

庞传伟,蒋荣群,李向红,等. 基于尺度分离的桂东北一次极端暴雨成因分析[J]. 气象研究与应用,2023,44(1):64–69.

Pang Chuanwei, Jiang Rongqun, Li Xianghong, et al. Analysis of the causes of an extreme rainstorm in northeastern Guangxi based on scale decomposition[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2023, 44(1): 64–69.

基于尺度分离的桂东北一次极端暴雨成因分析

庞传伟¹, 蒋荣群², 李向红^{3*}, 侯进⁴, 周希源³, 苏圣华⁵

(1.恭城县气象局, 广西 恭城 542500; 2.钟山县气象局, 广西 钟山 542600; 3.桂林市气象局, 广西 桂林 541001; 4.阳朔县气象局, 广西 阳朔 541900; 5.临桂区气象局, 广西 桂林 541100)

摘要: 利用广西降水数据、卫星 TBB 数据和 ERA5 再分析资料, 基于大气变量物理分解原理, 从全球大气分析场中分离出天气尺度扰动场, 对 2022 年 6 月 17—21 日桂东北极端暴雨过程进行了多角度分析。结果表明, 此次过程发生在充足的水汽供应和有利去稳环境条件下, 存在多种不同尺度的上升运动; 长时间维持在 25°N 附近的准静止锋是主要的抬升机制和连续暴雨的主要原因, 其南北摆动对应着暴雨带的南北移动, 暴雨的强弱变化和锋生扰动一致; 造成 20 日极端短时暴雨的 MCC, 由锋区内 925 hPa 和 850 hPa 气流辐合线所触发和维持; 扰动辐合线能很好地指示出降雨中心, 暴雨落区位于 925 hPa 和 850 hPa 扰动辐合线之间。

关键词: 极端暴雨; 静止锋; MCC; 扰动辐合线

中图分类号: P458.1+21.1

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.1.11

引言

传统暴雨预报采用的天气图, 包含了对指示暴雨天气无关的气候分量部分和有关的扰动部分^[1], 当天气扰动信息被气候背景和行星尺度系统所掩盖而变成噪声时, 很难准确判断影响系统和形成机制。钱维宏^[2-3]提出大气变量的物理分解原理, 分解得到的天气尺度扰动, 去除了与触发极端暴雨无关的气候部分和行星尺度系统, 保留天气尺度、次天气尺度的扰动信息, 指出低层大气的天气尺度扰动对区域暴雨落区的预报具有比传统天气图更好的指示意义, 并发现暴雨带位于低层大气扰动气流的辐合线上, 暴雨带两侧扰动气流多呈对峙的辐合状态。

对华南或广西前汛期暴雨, 特别是端午节前后的暴雨“龙舟水”形成机理已有不少研究: 林良勋等^[4]认为强降水与西风槽东移、高空急流加强和低层切变线的南压相关联, 低层的辐合抬升为持续性强暴雨的产生提供了稳定的上升运动条件; 胡娅敏^[5]将“龙舟水”进行了分型, 认为华南北部型“龙舟水”的

影响系统特征为西太平洋副热带高压(下称“副高”)面积偏大、脊线偏北、西伸脊点偏西。王艳兰^[6]认为无论是暖区暴雨、低涡暴雨还是锋面暴雨都发生在高空急流右侧辐散、低空急流左侧辐合叠加区, 暴雨的触发系统可以是西南急流遇迎风坡地形、西南涡与冷空气入侵, 以及冷锋; 张丁丁等^[7]、梁依玲等^[8]发现低空急流遇到喇叭口地形作用形成的地面辐合线可成为暴雨的触发机制; 梁嘉颖等^[9]认为广西强降雨落区与 925hPa 水汽辐合区基本吻合。

2022 年 6 月, 广西多次出现影响系统不太明显(低层为大范围南风气流、仅在个别时段出现不太明显的风速辐合)的大范围暴雨过程, 预报效果并不理想。本文从大气变量物理分解的角度出发, 研究其中一次典型过程的成因及落区, 以期为提高此类暴雨的预报能力提供思路。

