孔期,林建,2017.2015年5月19—20日华南地区不同性质暴雨成因和预报分析[J].气象,43(7):792-803.

2015年5月19—20日华南地区不同性质暴雨成因和预报分析*

孔 期 林 建

国家气象中心,北京 100081

提 要: 利用常规地面、高空和自动站观测资料以及NCEP 1°×1°逐6 h再分析资料,结合多普勒雷达回波和卫星资料,对比分析了2015年5月19—20日华南暴雨过程中不同性质暴雨对应的天气背景、垂直结构特征及直接造成暴雨的中尺度对流系统活动特征。结果表明:此次华南暴雨过程3个强降水中心分别与3个中尺度对流系统相关。(1)广西北部在850 hPa低涡切变线及α中尺度锋面气旋影响下,暴雨区斜压锋生结构明显,整层大气强烈上升。地面冷锋后中尺度线状对流活跃,排列紧密,持续时间较长,降雨量大。大尺度模式有较高的可参考性。(2)广东中北部暴雨区受边界层弱冷空气触发,线状对流系统在其南侧高温高湿环境中新生并传播,排列松散,移动速度较快,总降雨量不及广西北部,但局部雨强突出。边界层中尺度辐合线及γ中尺度气旋对强降水起重要作用。中尺度模式有一定的反映,预报难度较大。(3)广东东南部暴雨由暖区边界层风速辐合及地形海岸线作用产生,其降水质心低,降水效率高。模式的预报能力十分有限。针对不同特点的暴雨预报,数值模式的预报能力不同,而预报员在对天气特征准确把握的基础上,综合考虑不同数值模式的结果,有望得到更准确的预报。

关键词: 暴雨,低涡切变线,中尺度对流系统,暖区对流

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.07.003

Analysis on Causes and Forecasts of the Torrential Rainfall with Different Features over South China During 19 to 20 May 2015

KONG Qi LIN Jian

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Using conventional observations, automatic meteorological observation data, NCEP 1°×1° reanalysis data and the data from the satellite and Doppler weather radar, the torrential rainfall event that occurred over South China from 19 to 20 May 2015 was analyzed regarding the synoptic conditions, vertical structure and mesoscale convective activities. The results show that the three rainfall centers during this rainfall process were caused by three different mesoscale convective systems respectively. Firstly, the heavy rainfall over the north of Guangxi was caused by the meso-α-scale vortex and shear line in the low level with the obvious frontogenesis and intense uplift. The mesoscale linear convection located behind the cold front lined more intensely, causing the rainfall to maintain a longer time with more total precipitation. The global model shows a good prediction. Secondly, the heavy rainfall over the central and northern Guangdong was triggered by the weak cold air in the boundary layer. The mesoscale linear convection moved southward because of the new-born cells in the warm and wet areas in the south. The linear structure was less intense and moved rapidly, so the total precipitation was less than that in the north of Guangxi, but the local rainfall was more intense. The mesoscale convergence line in the boundary layer and the

* 气象预报预测业务与科研结合专项(CMAHX20160601)资助

2016年11月1日收稿; 2017年6月9日收修定稿

第一作者:孔期,主要从事短期天气预报、暴雨等灾害性天气的研究工作.Email:qiqinmc@163.com

meso-γ-scale convective systems played an important role. The mesoscale model can reflect the mesoscale process to some extent, but has more difficulties to forecast it. Thirdly, heavy rainfall over the southeast of Guangdong in the warm sector was triggered by the land and sea topographic uplift, persisting for a long time due to the combination with the MCS-B later. The forecast capability of the model is limited. Therefore, the numerical model has different forecasting capabilities according to the different characteristics of the torrential rainfall. Understanding of the characteristics of the heavy rainfall, some corrections can be achieved by subjective forecasting.

Key words: torrential rainfall, vortex and shear line, mesoscale convective system, warm-sector convection

引　言

4—6 月,随着西南季风加强,华南地区常常出现暴雨,华南暴雨一直是我国暴雨研究的热点之一。气象学者从不同角度分析研究,并开展了外场科学试验,取得的研究成果加深了对华南暴雨观测事实及发生发展机理的认识(陶诗言,1980;1996;陈红和赵思雄,2000;2004;周秀骥等,2003),也为更加准确预报华南暴雨过程提供了依据(薛纪善,1999;林良勋等,2006)。近年来,对华南暴雨过程的水汽输送、动力和热力结构特征以及暖区暴雨等方面都进行了大量深入的分析和研究(闫敬华等,2004;何立富等,2009;2010;罗建英等,2009;伍志方等,2011)。

长期的预报实践以及对华南暴雨的中尺度特征研究发现,华南暴雨是在有利的大尺度环流背景下,多尺度天气系统相互作用的产物。华南暴雨一般由多个相继生消的中尺度对流系统造成,中尺度对流系统不断发生、合并和加强是暴雨的直接影响系统(蒙伟光等,2003;2004;2012;慕建利等,2008;张晓美等,2009)。随着卫星及雷达等非常规观测资料的应用,华南暴雨中小尺度对流系统形成、发展原因及演变特征的分析研究工作也相继开展(廖胜石等,2007;伍志方等,2009;蒋建莹和汪悦国,2014)。孙建华和赵思雄(2000;2002)分析 1994 年 6 月华南暴雨过程中切变线上的中尺度对流系统,发现同一切变线上西段和东段的中尺度对流系统的发生发展过程及其强度均不同。蒙伟光等(2004)研究发现,对称不稳定可能是暴雨和中尺度对流系统发生发展的一种重要机制。张晓惠和倪允琪(2009)对华南前汛期锋面对流系统和暖区对流系统进行了对比研究,给出了中尺度对流系统发展成熟阶段的对流结构概念模型。这些研究成果不仅对科学认识华南暴雨有重要意义,同时对指导预报实践,探索暖区暴雨预报思路产生积极作用。目前虽然已有诸多关于华南暴雨的个例分析以及理论研究,但中尺度系统的触发及相互作用非常复杂,不同个例有不同的表现形式,因此在实际预报工作中,业务模式对中尺度对流系统的发生发展演变以及暖区对流等中尺度系统的预报常出现较大偏差,因此暴雨的预报也常出现偏差。

受东移高空槽、低层低涡切变线以及西南暖湿气流的共同影响,2015 年 5 月 19—20 日华南及贵州中南部等地出现一次暴雨到大暴雨天气过程。本次华南暴雨同样是多尺度系统相互作用的结果,既有系统性的大尺度强降雨,又有暖区性质的中小尺度对流性强降雨。无论是数值模式还是主观预报,对广东中北部的强降雨预报都有较大的空报,出现了一定偏差。本文利用各类常规地面、高空和自动站观测资料以及 NCEP 1°×1°逐 6 h 的再分析资料,结合多普勒雷达回波资料和卫星资料,对比分析了 2015 年 5 月 19—20 日华南暴雨过程中不同性质暴雨对应的天气背景、垂直结构特征及直接造成暴雨的中尺度对流系统活动特征,并从预报角度分析此次过程中不同性质暴雨预报的难度,并就如何对数值模式进行订正做一探讨,试图为定量降水预报寻找一些可用的预报依据和思路。

