

胡静, 薛玉龙, 胡维, 等. 桂林“5·22”大暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(4): 44–51.

HU Jing, XUE Yulong, HU Wei, et al. Characteristics of mesoscale convective system in Guilin during the "5·22" rainstorm process and its effects on short-time heavy rainfall[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(4): 44–51.

桂林“5·22”大暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响

胡 静¹, 薛玉龙¹, 胡 维¹, 王艳兰¹, 刘 锋², 阳 薇¹, 李向红^{1*}, 侯 进³

(1. 桂林市气象局, 广西 桂林 541001; 2. 柳州市气象局, 广西 柳州 545001; 3. 阳朔县气象局, 广西 阳朔 541900)

摘要: 利用常规观测资料、风云气象卫星四号 A 星(FY4A)资料、欧洲中期天气预报中心全球第五代大气再分析数据集(EAR5)以及桂林和柳州多普勒雷达资料, 分析 2023 年 5 月 22 日桂林极端大暴雨过程的中尺度对流系统(MCS)特征及其对短时强降雨的影响。结果表明, 此次过程降水时段集中、局地性强、极端性大, 强降水时段与对流云团的强烈组织发展阶段基本一致。在“北槽南涡”的环流背景下, 高原低涡东移及其切变线诱发 MCS 生成, 地面冷空气和辐合线使其强烈发展。降水回波强度高, 质心低, 降水效率高, 强回波柱在桂林市区维持。MCS 具有低层正涡度、负散度, 高层负涡度、正散度的垂直结构, 上升速度大, 利于发展维持。MCS 发展前期对流有效位能(CAPE)值迅速增大, 桂林处于有利的抬升环境中, 大气可降水量峰值出现时间与强降水发生时间对应。

关键词: 短时强降水; MCS; 低涡; 雷达反射率因子

中图分类号: P458.1*21.1

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.07

局地暴雨往往是几种不同尺度天气系统相互作用的结果, 其发生发展既受到大尺度环境条件的制约, 又与中尺度对流系统有十分密切的关系。随着探测技术的发展, 区域自动站、多普勒天气雷达、风云系列气象卫星等越来越多的探测设备进行布设并投入业务应用, 研究表明许多天气灾害诸如暴雨引发的洪涝、雷暴引起的强风暴和龙卷风等经常是中尺度对流系统(mesoscale convective system; MCS)造成的^[1-2]。MCS 的空间尺度小、生命史短、突发性强、破坏力大、预报困难。只有弄清 MCS 的发生、发展机制以及活动特征, 才能更好地提升局地暴雨的预报能力, 更有效地趋利避害。国内外学者对 MCS 的发生发展机制、空间和热动力结构等方面进行大量的分析, 陈永仁等^[3]研究发现, 短时强降雨通常由 MCS 中的深对流造成, 水平尺度多为中小尺度系统, 具有云顶亮温低、雷达反射率因子大和垂直累积液态水含量高等特点。胡祖恒等^[4]的研究表明, 在有利的大尺度环境条件中生成的 MCS 是中尺度暴雨的直接成因, 其积云对流产生的加热作用对西南涡的发展

有重要影响。盛日锋等^[5]研究发现地面中尺度辐合系统与雨团的发生发展关系十分密切, 且具有一定的预示作用。李晓容等^[6]指出大暴雨的分布与地面辐合线的走向基本一致, 并随其移动而移动。

桂东北地区作为华南暴雨中心之一, 受地形地貌的影响出现局地强降水的频次较高, 也有许多预报员和专家对此分析研究^[7-10]。但是目前在业务工作中桂东北局地暴雨的短期预报仍存在一定难度, 漏报率较高, 更多是依靠短时临近订正。随着观测业务的发展, 越来越多的高时空分辨率观测资料投入使用, 但如何综合应用数据, 在短时临近预报预警中发挥作用还有薄弱之处。利用多种资料对暴雨过程中的 MCS 进行研究, 有助于揭示不同类型 MCS 的成因及发生发展机理。本文对 2023 年 5 月 22 日由切变线引发的极端短时强降水过程进行诊断分析, 讨论降水过程中 MCS 的演变特征及其成因, 尝试找到探测资料在短时强降水预报中的综合应用着眼点, 为短时临近强降水预报提供科学参考依据。

收稿日期: 2023-11-25

基金项目: 广西气象科技重点项目(桂气科 2022Z01)

第一作者简介: 胡静(1990—), 工程师, 主要从事灾害性天气预报及研究。E-mail: 1219505066@qq.com

* 通讯作者: 李向红(1966—), 正高级工程师, 主要从事暴雨形成机理研究与预报。E-mail: glxh99@163.com

1 资料与方法

文中研究采用常规观测资料、区域自动站资料、FY4A 卫星资料、桂林和柳州多普勒雷达资料以及 EAR5 逐小时全球再分析资料。研究方法采用动力热力和水汽的诊断分析方法。