1 资料与方法

采用的数据包括: 2022 年 6 月 16 日 20 时(北京时, 下同)—2022 年 6 月 21 日 20 时(此时段下文

收稿日期: 2022-11-25

基金项目: 广西气象科技开发重点项目(桂气科 2022Z01、桂气科 2023M19)

作者简介: 庞传伟(1986—), 工程师, 主要从事中短期天气预报与研究。E-mail: 373851358@qq.com

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

简称为 2022 年 6 月 17—21 日或连续暴雨期间)广西 92 个国家级地面气象站降水日数据和广西 2936 个加密自动站逐小时降水数据、精度为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 逐小时的风云 FY-2G 卫星 TBB 数据、精度为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐小时 ERA5 全球范围再分析数据, 以及 1981—2020 年精度为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 逐 3h ERA5 全球再分析数据。

研究方法基于大气变量物理分解原理, 从全球再分析资料中分离出气候部分和瞬变扰动部分, 再进行天气学诊断分析。

1.1 天气扰动的提取方法

钱维宏^[10]提出了气候钟的概念和全球大气变量的物理分解原理, 其中, 天气尺度的瞬变扰动 A^* 可等价表示为:

$$A^* = A - \bar{A} - ([A] - [\bar{A}]) \quad (1)$$

$\bar{\quad}$ 代表取多年气候平均, $[\quad]$ 代表取纬圈平均。对上式展开到逐日逐时的全球变量, 即将 A 的具体表达式 $A = A(x, y, z, t)_d$, x, y, z 表示空间, 分别代表经度、纬度、高度或气压层, 且 A 包含全球纬圈值; d 为一年中的第几, t 为该日中的某一时刻, 代入即可计算瞬变扰动。其中, 计算多年气候平均时, 采用 1981—2020 年平均值。从公式中可以看到, 因去除了气候平均场和行星尺度的纬圈平均的扰动, 保留了行星尺度以下的扰动信息, 故适用于分析(次)天气尺度的扰动, 相当于对真实大气系统进行了带通滤波处理。保留的尺度范围在 4 倍的资料网格距离到 $1/4$ 纬圈周长之间, 本文所用 ERA5 格距为 0.25° , 故包含了部分中- β 尺度系统的扰动信息, 但考虑到天气系统的尺度划分并未统一, 以下均简称为天气扰动或扰动。

2 过程概况

2022 年 6 月 17—21 日, 桂东北出现连续性大暴雨、局部特大暴雨天气过程, 5d 最大累积雨量达 898.2mm, 同期全国排名第一。其中, 20 日暴雨范围最广雨量最大, 17 日次之, 18—19 日暴雨范围显著北抬收缩, 21 日暴雨区东移明显。暴雨强度大, 多次出现小时雨量超过 50mm。小时雨强极值出现在 20 日 03 时临桂宛田十二滩漂流风景区气象观测站(站号 N3142, 简称宛田站), 小时雨量达 110.3mm。分析宛田站降雨时序(图 1)发现, 强降雨主要时段在 17 日下午和 19 日夜间至 21 日白天, 20 日 17 时—22 时出现降雨停歇期。