1　暴雨过程概况

2015 年 5 月 19—20 日华南、江南南部和贵州中南部等地出现一次大到暴雨、局地大暴雨的天气过程。3 个强降雨中心分别位于广西北部(雨区 1)、广东中北部(雨区 2)和广东东南部沿海(雨区 3),19 日 20 时至 20 日 20 时 24 h 降雨量(图 1)可见,3 个雨区均达大暴雨量级。降雨过程从 19 日下午开始,首先在贵州西部开始发展,19 日夜间雨势迅速增强,强降雨逐渐向东南方向移动至贵州南部及广西西北部。此外,19 日夜间开始,广西南部暖区中有

分散的强降雨向东北方向移动至广西东北部及广东北部后合并发展，此后广东北部的强降雨迅速南移，并逐渐与东南沿海局地强降水合并增强。

分别从 3 个雨区中选取 4 个代表站来看其降雨特点。位于广西北部的永福站降雨(图 2a)，最初2 h 的降雨为暖区降雨，小时雨强达到 40 mm。此后 20 日 02—10 时随着低涡切变线向东南移动而转为系统性降雨，小时雨强约为 20 mm，峰值出现在 20 日 07 时，小时雨强达 45.6 mm，可见广西北部(雨区 1)降雨强度较大且持续时间较长。广东中北部选取两个站点，分别位于广东北部和中部。广东北部英德站的降雨从 20 日 02—12 时，略滞后于永福站(图 2b)，平均小时雨强约为 10 mm，弱于永福站。峰值出现在 20 日 04 时，小时雨强为 27.9 mm。广东中部从化站的降雨(图 2c)，持续时间短，但小时雨强大，达到了 63 mm，有明显的对流性质，降雨的峰值出现时间比英德站滞后约 5 h(出现在 20 日上午 10时)，可见广东中北部(雨区2)降雨的对流性更为明显，局地雨强大，持续时间相对较短。位于广东东南部沿海海丰站的降雨(图 2d)，从 20 日 00 时一直持续到 20 日 19 时，持续时间最长。强降水主要集中在 20 日 05—14 时，峰值出现最晚，在 20 日 10 时，小时雨强峰值达64.6 mm，可见广东东南部沿

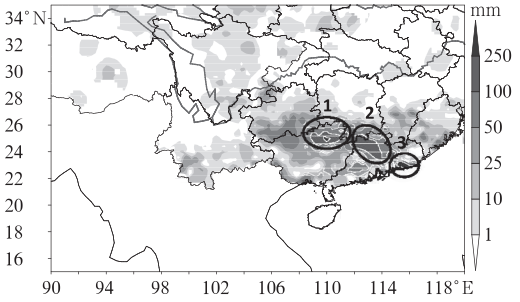


图 1 2015 年 5 月 19 日 20 时至 20 日 20 时 24 h 累积降水

Fig. 1 The 24 h accumulated precipitation from 20:00 BT 19 to 20:00 BT 20 May 2015

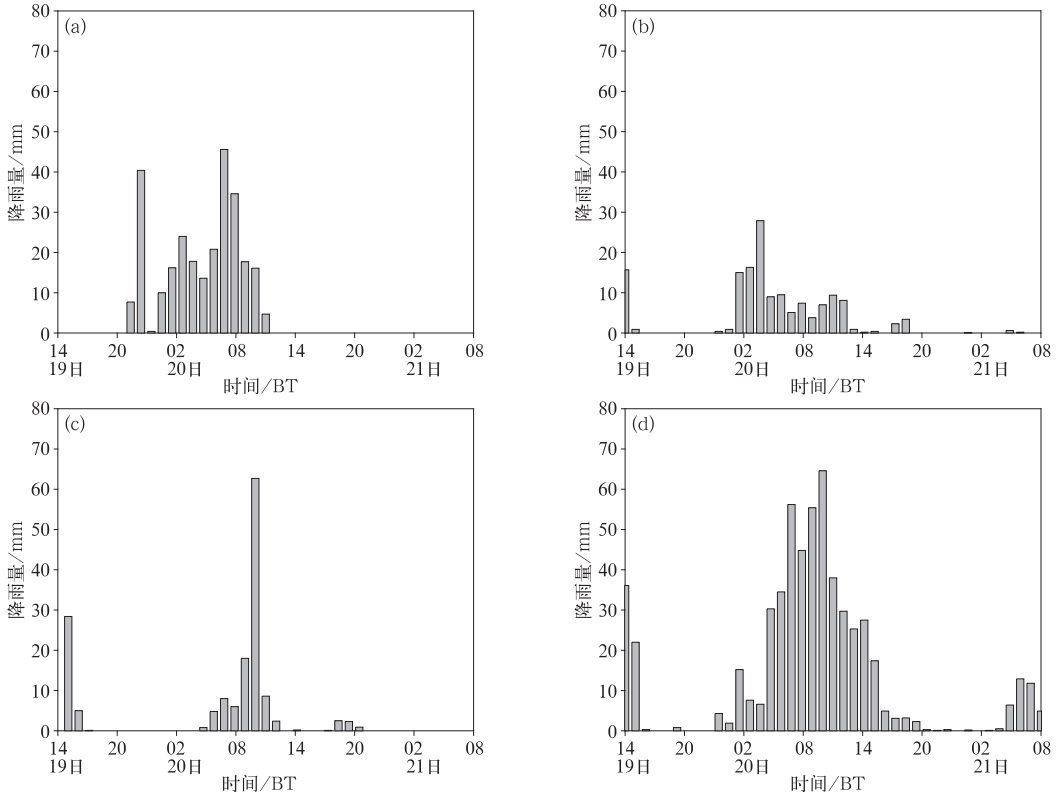


图 2 2015 年 5 月 19 日 14 时至 21 日 08 时广西北部(永福站，a)、广东北部(英德站，b)、广东中部(从化站，c)、广东东南部(海丰站，d)逐小时雨量演变

Fig. 2 The hourly precipitation evolution at Yongfu of Guangxi (a), Yingde of Guangdong (b), Conghua of Guangdong (c), Haifeng of Guangdong (d) from 14:00 BT 19 to 08:00 BT 21 May 2015

海(雨区 3)的降雨为暖区对流性降雨,雨强大且持续时间长,因而累计雨量大。

2　天气形势分析

暴雨的发生与高低空天气系统的有利配置是密不可分的。降雨发生期间,华南地区位于 200 hPa 南亚高压东北侧的高空分流区。500 hPa 欧亚大陆中高纬度为两槽一脊型,两槽分别位于新疆西部和东北地区。东北地区低槽后部冷空气扩散南下,与副热带高压西北侧南支槽前暖湿气流在江南南部和华南北部形成切变线,切变线上有低涡生成发展。低涡 19 日下午在贵州西部生成后逐渐东移发展加强,20 日 08 时低涡切变线东南移至广西北部。从地面图上来看,锋面在南移过程中断裂为东、西两段。19 日 20 时,地面冷锋呈东北—西南走向,云南—贵州—广西一带受地面低压倒槽控制,随着江南东部边界层浅薄冷空气的快速南压,19 日 23 时冷锋呈准东西向,位于江南南部至广西北部一线。西段冷锋受低压的阻挡移速变慢,而东段冷锋移速加快,20 日 02 时,冷锋分为两段,西段冷锋位于广西北部一带,东段冷锋快速移至江南东部到广东北部一带。20 日 08 时前后(图 3b),随着西段冷锋南压,广西中部有中尺度气旋发展,气旋及锋面北侧产生较强降水。低涡切变线及西段冷锋造成了广西北部强降雨(雨区 1)。与此同时,东段冷锋南移造成广东中北部强降雨(雨区 2)。另外一条雨带稳定少动,维持在广东东南部沿海(雨区 3),降雨后期,随着第二条雨带的快速南压,两者合并发展。

