

支树林,陈娟,包慧濛. 2015. 一次副热带高压边缘上大暴雨的中尺度特征分析. 气象, 41(10):1203-1214.

一次副热带高压边缘上大暴雨的中尺度特征分析^{*}

支树林 陈娟 包慧濛

江西省气象台,南昌 330046

提 要: 文章利用常规和自动气象站观测资料、卫星、闪电定位、雷达资料及 NCEP 分析资料,对 2014 年 5 月 24—25 日赣西地区致灾大暴雨的中尺度对流条件和对流系统的演变特征进行了分析。结果表明:(1)高空槽东移、副热带高压边缘暖湿气流加强,以及冷空气影响,构成了此次大暴雨的天气背景条件。(2)地面中尺度辐合线是导致 M β CS 发展及加强的重要因子;多个结构密实、边界光滑的 M β CS 在赣西地区长时间维持,导致相应地区出现持续强降水天气;此次大暴雨过程中 TBB $\leq -62^{\circ}\text{C}$ 的冷云云团位置和强度对地面降水有很好的指示作用,尤以 TBB $\leq -72^{\circ}\text{C}$ 的中心区与强降水中心区吻合最好。(3)此次暴雨过程 5 min 雨量分布与地闪数的分布较重合,地闪跃增时刻在地面降水增大前出现,提前时间约 10 min 左右。(4)雷达径向速度图上的中尺度涡旋是导致此次暴雨发生的重要因素之一;在赣西地区存在显著的径向风辐合特征,且低空强西南风急流上叠加深厚径向风辐合区,有利于降水的加强和维持;另外在动力辐合和山地地形共同作用下,强劲的偏南风急流携带充沛水汽在赣西地区汇合,导致该地区出现连续性强降水。(5)最大雷达回波强度的变化对地面 5 min 雨强的变化有辅助参考,但预示性不明显;雷达风廓线产品对地面强降水的发生有较好的预报辅助作用,在此次大暴雨过程中该产品对赣西地区强降水预报辅助作用的“提前量”达 2 h。

关键词: 中尺度对流系统,垂直风切变,基本反射率,雷达风廓线产品

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.003

Mesoscale Characteristics Analysis of Rainstorm on the Edge of Subtropical High

ZHI Shulin CHEN Juan BAO Huimeng

Jiangxi Meteorological Observatory, Nanchang 330046

Abstract: Based on conventional and automatic weather station observation data, satellite, lightning location, radar data and NCEP reanalysis data, this paper analyzed the mesoscale convection condition and evolution characteristics of convective system in the disastrous rainstorm that happened in the west of Jiangxi from 24 to 25 May 2014. The conclusions are as follows. (1) Synoptic background of this rainstorm consists of eastward the movement of upper trough, strengthening of warm wet air in the edge of subtropical high, and the effect of cold air. (2) Surface mesoscale convergence line contributes to development and strengthening of M β CS. The long-time lasting of many dense M β CSs with smooth boundary in western Jiangxi leads to continuous heavy rainfall in the corresponding region. The cold cloud's position and intensity of TBB $\leq -62^{\circ}\text{C}$ are good indicators for surface precipitation, especially the center of TBB $\leq -72^{\circ}\text{C}$ coincides with the rainfall center best. (3) In this rainstorm, distribution of 5 min rainfall is almost in accord with distribution of CG lightning number, which happens 10 min earlier than jump of surface

* 中国气象局关键技术集成及应用项目(CMAGJ2014Z07)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406002)和 2015 年江西省气象局课题“强对流天气的格点化预报方法研究”共同资助

2014 年 8 月 19 日收稿; 2015 年 8 月 15 日收修定稿

第一作者:支树林,主要从事雷达气象应用和短临预报. Email:zhisl00@126.com

precipitation. (4) Mesoscale vortex in radar radial velocity graph is one of the most important factors for this rainstorm. Western Jiangxi presents notable wind convergence and wind speed divergence. Low-level strong southwest jet's overlying deep "radial wind convergence zone" helps the strengthening and maintaining of the rain. In addition, with the help of dynamic convergence and mountainous topography, strong southerly jet with abundant water vapor meets in the west of Jiangxi, causing continuous heavy rainfall. (5) The change of biggest radar echo intensity assists estimating the change of 5 min rainfall intensity, but it is not a good indicator. Radar wind profile products are good indicators of heavy rainfall on the surface, which forecasted this heavy rainfall seen in western Jiangxi 2 h in advance.

Key words: mesoscale convective system, vertical wind shear, base reflectivity, radar wind profile products

引 言

江西三面环山,西部地区山峦起伏,境内有幕府山、武功山和罗霄山等诸多山脉分布,地貌复杂;其中萍乡市隶属赣西地区,而萍乡市上栗县地处萍乡市北部,为萍水和栗水的源头,这两条溪流具典型“易涨易退”山溪性洪水特征;山丘洪灾爆发迅猛,常历时短,破坏性极大。每年4—6月,赣西地区常受冷暖空气交汇影响,兼受复杂地形作用,强对流和暴雨天气频繁出现,常为江西省的暴雨中心之一,给防汛抗洪带来了极大压力。

在预报副热带高压(以下简称副高)控制下暴雨天气的着眼点方面,陈德林等(1999)总结发现,副高控制下的暴雨天气发生的前一天,中低层中尺度条件不稳定区和地面冷锋或干线的形成,是这类暴雨天气最重要的前期特征,也是24 h短期预报的主要着眼点。徐远波等(2009)发现,暴雨发生前持续数日的高温高湿状态,会造成大气不稳定能量不断积累,能为中小尺度系统形成创造有利的环境条件,地面冷锋和中小尺度地形的抬升则为 γ 中尺度系统的发展提供了很好的触发条件。然而,副高控制下或副高边缘发生的局部大暴雨天气还是常会被漏报。在预报失误的原因分析方面,吕校华等(2011)认为,预报员对副高控制下的低层到地面天气系统及变化的分析不够,以及对数值模式预报产品的误差了解不足,就会导致漏报局地暴雨天气。在复杂地形处形成的大暴雨天气成因分析方面,地形可以作为天气系统的触发机制和组织机制,同时也可以引起天气系统的增强、减弱以及影响天气系统的移动等。如岳甫璐等(2014)分析了“7·21”北京大暴雨过程,发现暴雨发生前,中低层强的正涡度中心和负散度中心配合组织起了一个很好的垂直环流圈,它加强

了迎风坡气流的上升运动,且位涡中心与暴雨落区具有良好的对应关系。俞小鼎(2012)认为强烈的暖湿低空急流遇到燕山山脉阻挡,低层会出现回流;翻越燕山的气流会受到山脉地形的拖曳作用产生减速,它们都导致低空急流在北京地区形成明显的低层水汽通量辐合,为“7·21”北京大暴雨的产生提供了很充足的水汽源。孙健等(2002)研究了1998年6月8—9日华南暴雨过程的中尺度结构,发现华南地区的复杂地形在这次暴雨过程中主要为动力性作用。朱素行等(2010)发现中尺度山脉迎风、背风坡均以层云降水为主,层云降水强度在迎风坡强于背风坡;对流降水在迎风坡主要为浅对流,背风坡主要为深对流,对流降水强度在背风坡强于迎风坡。近年来,随着地面加密自动站的布设、新一代天气雷达网的建设、遥感技术的广泛应用以及数值模式的发展,局地暴雨天气系统活动的监测能力有了较大提高,这对揭示暴雨系统的发生、发展机理发挥了较大的作用,同时中尺度暴雨研究也相应有了很大发展。如李津等(2006)利用卫星、雷达、风廓线、GPS/MET和自动站等资料对暴雨的中小尺度特征进行了分析,揭示了一些暴雨过程的形成机理。王令等(2012)分析了风廓线雷达的水平风垂直廓线演变特征,发现当低空急流加强,或有扰动生成,高空有波动等都预示着天气的转变。杨成芳等(2012)用加密探测资料分析了冷式切变线类大暴雨的动力结构,认为风廓线对降雨的起止、盛衰有较强信号。尽管如此,国内对副高控制下的局地大暴雨天气成因及中尺度特征分析还很缺乏,对处于副高控制下或位于副高边缘的复杂地形处发生的暴雨过程成因及中尺度特征分析尤其少。