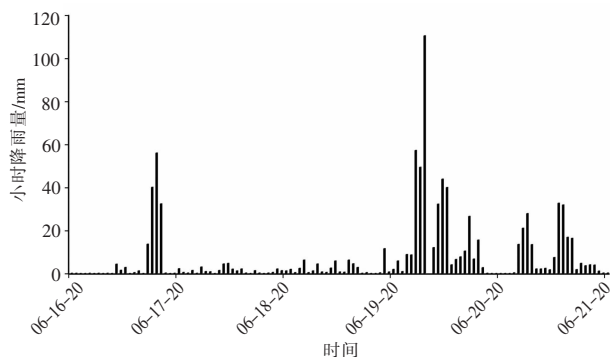


图 1 2022 年 6 月 16 日 20 时—6 月 21 日 20 时
临桂宛田 N3142 站小时雨量时序

3 环流背景

连续暴雨期间, 500hPa 平均高度场和 850hPa 平均水汽通量表明, 中高纬度维持两槽一脊稳定长波型, 为连续暴雨提供了稳定的可重复或持续产生暴雨的天气形势^[11-12]; 西南到华南地区存在宽广的低槽, 槽前正涡度平流利于低层减压和大尺度的动力抬升, 同时孟加拉湾北部反复生成的短波槽, 不断东移合并到宽槽中, 加强了这一机制; 两支季风合并于华南南部, 来源于孟加拉湾的水汽输送在广西东南部达到极值, 为广西暴雨区提供了大尺度水汽供应条件^[13], 水汽通量中心超过 $24 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$, 接近该地区 6 月平均值的 3 倍(桂东南 6 月多年平均水汽通量值为 $8 \times 10^{-3} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$), 为其下游的桂东北和粤西北连续大暴雨提供了充分的水汽供应。同时, 伴随着异常强的水汽输送的强西南急流, 也带来了足够的不稳定能量和低空天气尺度的抬升机制。

4 辐合上升与雨强

分析连续暴雨期间临桂宛田站上空的垂直速度和散度分布(图 2)发现, 975~875hPa 连续 5 日维持着较强的辐合, 为持续性的系统性辐合所造成; 17 日 13—16 时、20 日 03—04 时 975~500hPa 均为辐合且 $-1 \text{pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 较强上升运动贯穿 900~300hPa, 宛田出现强降雨; 20 日 13 时, 925~700hPa 为强辐合, 伴随 700hPa 达 $-2.4 \text{pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强上升中心, 此时宛田也出现了较强降雨, 同时可见无辐散层也在 700hPa, 在其上下层分别存在 400hPa 强辐散中心、850hPa 强辐合中心, 由连续方程可知, 700hPa 异常强的上升速度由上下两个散度中心共同贡献而成, 起决定性作用的是距离更近、强度更强(达 -15s^{-1})的

850hPa 的强辐合;20 日 05—11 时,900hPa 附近出现弱辐散降雨有所减弱,14—22 时自下而上转为辐散下沉运动对应宛田降雨迅速减弱,当 850hPa 在 17 时也转为辐散下沉运动时对应宛田降雨停止。同时可以看到有的上升中心在 400hPa 附近甚至到达 200hPa 高度,显然分别来源于中低层的对流不稳定能量和中高层的对称不稳定能量释放,是多种尺度系统相互作用下产生的不同尺度的上升运动^[14-17]。

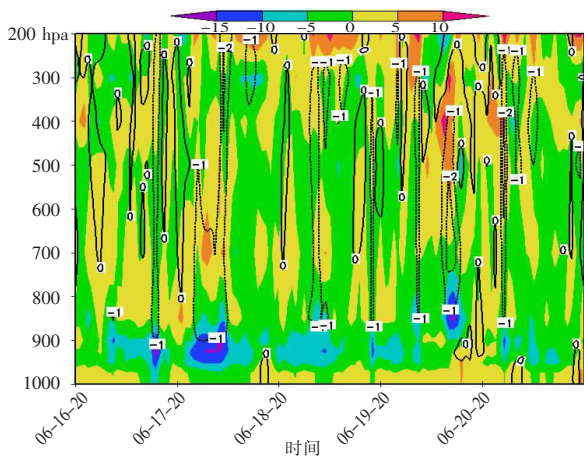


图 2 2022 年 6 月 16 日 20 时—21 日 20 时临桂宛田站上空上升速度(等值线,单位: $\text{pa} \cdot \text{s}^{-1}$)和散度(阴影,单位: 10^{-5}s^{-1})的垂直-时间剖面