广西北部永福站(图 2a)19 日 22—23 时的局地强降雨就是在锋前西南急流里边界层辐合和地形抬升引起的暖区强降雨,20 日 00 时之后西段冷锋向东南移动,进入华南对流不稳定区,在锋后形成线状对流,引起短时强降雨。广东北部英德站的降雨(图 2b)主要是伴随东段冷锋南移而产生的,由于冷空气浅薄,锋区较弱,造成的降水强度比西段冷锋弱,英德站的小时雨强基本在 10 mm 左右。随着东段冷锋南压,边界层弱冷空气触发对流,在锋面附近形成了准东西向线状对流并向南快速移动。广东中部从化站出现了对流性短时强降水(图 2c),20 日 10 时小时雨强达到 63 mm。由于系统移速快,强降雨持续时间不长。而海丰站的降雨(图 2d)在 20 日 05 时之前是边界层风速辐合遇到海岸地形影响出现的局地对流性降雨,05 时随着东段冷锋南压,锋前线状对流移近,原先暖区中局地对流性降雨与线状对流引起的短时强降雨合并,因此海丰站的降雨明显增强。

上述特征表明此次暴雨过程自西向东、自北向南移动,具有降雨强度大、降雨性质不同等特征,既有伴随冷空气和低涡切变线的锋后降雨(广西北部),又有边界层锋区(浅薄冷空气)前侧的不稳定对流降雨(广东中北部)以及无明显冷空气参与的暖区降雨(广东东南部)。下面将针对不同雨区来分析其大尺度垂直结构以及中尺度系统发展演变特征,以期更好地理解此次暴雨过程的发生发展特点、物理机理,加强对数值预报的订正能力,提升对华南暴雨的预报技巧。

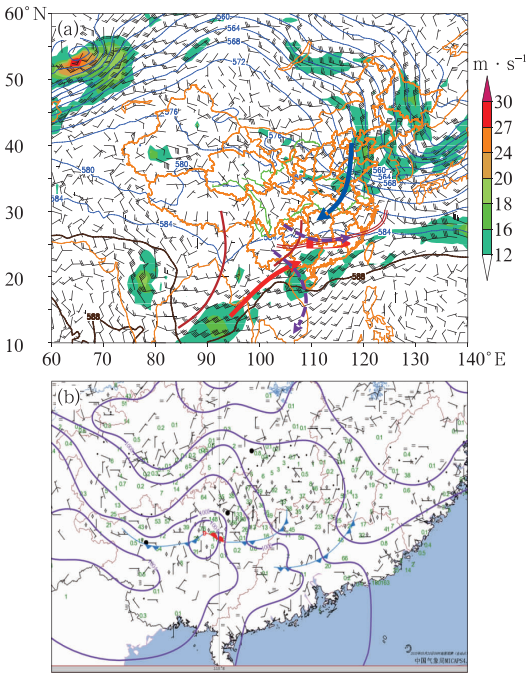


图 3　2015 年 5 月 20 日 08 时(a)500 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)和 850 hPa 风场(填色为>12 m·s^{-1}的风速)以及天气系统配置分析,(b)地面天气图分析(线条为等压线,间隔 1 hPa,数值为过去 6 h 降水)

Fig. 3　(a) Geopotential height at 500 hPa (solid lines, unit: dagpm) and wind field at 850 hPa (shaded area shows the region with wind speed > 12 m·s^{-1}), (b) synoptic analysis of surface synoptic chart at 08:00 BT 20 May 2015 (Solid lines denote the isobaric lines, with 1 hPa interval; numbers denote the 6 h precipitation of the past)

3 垂直结构特征分析

3.1 冷空气及锋生作用

为了反映广西北部、广东中北部以及广东东南部沿海 3 个强降雨区域的垂直环流特征，分别选取永福站（110°E）、英德站（113.25°E）和海丰站（115.19°E）3 个站所在经度做垂直剖面。图 4 给出了 5 月 20 日 02 和 08 时沿 110°E、113.25°E 和 115.19°E 的假相当位温、垂直速度、散度场和风场的经向垂直剖面。图 5 给出了 2015 年 5 月 20 日 02 时 109°～111°E 及 112°～114°E 经向平均的锋生函数垂直剖面。