2 结果与分析

2.1 降水过程概述

2023 年 5 月 22 日凌晨,桂林出现暴雨,局部大暴雨天气,多地出现短时强雷暴天气,局地伴有短时雷暴大风。从过程雨量来看,5 月 21 日 20 时—5 月 22 日 20 时,桂林降雨量 250 mm 以上有 2 站,100~249.9 mm 有 42 站,50~99.9 mm 有 60 站。最大降雨出现在秀峰甲山琴潭气象观测站,降雨量为 329.4 mm。此次过程以短时强降水为主,具有降水时段集中、强度大、局地性强等特点,强降水落区集中在桂林市区,强降水时段集中在 22 日凌晨 05—08 时(图 1),

桂林本站 1 h 雨量(84.6 mm)、3 h 雨量(142.7 mm)超历史极值。根据统计结果,此次过程,桂林市区内 265 个区域气象站中有 11 个打破小时雨量极值(表 1),有 13 个打破 3 h 雨量极值,有 11 个打破 6 h 雨量极值,有 5 个打破 12 h 雨量极值,有 2 个打破 24 h 雨量极值,其中秀峰甲山琴潭气象观测站 24 h 降雨量为 329.9 mm,最大小时雨量达到 160.6 mm。

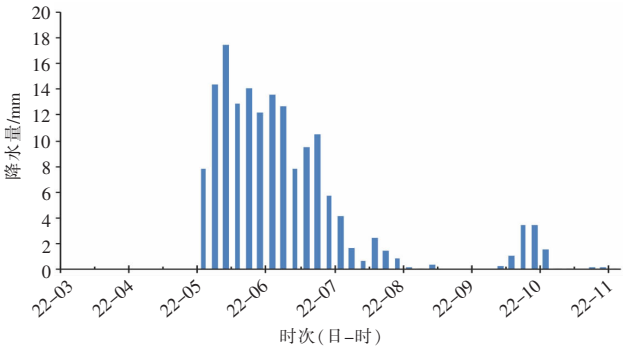


图 1 5 月 22 日 03—11 时桂林站 10 min 雨量变化图

表 1 桂林市区内部分气象站雨量极值(单位:mm)

站号	站名	1 h降水极值	3 h降水极值	6 h降水极值	12 h降水极值	24 h降水极值
N3140	秀峰甲山琴潭气象观测站	<u>160.6</u>	<u>300.1</u>	<u>322.8</u>	<u>329.4</u>	<u>329.4</u>
N3180	秀峰甲山长海气象观测站	<u>151.9</u>	<u>224.4</u>	<u>248.2</u>	<u>255.4</u>	<u>277.2</u>
N3220	秀峰丽君甲山气象观测站	<u>147.5</u>	<u>220.7</u>	<u>233.2</u>	<u>238.6</u>	<u>266.4</u>
N3050	秀峰甲山气象观测站	<u>126.7</u>	<u>186.1</u>	<u>208.2</u>	<u>221.7</u>	<u>222.9</u>
N3200	秀峰丽君气象观测站	<u>104.1</u>	<u>165.4</u>	<u>173.7</u>	<u>179.3</u>	<u>253.8</u>
N3210	七星东江猫儿山气象观测站	<u>90.8</u>	<u>162.5</u>	<u>167.2</u>	<u>171.1</u>	<u>190.3</u>
N3120	秀峰丽君驺马山气象观测站	<u>90.6</u>	<u>156.0</u>	<u>165.3</u>	<u>172.2</u>	<u>224.2</u>
N3260	七星街道毅峰气象观测站	<u>85.4</u>	<u>144.5</u>	<u>153.7</u>	<u>226.4</u>	<u>289.3</u>
N3030	七星东江羊角山气象观测站	<u>84.9</u>	<u>158.0</u>	<u>186.2</u>	<u>255.6</u>	<u>312.0</u>
N3130	秀峰街道气象观测站	<u>82.1</u>	<u>148.4</u>	<u>155.6</u>	<u>162.6</u>	<u>224.0</u>
N3040	叠彩大河村气象观测站	<u>81.8</u>	<u>134.5</u>	<u>149.2</u>	<u>179.5</u>	<u>228.7</u>
N3150	七星东江气象观测站	<u>71.1</u>	<u>150.2</u>	<u>152.2</u>	<u>185.2</u>	<u>226.4</u>
N3070	七星漓东国家气象观测站	<u>69.7</u>	<u>117.1</u>	<u>160.5</u>	<u>294.7</u>	<u>392.2</u>
N3230	象山街道气象观测站	<u>63.8</u>	<u>119.6</u>	<u>156.5</u>	<u>173.7</u>	<u>220.5</u>

注:下划线数字表示极值出现在 2023 年 5 月 22 日

2.2 中尺度对流系统的演变特征

2.2.1 MCS 在卫星云图上的演变特征

FY4A 红外云图(图 2)显示,21 日 20:00 对流云团在湘黔交界处生成并东移发展,22 日 01:00,对流云团上风方向边界光滑,云顶亮温为-91.86 ℃,出现在靠上风方向一侧,上风方向亮温梯度非常大,卷云砧沿高空急流向东偏北方向伸展。随后对流云团