5 触发机制

5.1 扰动信息的掩盖

气候上 6 月广西低层为较强的西南季风,当存在不足够明显的北风扰动时,传统天气图因没有去除气候部分而表现为一致的南风或仅存在不太明显的风速辐合,因此难以辨认实际抬升触发机制。同理,诸如温度、湿度等要素的扰动信息也会被气候背景和行星尺度系统所掩盖而变成噪声,当强天气发生在弱天气强迫环境(比如 MCC)时这种信息掩盖效应尤为明显。如前所述,本文所用资料包含了部分中- β 尺度系统的扰动信息,利于分析弱天气强迫下的中尺度扰动。

5.2 静止锋的锋生扰动

沿 110°E 作 925hPa 的温度扰动和 V 分量扰动的垂直-时间剖面(图 3)发现,17—21 日在 25°N 附近,始终存在扰动暖气团和扰动南北风的对峙,实为华南静止锋。按锋生理论,作用于同一区域大气的温度梯度若加大即锋生,注意扰动南北风对 25°N 南部扰动暖气团的平流,发现在 17 日和 20 日有

两次显著锋生,与此次过程暴雨最强的两个日期相同:第一次在 17 日下午,近地面暖气团到达南岭南麓因高达 2000m 海洋山脉阻挡堆积而使温度梯度加大,达 $10 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 扰动南风辐合于 25.2°N ,随后在 18—19 日继续北上爬坡而减弱,对应此时暴雨区的北抬收缩,但因地形阻挡和暴雨区冷池出流使得静止锋结构仍得以维持;第二次在 19 日夜间,因温度扰动中心低于 -4k 的冷气团伴随着显著扰动北风 ($-2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 入侵到达 24.6°N 附近,强烈的南北风辐合和冷暖对峙而再次锋生,与此相应的是 20 日暴雨达到最盛范围也最广,随后在南北摆动中温度梯度趋于减弱(注意北侧延伸到 26.7°N 暖气团的锋消作用)并于 21 日晚移出桂东北,对应 21 日桂东北暴雨减弱东移。

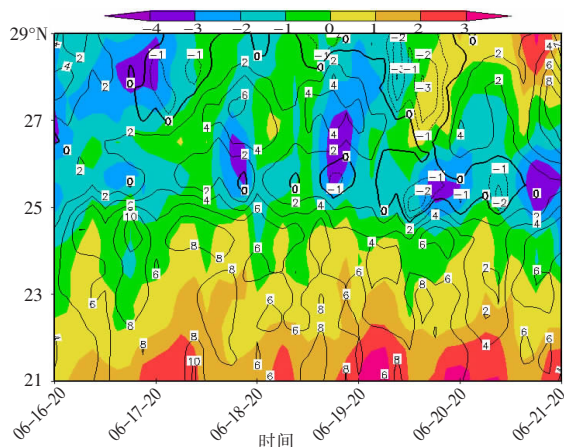


图 3 925hPa 扰动温度(阴影,单位: K)和扰动 v 分量(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 110°E 的经向-时间剖面

5.3 MCC 的触发和维持

分析 TBB 叠加 925、850hPa 扰动场(图 4)可知,19 日 23 时扰动冷气团从西路率先进入广西,对应的扰动辐合线上,分别在桂西触发出 MCS,在柳州附近触发出直径超 160km 的近圆形 MCC,两者云顶亮温均在 200K 以下。注意 MCC 东南部和西北部边界分别在 925hPa 和 850hPa 扰动辐合线上,以及冷气团达到的位置,不难发现 MCC 是在锋区内,同时可以看到锋区随高度向冷区明显倾斜。此外,广西境内外的对流云团无论大小均在 925hPa 或 850hPa 扰动风场辐合处,唯一区分是锋前(后)在 925(850)hPa 扰动风场辐合处。这足以说明锋区的触发作用。值得注意的是,此时 925hPa 冷气团已经占据整个桂北,北路冷气团主体尚未进入广西,意味着当锋区继续南推,桂北的辐合将以 850hPa 为主,故 20 日凌晨