2014年5月24—25日,赣西地区经历了罕见的强降水过程,此次强降水过程发生在副高控制下,强度大、持续时间长,对人民生命安全和国民经济造

成严重损失,尤其是萍乡市上栗县遭受大暴雨袭击,损失惨重。由于此次大暴雨过程发生在副高控制下、地形条件非常复杂的赣西山区,且强降水时段之一发生在凌晨,气象灾害预警滞后,加之前期的预报在降水量级和强降水落区上存在较严重偏差,且对较大区域上的大暴雨和集中性强降水未能及时更正和跟踪预警,致使整体的预报预警效果不佳,也让后期的气象工作陷入尴尬和被动局面。因此,加强对此次大暴雨过程的研究,有助于掌握赣西致灾性强降水和暴雨的发生特点和发展规律,增强此类强天气的预报预警能力,提升防洪抗灾应对水平。

本文利用 NCEP/NCAR 分析资料、卫星、闪电定位仪、多普勒雷达和自动气象站等资料,对此次暴雨过程进行研究,分析和总结了有利于中尺度对流系统发生的天气尺度环流背景、中尺度环境条件以及对流云团的演变特征,为此类暴雨预报预警和减灾服务提供一定的参考依据。

1 降水概况与灾情

2014 年 5 月 24 日 18 时至 25 日 09 时,赣西地区出现了明显的暴雨甚至大暴雨天气。萍乡市上栗县遭受了大暴雨和特大暴雨袭击,其中上栗县城雨量达 181.6 mm,上栗县枣木水库雨量达 239.1 mm,为江西省大暴雨中心。持续较长时间的降雨,造成该县 10 个乡镇不同程度受灾,县城内部分街道被淹,乡村遭遇洪水围困,低洼处水深超过 1 m,受灾人口达 40 万,倒塌房屋 2100 多间,其中农房 1 600 多间,严重损坏房屋 500 余间,农作物受灾面

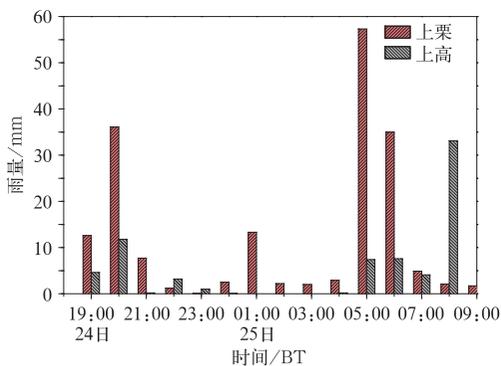


图 1 2014 年 5 月 24 日 18 时至 25 日 09 时赣西地区两个站点的逐小时雨量(单位: mm)

Fig. 1 Hourly precipitation at two stations in western Jiangxi from 18:00 BT 24 to 09:00 BT 25 May 2014 (unit: mm)

积 2600 余 hm^2 ,直接经济损失 4 亿多元。同时,赣江中下游部分支流水位上涨,个别水库甚至出现险情。

由于赣西地区的大暴雨天气过程主要发生在萍乡市中北部及宜春和新余两市西部地区,本文选取了大暴雨中心上栗县枣木及其周边地区进行分析。从图 1 可以看到:强降水过程主要发生在两个时段,分别为 24 日 18—21 时和 25 日 04—08 时。

2 环流背景和中尺度对流条件分析

2.1 环流背景特征

研究表明,暴雨是在大尺度环流背景下,由不同尺度天气系统相互作用而形成的,暴雨的强度和出现的时间与中尺度扰动密切相关(杨学斌等,2012;张晓美等,2009;方翀等,2012;张玉玲,1999)。高空槽东移和副高边缘暖湿气流加强的共同作用,构成了有利于赣西地区形成大暴雨的天气背景条件。

5 月 24 日 08:00(北京时,下同),500 hPa(图略)中纬度环流形势为两槽一脊型,两高空槽分别位于新疆东部至西北地区东部,以及华北、江淮西部到江汉一带。东段槽的底部伸至湘东到赣中一带,赣北地区普遍受低纬槽前西南气流影响,赣西地区则位于槽底附近。该高空槽的北段东移迅速,24 日 20:00(图 2a),北段已移至黄海海上,而南段仍维持在湘赣交界处,且北方冷空气逐渐南下,赣西地区的西南风逐渐转成偏西风,风速也逐渐加大。588 dagpm 等高线北界一直位于湘北、赣西北到浙南一带,且稳定少动;赣北地区处副高边缘,赣西地区则位于 588 dagpm 线附近。受槽底东移和副高边缘暖湿气流共同影响,赣西和赣西北地区的降水逐渐增强;江西中南部地区处副高内,降水则不强。25 日 08:00,湘赣边界附近的高空槽东移至浙江南部到福建中部,江西转处槽后西北气流控制,全省降水渐趋东移减弱。24—25 日副高 588 dagpm 等高线稳定维持,其北界位于赣西和赣北地区少动,26 日后方可南落,副高的稳定维持也有利于其西北侧的西南暖湿气流向赣西地区不断输送水汽。

700 hPa 上(图略),24 日 08:00,切变线位于华北南部、黄淮、江淮西部、江汉到湖南西北部地区,湖南北部存在着明显的风速辐合。20:00 切变移至山东中部、江苏北部、安徽南部、江西西北部到湖南北

部一带,且湖南北部和江西北部地区的西南风明显增强,受该切变线和增强的西南风影响,江西西北部雨势明显。赣西地区处切变线南侧加强的西南气流里,降水呈逐渐增强的趋势。该切变线移动缓慢,25日08:00仍在赣西北维持,20:00才移至赣东地区。850 hPa上,24日08:00,切变线位于湖南西北部地区,赣西地区受切变东侧 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南暖湿急流影响,水汽持久充沛;该切变线东侧的湖南西部和广西等地风速则达 $14 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,因此西南急流在湖南和江西中部形成风速辐合。20:00(图2b),切变线北抬,西南风速略减小,但仍有 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,赣西北地区风向顺转,形成了风向和风速的辐合。随着北方冷空气的南下,这种特征在24日夜间(图2b)到25日凌晨进一步明显,切变线随之南移,冷式切变线在赣西和赣西北地区维持,切变线南

侧的西南急流再度加强,风速达 $14 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,风速辐合仍位于赣西地区,强烈的低空辐合加速了垂直环流,使大气暖湿空气得到抬升,从而造成了赣西地区强降水的持续和加强。25日上午切变线逐渐东移减弱。925 hPa上(图略),24日夜间至25日早晨,西南风速持续增大,25日早晨赣南的风速达到了 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,同时异常充沛水汽向北输送,恰好在赣西地区与冷空气结合,增强了形成大暴雨发生的动力和水汽条件,促进了赣西地区出现大暴雨天气。