从湖南南部缓慢东南移影响龙胜,造成龙胜出现局部暴雨。03:00,≤-52 ℃的区域面积扩大到大约 33 000 km²,对流云团后方有小尺度云团与其联结随后逐渐并入,在东南移过程中,对流进一步加强,边界更加清晰,04:00 对流云团云顶亮温大约维持在-78.16 ℃左右,云顶位置相较初生阶段略有东移,冷云顶面积逐渐扩大,对应灵川、临桂北部及桂林市区出现强降

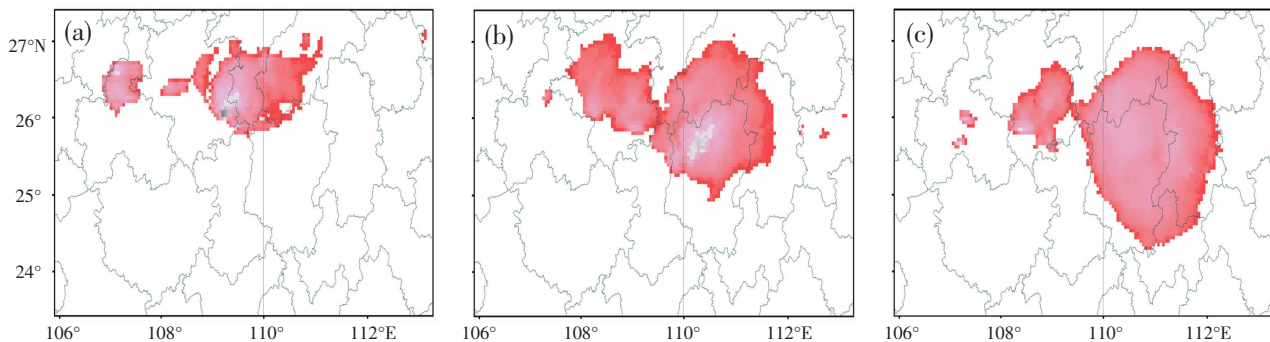


图2 2023年5月22日FY2A卫星TBB分布(填色部分为 $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 的冷云顶区域)

(a)01时;(b)04时;(c)06时;(d)09时

水及雷暴大风。对流云团继续发展加强,演变成为一个致密的近圆形结构,06:00冷云顶面积达到最大,基本覆盖整个桂林地区, $\leq -52^{\circ}\text{C}$ 的区域面积超过 $5.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,对应实况数据,秀峰区甲山琴潭气象观测站的最大小时雨强160.6 mm就是出现在这个时段。强降水云团继续缓慢东南移,07:00偏心率明显变大,结构逐渐松散,云顶亮温为 -69.60°C ,之后对流云团在东移过程逐渐减弱分裂,11:00后明显减弱移出桂林,13:00减弱消失。

应用卫星云图资料,依据云团形状大小、生命周期、偏心率、云顶温度等要素,MADDOX^[11]最早给出MCC的定义。JIRAK等^[12]给出如表2所示的更具体的分类:将MCS细分成4类,即MCC、PECS、M β CCS

和M β ECS(后二者是 β 尺度的MCC和PECS)。该分类方法将尺度相较MCC和PECS略小的MCS也包括在内,其广泛的代表性更便于实际业务应用中对中尺度对流系统进行分析。按照这种分类方法,发生在2023年5月22日过程中的MCS属于M β ECS。梁巧倩等^[13]按照该分类方法研究华南前汛期MCS的活动特征及组织发展形式,发现华南前汛期M β CCS和M β ECS的主要组织发展形式是准孤立发展型,移动方向主要以东移为主。此次过程中的M β ECS与文献中表述的准孤立发展型一致,MCS发展自一个独立的对流单体,一边发展一边逐渐向东南方向移动,传播特征不明显。

表2 基于红外云图分析的MCS定义

MCS分类	大小	持续时间	形状
MCC PECS	$\leq -52^{\circ}\text{C}$ 的冷云顶区域 $\geq 5 \times 10^4 \text{ km}^2$	满足大小条件的 持续时间 $\geq 6\text{h}$	最大时偏心率 ≥ 0.7 $0.2 \leq \text{最大时偏心率} \leq 0.7$
M β CCS M β ECS	$\leq -52^{\circ}\text{C}$ 的冷云顶区域 $\geq 3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 并且最大区域必须 $\geq 5 \times 10^4 \text{ km}^2$	满足大小条件的 持续时间 $\geq 3\text{h}$	最大时偏心率 ≥ 0.7 $0.2 \leq \text{最大时偏心率} \leq 0.7$