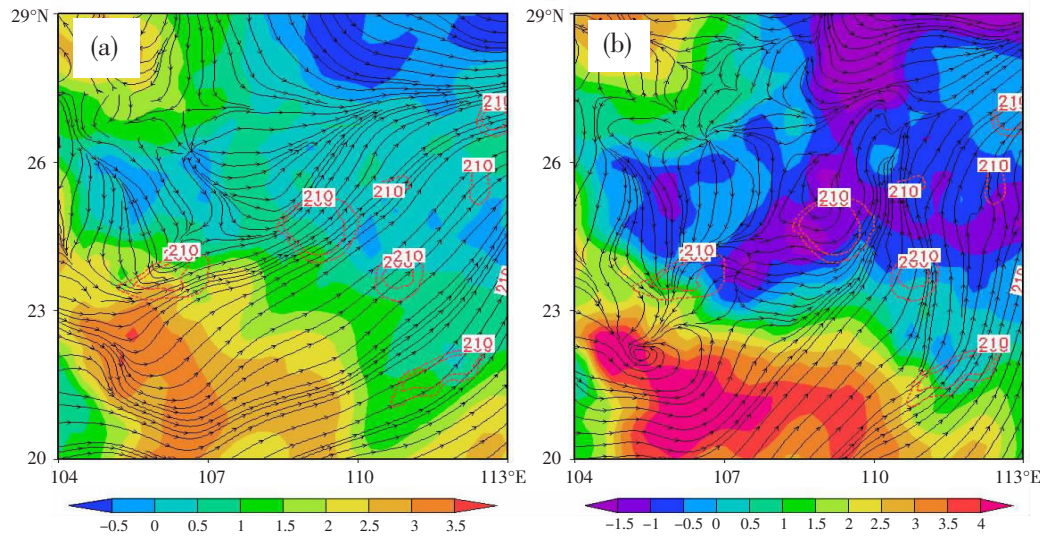


图4 2022年6月19日23时TBB(粗虚线,单位:k)叠加低层扰动场(阴影为温度,单位:k)
(a)TBB 叠加 850hPa 扰动场;(b)TBB 叠加 925hPa 扰动场

02—05 时 MCC 的爆发和极端降雨改用 850hPa 扰动场(图 5)分析。

随着北路冷气团的入侵和西南部的暖气团北抬,20 日 02 时(图 5a)锋生最盛,锋面略转横,桂西 MCS 减弱消失,850hPa 辐合线上强辐合处,桂北 MCC 迅猛发展并向桂林中北部扩展而形成中心,其长轴和中心均在扰动辐合线上,低于 210K 的冷云顶在 3h 内范围扩大一倍有余,中心值也下降到 190k 以下,此次过程桂东北最强的小时降雨就产生于此时;20 日 05 时(图 5b),随着暖气团北抬和冷气团范围的收缩,冷暖气团的扰动对峙到达河池附近,

MCC 中心也移到此处,尽管 190k 中心范围缩小,此时宜州德胜仍出现 109.5mm 的小时降雨,同时低于 210K 的冷云顶范围已达最大面积,长轴超 400km, MCC 东部和南部 tbb 梯度减小,意味着对流减弱 MCC 趋于消亡,此时 MCC 东部的桂林降水已大为减弱。

可见,在 MCC 生命周期内,其降水中心均出现在锋区内的气流辐合线上,扰动辐合加强(减弱)时 MCC 即发展(转弱),意味着 MCC 由锋区内的扰动辐合线所触发和维持。和 MCC 通常产生于弱天气强

