6 Geopotential height (red contour, unit: gpm) and streamline at 500 hPa (a, b), divergence (colored, unit: 10^{-5} s^{-1}) and streamline at 925 hPa (c, d) at 14:00 BT 18 (a, c) and 20:00 BT 19 (b, d) August 2018

强的辐合带(图 6c),同时伴随着 500 hPa 高度上的辐散区,造成了自商丘延伸到淮南的长雨带。18 日 14—20 时低层的辐合(图 6c)、水汽通量辐合(图 8a)、垂直速度(图 8c)、中层的辐散以及地面—500 hPa 的垂直风切变(图 7e)较强,对应着这段时间的强对流螺旋雨带。较强的上升运动区位于倒槽正涡度柱的东侧,一直延伸到 200 hPa(图 8e),副高在这段时间加强西伸,使得其与台风环流之间的辐合加强,水汽输送充沛,导致了强降水带南端的离散对流线一直延伸到浙江西部。

19 日开始台风的强度迅速减弱,并快速向东北方向移动。气旋环流中强风速区主要出现在环流的东部(图 7c)。环流北部再次出现大范围的地面—500 hPa 强垂直风切变区(图 7f),预示着强对流再次发展的可能。类似于 18 日 00 时台风北部的多螺

旋雨带特征,19 日 16:30 地面环流的东北侧的倒槽区域再次发展出多条西北—东南向雨带。随着台风的快速向东北方向移动,台风与其东侧的副高之间的辐合在台风环流附近由 18 日的西北—东南向转为南北向(图 6d),形成一条南北向的水汽通量辐合带(图 8b),从而造成了一条笔直的南北向的对流线自山东东营一直延伸到江苏宿迁附近。该雨带的最强中心出现在垂直风切变最大的山东临沂附近,垂直速度和水汽通量辐合都呈现了极大值(图 8b, 8d),造成了超级单体和临沂龙卷的发生。然而,相比于 18 日 20 时安徽北部的强对流螺旋雨带环境,19 日 20 时雨带虽同样位于倒槽的东侧,但倒槽中的涡度柱明显偏低,强度偏弱,同时雨带的上升运动发展高度和上升速度均较低(图 8f)。

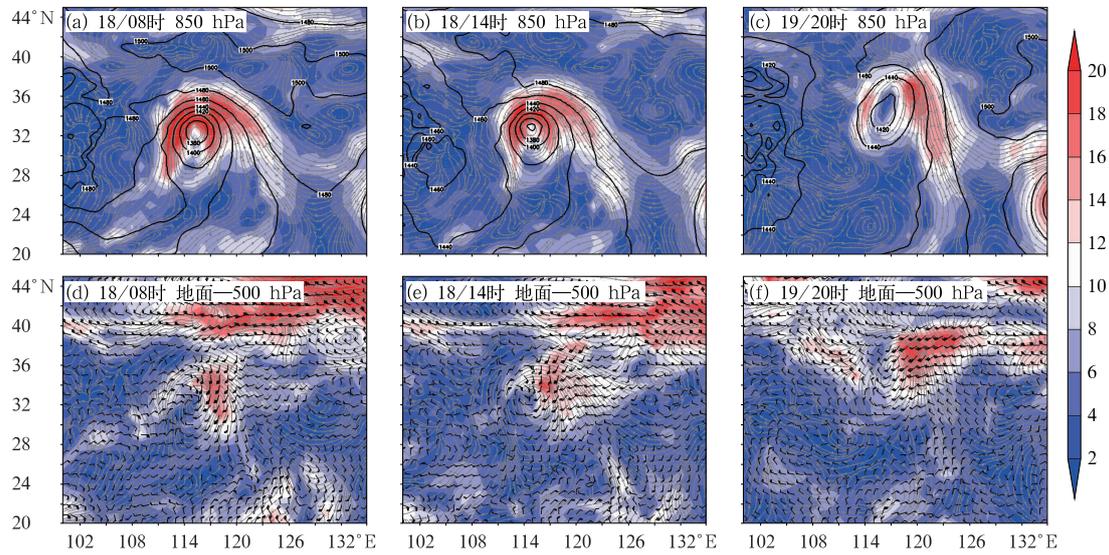


图 7 2018 年 8 月(a,d)18 日 08 时、(b,e)18 日 14 时和(c,f)19 日 20 时(a,b,c)850 hPa 位势高度 (黑色等值线,单位:gpm,间隔为 20 gpm)、风速(填色,单位: $m \cdot s^{-1}$)和流场, (d,e,f)地面—500 hPa 垂直风切变的矢量(风杆:短杆、长杆、小旗子分别代表 2、4 和 $20 m \cdot s^{-1}$) 和大小(填色,单位: $m \cdot s^{-1}$)以及 850 hPa 流线