2.2.2 MCS在雷达上的特征

为了更细致地描述MCS的对流特征,结合强降水阶段,进一步对短时强降水发生期间的桂林、柳州两地的雷达产品进行分析。22日01时起,带状降水回波开始从测站西北侧进入桂林雷达并缓慢向东南方向移动,04:13,对流云团发展强盛,中心出现反射率因子强度大于65 dBZ的区域,04:19回波中心仍然维持这样的反射率因子强度,并且强回波在垂直方向上伸展得更高,桂林雷达反射率因子垂直剖面显示, $\geq 60 \text{ dBZ}$ 的强反射率因子回波柱大约位于3.8~6 km处, $\geq 45 \text{ dBZ}$ 强反射率因子几乎接地,在

对流云团反射率因子三维雷达图上也很好的印证这一点,这类低质心对流单体降水效率很高。在强回波带东移南压过程中,强回波带以西端为中心逐渐沿顺时针方向转向,05:07至06:00, $\geq 45 \text{ dBZ}$ 的强回波基本转变为东西向,05:19柳州雷达反射率因子垂直剖面显示桂林上空 $\geq 45 \text{ dBZ}$ 的强回波中心伸展至11 km高度,由于强回波带具有一定的宽度,高反射率因子区在桂林市区的长时间停滞,造成市区的极端小时雨强,处于桂林市秀峰区内站点甲山琴潭气象观测站在22日05:00—06:00降雨160.6 mm。06:30, $\geq 45 \text{ dBZ}$ 的强回波由带状逐渐演变为

片状,分布在桂林、临桂大部地区,中心最大强度为 50 dBZ,位于桂林市区南部。由于转向作用导致桂林市区长时间处于强反射率因子回波影响下,近似“列车效应”作用,导致桂林市区在 22 日 05:00—07:00 多个站点出现大暴雨。07:00 后,强回波基本移出市区并继续减弱。

柳州雷达的垂直液态水含量(VIL)产品显示,回波越强的区域,垂直累积液态含水量越高。在 5 月 22 日 04—05 时 MCS 东移发展过程中,其对应的强回波带中心的 VIL 值基本上大于 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。05:13,强回波带中心的 VIL 值达到 $55 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,较高的垂直累积液态含水量通常也对应着短时强降雨的发生。

通过分析反射率因子强度的三维雷达图,可以更好地了解强降水回波在水平方向和垂直方向上的演变。强度大于 25 dBZ 的回波柱在 04:00—07:00 的高度和体积变化不大,其范围基本保持在桂林中

部,以市区为中心的 60 km 范围内。强度大于 40 dBZ 的回波柱变化较为明显(图 3),在 02:00 左右回波柱基本低于 8 km,比较分散,03:32 回波柱聚集并且开始出现明显的主回波柱,高度达到 9 km 以上,04:32 主回波柱体积迅速增大,呈底部大,顶部小的锥形,回波柱高度陡增,直接超出 13.5 km。05:01 回波柱体积略有变小,05:31 回波柱体积继续变小,中底部接近圆柱形,高度明显降低,最高处约为 13 km。06:30 中层回波减弱,主回波柱再次变为锥形,周围低层出现分散的大于 40 dBZ 的回波柱。07:00 主回波柱消失,分散的回波柱高度基本维持在 5 km 左右。将大于 40 dBZ 的回波柱的体积、高度演变与桂林站降雨量进行对比分析,发现强回波柱出现的时间略早于极端雨强出现的时间,大约提前 1~1.5 h。

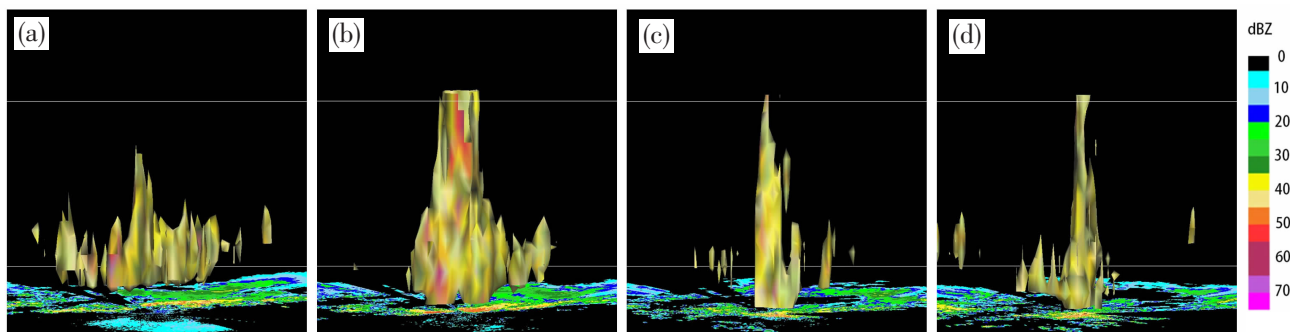


图 3 5 月 22 日桂林雷达大于 40dBZ 的反射率因子三维显示图(单位: dBZ)