从24日20:00的中尺度分析结果(图3)可以看到,赣西地区受副高控制,500 hPa上有短波槽,700~925 hPa上有切变影响,地面有辐合线存在,为该地区强对流天气的形成和加强提供了很好的动力条件。850 hPa有暖脊东伸,为萍乡、宜春等地的强降水天气提供了良好的热力条件;925和850 hPa

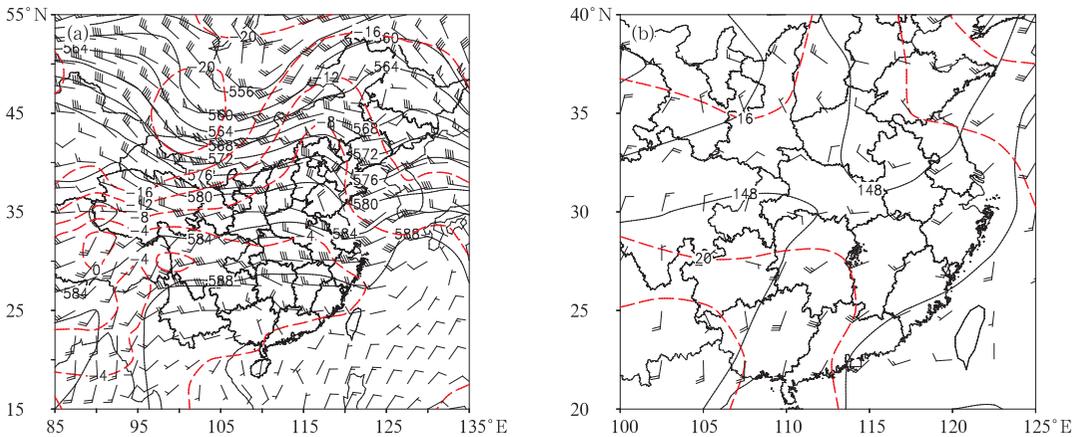


图2 2014年5月24日20时500 hPa (a)和850 hPa (b)环流形势
(黑线为位势高度,单位:dagpm;红色虚线为等温线,单位:℃;黑点为大暴雨站点)

Fig. 2 Synoptic situation at 500 hPa (a) and 850 hPa (b) at 20:00 BT 24 May 2014
(Black lines denote geopotential height, unit: dagpm; red lines denote isotherm, unit: ℃; dots denote stations with severely torrential rains)

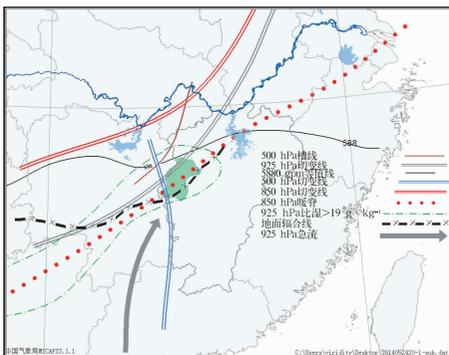


图3 2014年5月24日20:00中尺度分析结果
Fig. 3 Result of mesoscale analysis on the weather at 20:00 BT 24 May 2014

有强西南急流伸向赣西地区,925 hPa上比湿 $\geq 19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的异常高湿区就位于湖南中部和江西西部等地,从而为赣西地区的大暴雨提供了充沛的水汽,得以形成致灾性强降水。

2.2 对流条件分析

暴雨的产生除需要较好的动力条件外,还需要充沛的水汽和不稳定层结条件,因此分析24和25日的探空资料。考虑萍乡和南昌的直线距离约230 km,离长沙约100 km,且长沙位于萍乡的上游,选取了长沙站的探空资料进行分析,如图4a和表1所示。

从图 4a 可以看到,中低层湿度较大,垂直方向上低层(925~700 hPa)具有中等强度风速切变,暖云层(LCL 到 0°C 层高度)厚度较厚,这些条件有利于产生较强降水。另外 500 hPa 附近存在干空气层,与低层湿层配合,有利于对流性降水产生。

从表 1 可以看到:24 日白天到夜间,K 指数明显偏大,SI 指数<0,CAPE 值在 20:00 达到最大,表明对流性条件好,不稳定能量高。随着 24 日夜间到 25 日凌晨的降水天气逐渐影响,赣西地区的对流性条件逐渐变差。0~6 km 风垂直切变在 11~17 m·s⁻¹,与丁一汇等(1978)给出的暴雨环境风垂直切变阈值结果相近。24 日白天到夜间 0~6 km 风

垂直切变明显增大,有利于强迫抬升,对流加强,促进中小尺度系统的发展和维持。

24—25 日大气可降水量(PWAT)经历了先增大后减小的过程。24 日白天和晚间 PWAT 均>55 mm,表明水汽较充沛;25 日早晨 PWAT 降至 41 mm,相应地,降水渐趋减弱。

24 日至 25 日 $\Delta\theta_{se(500-850)}$ 均为负值(图 4b),且 24 日异常偏小,25 日 08:00 后才变大,表明大暴雨发生前后赣西地区均表现为层结不稳定,且暴雨落区位于该值低值区的前方或附近。在高空槽、中低层切变线,同时配合不稳定能量释放的作用下,赣西地区出现了对流性强降水和大暴雨。

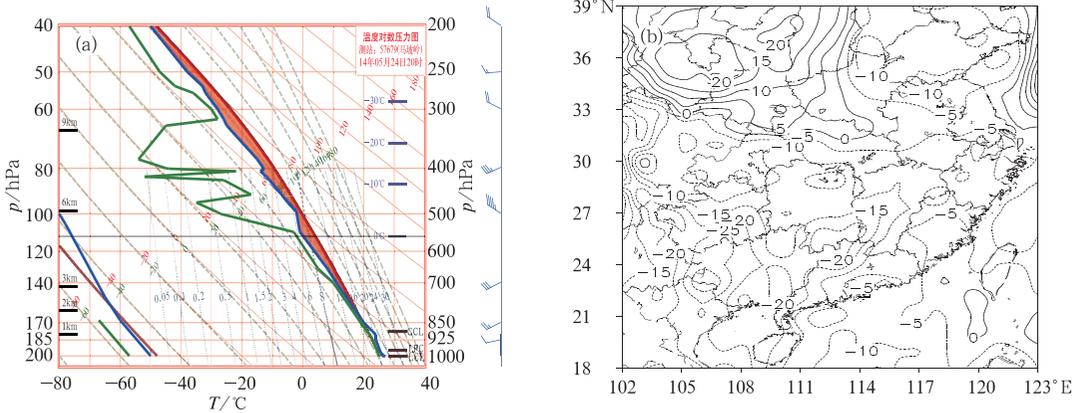


图 4 2014 年 5 月 24 日 20 时长沙探空站 T-lnp 图(a)和 $\Delta\theta_{se(500-850 \text{ hPa})}$ 分布(b,单位:°C)

Fig. 4 Skew-T diagram of Changsha (a) and $\Delta\theta_{se(500-850 \text{ hPa})}$ value distribution (b, unit: °C) at 20:00 BT 24 May 2014

表 1 2014 年 5 月 24—25 日长沙探空的部分物理量

Table 1 Some sounding physical quantities at Changsha Station from 24 to 25 May 2014

物理量	24 日 08:00	24 日 20:00	25 日 08:00
K 指数/°C	40	40	3.0
SI 指数/°C	-2.1	-1.1	0.2
CAPE/J·kg ⁻¹	0	1412.6	0
0~6 km 风切变 /m·s ⁻¹	11.4	17	13.0
0~2 km 风切变 /m·s ⁻¹	12.4	9	3.6
$\Delta\theta_{se(500-850 \text{ hPa})}/\text{°C}$	-24.31	-22.35	-12.52
PWAT/mm	55.6	64.5	41.0