Fig. 7 Geopotential height (black contour, unit: gpm, every 20 gpm), wind speed (colored, unit: $m \cdot s^{-1}$) and streamline at 850 hPa (a, b, c), the barb (half bar, full bar and flag denote 2, 4 and $20 m \cdot s^{-1}$, respectively) and magnitude (colored, unit: $m \cdot s^{-1}$) of vertical wind shear between surface—500 hPa and streamline at 850 hPa (d, e, f) at 08:00 BT 18 (a, d), 14:00 BT 18 (b, e) and 20:00 BT 19 (c, f) August 2018

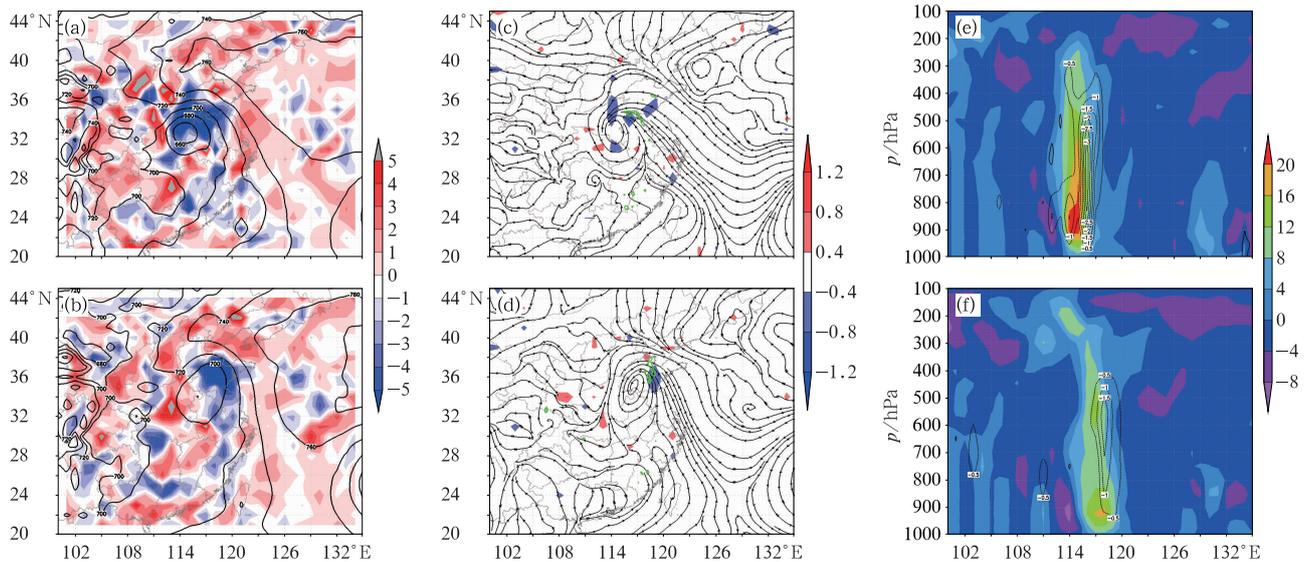


图 8 2018 年 8 月(a,c,e)18 日 20 时和(b,d,f)19 日 20 时(a,b)925 hPa 的位势高度(黑色等值线,单位:gpm)、和水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} s^{-1}$),(c,d)925 hPa 的流场、垂直速度(填色,单位: $Pa \cdot s^{-1}$) 和所示时刻前 1 h 大于 20 mm 的雨量(绿色等值线),(e)沿 $34^{\circ}N$ 和(f)沿 $36^{\circ}N$ 的垂直涡度 (填色,单位: $10^{-5} s^{-1}$)和垂直速度(黑色等值线,单位: $Pa \cdot s^{-1}$)的垂直剖面

Fig. 8 (a, b) Geopotential height (black contour, unit: gpm) and water vapor flux divergence (colored, unit: $10^{-7} s^{-1}$), (c, d) streamline, vertical velocity (colored, unit: $Pa \cdot s^{-1}$) and accumulated rainfall of $> 20 mm$ (green contour) in the past hour before the given time, (e, f) the vertical cross-sections of vertical vorticity (colored, unit: $10^{-5} s^{-1}$) and vertical velocity (black contour, unit: $Pa \cdot s^{-1}$) along $34^{\circ}N$ (e) and $36^{\circ}N$ (f) respectively at 20:00 BT 18 (a, c, e) and 20:00 BT 19 (b, d, f) August 2018

4 结 论

本文基于中央气象台地面加密观测资料、气象雷达观测资料和 NCEP FNL 资料,重点分析了 2018 年第 18 号台风温比亚造成华东强降水过程中雨带精细结构和演变特征及其天气背景。得到如下主要结论。