(a)03:32; (b)04:32; (c)05:31; (d)06:30

2.3 MCS 的垂直结构演变特征

诱发此次极端短时强降水的 MCS 生命史大约为 9 h, 分别选取 22 日 02、04、06 和 08 时的资料代表 MCS 的初生阶段、增长阶段、成熟阶段和消亡阶段。从图 4 中可以看出, MCS 在垂直方向上动力特征具有相似的结构特征。涡度分布(图 4a)显示, MCS 演变过程中一直维持低层正涡度、高层负涡度的结构, 但不同阶段中上下层的涡度数值变化不同, 在初生阶段和消亡阶段低层的涡度大, 最大值超过 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 大约在 600 hPa 转为负涡度并延伸到 1 000 hPa, 在增长和成熟阶段, 低层的涡度最大值约为 $1.2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 在 800 hPa 转为负涡度。300 hPa 以上涡度随时间变化不大, 在各阶段基本都接近为 $-0.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的负涡度。对于散度(图 4b), MCS 在各发展阶段的垂直分布结构较为一致, 不同于涡度

的垂直变化, 散度在垂直方向上主要分为三层, 在低层 800 hPa 以下基本为强辐合层, 800~300 hPa 的中层为较弱的辐合层、辐散层交替分布, 300 hPa 以上为辐散层。对于垂直速度(图 4c), 各个阶段总体呈上升运动。在初生阶段, 上升运动最大值出现在 800 hPa 附近, 达到 $-1.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 然后随高度向上迅速减小, 在 500 hPa 减弱至 $0 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 随后再次随高度增大并减小。在增长阶段和成熟阶段, 900~250 hPa 层始终表现为上升运动, 增长阶段的 MCS 在 600~300 hPa 基本维持在 $-0.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 成熟阶段的 MCS 在此层上升速度更大, 达到 $-1.0 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 说明上升运动随着 MCS 的发展存在显著增强。消亡阶段 MCS 的垂直速度特征与初生阶段类似, 不过低层的上升运动相较初生阶段更弱, 并且在 700~400 hPa 附近时, 垂直速度为正值, 说明 MCS 减弱消散后, 上升运动迅速减弱并

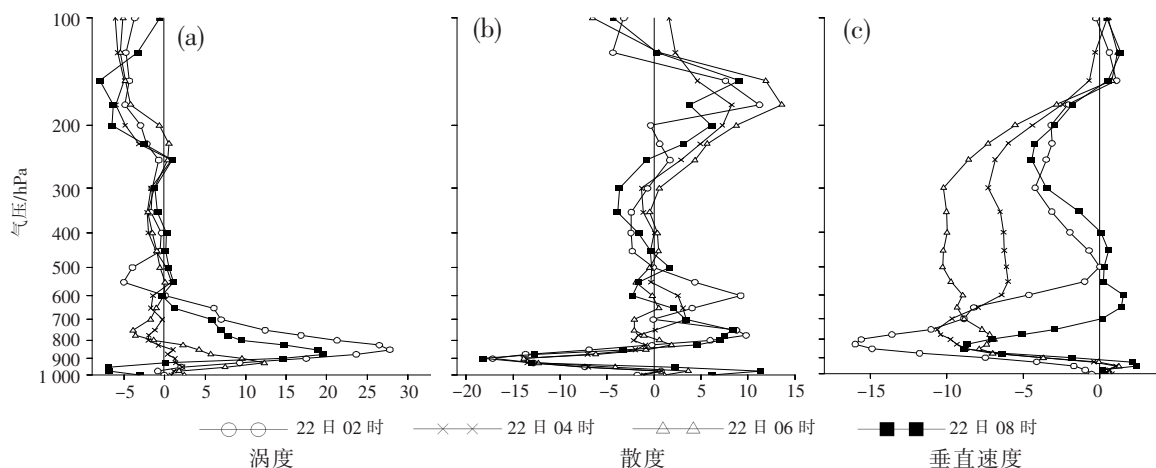


图4 MCS各个阶段的物理量变化

(a) 涡度 (单位: 10^{-5} s^{-1}); (b) 散度 (单位: 10^{-5} s^{-1}); (c) 垂直速度 (单位: $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

且在中层出现下沉气流。

3 MCS演变的成因分析

3.1 “北槽南涡”的环流形势分析

有利的环流条件对 MCS 发生发展至关重要,在暴雨开始前,20 日 08 时,500 hPa 上青藏高原东部有一低涡环流,是初生的高原涡,从中高纬度地区的内蒙古北部至河套附近有近似横槽的西风槽活动,此时西太平洋副热带高压 588 dagpm 线位于 100°E 附近,到 20 日 20 时,500 hPa “北槽南涡”的环流形势维持,受高原地形影响和高空槽引导作用^[14],高原涡东移南压,低涡中心位于西藏与四川交界处德格以南,恰位于西风槽底部。21 日,西太平洋副热带高压显著增强,“北槽南涡”的环流形势整体东移,500 hPa 西风槽经向度加大,槽底向南发展,高原涡也随之南移,21 日 08 时,700 hPa 上低涡南侧为强盛的西南急流,急流核位于滇黔桂交界处北侧,急流核风速值超过 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,宽广的西南急流将为低涡东侧输送充足的水汽和不稳定能量。21 日 20 时,低涡中心南压至贵州西南部,700 hPa 上西南急流维持,急流核南移至广西中南部,急流核风速值略有减小,但仍大于 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。850 hPa 上,低涡东侧有切变线,切变两侧偏南偏北气流都较强,造成很强的辐合抬升作用,该切变线即诱发此次过程中 MCS 的重要系统。低涡南侧存在较强西南风,风速大值中心位于云南、广西交界处,风速值同样达到 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,西南风在湘黔桂三省交界处存在明显的风速辐合,说明有源源不断的暖湿空气输送至切变线以南地区。随着低涡和切变线的东移,加上前期充足的水汽和能量供