(陶诗言,1980)。为了还原此次赣西地区致灾大暴雨过程中的中尺度对流系统演变特征,本文利用卫星云图、地面观测资料、地闪观测资料、多普勒雷达资料和 NCEP 分析资料,对中尺度对流系统的特征进行了分析。

3.1 中尺度系统的演变特点

此次赣西地区暴雨范围相对较大,从赣西地区的气象要素特征以及卫星云图演变可以看到中尺度系统(mesoscale convective system, MCS)特征比较明显,具体表现为多个对流云团组成的 MCS 持续影响。

3.1.1 红外云图特征

从 FY2E 卫星红外云图(图略)可以看到,24 日凌晨贵州中部和重庆南部各有对流云团发展,在东移的过程中,重庆南部的对流云团迅速扩大,而贵州

3 中尺度对流系统特征分析

暴雨和强对流是在一定的大尺度环流形势下,由嵌入天气尺度系统中的中小尺度系统直接造成的

中部的对流云团则逐渐减弱,并与北部的云团合并。合并后的对流云团继续东移,但强度逐渐减弱,13:00到达湖北东部和华南东北部时,其结构已变得松散。对流云团进入赣北后,逐渐分裂成两个对流云团单体,其中位于萍乡和宜春等地的对流云团面积较大,强度维持,且位置少动;而位于九江北部的对流云团则面积缩小,且快速东移消失。21:00后,位于萍乡和宜春附近的对流云团缓慢向东南方向移动,并减弱消散,同时,在湖南中北部又有分散的小块对流云团迅速发展,并在东移的过程中合并加强。

25日03:00后对流云团陆续进入江西境内,强度进一步加强,形成了多个结构密实、边界光滑的M β CS(图5a),这导致赣西地区雨势的迅速加强并

形成暴雨。从MCS的演变趋势可以看到,造成25日凌晨赣西地区强降水的中尺度对流云团主要有两块,且西部东移迅速的对流云团与东部移动缓慢的对流云团合并,合并后在06:00对流云团强度达最强,强中心就位于萍乡北部的上栗县附近(图5b),且其位置少动,具中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)特征,其直到08:00后强度逐渐减弱。

这种夜间到凌晨期间加强的MCS大都降水效率高,常形成暴雨。由于MCSs在赣西地区的长时间维持,因而导致这些地区形成了持续强降水天气并造成灾害。

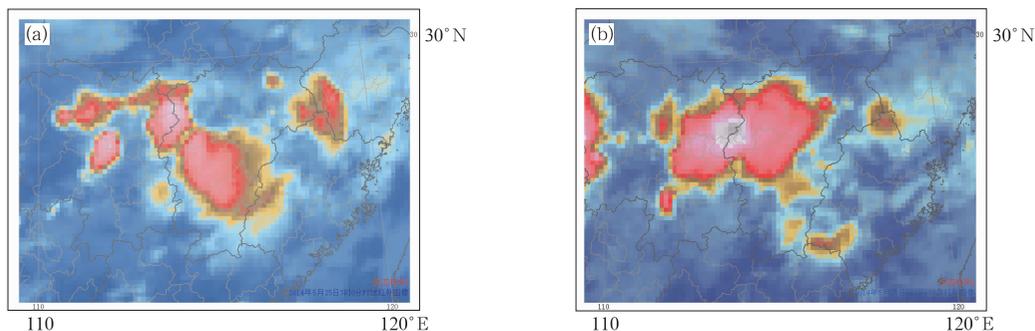


图5 2014年5月25日03:00(a)和06:00(b)的红外卫星云图

Fig. 5 Infrared satellite images at 03:00 (a) and 06:00 (b) BT 25 May 2014

3.1.2 TBB变化特征

从FY2E的TBB资料可以看到,24日14:00开始,湖南境内即有 $TBB \leq -52^\circ\text{C}$ 的对流云团东移; $TBB \leq -62^\circ\text{C}$ 的冷云云团有三块,分别位于湖南省中部(A)、东北部(B)和湖北省东南部(C)。在东移过程中A云团强度少变,C云团逐渐减弱,而B云团则强度加强(图略)。17:00B云团主体位于江西省萍乡市北部和宜春市西部地区,其强度进一步增强至 $TBB \leq -62^\circ\text{C}$ (图6a),造成此次大暴雨过程中的第一轮强降水天气,强中心所在的江西省铜鼓县雨量在17:00—18:00达到最大。18:00后,C云团的强度先加强后减弱,A云团则与B云团合并,强度基本维持,位置略有南移(图略)。21:00, $TBB \leq -62^\circ\text{C}$ 的面积约12950 km²左右,其主要影响区域为萍乡市中南部、宜春市南部、吉安市北部和新余市等地(图6b)。该对流云团空间尺度较大,先后影响了赣北的偏西地区和整个赣中;维持时间长,从中午生成到25日凌晨后逐渐减弱,持续时间超过

10 h,为较典型的MCC。

25日03:00后,B云团方才渐趋减弱消散,同时,湖南中部和东部又有对流云团发展。将 $TBB \leq -62^\circ\text{C}$ 的新生冷云云团分别标记为D和E(图6c),追踪其路径和强度的变化,可以看到,随着时间的推移,D和E的范围和强度都呈迅速增大和增强的趋势,尤其表现为 $TBB \leq -72^\circ\text{C}$ 的区域明显扩大。由于D云团移动缓慢,而E云团移动较快,两者逐渐合并,强度进一步增强。06:00, $TBB \leq -72^\circ\text{C}$ 的中心就位于萍乡市境内,对应该处的地面降水也在04:00—07:00最强,冷云中心与地面降水中心的位置非常吻合(图6d)。

从TBB的变化可以看到,此次大暴雨过程期间, $TBB \leq -62^\circ\text{C}$ 的冷云云团位置和强度的变化对地面降水的变化有很好的指示作用,尤其 $TBB \leq -72^\circ\text{C}$ 的中心区更是与强降水中心完全吻合,因此应用TBB资料有助于指导开展此次大暴雨过程的强降水预报和预警。