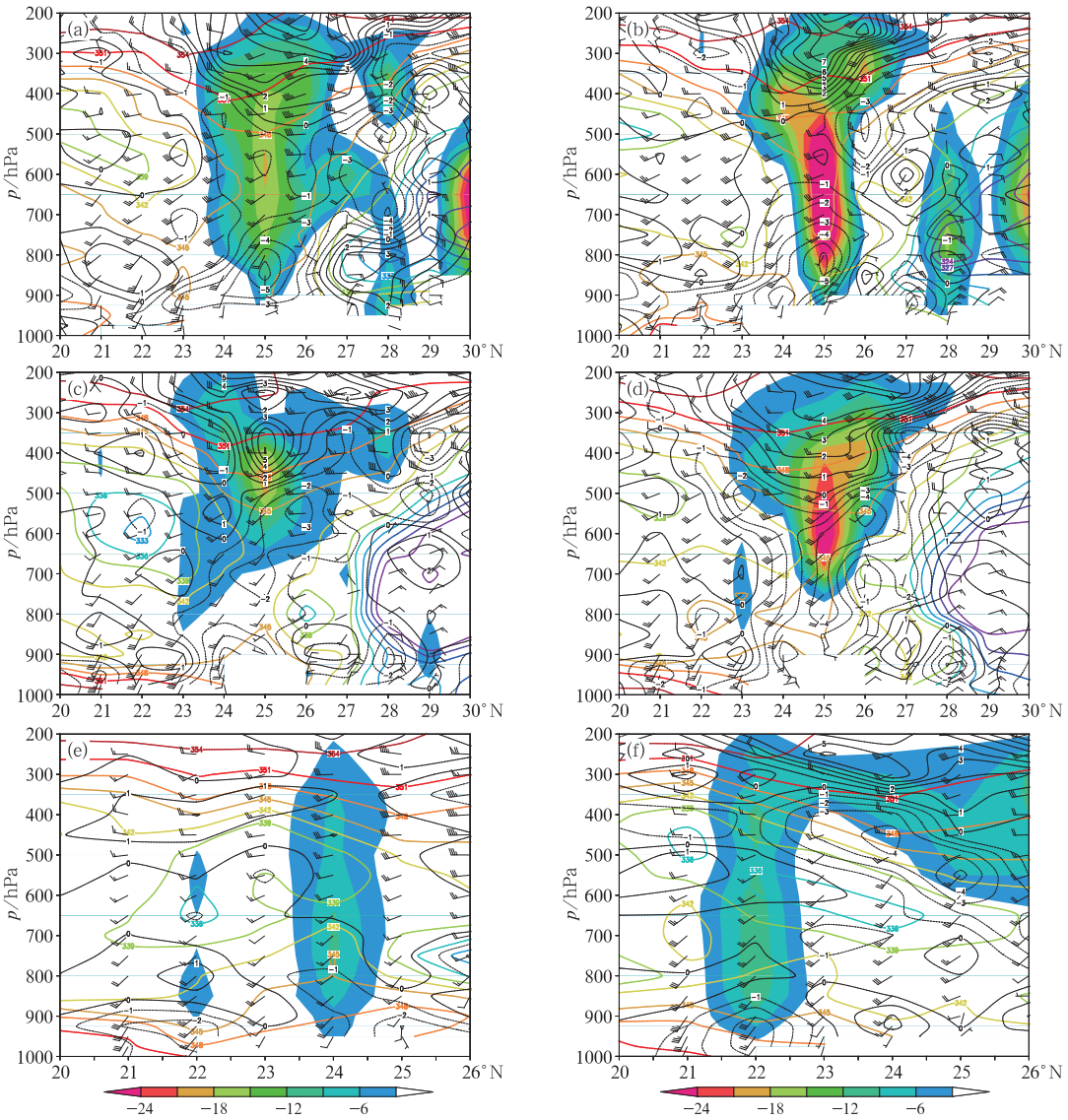


图 4 2015 年 5 月 20 日 02 时(a，c，e)和 08 时(b，d，f)沿 110°E(a，b)、113.25°E(c，d)和 115.19°E(e，f)假相当位温(彩色实线，单位：K)、散度场(黑色线条，单位：10^{-5} s^{-1})、垂直速度(阴影，单位：10^{-1} Pa·s^{-1})和风场的纬度-高度剖面

Fig. 4 Latitude-height cross sections of pseudo-equivalent temperature (colorful solid lines, unit: K), divergence field (black solid lines, unit: 10^{-5} s^{-1}), vertical velocity (shaded area, unit: 10^{-1} Pa·s^{-1}) and wind field along 110°E (a, b), 113.25°E (c, d) and 115.19°E (e, f) at 02:00 BT (a, c, e) and 08:00 BT (b, d, f) 20 May 2015

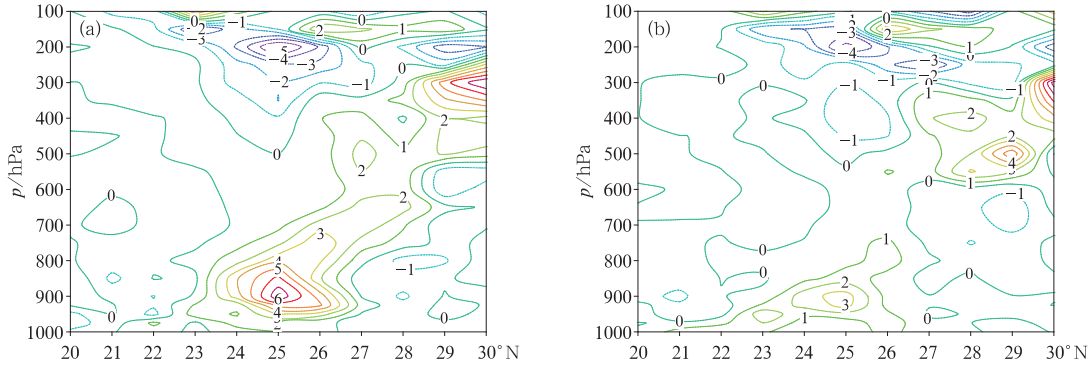


图 5　2015 年 5 月 20 日 02 时径向平均的锋生函数垂直剖面(单位:10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1})
(a) 109°～111°E, (b) 112°～114°E

Fig. 5　Latitude-height cross sections of frontogenesis function (unit: 10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}) averaged over (a) 109°—111°E, (b) 112°—114°E at 02:00 BT 20 May 2015

20 日 02 时广西北部大气具有明显的斜压锋生结构,27°N 以北 900～500 hPa 高空有冷空气从低层向南侵入(图 4),冷锋锋区位于 24°N 以北随高度向北倾斜,锋生函数大值区位于低层 800～900 hPa,中心强度为 7×10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1}(图 5a)。低层辐合中心位于 850 hPa 左右,中心强度在 -6×10^{-5} s^{-1},高层辐散位于 500 hPa 以上。锋面触发及低层切变辐合抬升使锋后上升运动强烈,垂直速度达−1.8 Pa·s^{-1}以上。到 20 日 08 时,冷空气进一步南侵,锋后东北风明显加强并南压,低层暖湿西南气流加大,700 hPa 以下斜压锋生加强,锋生函数达最强(12×10^{-9} K·m^{-1}·s^{-1})。低层辐合、高层辐散进一步加强,上升运动达最强,850～450 hPa 垂直速度都小于 −2.1 Pa·s^{-1},中心值达 −2.4 Pa·s^{-1}以上,对应此时段永福站的降雨强度也达到最强,位于地面锋线北侧。此后随着锋区向东南方向移动,雨区也逐渐向东南方向移动,永福站的降水逐渐减弱,20 日 11 时降水基本结束。

广东中北部大气垂直结构特征与广西北部有明显的不同。从图 4c、4d 可以看出,850 hPa 冷锋锋区位于 27°N 以北,但在边界层有弱冷空气南侵。20 日 02 时地面冷锋位于 24.5°N 附近(从地面图分析可知),冷空气位于 900 hPa 以下,冷锋锋区伸展高度较低,其锋生结构明显偏弱(图 5b)。垂直上升运动中心在 400～600 hPa,位于地面锋面上空。从 20 日 02 时广东清远站的探空(图略)可知,抬升凝结高度(LCL)和云凝结高度(CCL)都很低,对流有效位能(CAPE)达 2264 J·kg^{-1}。边界层弱冷空气侵入暖区,促使暖区内暖湿空气抬升,触发不稳定能量释放,上升运动表现为中层大气的强烈抬升。20 日 08 时,边界层冷空气继续南下至 23.5°N 附近,对流层中下层西南急流进一步加强,浅薄冷空气触发暖区对流发展,水汽辐合抬升加强,垂直上升运动变得更加深厚(750～300 hPa),中心值达 −2.4 Pa·s^{-1}以上。广东中北部强降水与边界层浅薄冷空气的前锋对应,上升运动集中在对流层中层,降水的局地性、对流性明显;而广西北部强降水是受天气尺度锋面系统的触发整层的上升运动,对应系统性降水更清楚。

从图 4e 沿海丰站(115.19°E)的经向剖面可以看到 20 日 02 时在 22°N 和 24°N 附近存在上升运动区,22°N 附近广东东南部沿海地区的上升运动是由于海陆地形抬升作用产生,属于暖区局地对流,尺度小,在大尺度上升运动中反映不明显。24°N 附近的上升运动与广东北部边界层锋区南侧暖区产生的线状对流对应。20 日 08 时(图 4f),线状对流系统南移到广东东南部沿海高能高湿的不稳定环境下,并且广东东南部沿海西南急流加强,因此,线状对流强度明显得到加强,垂直速度也达到了 −1.0 Pa·s^{-1}以上。

3.2　涡度散度及湿度垂直分布特征

图 6 分别给出了广西北部、广东中北部和广东东南部 3 个区域平均相对湿度、涡度和散度时空剖面图。广西北部的正涡度区可伸展至 400 hPa,强中心位于 800 hPa 附近,中心达到 6×10^{-5} s^{-1},与低涡切变系统对应。辐合中心位于低层 900 hPa,达到 -4×10^{-5} s^{-1},高层辐散中心位于200 hPa,中