应,MCS 东移发展,22 日凌晨,地面冷空气快速南下影响桂林,02 时至 08 时,桂林站气温从 29°C 降至 19.9°C ,在冷空气南下过程中,05 时地面形成中尺度辐合线,辐合抬升作用使得 MCS 明显加强,造成了桂林的大暴雨。

可见,在“北槽南涡”的环流形势下,前期西南急流提供充足的水汽和能量,高原低涡东移及其切变线诱生 MCS,在地面冷空气和辐合线的影响下,MCS 强烈发展,在桂林造成此次极端短时强降水。

3.2 水汽条件分析

中尺度对流系统的发展不仅是动力作用的结果,热力条件和水汽条件在其发展演变过程中也非常重要^[15-16]。图 5 选取怀化通道站、桂林雁山站、永州江永站三个站点的 GPS 大气可降水量探测数据对诱发此次短时强降水的 MCS 的水汽条件进行分析。伍志方等^[17]在研究中指出,当大气可降水量(PW)达到 60 mm,接近我国短时强降水发生的充分条件。郑永光等^[18]指出,大气可降水量在 70 mm 以上是大气中非常极端的水汽条件。

采用怀化通道站的 GPS 大气可降水量探测器的数据代表桂林北部即上游地区的大气可降水量,分析发现,MCS 的初生阶段正位于桂林北面怀化、邵阳南部,对应怀化通道站点上空出现大于 55 mm 的大值区,随着 MCS 的东南移动和迅速发展,05 时左右开始影响桂林市,位于市区内的雁山站大气可降水量在 22 日 06 时达到峰值,并且在 22 日 06 时至 08 时超过 60 mm,与强降水发生时间对应,符合文献中出现短时强降水的充分条件。永州江永站位于桂林东侧,相当于 MCS 移动的下游地区,该站

大气可降水量随时间变化曲线和雁山站基本一致,但是大气可降水量峰值基本低于 60 mm,说明 MCS 东部的水汽条件不如中心区域,再加上尺度较小,东移减弱明显,因此仅在桂林市区内造成雨强较大的短时强降水,虽然个别站点小时雨强超过 160 mm 具备一定的极端性,但是极端短时强降水发生的范围不大,考虑可能是由于桂林及周边范围内大气可降水量没有超过 70 mm 有关。

暴雨过程发生前及过程期间桂林上空一直维持

比较强的偏南气流,低空西南风基本维持在 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。图 6 是 21 日 16 时至 22 日 12 时桂林上空比湿与风场的时间-高度演变,强降水发生前期间 900 hPa 以下比湿达到 $18\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,在 21 日 17 时至 21 时甚至超过了 $20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,为低层比湿大值区峰值,比大气可降水量峰值出现的时间提前大约 8h,说明超低空急流在此次强降水过程中的作用主要是在暴雨发生前提供了充足的水汽,低空和超低空的西南风持续将暖湿空气输送到桂林上空。

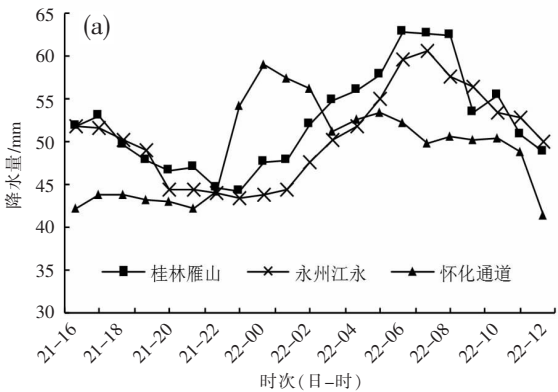


图 5 21 日 16 时至 22 日 12 时桂林上空 GPS 大气可降水量随时间变化(单位:mm)

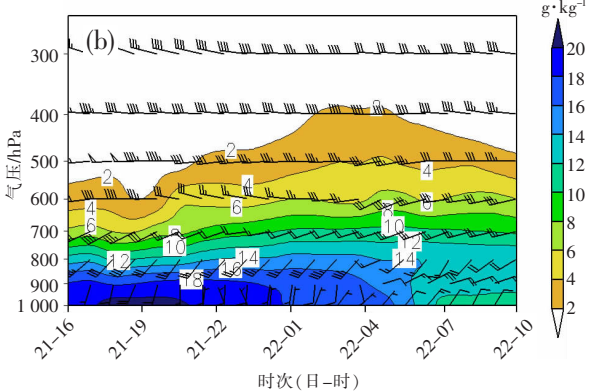


图 6 21 日 16 时至 22 日 10 时桂林上空比湿与风场时间-高度变化(等值线及阴影为比湿场,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$;黑色风向杆为风场,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