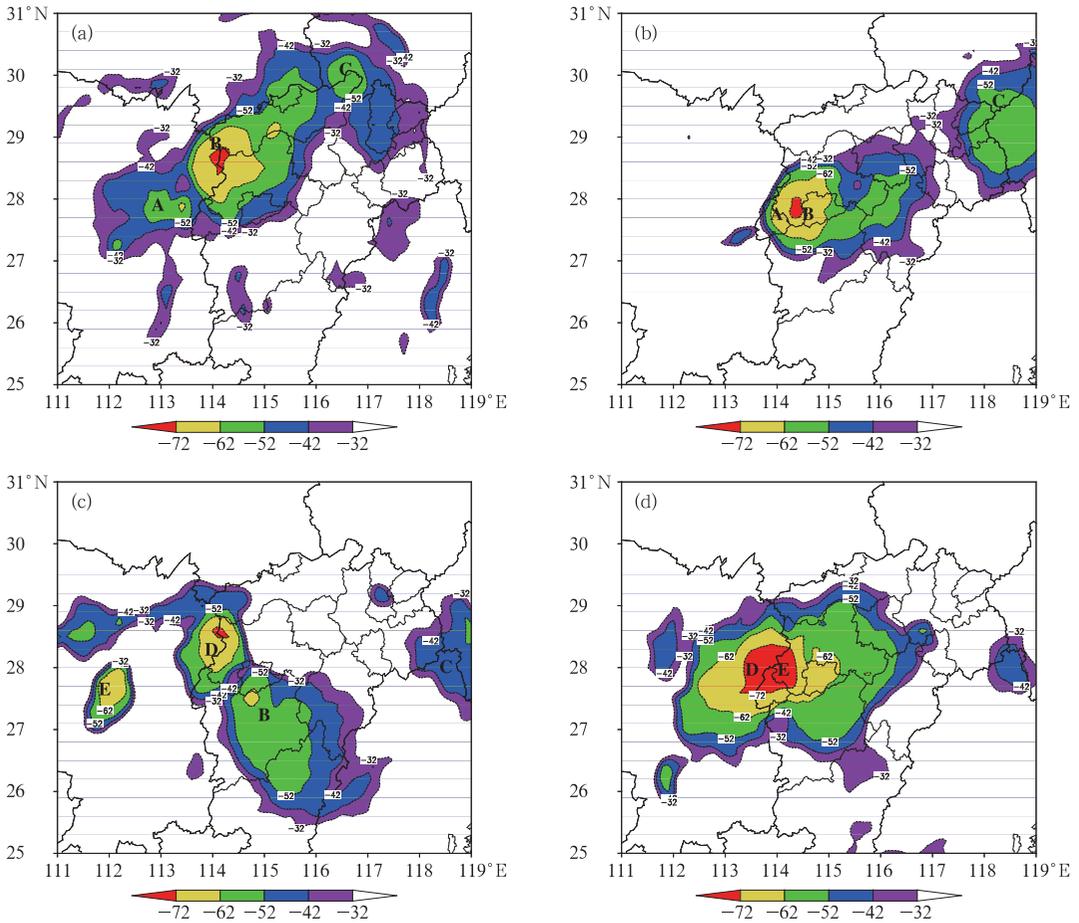


图 6 2014 年 5 月 24 日 17 时(a)和 21 时(b)、25 日 03 时(c)和 06 时(d)FY2E 卫星云顶亮温(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 TBB of FY2E at 17:00 (a), 21:00 (b) BT 24 May and at 03:00 (c), 06:00 (d) BT 25 May 2014 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

然而,在实际业务中,云图资料常会延迟 30~60 min 左右,因而会在一定程度上影响对流云的强度或位置等信息的及时获得。尽管如此,仍可借助分析云型及云图的前期变化特征,并结合分析天气尺度系统的演变过程,预测对流云团的移动、变化趋势及强对流天气落区和主要表现形式,从而指导提前开展临近强降水等强天气的预警准备。

3.2 地面中尺度系统特征

为弄清地面风场对此次大暴雨过程的作用,利用逐小时加密自动站观测资料和 NCEP 分析资料,对地面风场、温度和雨量对比分析,以揭示中尺度天气系统的活动特征。

从 5 月 24 日地面天气图可以看到(图略),08:00 锋后冷高压已东移至海上,江西省处高压后部;受偏南气流影响,江西省水汽条件较好。24 日白天,江南华南等地均受偏南气流影响,气温上升明

显,其中高于 26°C 的区域位于湖南中部到江西西部地区,这种高温高湿的环境有利于午后对流天气的生成和发展。

从风场和温度场分布可以看到,20:00 前后北方有冷空气逐渐渗透南下,与西南暖湿气流交汇于赣西地区,由于冷空气受强偏南气流的阻挡发生了气旋性弯曲,因而在九江西部的修水县附近形成辐合中心(图 7a)。锋面引起的垂直环流必然伴随低层辐合。在辐合中心修水附近的地面温度约为 22°C ,其南侧为高于 24°C 的相对较暖的区域,于是在此较暖区域中地面形成了东北—西南向的辐合线,强降水即出现于此处附近。同时,由于湖南东部地区温度相对更高,且受西南暖湿气流影响,因此在赣西地区的暖湿环境里又形成了较明显的温度梯度锋区,加强了地面辐合运动的形成,从而为对流天气的发生提供了一种触发机制(马中元等,2014),因此温度锋区的出现为其后移入该地区的对流回波强度

的加强提供了很好的环境条件。

24日23:00后,西北地区的冷高压逐渐南移至华中地区,赣西地区北部逐渐转为东北风,南部为东南风,即有风向辐合形成,赣西地区的降水再度加强。由于偏南暖湿气流强盛,因此北方冷空气南下的速度不快(图略)。从25日02:00的地面流场分布(图7b)可以看到,地面冷空气前部到达赣西北地区,冷暖空气刚好交汇于赣西地区,地面风场形成了东北—西南向的中尺度辐合线,且温度梯度较大的区域也恰好位于赣西地区,这促进形成了有利于赣西地区降水增强的潜在条件。实况证实,在这中尺度地面辐合线的南侧有M β CS逐渐发展,同时,湖南东部的M β CS在东移过程中迅速得以加强,并于

25日03:00后影响赣西地区,造成了连续强降水和暴雨。可见,在有利的大尺度环境条件下,地面的中尺度辐合是M β CS发生、发展与加强的重要因子,在对流系统的连续发展过程中有重要作用。从时间上来看,赣西地区的地面中尺度辐合线和温度锋区在25日02:00后形成,湖南东部的M β CS在东移加强,并于25日03:00后影响该地区,表明地面中尺度辐合线和温度锋区的形成先于地面降水加强,另一方面也证实,地面中尺度辐合线和温度锋区的形成易导致温度向不连续方向崩溃,从而有利于锋生(熊秋芬等,2012),为其后降水的加强提供了很好的环境条件。

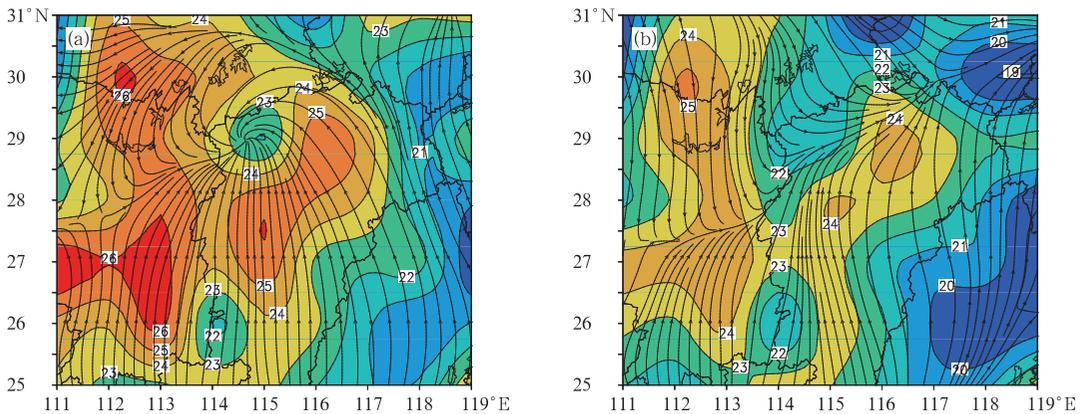


图7 2014年5月24日20:00(a)和25日02:00(b)的地面温度(填色,单位:℃)和10 m风场(流线)分布

Fig. 7 The ground temperature (unit: ℃) and the 10 m wind field distribution at 20:00 BT 24 May (a) and 02:00 BT 25 May 2014 (b)