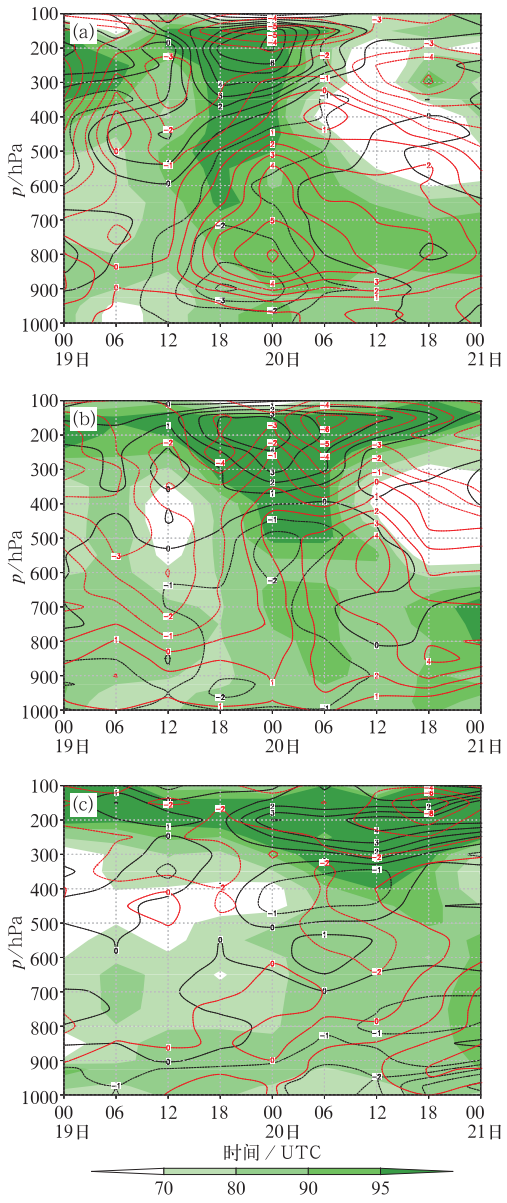


图 6 2015 年 5 月 19—21 日广西北部(24°～26°N、109°～111°E,a),广东中北部(23°～25°N、112°～114°E,b)和广东东南部(22°～23°N、115°～117°E,c)区域平均的散度(黑色线条,单位:10^{-5} s^{-1})、涡度(红色线条,单位:10^{-5} s^{-1})及相对湿度(阴影≥70%)的时间-高度剖面

Fig. 6 Time-height cross sections of divergence (black lines), vorticity (red lines) and relative humidity (shaded area ≥70%) averaged over Northern Guangxi (24°—26°N, 109°—111°E; a), Northern and Middle Guangdong (23°—25°N, 112°—114°E; b) and Southeast Guangdong (22°—23°N, 115°—117°E; c) from 19 to 21 May 2015

心值达到 7×10^{-5} s^{-1}。从 19 日 20 时至 20 日 14 时,广西北部整层相对湿度>90%,对流层中低层的正涡度增强,低层辐合与高层辐散增加,对应最强降水时段。广东中北部大气垂直结构不同于广西北部,辐合集中在对流层中层 400 hPa 左右,辐散中心位于 200 hPa。辐合辐散强度较广西北部弱,正涡度中心与散度中心不重叠,因此,总体降水强度不及广西北部。广东东南部边界层辐合清楚,前期降水主要是边界层的风速辐合遇到地形海岸线出现的局地对流性降水,而 20 日 08 时之后,低层辐合层次逐渐抬高,正涡度区也逐渐抬高,强度有所增强,高层辐散也增强。在 20 日 08 时之前,相对湿度大值区(≥80%)集中在对流层低层 800 hPa 以下,此后整层湿度增加,且高层相对湿度大值区向下伸展,对应降水强度增强。

4 中尺度对流系统发展演变特征

此次暴雨过程中,中尺度对流系统(MCS)较为活跃,组织化的程度也较高,因而造成了较强的降雨。整个过程在华南地区上空活跃着一系列对流系统,华南地区的 3 个强降水中心分别与 3 个中尺度对流系统(MCS-A、MCS-B、MCS-C)直接相关(图 7)。19 日 20 时,在广西西北部,分散的对流单体逐渐组织发展成为准圆形的中尺度对流系统 MCS-A,云团发展加强并逐渐向东南方向移动,且云团后部有对流云团发展加强。20 日 05 时对流发展至成熟阶段,此后逐渐减弱向东南方向移动。广东中北部的中尺度对流系统 MCS-B 大约在 19 日 23 时生成,随着边界层冷锋快速南压,该中尺度对流系统 MCS-B 逐渐向南移动发展,与此同时,19 日夜间在广东东南部沿海有尺度较小的对流云团生成,由于没有冷空气参与,仅由于边界层风速辐合与

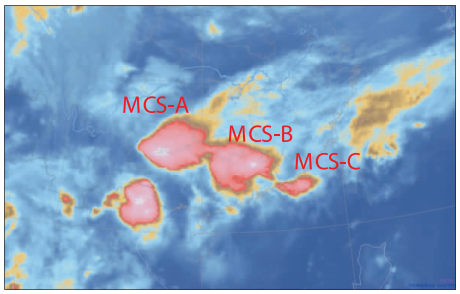


图 7 2015 年 5 月 20 日 02 时 FY-2E 红外通道云图

Fig. 7 The IR images from FY-2E at 02:00 BT 20 May 2015

地形海岸线作用产生,称其为暖区对流系统(MCS-C),其尺度更小。中尺度对流云团 MCS-B 在南移过程中与 MCS-C 合并,使得 MCS-C 加强。与此同时,中尺度对流云团 MCS-B 的后部有对流云团发展,并在南移过程中发展加强,到 20 日 13 时,后部云团发展到最强,造成广东南部强降水。

中尺度雨带是由中尺度对流系统直接产生的,但并非中尺度对流云团范围内均出现强降水,而且同样强度的中尺度对流云团内部降水强弱也不等。卫星云图只能反映中高层云团的云顶情况,而无法了解云盖下面强对流活动。本次暴雨过程广西北部和广东中北部中尺度对流云团均有线状对流发展,从对流单体的触发到组织发展为线状的中尺度对流系统,可能有多种方式(Bluestein and Jain,1985;Maddox,1980;Parker and Johnson,2000;Schumacher and Johnson,2005)。下面我们利用多普勒雷达回波资料及地面自动站加密风场及逐小时降水,分析 MCS-A 和 MCS-B 中尺度对流云团下面的线状对流演变特征及发展方式。

4.1　广西北部 MCS-A 活动特征

对流最先在贵州西部触发并发展加强。19 日 20 时,850 hPa 低涡及切变线位于贵州西部,随着低涡北侧偏东风加强,对流发展加强并向东南方向移动。20 日 00 时,贵州南部存在大片层状云回波,在回波移动前缘,开始生成一些分布不规则孤立的对流单体,少数单体逐渐排列成线状,最后连接起来,形成线状对流,从其发展方式上表现为不连续发展型(broken line)。20 日 02 时,强回波带位于贵州、广西交界处(图 8a),处于地面锋面后侧。此后,对流单体线状排列的组织化发展更为清楚,强回波单体位于回波的前端,后侧有明显的层云伸展,但结构上并不太对称,拖曳层云回波偏向于暖切一侧,从组织形态结构上属于层云拖曳型(TS 型)。从广西南宁 5 月 20 日 05:26 雷达回波,过线状对流强回波中心沿单体移动方向作雷达反射率因子垂直剖面(图9)