3.3 不稳定条件分析

利用探空站资料分析 MCS 生成的环境,选取桂林站 5 月 21 日 08 时、20 时和 22 日 08 时的探空资料分析 MCS 发展演变过程中的环境条件变化(表 3)。

MCS 生成前期(21 日 08 时和 20 时),桂林上空存在正对流有效位能($CAPE>0$),但也存在一定的对流抑制能量(CIN),对流抑制能量的存在,使得不稳定大气不容易发生对流活动。21 日 20 时,对流不稳定能量相较 12 h 前迅速增大,达到 $2\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以

上,在高能不稳定的状态下,无需太强的动力强迫即可触发对流,而对流抑制能量略有减小,这种变化说明暴雨发生前存在大量的能量聚集,大气不稳定性增大,引起对流活动发生。热力状态显示,暴雨发生前, K 指数在 $36\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明大气已处于热力不稳定。探空站的自由对流高度降低,抬升凝结高度升高。从地面抬升指数来看,在暴雨前期和暴雨临近时为负,表示桂林站附近处于有利的抬升环境中。

表 3 5 月 21 日 08 时至 22 日 08 时桂林探空站物理量

时间(日-时)	$CAPE/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$CIN/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$	$K/^{\circ}\text{C}$	$SI/^{\circ}\text{C}$	0°C 层高度/m	LFC/hPa	EL/hPa	$L/^{\circ}\text{C}$
21-08	776.2	38.0	36.0	0.89	4 879	851.5	207.5	-0.32
21-20	2 398.9	29.6	28.8	-1.16	2 697	855.0	143.0	-2.97
22-08	1.5	4.2	36.5	1.71	5 263	960.8	924.8	6.72

4 结论与讨论

(1) 桂林“5·22”大暴雨过程主要以短时强降水为主,具有降水时段集中、强度大、局地性强等特点,

强降水落区集中在桂林市区,多个站点 1、3、12、24 h 雨量打破历史极值,说明此次过程具有一定的极端性。强降水集中时段在 5 月 22 日凌晨,与对流云团的强烈组织发展阶段基本一致。

(2) 5月22日过程中的 MCS 属于 $\text{M}\beta\text{ECS}$, 其演变主要为准孤立发展。在“北槽南涡”的环流背景下, 前期强盛的西南急流提供充足的水汽和能量, 高原低涡东移及其切变线使得 MCS 在湘黔交界处生成并东移发展, 后期地面冷空气的侵入形成中尺度辐合线, 在强动力抬升作用下, MCS 强烈发展, 逐渐演变成为一个致密的近圆形结构几乎覆盖整个桂林, 其对应的降水回波强度强, 伸展高度较高, 质心低, 降水效率高, 垂直累积液态水含量在 $10 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ 以上。原本东北-西南向的强回波带由于转向作用导致桂林市区长时间处于强反射率因子回波影响下, 强回波柱一直停留在桂林市区上空, 使得此次过程的小时雨强和累积雨量很大。

(3) 演变过程中 MCS 垂直结构变化不大, 低层涡度为正、高层涡度为负, 低层散度为负、高层散度为正, 垂直上升速度较大, 特别是在增长阶段和成熟阶段, 900~250 hPa 层始终表现为很强的上升运动, 这种垂直结构特征可能是 MCS 发展维持的动力因素, 亦是产生强降水的重要机制之一。水汽条件和热力条件方面, 由于低涡南侧强盛的西南急流, 急流核风速值超过 $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为 MCS 的前期发展输送充足的水汽和不稳定能量。MCS 发展前期, 桂林探空站的 CAPE 值迅速增大至 $2000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上, 在高能不稳定的状态下, 极易触发对流。地面抬升指数基本为负, 表示桂林站附近处于有利的抬升环境中。GPS 大气可降水量探测数据显示, 桂林的大气可降水量在 22 日 06 时达到峰值, 超过 60 mm, 与强降水发生时间对应。

目前模式和预报员对于 MCS 的演变发展预报存在较大困难, 本文也仅分析了一次低涡切变影响下 MCS 的演变特征及其对短时强降水的影响, 通过总结不同类型的 MCS 在发展过程中的特点, 可以更好地指导短临预报中由 MCS 引发的强对流天气的预报。注意加强对 $T\text{-}\ln P$ 图和 GPS 水汽探测的分析, 强的热力不稳定和极端的水汽条件只需一点动力触发就可产生强降水。地面中尺度辐合线和中尺度辐合中心是对流单体触发和快速增长的重要系统, 在前期大尺度环流形势能够提供较好水汽条件和热力条件时, 注意分析实况中尺度环境场和中尺度模式地面风场。通过对大量类似个例的总结分析, 加强由 MCS 引发的局地暴雨的预报着眼点和预报思路的研究以及短临的监测与预警, 进一步提高此类暴雨的预报准确率。