3.3 地闪变化特征

大量研究表明,MCS的发生发展与地闪活动特征有很好的对应关系,而且MCS的不同发展阶段对应的闪电活动特征也不相同(慕建利等,2012;李建华等,2006)。关于地闪与强降水的关系,国内外已开展诸多相关研究,如Piepgrass等(1982)发现每分钟的闪电数与降水密切相关,降水率峰值落后地闪峰值约10 min;Goodman等(1986)的研究表明总雨量与风暴的闪电密度之间重合程度很高。周筠君等(1999)发现地闪与对流性天气中的降水有较好的相关性,这种相关性用来对一般性对流天气中降水进行估测是可行的。因此,借助地闪资料的分析,有助于提高降水预报的准确率和预警及时性。

以此次大暴雨过程的最大处——萍乡市上栗县枣木为中心,统计其周边 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬度范围内的地闪数,并与逐5 min雨量对比(图略)。可以看到,5 min雨量分布与地闪数的分布较重合。04:00—07:00间共有约3次明显的地闪数和地面雨量跃增的阶段,其中地闪数明显跃增的时段分别是04:15—04:20、05:10—05:25和06:00—06:05,而上栗县枣木处的5 min雨量明显增大的时段分别为04:30—04:35、05:20—05:35和06:10—06:20,显示出这3次阶段中,地闪跃增时刻在地面降水增大前出现,提前时间约10 min左右。

此外,统计5 min内的地闪强度后发现:正、负闪平均强度分别为28.2和-11.1 kA,表明虽然正地闪占总闪数比例不高,但其强度却常高于负地闪,

而在强对流天气中正地闪常常相较负地闪更易致灾。

3.4 雷达资料特征

由于距离较远,南昌雷达对萍乡等地的探测效果不佳,而长沙雷达则离赣西地区距离较近,且宜春地处赣西地区,因此本文采用长沙和宜春多普勒雷达资料进行分析,以探讨造成上述地区强降水和大暴雨的 MCS 特征。

3.4.1 回波强度的变化特征

从雷达回波的演变过程可以看到(图略),24 日 18:00 后,回波强度开始呈现出迅速加强的趋势,回波类型由层状云降水为主转为混合型,且其对流性特征渐趋明显。回波在东移的过程中迅速加强,强度 >45 dBz 的回波范围也逐渐扩大。24 日 18:00 至 25 日 00:24 期间,受多个强回波单体持续东移影响,有 50 dBz 以上的强回波不断经过赣西地区,并在上栗县附近形成了明显的“列车效应”,致使赣西地区降水猛烈而持久。25 日 02:42 后,回波再度逐渐加强,“列车效应”再次出现在上栗县附近,该县北

部地区受持续强回波影响的特征较南部更明显,这种现象一直持续到 06:24 后方才缓慢消失。

尽管回波强度较强,但垂直累积液态水含量(VIL)不大,24 日白天赣西地区的 VIL 值均低于 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 尽管 20:12—20:36 萍乡东北部出现 VIL 值大于 $45 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,局部达 $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,但由于东移速度较快,因此大 VIL 值影响时间较短,且影响位置也偏东,对上栗县等地造成的影响不大。即使在降水最猛烈的 04:00—07:00,萍乡境内的 VIL 值也不超过 $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,表明降水回波的对流程度不剧烈(图略)。以 05:36 时刻为例,从长沙雷达的反射率剖面图也可以看到,上栗县附近的回波在垂直方向上的伸展高度大都在 10 km 以下,强度 >40 dBz 的回波高度均在 5 km 以下,即呈现出明显的“矮胖”型特征,且强回波均未发展得很高即已及地,表明此次强回波影响过程以强降水为主,尽管降水效率高,但雷暴不强,且无明显强风伴随(图 8)。这些分析结果,有助于较准确地判识出对流回波的主要表现方式,对地面防灾减灾具有较好的指示意义。

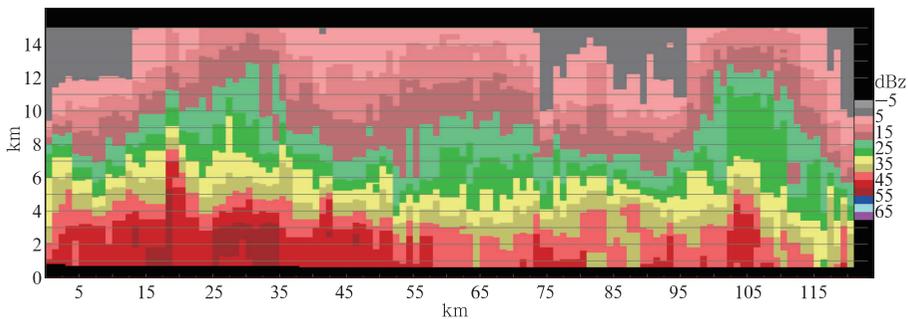


图 8 2014 年 5 月 25 日 05:36 上栗县附近的雷达反射率因子垂直剖面

Fig. 8 Radar reflectivity of vertical profile of Changsha radar near Shangli County at 05:36 BT 25 May 2014

3.4.2 回波强度与降水的对应关系

分钟雨量计正式投入业务运行的时间还不长,目前对其的研究和统计工作很少;回波强度与分钟级降水的关系方面,国内相关的研究更少。盛杰等(2012)发现分钟雨量的扰动与雷达回波的扰动对应较好,分钟雨量的变化能反映 γ 中尺度对流系统的特征。本文参考了盛杰等(2012)和陈朝平等(2013)的做法,采用宜春多普勒雷达资料分析全省大暴雨中心—上栗县枣木水库附近的回波强度随时间的变化特征。另外,选取与雨量值时刻最近的雷达回波

强度进行统计分析,时段为降水最强期间,即 5 月 25 日 03:00—06:30,如图 9 所示。

从图中可以看到,5 min 内雨量的波动较大,表明降水性质以对流性为主;最大回波强度基本都 ≥ 45 dBz。此次大暴雨过程中,当回波强度 ≥ 55 dBz 时,5 min 内的雨量均超过了 9 mm;当回波强度增大或减小时,地面雨量也基本随之呈相同的变化特征,因此,最大回波强度的变化对地面 5 min 雨强的变化趋势有较好的辅助参考,但预示性不明显。如 25 日 06:25 后,影响上栗县北部地区的回波强度迅

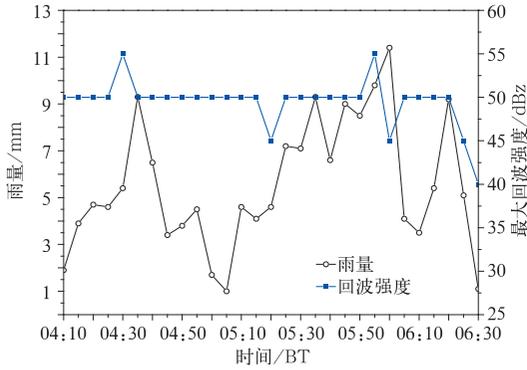


图 9 2015 年 5 月 25 日上栗县枣木附近的 5 min 雨量与最大回波强度随时间的变化

Fig. 9 Variation of rainfall and maximum echo reflectivity per 5 min near Zaomu of Shangli County

从 0.5° 仰角的径向速度图可以看到(图略), 25 日 03:18 后, 在湖南东部出现了一条东北—西南走向的正速度带, 它在东移的过程中逐渐变宽, 强度逐渐增强, 且其前部逐渐向东凸起, 25 日 05:06 时已接近萍乡市西部边界地区, 最大强度达到了 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且该正速度带已演变成宽广的正速度区, 它与其前部的负径向速度存在着风向辐合, 湖南醴陵北部地区还出现了正负径向速度对, 形成了具辐合特征的 γ 中尺度涡旋(图 10a 中的蓝色圆圈), 其对应的最大回波强度达 55 dBz 以上, 且强度在 50 dBz 以上的强回波区的东西向宽度达 20~30 km, 并朝着萍乡市方向移动。05:24 后, 该正径向速度区前部的大风速核进入萍乡市境内, 其在东移的过程中速度持续不变, 负径向速度则不断增大。