“温比亚”登陆后完整、庞大的环流和强度维持及其与副高的停滞西伸加强的相互作用决定了其强降水雨带的维持和形态演变。台风温比亚登陆后造成的强降水主要分为在 18 日安徽、河南、山东交界和 19 日山东中南部两个阶段。

第一个阶段,台风温比亚深入内陆后其北部倒槽在 18 日表现为多条短螺旋雨带向单一长雨带过渡的特征。受来自其东南方的水汽持续供应的影响,台风登陆后环流特征完整维持,其螺旋雨带持续发展,在其北侧的河南、安徽等地首先造成了大面积强降水。随着“温比亚”向北移动,台风环流和副高之间辐合加强,其环流北侧的多条短雨带合并,且向东南方向发展出一条准静止的对流性长雨带,雨带具有明显的后部增生特征,从而造成局地强降水。同时,低空垂直风切变的加强使雨带的对流显著增强,发展出多个超级单体、弓形回波和龙卷。

第二个阶段,19 日开始,台风进入山东后,再次经历了倒槽中多条短雨带向单一长雨带合并发展的特征。这一阶段的多条短雨带主要与环流东北部的倒槽关系密切,随后,向东北方向加速移动的环流与其东侧的副高之间辐合加强,形成了一条南北向的长雨带,该雨带随着低空垂直风切变的增强使得对流再次加强,在山东临沂造成了超级单体和龙卷。

参 考 文 献

陈联寿,丁一汇,1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京:科学出版社:491. Chen L S, Ding Y H, 1979. The Conspectus of Western Pacific Typhoon[M]. Beijing: Science Press: 491(in Chinese).
陈联寿,孟智勇,丛春华,2017. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报,37(4): 1-7. Chen L S, Meng Z Y, Cong C H, 2017. An overview on the research of typhoon rainfall distribution[J]. J Mar Meteor, 37(4): 1-7(in Chinese).

高拴柱,董林,许映龙,等,2018. 2016 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象,44(2):284-293. Gao S Z, Dong L, Xu Y L, et al, 2018. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoons in Western North Pacific in 2016[J]. Meteor Mon, 44(2): 284-293(in Chinese).
梁军,张胜军,黄艇,等,2015. 辽东半岛“达维”(1210)台风暴雨的诊断分析[J]. 气象,41(3):364-371. Liang J, Zhang S J, Huang T, et al, 2015. Diagnostic analyses of typhoon torrential rain over Liaodong Peninsula[J]. Meteor Mon, 41(3): 364-371(in Chinese).
杨舒楠,曹勇,陈涛,等,2019. 台风苏迪罗登陆次日分散性暴雨成因及预报着眼点[J]. 气象,45(1):38-49. Yang S N, Cao Y, Chen T, et al, 2019. Causes and focus points of forecasting the scattered rainstorm of Typhoon Soudelor on day 2 after landing[J]. Meteor Mon, 45(1): 38-49(in Chinese).
Bai L Q, Meng Z Y, Sueki K, et al, 2019. Climatology of tropical cyclone tornadoes in China from 2006 to 2018[J]. Sci China Earth Sci, DOI:10. 1007/s11430-019-9391-1.
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.
Dong M Y, Chen L S, Li Y, et al, 2010. Rainfall reinforcement associated with landfalling tropical cyclones[J]. J Atmos Sci, 67(11): 3541-3558.
Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al, 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with Severe Tropical Storm Bilis (2006) after its landfall[J]. Mon Wea Rev, 137(6): 1881-1897.
Kim D, Ho C, Park D S R, et al, 2018. The Relationship between tropical cyclone rainfall area and environmental conditions over the subtropical oceans[J]. J Climate, 31(12): 4605-4616.
Meng Z Y, Zhang Y J, 2012. On the squall lines preceding landfalling tropical cyclones in China[J]. Mon Wea Rev, 140(2): 445-470.
Moore B J, Bosart L F, Keyser D, et al, 2013. Synoptic-scale environments of predecessor rain events occurring east of the Rocky Mountains in association with Atlantic basin tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 141(3): 1022-1047.
Wang Y Q, Wang Y Q, Fudeyasu H, 2009. The role of Typhoon Songda (2004) in producing distantly located heavy rainfall in Japan[J]. Mon Wea Rev, 137(11): 3699-3716.
Yang S, Kang K R, Cui X P, et al, 2008. Diagnostic analysis of the asymmetric structure of the simulated landfalling Typhoon“Haitang”[J]. Progr Natur Sci, 18(10): 1249-1260.
Zhu L, Wan Q L, Shen X Y, et al, 2016. Prediction and predictability of high-impact western Pacific landfalling Tropical Cyclone Vicente (2012) through convection-permitting ensemble assimilation of doppler radar velocity[J]. Mon Wea Rev, 144(1): 21-43.