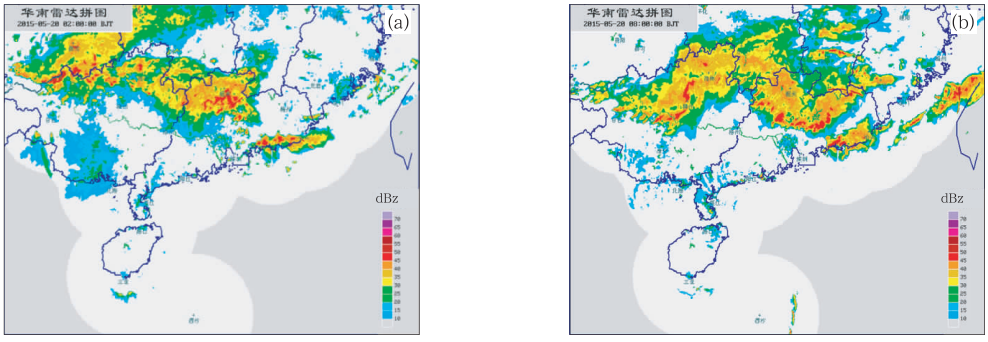


图 8　2015 年 5 月 20 日 02 时(a)和 08 时(b)华南地区雷达反射率因子产品拼图

Fig. 8　The mosaics of radar reflectivity factor at (a) 02:00 BT, (b) 08:00 BT 20 May 2015

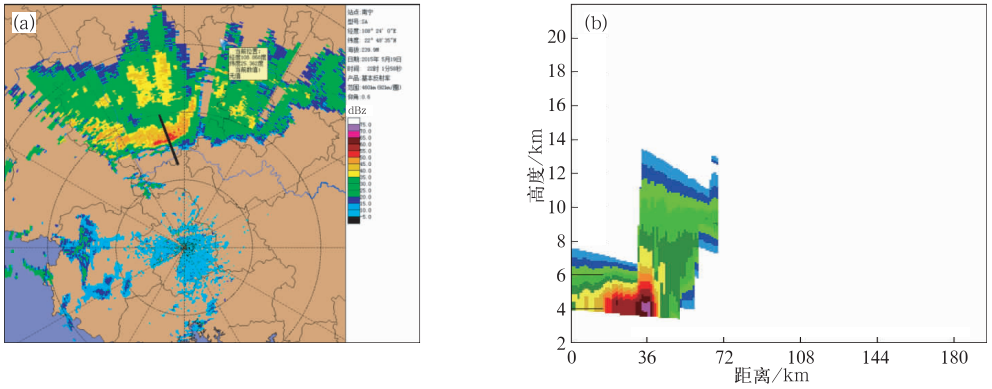


图 9　2015 年 5 月 20 日 05:26 广西南宁雷达回波(a)和对流单体回波剖面图(b)(剖线位置见图 a)

Fig. 9　Radar reflectivity of Nanning, Guangxi (a), cross section of radar reflectivity (b) at 05:26 BT 20 May 2015

可见，最强回波达到 65 dBz，45 dBz 垂直厚度不高，在 4 km 以下，是典型暴雨回波结构。20 日 08 时前后，α 中尺度气旋中心位于广西柳州附近(图 3b)，雷达回波(图 8b)反映出与中气旋结构对应的“人”字形回波特征，中气旋内辐合上升运动特别强烈，对应降水达最强(图 2)。

4.2 广东中北部 MCS-B 活动特征

19 日 17 时，广西西南沿海有分散对流单体生成，并沿西南急流向东北方向移动，与此同时，在广西东北部受低层风速脉动辐合以及局地地形抬升作用，触发分散对流。19 日 20 时，广西偏南风逐渐加强，分散的对流单体逐渐合并加强并向东北方向移动，逐渐并入广东北部层云降水中。20 日 02 时，边界层冷空气触发广东北部对流性降水迅速增强，在大片的层状云回波中有若干无组织的强对流回波单体(图 8a)。对应地面自动站观测，广东北部为西北风和东北风，对应的强降水发生在偏北风一侧。此后，分散的回波单体发展增强，在回波区南侧，若干个单体排列成近似东西向线状，层云回波拖曳在较强的线状对流带后。20 日 04 时，在广东中部佛冈一带形成了一条东西向水平尺度约 200 km 的 β 中尺度辐合线，其上有中尺度气旋发展，尺度小，仅几十千米，气旋附近的小时雨强在 50 mm 左右(图 10)。广东中北部的局地强降水与地面的风场辐合和中尺度气旋的发展密切相关。图 11 给出了沿 04 时广州雷达回波线状对流上 γ 中尺度对流单体的剖面，可以发现强回波可达 65 dBz 以上，45 dBz 的垂直厚度一直伸展到 8 km 高度，35 dBz 可以达到 10 km 高度，说明对流发展深厚。线状对流 MCS-B 快速向南侧高能高湿区发展移动，20日08时，中尺度线状对流排列完整(图 8b)。20 日 10 时，边界层冷空气继续南侵，偏北风与偏南风辐合加大，在广东从化站一带降水增强。20 日 12 时，地面辐合线位于珠江口附近，辐合线附近出现了大范围小时雨强 >50 mm 的降水。之后降水逐渐减弱，20 日 14 时，线状对流系统移到广东南部沿海。

综上，广西北部(MCS-A)和广东中北部(MCS-B)的线状对流在成熟阶段的雷达回波上都表现为层云回波拖曳在较强的线状对流带之后。MCS-A 较 MCS-B 的线状排列更为紧密，因而广西北部雨强大于广东中北部。MCS-B 线状对流移动速度较快，其上有强度不等的 γ 尺度对流单体发展，因而广东中北部局部雨强突出。

5 数值预报与主观预报误差分析

此次华南强降水过程，从预报角度来看，由于降

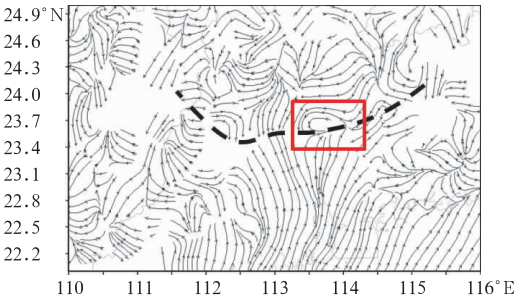


图 10 2015 年 5 月 20 日 04 时自动站资料分析的地面流场

(虚线为地面辐合线，红色方框内为中尺度气旋)

Fig. 10 The streamline of the wind from automatic weather station at 04:00 BT 20 May 2015

(Dotted line denotes the convergence line and red square denotes the mesoscale vortex)