从 25 日 05:36 的 0.5° 仰角的基本速度场产品(图 10b)可以看到, 醴陵县城北部的中尺度涡旋向东北方向移动至江西上栗县(图中蓝色圆圈处), 其南部和萍乡西部处则又新生了中尺度涡旋, 该涡旋上的最小负径向速度 $\leq -27 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 最大正径向速度为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 因而具有较明显的风向和风速辐合特征(图中白色方框内)。从同时刻 2.4° 仰角的速度图(图 10c)可以看到, 与 0.5° 仰角上的中尺度

速减弱, 地面雨强几乎同时随之衰减。

3.4.3 径向速度变化特征

从长沙雷达基本速度产品(图略)可以看到, 24 日晚间萍乡市北部不断有小范围的径向风辐合区移过, 其正负径向速度值均在 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右, 表明低层有辐合作用存在, 有利于中小尺度系统的生成和发展, 为持续性降水的发生提供了动力条件; 湖南东部则维持着低层风速为 $-15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右的西南风。

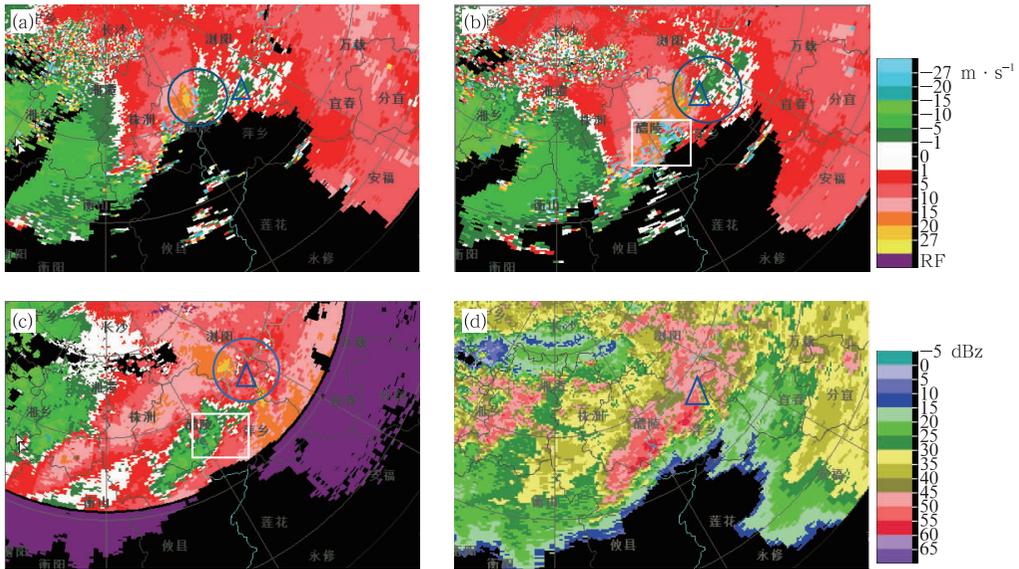


图 10 2014 年 5 月 25 日雷达径向速度(a, b, c)和组合反射率(d) (Δ 为上栗县城的位置)

(a)05:06, 仰角 0.5° ; (b)05:36, 仰角 0.5° ; (c)05:36, 仰角 2.4° ; (d)05:36 组合反射率

Fig. 10 Radar radial velocity (a, b, c) and composite reflectivity (d) on 25 May 2014

(Δ indicates the location of Shangli County)

(a) elevation of 0.5° at 05:06 BT, (b) elevation of 0.5° at 05:36 BT,

(c) elevation of 2.4° at 05:36 BT, (d) at 05:36 BT

涡旋相应,该处(图中白色方框处,位于萍乡市区附近)在 2.4° 仰角上则是风向和风速的辐散区;其南侧(醴陵南部)则有范围较大的径向风的辐合,辐合带主要位于湖南醴陵附近。它的出现跟气流运动的变化有关,它是对流运动水平方向的辐合辐散的强弱分布不均匀和气旋式垂直运动共同作用的结果(胡大海,2010),与短历时强降水等强对流天气有着密切的联系。该径向风辐合特征一直延伸到 6.0° 仰角高度以上,其负径向速度值最小达 $-15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。速度图上表现出的这种较高处径向风辐合特征是对流回波在垂直方向上强烈发展所致,它与有组织的上升和下沉两支气流形成较完整的中尺度环流涡管息息相关(陈鲍发等,2008),其往往出现在对流回波发展至成熟阶段时。由于湖南醴陵和江西萍乡附近为高温高湿区,且受地面辐合线和中低层切变影响,因此当湖南中部有对流回波东移时,湘东和赣西地区的有利条件促进了其进一步加强和对应的中尺度涡旋的发展。对流回波的强上升运动,导致径向风辐合在垂直方向上扩展到很高的高度上,因此,这种低空强西南风急流上叠加的深厚径向风辐合区促进了地面强降水的形成。

图 10c 还可以看到,萍乡北部的中尺度涡旋上方对应着较大范围的正径向速度区,负径向速度则消失,且正速度呈辐散特征(图中的蓝色圆圈处),其高度约 6 km,表明低层辐合、高层辐散,有利于促进和维持上升气流,从而影响增加地面降水。从同时期的组合反射率产品(图 10d)也可以看到,受低空

急流和径向风辐合的共同影响,湖南东部的强回波在东移过程中强度少变,湖南中北部地区还不断有强降水回波加强东移,持续影响湖南东部和赣西地区,加之赣西山地形作用的共同影响,强劲的偏南风急流带来的充沛水汽在赣西地区集中,导致这些地区形成了强降水,局地雨强高达 $83.2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,从而引发了洪涝和地质灾害。

3.4.4 雷达风廓线产品特点

从宜春雷达风廓线产品可以看到,24 日白天 4.9 km 高度以下均为西南风,风速 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,4.9 km 高度以上则多偏西到西北风的波动。18:44 后,9.1 km 高度以下转受一致西南风影响(图略);21:08 后,6.1 km 高度以上的偏西到西北风逐渐增强,并呈向下渗透的变化趋势(图 11a),并在 23:33 到达 0.3 km 的近地面高度上,导致 25 日凌晨江西西部地区的降水呈逐渐减弱趋势。冷空气的侵入还有助于抬升暖湿上升气流,触发不稳定能量释放,25 日 01:05 后,低层西南风又逐渐加强并向上发展,风速也逐渐增大,并在 4.9 km 高度附近形成了明显的辐合(图 11b)。在垂直方向上,风向呈顺时针旋转,即暖平流特征明显;4.0 km 高度以下的西南风速达 $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,表明有低空急流的发展和维持,因此有助于降水的加强。这些特征在 25 日 02:00 后即出现,而赣西地区的强降水天气自 04:00 后开始,因此雷达风廓线产品对地面强降水的发生有较好的预报辅助作用,对 25 日早晨赣西地区强降水天气的预报辅助作用的提前量达 2 h。