参考文献:

- [1] 刘晓梅, 陈见, 李向红, 等. 一次广西东部季风爆发前夕短历时强降水分析[J]. 气象研究与应用, 2014, 35(2): 14-18.
- [2] 骆凯, 程乘, 杨志宏, 等. 2021 年 4 月广西南部一次暴雨过程的短时强降水特征分析[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(3): 95-101.
- [3] 陈永仁, 李跃清. “12.7.22”四川暴雨的 MCS 特征及对短时强降雨的影响[J]. 气象, 2013, 39(7): 840-860.
- [4] 胡祖恒, 李国平, 官昌贵, 等. 中尺度对流系统影响西南低涡持续性暴雨的诊断分析[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 116-129.
- [5] 盛日锋, 王俊, 龚佃利, 等. 济南“7·18”大暴雨中尺度分析[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1554-1565.
- [6] 李晓容, 濮梅娟, 王啸华, 等. 江苏一次大暴雨过程的诊断与中尺度分析[J]. 气象科学, 2012, 32(1): 53-61.
- [7] 刘国忠, 覃月凤, 覃卫坚, 等. 2022 年广西极端“龙舟水”暴雨过程环境场特征分析[J]. 气象研究与应用, 2023, 44(1): 7-13.
- [8] 刘蕾, 陈茂钦, 蓝柳茹, 等. 桂北山区两次突发性大暴雨触发及维持机制分析[J]. 气象与环境学报, 2022, 38(5): 15-24.
- [9] 张丁丁, 黄莉, 周琰. 2020 年广西南宁一次极端暴雨特征及预报偏差分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(3): 72-76.
- [10] 卢伟萍, 孙靖雯, 肖志祥, 等. 2020 年 5 月 16 日广西暴雨天气过程分析[J]. 气象研究与应用, 2022, 43(3): 62-66.
- [11] MADDOX R A. Mesoscale convective complexes[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1980, 61(11): 1374-1387.
- [12] JIRAK I L, COTTON W R, MCANELLY R L. Satellite and radar survey of mesoscale convective system development[J]. Monthly Weather Review, 2003, 131(10): 2428-2449.
- [13] 梁巧倩, 项颂翔, 林良根, 等. 华南前汛期 MCS 的活动特征及组织发展形式[J]. 热带气象学报, 2012, 28(4): 541-551.
- [14] 顾清源, 师锐, 徐会明. 移出与未移出高原的两类低涡环流特征的对比分析[J]. 气象, 2010, 36(4): 7-15.
- [15] 易笑园, 李泽椿, 姚学祥, 等. 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, 2011, 69(2): 249-262.
- [16] 邓承之, 赵宇, 牟容, 等. 一次西南涡特大暴雨过程中 MCS 的演变特征[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 121-128.
- [17] 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等. 2017 年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J]. 气象, 2018, 44(4): 485-499.
- [18] 郑永光, 陶祖钰, 俞小鼎. 强对流天气预报的一些基本问题[J]. 气象, 2017, 43(6): 641-652.

Characteristics of mesoscale convective system in Guilin during the "5·22" rainstorm process and its effects on short-time heavy rainfall

HU Jing¹, XUE Yulong¹, HU Wei¹, WANG Yanlan¹, LIU Feng², YANG Wei¹, LI Xianghong^{1*}, HOU Jin³

(1. Guilin Meteorological Bureau, Guangxi Guilin 541001, China;

2. Liuzhou Meteorological Bureau, Guangxi Liuzhou 541001, China;

3. Yangshuo Meteorological Bureau, Guangxi Yangshuo 541900, China)

Abstract: Using conventional observation data, FY4A satellite data, EAR5 reanalysis data, data from Doppler radar in Guilin and Liuzhou the characteristics of mesoscale convective system(MCS) during the extreme heavy rainstorm in Guilin on May 22, 2023, and its effects on short-term extremely heavy precipitation are analyzed. The results show that: The precipitation period of this process is concentrated, highly localized, and extreme. The period of heavy precipitation is basically consistent with the stage of strong organization and development of convective clouds. Under the circulation background of the "northern trough and south vortex", the eastward movement of the plateau vortex and its shear line induce the generation of MCS, which is strongly developed by surface cold air and convergence lines. The precipitation echo intensity is strong, the centroid is low, and the precipitation efficiency is high. The strong echo column is maintained in the urban area of Guilin. MCS has a vertical structure with positive vorticity and negative divergence in the lower levels, and negative vorticity and positive divergence in the upper levels, with a large upward velocity, which is conducive to the development and maintenance of MCS. In the early stage of MCS development, the *CAPE* value increases rapidly, and Guilin is in a favorable uplift environment. The occurrence time of peak atmospheric precipitation corresponds to the occurrence time of heavy precipitation.

Key words: short-time heavy rainfall; mesoscale convective system; low vortex; radar reflectivity factor