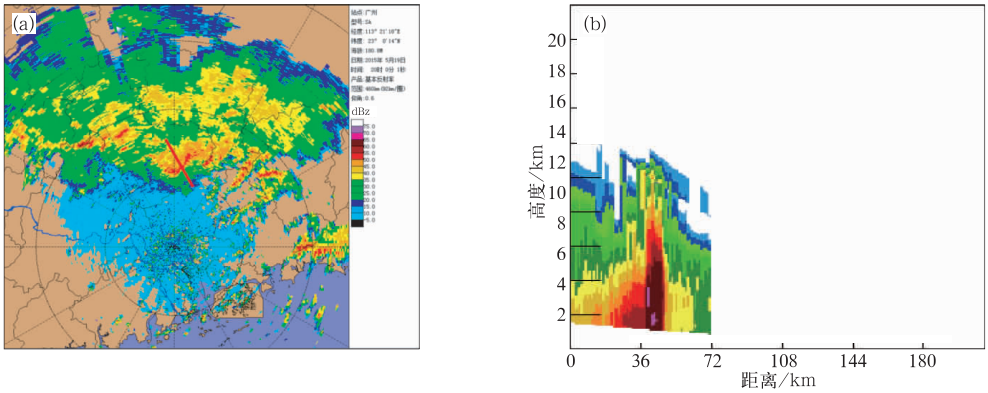


图 11 同图 9，但为 2015 年 5 月 20 日 04:00 广东广州

Fig. 11 Same as Fig. 9, but for Guangzhou at 04:00 BT 20 May 2015

水性质和特征的差异,预报难度也有所不同。降水前期,5 月 19 日 20 时至 20 日 20 时 24 h 降水预报来看(图 12a),预报员对广西北部的暴雨和大暴雨落区把握较好,但对广东中部强降水考虑不足。降水后期,从 5 月 20 日 08 时至 21 日 08 时 24 h 降水预报来看(图 12b),预报员对广东中北部的降水预报偏强,出现较大的空报,在广东东南部沿海预报偏弱。

由前述分析可见,广西北部的强降水由低涡和切变线系统造成,属于典型的暴雨天气形势,以大尺度系统性抬升为主的混合型降水,地面锋面后侧有线状对流发展(MCS-A)。大尺度全球模式对于低涡以及切变线的位置和移动速度预报都较为准确,强降水落区预报也较准确,在实际预报过程中有较高的可参考性。

对广东中北部降水预报出现了较大的空报。预报中考虑到 20 日白天到夜间,由于低层切变线系统维持在广东北部,认为广东北部仍会有较明显降水。而实况在 20 日白天广东北部降雨量并不大,相反在广东南侧降雨强。广东北部的降水,初始对流在暖区内启动,后期虽然 850 hPa 切变线仍维持在广东北部,但边界层冷空气南下触发线状对流(MCS-B),并快速南移,降水也随之南移。由于中尺度对流的发展以及强降水的产生,使得能量和水汽都大量消耗,西南风低空急流、广东北侧的切变线以及水汽条件等都较预报场明显减弱。大尺度全球模式很难正确描述出中尺度对流系统的发生发展,这可能也一定程度上导致后期对大尺度形势场的预报强度出现明显偏差,这其中也涉及到中尺度系统与大尺度系统之间的反馈和影响作用,预报难度显然更大。业务中预报员常参考华东区域中尺度模式,该模式预报范围主要为我国华东地区,模式水平分辨率为 9 km,垂直方向包括 51 层,中心点设在(30°N、117°E),网格点数为 760×600。该模式以美国 GFS 分析场为初猜场,ADAS 同化后的分析场为初始场,分别在北京时 08、14、20 和 02 时起报,预报时效为 72 h。对华东区域中尺度模式预报效果的检验(徐同等,2016)也表明,该模式有较好的预报效果。从本次过程华东 9 km 区域中尺度模式的预报来看(图 13),中尺度模式对于快速向南发展的线状对流有一定的体现,这也给业务预报提供更多的参考。鉴于全球和区域模式各自的特点,实际预报中要根据降水的特点和性质,结合大尺度和中尺度模式对强降水落区做相应调整。大尺度模式对于系统性的降水预报较准确,但对中尺度对流降水的考虑不足,这方面需要更多地发挥中尺度模式的参考价值,根据对流系统的发展演变对强降水落区调整,而相应大尺度降水的范围和强度要减小。

对于广东东南部沿海暖区暴雨,由于尺度小,大尺度模式的预报能力十分有限,且中尺度模式也未能准确预报。海陆地形及海陆热力差异的外强迫作用,导致的沿海暖区暴雨的预报能力十分有限,高分辨率中尺度数值模式的预报效果也不尽人意(何立富等,2016;Wu and Luo,2016)。预报员可以借助实况资料(实况降水、雷达资料等)和边界层向岸风的变化等资料以及经验给予订正。

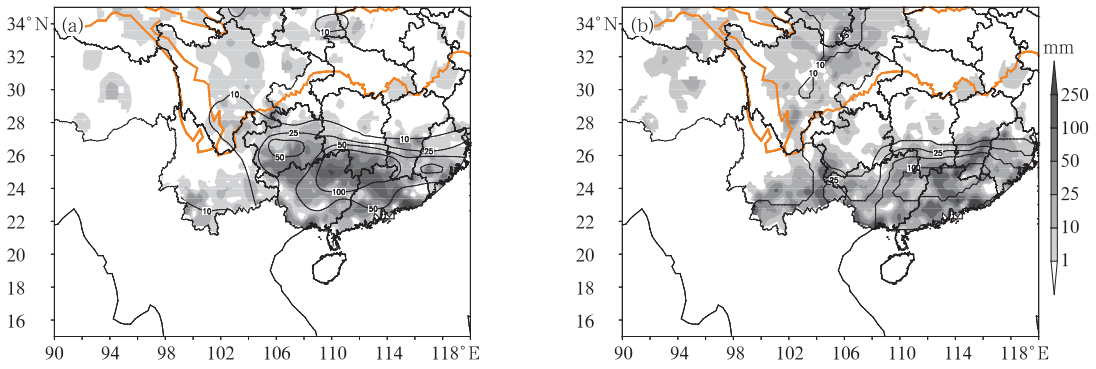


图 12　2015 年 5 月(a)19 日 20 时至 20 日 20 时和(b)20 日 08 时至 21 日 08 时 24 h 降水实况(阴影)以及对应预报员主观预报(等值线)

Fig. 12　Observation of the 24 h rainfalls (shaded area) and the corresponding subjective rainfall forecast of forecasters (contour) during (a) 20:00 BT 19 to 20:00 BT 20, (b) 08:00 BT 20 to 08:00 BT 21 May 2015

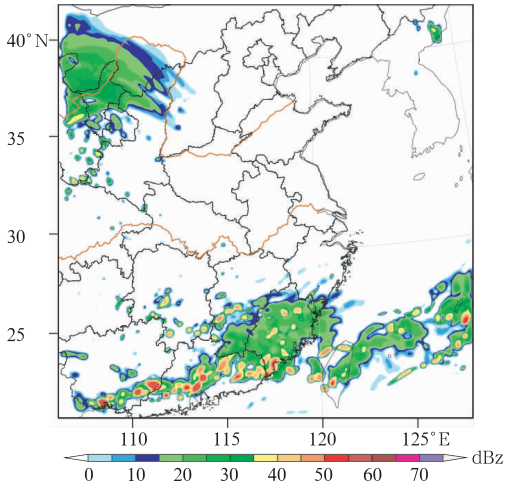


图 13 华东区域中尺度模式 2015 年 5 月 19 日 20 时起报的 20 日 17 时雷达反射率

Fig. 13 Radar reflectivity of 17:00 BT 20 May from Huadong (eastern China) regional mesoscale model (SMB-WARMS) starting from 20:00 BT 19 May 2015