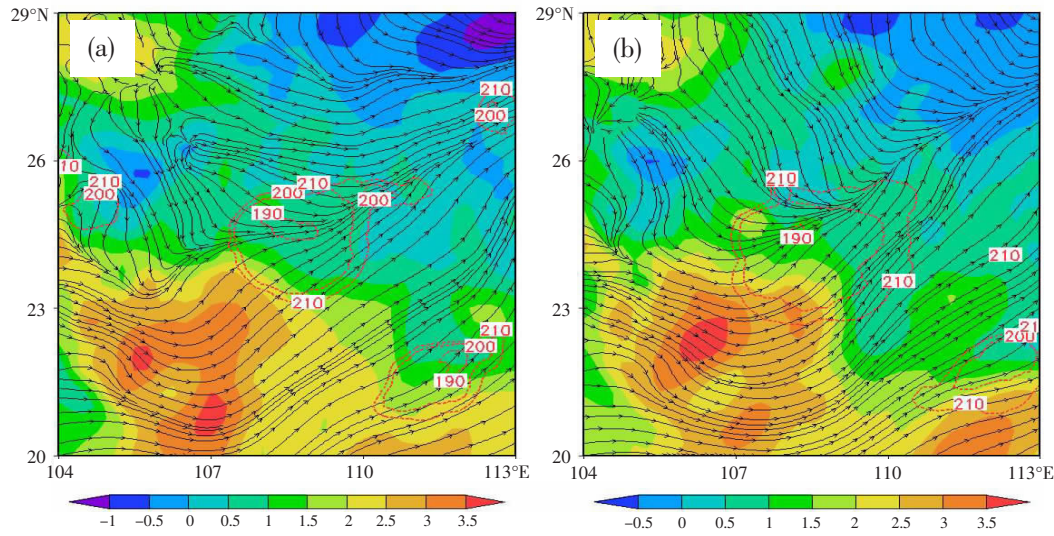


图5 2022年6月20日02时、05时TBB(粗虚线,单位:k)叠加 850hPa 扰动场(阴影为温度,单位:k)
(a)02 时;(b)05 时

迫的环境^[18-19]有所不同。

6 结论与讨论

本文主要得到以下结论:

(1)此次极端暴雨过程发生在异常强盛的季风所带来充足的水汽供应和不稳定能量的环境背景下。

(2)华南准静止锋长时间维持和锋生扰动,是桂东北持续 5d 的大暴雨得以维持的主要原因和抬升机制,其强度与位移对应着雨带的强弱和位移。

(3)极端雨强与边界层到中层深辐合以及强的上升运动相关,边界层内的辐合更重要,当辐散下沉运动向上发展到 850hPa 高度时,降雨极大地减弱。

(4)导致 20 日桂北地区极端短时降雨的中- α 尺度 MCC,由锋区内的低层扰动气流辐合所触发和维持,极端降雨发生在 925~850hPa 扰动辐合线的强辐合处。

利用高时空分辨率资料提取的瞬变扰动,可以更好地反映更小尺度的天气扰动信息,更好地揭示极端暴雨的成因并指示出暴雨中心位置,对较大范围的暴雨之类的强扰动信号、高影响天气的预报,特别是“天气系统不明显”时的预报,具有显著效果和应用价值。但孤立的小尺度对流系统存在不同的抬升机制,是否能用更高分辨率的瞬变扰动来反映,尚需进一步研究。此外,计算所需的几十年的数据量十分巨大,不利于基层使用。

参考文献:

- [1] 丑纪范.一个创新研究——大气数值模式变量的物理分解及其在极端事件预报中的应用[J].地球物理学报, 2012,55(5):1433-1438.
- [2] 钱维宏,单晓龙,朱亚芬.天气尺度扰动流场对区域暴雨的指示能力[J].地球物理学报,2012,55(5):1513-1522.
- [3] 钱维宏,江漫,单晓龙.大气变量物理分解原理及其在区域暴雨分析中的应用[J].气象,2013,39(5):537-542.
- [4] 林良勋,吴乃庚,黄忠,等.广东 2008 年罕见“龙舟水”特

点及成因诊断分析[J].气象,2009,35(4):43-50.