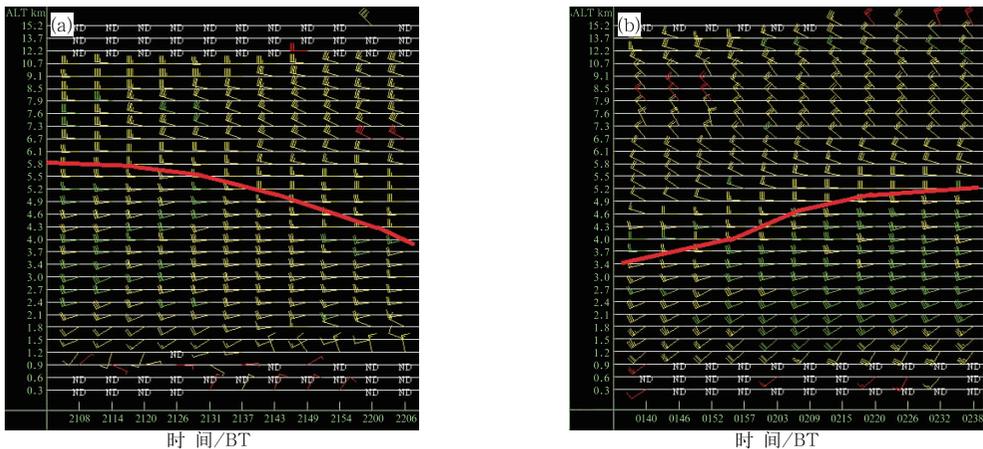


图 11 2014 年 5 月 24—25 日的宜春多普勒雷达风廓线图
(红线为风向辐合的位置)

(a)24 日 21:08—22:06, (b)25 日 01:40—02:38

Fig. 11 Radar vertical wind profile products at Yichun

(Red line shows the location of wind direction convergence)

(a) from 21:08 to 22:06 BT 24 May 2014, (b) from 01:40 to 02:38 BT 25 May 2014

4 结论和讨论

通过对5月24—25日赣西地区副高控制下的致灾大暴雨天气过程的中尺度特征分析,得到以下主要结论:

(1) 在地面冷空气南侵、高空槽东移和副高边缘暖湿气流加强的天气环流背景下,低空强烈的动力辐合加强了垂直环流,促使暖湿空气抬升,造成了赣西地区强降水持续和加强。

(2) 强降水由多个结构密实、边界光滑且持续时间长久的M β CS影响造成;此次暴雨过程TBB \leq -62℃的冷云云团位置和强度的变化对地面降水的变化有较好的指示作用,尤以TBB \leq -72℃的中心区与强降水中心吻合最好。冷暖空气交汇于赣西地区,造成该地区温度梯度较大,而地面中尺度辐合线,是促使M β CS发展及加强的重要因子,在对流系统的连续发展过程中起到重要作用。

(3) 此次暴雨过程5 min雨量分布与地闪数的分布较重合,地闪跃增时刻在地面降水增大前出现,提前时间约10 min左右。

(4) 雷达径向速度图上的中尺度涡旋是导致强降水的重要特征之一。在赣西地区存在显著的径向风向和风速辐合特征,且低空强西南风急流上叠加深厚径向风辐合区,有利于降水的加强和维持;另外在动力辐合和山地地形共同作用下,强劲的偏南风急流携带充沛水汽在赣西地区汇合,导致该地区出现连续性强降水。

(5) 最大回波强度的变化对地面分钟雨强的变化趋势有辅助参考,但预示性不明显;而雷达风廓线产品在本次过程中对赣西地区强降水天气的预报“提前量”达2 h,因而其对地面强降水的发生有较好的预报辅助作用。

由于中尺度对流系统常在夜间到早晨期间加强,此次大暴雨天气过程也不例外,因此给实时预警业务带来了不便,导致此次预警效果较差,气象防灾工作未能及时有效地开展起来。今后的工作中尤应重视上游地区的MCS对流云团生消变化和移动状况,密切关注副高边缘积云的发展对未来降水的影响,同时加强风垂直分布及其变化对降水趋势影响的作用分析,以尽可能地争取更多预警时间,在气象防灾方面赢得主动,减免损失。

参考文献

陈鲍发,魏鸣,柳守煜. 2008. 逆风区的回波演变与强对流天气的结构

- 分析. 暴雨灾害, 27(2):127-134.
- 陈朝平,王佳津,罗可生. 2013. “7.20”暴雨过程中分钟级雨量特征分析. 高原山地气象研究, 33(1):25-28.
- 陈德林,朱炳春. 1999. “副高”控制下暴雨天气初探. 广西气象, 20(1):29-31.
- 丁一汇,蔡则怡,李吉顺. 1978. 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究. 大气科学, 2(3):276-289.
- 方朔,毛冬艳,张小雯,等. 2012. 2012年7月21日北京地区特大暴雨中尺度对流条件和特征初步分析. 气象, 38(10):1280-1287.
- 胡大海. 2010. 基于多普勒雷达径向速度图的风暴信息提取. 天津:天津大学.
- 李津,王华. 2006. 北京城区一次大到暴雨的预报难点分析. 气象, 32(2):92-97.
- 李建华,郭学良,肖稳安. 2006. 北京强雷暴的地闪活动与雷达回波和降水的关系. 南京气象学院学报, 29(2):230-231.
- 吕校华,戴劲,伍金花,等. 2011. 一次副高控制中局部大暴雨预报失误原因分析. 安徽农业科学, 39(12):7527-7530.
- 马中元,苏敏敏,湛芸,等. 2014. 一次强飑线及飑前中小尺度系统特征分析. 气象, 40(8):916-929.
- 慕建利,李泽椿,湛芸. 2012. 一次强暴雨过程地闪活动特征与中尺度对流系统和强降水的关系. 气象, 38(1):58-64.
- 盛杰,张小雯,孙军,等. 2012. 三种不同天气系统强降水过程中分钟雨量的对比分析. 气象, 38(10):1164-1168.
- 孙健,赵平,周秀骥. 2002. 一次华南暴雨的中尺度结构及复杂地形的影响. 气象学报, 60(3):333-342.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京:科学出版社.
- 王令,王国荣,孙秀忠,等. 2012. 应用多种探测资料对比分析两次突发性局地强降水. 气象, 38(3):281-290.
- 熊秋芬,章丽娜,王秀明. 2012. 强天气预报员培训手册.
- 徐远波,尹恒,谭文秀,等. 2009. 副高边缘一次局地突发性大暴雨过程的中尺度分析. 暴雨灾害, 28(1):58-63.
- 杨成芳,阎丽凤,周雪松. 2012. 利用加密探测资料分析冷式切变线类大暴雨的动力结构. 气象, 38(7):819-827.
- 杨学斌,湛芸,代玉田. 2012. 山东一次区域性暴雨中尺度特征分析. 气象科技, 40(4):628-633.
- 俞小鼎. 2012. 2012年7月21日北京特大暴雨成因分析. 气象, 38(11):1313-1329.
- 岳甫璐,王春明,崔强,等. 2014. “7·21”北京大暴雨过程的地形作用分析和数值试验研究. 沙漠与绿洲气象, 8(2):41-53.
- 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. 热带气象学报, 25(5):553-558.
- 张玉玲. 1999. 中尺度大气动力学引论. 北京:气象出版社.
- 周筠君,郗秀书,张义军,等. 1999. 地闪与对流性天气系统中降水关系的分析. 气象学报, 57(1):105-109.
- 朱素行,徐海明,徐蜜蜜. 2010. 亚洲夏季风区中尺度地形降水结构及分布特征. 大气科学, 34(1):71-82.
- Goodman S J, MacGorman D R. 1986. Cloud to ground lightning activity in mesoscale convective complexes. Mon Wea Rev, 114(12):2320-2328.
- Piegras M V, Krider E P. 1982. Lightning and surface rainfall during Florida thunderstorms. J Geophys Res, 87(c13):11193-11201.