6 结论与讨论

受东移高空槽和低层低涡切变线直接影响，2015 年 5 月 19—20 日在贵州中南部、华南等地出现强降雨天气。3 个强降水中心与 3 个中尺度对流系统(广西北部线状对流 MCS-A、广东中北部线状对流 MCS-B 和广东东南部暖区对流 MCS-C)的发生发展直接相关，其大尺度垂直结构以及中尺度特征有明显异同。

(1) 广西北部暴雨主要受 850 hPa 低涡切变线以及地面冷锋的影响，属于比较典型的低涡暴雨形势。强降水时段伴有 α 中尺度(约 200 km)的锋面气旋，与对流层中低层正涡度大值区及强低层辐合、高层辐散对应。斜压锋生结构明显，锋面抬升促使锋面附近及锋后整层大气强烈上升。中尺度对流系统 MCS-A 活跃，低涡切变线前缘(地面冷锋后)有线状对流发展，排列较为紧密，降雨量大。线状对流系统随低涡向东南方向移动，持续时间较长。广西北部低涡切变线系统性暴雨过程属于较为典型的暴雨过程，大尺度全球模式预报较为准确，在实际预报过程中有较高的可参考性。

(2) 广东中北部暴雨最初由暖区中分散的对流向东北方向合并发展，后期随着东段冷锋南压，边界层冷空气在层状云区南侧触发对流，逐渐排列形成近东西向线状对流 MCS-B。广东中北部暴雨对流性质更突出，中层上升运动强烈。低层大尺度辐合较弱，并且与正涡度中心不对应。边界层中尺度辐合线及其上的 γ 中尺度气旋对强降水起重要作用。线状对流 MCS-B 移动速度较快，排列略松散，但其上有强度不等的 γ 中尺度对流单体发展，总体降雨量不及广西北部，但局部雨强突出，强回波顶更高。线状对流 MCS-B 的移动发展机制明显不同于 MCS-A，对流单体在其南侧高温高湿的环境中新生传播，使得对流单体快速向南移动。广东中北部的暴雨过程，对流性质更为清楚，大尺度全球模式很难正确描述出中尺度对流系统的发生发展，中尺度模式有一定的体现，并且这其中可能涉及到中尺度系统与大尺度系统之间的反馈和影响作用，预报难度显然大。

(3) 广东东南部暴雨是边界层风速辐合及地形海岸线抬升作用产生的暖区对流降水，其降水质心低，降水效率高。3 个对流系统的最强水汽辐合均集中在 850 hPa 以下，广东东南部暴雨的最强水汽辐合层次最低，边界层辐合特征最清楚。广东东南部的暖区暴雨，大尺度模式的预报能力十分有限，中尺度模式也未能准确预报，预报难度大，预报员可以借助实况资料(实况降水、雷达资料等)和边界层向岸风的变化等资料以及经验给予订正。

本次华南暴雨过程，不同区域降雨性质不同，有一定的预报难度。无论从诊断还是预报来讲，对流单体的组织维持机制、中尺度和大尺度系统之间的相互作用及反馈机制、地形及海陆分布对强降水产生的作用、中尺度数值模式对华南暖区暴雨的模拟及诊断能力等科学问题都值得进一步深入研究。在判断中尺度对流系统的触发、对流启动的位置、暴雨落区等预报问题上，对暴雨过程中不同性质、不同尺度降水的细致分析以及中尺度模式的参考和应用应该有更加重要的地位。

参考文献

陈红，赵思雄，2000. 第一次全球大气研究计划试验期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断研究[J]. 大气科学，24(2)：238-252.

陈红，赵思雄，2004. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验(HUAMEX)期间暴雨过程及其环流特征研究[J]. 大气科学，28(1)：32-47.

何立富，陈涛，孔期，2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报，27(5)：559-569.

何立富，周庆亮，陈涛，2009. “05.6”华南特大暴雨过程大尺度水汽输送特征[J]. 气象与减灾研究，32(1)：10-16.

何立富，周庆亮，陈涛，2010. “05.6”华南暴雨中低纬度系统活动及相互作用[J]. 应用气象学报，21(4)：385-394.

蒋建莹，汪悦国，2014. 卫星水汽图像上两次暴雨过程的干、湿特征对比分析[J]. 气象，40(6)：706-714.

廖胜石，罗建英，蔡芗宁，2007. 2005 年 6 月华南致洪暴雨过程中 FY-2C 卫星 TBB 场分析[J]. 气象，33(1)：81-86.

林良勋，冯业荣，黄忠，等，2006. 广东省天气预报技术手册[M]. 北京：气象出版社：119.

罗建英，廖胜石，黄归兰，等，2009. 广西前汛期锋前暖区暴雨过程的模拟与分析[J]. 气象，32(10)：50-57.

蒙伟光，戴光丰，张艳霞，等，2012. 华南局地锋生及对流系统发展的模拟分析研究[J]. 气象学报，70(3)：387-401.

蒙伟光，王安宇，李江南，等，2003. 华南前汛期一次暴雨过程中的中尺度对流系统[J]. 中山大学学报(自然科学版)，42(3)：72-77.

蒙伟光，王安宇，李江南，等，2004. 华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析[J]. 大气科学，28(3)：330-341.

慕建利，王建捷，李泽椿，2008. 2005 年 6 月华南特大连续性暴雨的环境条件和中尺度扰动分析[J]. 气象学报，66(3)：437-451.

闰敬华，郑彬，苏百兴，等，2004. 华南暖区暴雨的一种重力波触发机制[J]. 气象学报，62(12)：623-930.

孙建华，赵思雄，2000. 一次罕见的华南大暴雨过程的诊断与数值模拟研究[J]. 大气科学，24(3)：381-392.

孙建华，赵思雄，2002. 华南“94·6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究：Ⅱ. 物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用[J]. 大气科学，26(5)：633-646.

陶诗言，1980. 中国之暴雨[M]. 北京：科学出版社.

陶诗言，1996. 1994 年东亚夏季风活动的异常与华南的特大洪涝灾害：Ⅰ. 大气环流的异常[C]// 1994 年华南特大暴雨洪涝学术研讨会论文集. 北京：气象出版社：1-5.

伍志方，曾沁，胡胜，等，2009. 珠江三角洲大暴雨的多普勒特征及形成机制[J]. 自然灾害学报，18(5)：119-126.

伍志方，曾沁，吴乃庚，等，2011. 广州“5.7”高空槽后和“5.14”槽前大暴雨过程对比分析[J]. 气象，37(7)：838-846.

徐同，李佳，杨玉华，等，2016. SMS-WARMS V2.0 模式预报效果检验[J]. 气象，42(10)：1176-1183.

薛纪善，1999. 1994 年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京：气象出版社：185.

张晓惠，倪允琪，2009. 华南前汛期锋面对流系统与暖区对流系统的个例分析与对比研究[J]. 气象学报，67(1)：108-121.

张晓美，蒙伟光，张艳霞，等，2009. 华南暖区暴雨中尺度对流系统的分析[J]. 热带气象学报，25(5)：551-560.

周秀骥，薛纪善，陶祖钰，等，2003. 98 华南暴雨科学试验研究[M]. 北京：气象出版社：370.

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.

Maddox R A, 1980. Mesoscale convective complexes[J]. Bull Amer Meteor Soc, 61(11): 1374-1387.

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.

Wu Mengwen, Luo Yali, 2016. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitation in China mainland during pre-summer rainy season of 2015[J]. J Meteorol Res, 30(5): 719-736.