- [5] 胡娅敏,杜尧东,罗晓玲.近 49 年华南“龙舟水”的降水分型[J].气象,2013,39(8):1031-1041.
- [6] 王艳兰,伍静,唐桥义,等.2019 年 6 月桂林三次强降水天气成因对比分析[J].暴雨灾害,2020,39(2):136-147.
- [7] 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.
- [8] 梁依玲,覃月凤,陈见.2020 年广西开汛暖区暴雨特点及预报偏差分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):77-82.
- [9] 梁嘉颖,董良森,覃月凤,等.2020 年广西首场区域性暴雨天气过程分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):103-109.
- [10] 钱维宏.天气尺度瞬变扰动的物理分解原理[J].地球物理学报, 2012, 55(5): 1439-1448.
- [11] 丁一汇.1991 年江淮流域持续性特大暴雨的研究[M].北京:气象出版社,1993.
- [12] 林爱兰,李春晖,郑彬,等.广东前汛期持续性暴雨的变化特征及其环流形势[J].气象学报, 2013(4):628-642.
- [13] 王晓芳,黄华丽,黄治勇.2010 年 5—6 月南方持续性暴雨的成因分析[J].气象,2011,37(10):1206-1215.
- [14] 李佳颖,翟丽萍,覃月凤,等.广西一次大范围西南涡暴雨过程多尺度特征分析[J].气象研究与应用,2018,39(3):7-10.
- [15] 张凌云,刘蕾.柳州 2020 年一次“龙舟水”成因及预报偏差分析[J].气象研究与应用,2022,43(3):67-71.
- [16] 谢家旭,李国平.重力波与对流耦合作用在一次山地突发性暴雨触发中的机理分析[J].大气科学,2021,45(3):617-632.
- [17] 黄楚惠,李国平,牛金龙,等.2020 年 8 月 10 日四川芦山夜发特大暴雨的动热力结构及地形影响[J].大气科学, 2022,46(4): 989-1001.
- [18] 杨本湘,陶祖钰.青藏高原东南部 MCC 的地域特点分析[J].气象学报,2005,63(2):236-242.
- [19] 吴芳芳,俞小鼎,王慧,等.一次黄海之滨中尺度对流复合体多尺度结构特征观测研究[J].气象学报,2019,77(5):785-805.

Analysis of the causes of an extreme rainstorm in northeastern Guangxi based on scale decomposition

Pang Chuanwei¹, Jiang Rongqun², Li Xianghong^{3*}, Hou Jin⁴, Zhou Xiyuan³, Su Shenghua⁵

(1.Gongcheng County Meteorological Bureau, Guangxi Gongcheng 542500, China;

2.Zhongshan County Meteorological Bureau, Guangxi Zhongshan 542600, China;

3.Guilin Meteorological Bureau, Guangxi Guilin 541001, China;

4.Yangshuo County Meteorological Bureau, Guangxi Yangshuo 541900, China;

5.Lingui District Meteorological Bureau, Guangxi Guilin 541100, China)

Abstract: Using the precipitation data of Guangxi, satellite TBB data and ERA5 reanalysis data, based on the principle of physical decomposition of atmospheric variables, the synoptic scale disturbance field was separated from the global atmospheric analysis field, and the extreme rainstorm process in northeast Guangxi during 17–21 June 2022 was analyzed from multiple angles. The results show that: This process occurred under the conditions of sufficient water vapor supply and favorable de-stabilizing environment, and there were various ascending motions at different scales. The stationary front which maintained near 25°N for a long time was the main cause of the continuous rainstorm and the main lifting mechanism. Its north–south swing corresponded to the north–south movement of the rainstorm belt, and the variation of the intensity of the rainstorm was consistent with the frontogenesis disturbance. The system responsible for the extreme short–duration rainstorm on June 20, 2022 was the MCC, which was triggered and maintained by the convergence line of the 925hPa and 850hPa airflow in the front area. Disturbance convergence lines can indicate the center of rainfall well, the rainstorm falling zone is located between the 925 hPa and 850 hPa disturbance convergence lines.

Key words: extreme rainstorms; stationary fronts; MCC; disturbed convergence lines