

潘仕球,唐小琴,唐熠,等. 桂北地区前汛期两次极端强降水成因对比分析[J]. 气象研究与应用,2023,44(4):36–43.

PAN Shiqiu,TANG Xiaoqin,TANG Yi,et al. Comparative analysis of the causes of two extreme heavy rainfalls during the previous flood season in northern Guangxi[J]. Journal of Meteorological Research and Application,2023,44(4):36–43.

桂北地区前汛期两次极端强降水成因对比分析

潘仕球¹, 唐小琴², 唐熠¹, 欧阳荣谦¹, 阳薇¹, 李向红^{1*}

(1.桂林市气象局, 广西 桂林 541000; 2.恭城县气象局, 广西 桂林 542500)

摘要: 利用地面高空常规观测资料和欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的全球气候第五代大气再分析数据 (ERA5) 资料, 对 2022 年 4 月 25—30 日 (“4·25”过程) 和 2023 年 5 月 21—22 日 (“5·22”过程) 两个极端强降水过程进行分析, 探讨两次过程的触发机制。结果表明: (1) 两次过程均发生在 500~700 hPa 高原东侧有小波动发展的天气尺度下, “4·25”过程具有持续时间久、范围大、短时雨强大和夜雨特征明显的特征; “5·22”过程具有持续时间短、降水中心范围小、短时雨强大和夜雨特征明显的特征。 (2) 有利的环境条件为暴雨的形成提供较好的水汽和热力不稳定条件。但 “5·22”过程环境条件更强, 异常强的层结不稳定和抬升作用对 “5·22”极端强降水的发展提供有利条件。 (3) 超低空急流建立强劲的水汽通道, 两次过程的强降水中心存在水汽通量辐合大值区, 超低空急流输送的暖湿气流为强降水的产生提供稳定持续的水汽条件。

关键词: 极端强降水; 超低空急流; 降雨特征; 前汛期

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2023.4.06

随着全球气候变暖, 极端性天气事件发生的概率显著增加, 降水作为常见的天气现象, 近年来也日渐趋向极端化, 极端强降水发生的概率越来越大^[1-3]。极端强降水事件发生概率相比于气候平均态显著偏小, 常导致比较严重的灾害, 可能造成重大经济损失和人员伤亡, 是气象工作者的重要研究方向。国内学者对极端强降水的热力、动力成因、环境场特征、中尺度特征、触发和维持机制等方面进行较为系统的研究^[4-9]。冀翠华等^[10]研究发现副热带高压 (简称“副高”, 下同) 稳定加强、高空低槽东移加深, 引导中低层低涡切变线加强, 诱发中小尺度辐合中心及辐合线的形成有利于大暴雨天气的发生; 大暴雨主要出现在气旋中心至移向右前部的倒槽内和在低空急流的前端、地面辐合线附近^[11]; 张江涛等^[12]研究表明对流层高、中、低层以及中低纬度多尺度大气系统共同作用, 并叠加地形的辐合抬升为极端降水提供强盛的动力机制; 张入财等^[13]研究发现 α 中尺度低涡在移动的过程中配合高空位涡变化、低层切变的

作用下, 有利于生成深厚稳定的 β 中尺度低涡, 有利于触发强对流的发生, 进而导致极端强降水的发生; 吴乃庚等^[14]对华南前汛期暖区暴雨研究发现, 4 月南海夏季风的前沿推至南海北部, 5 月进入华南, 带来充沛高温高湿的水汽条件, 假相当位温在 348 K 以上, 有利于形成不稳定的大气层结, 进而导致暴雨发生; 何立富等^[15]将华南暖区暴雨分为边界层辐合线型、偏南风风速辐合型、强西南急流型三类, 并给出相应的综合天气形势配置。刘泳涛等^[16]研究发现切变线、低空急流、低涡、(西) 南风风速脉动和风向辐合可作为潮汕暖区暴雨中低层天气系统的主要预报着眼点。田付友等^[17]研究发现, 在有利的天气形势下, 单点动力、水汽和热力条件以及 850 hPa 动力抬升和整层可降水量的差异, 可导致极端暴雨的量级发生巨大的变化。钱卓蕾等^[18]研究发现, 在弱天气强迫背景下, 边界层急流的作用配合 β 中尺度辐合线发展以及地形的抬升作用, 是造成暖区大暴雨的主要原因。陈芳丽等^[19]进一步研究表明, 边界层急

收稿日期: 2023-12-01

基金项目: 广西气象科技重点项目 (桂气科 2022Z01)、2022 年桂林市重点研发计划 (20220118-3)

第一作者简介: 潘仕球 (1993—), 男, 主要从事预报服务业务及研究。E-mail: psgqlqx@126.com

* 通讯作者: 李向红, 正高级工程师, 主要从事暴雨形成机理研究与预报。E-mail: gllxh99@163.com

流为强降水提供充沛的、源源不断的水汽条件,配合地形的摩擦阻挡作用,易形成水汽通量辐合大值区,造成持续性的强降水。双低空急流的耦合作用促进强降水的降水效率,是产生极端强降水的重要原因^[20-21]。低空急流特征量和垂直风切变大小对强降水的发生具有重要的指示意义^[22-24]。极端暴雨中的“列车效应”多发生在缓慢移动的季风低压区,中尺度辐合线以及边界层偏南暖湿气流脉动是极端强降水过程中“列车效应”形成的主要原因^[25-27]。上述国内工作者的研究从不同的角度分析极端强降水发生发展过程,为业务工作提供理论依据和技术支撑,起到良好的指导作用。但每次发生的暴雨过程其中尺度触发机制都不尽相同,因此局地突发性的极端暴雨仍是预报中的难点。

2022 年 4 月 25—30 日(“4·25”过程)和 2023 年 5 月 21—22 日(“5·22”过程),桂林地区出现突发性特大暴雨过程,过程造成桂林部分地区道路交通中断,低洼地带出现严重内涝。不同模式对落区有较大偏差、量级预估偏小,且业务数值模式和预报员对强降水发生的时段和极端性预估不足,导致 2022 年 4 月 25 日 21—22 时、2023 年 5 月 22 日 01 时—08 时的时段出现漏报。本文拟通过环流形势、不稳定条件、动力结构和不稳定层结以及低空急流等,对“4·25”过程最强阶段(25 日 08 时—26 日 08 时)与“5·22”过程桂林地区突发性的特大暴雨过程进行详细分析,探讨触发机制,以期对桂林地区暴雨的强度、落区精细化订正提供一定理论基础,为地方防灾减灾服务提供技术支撑。

1 资料与方法

利用地面高空常规观测资料和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 再分析资料(时间分辨率为 1 h,水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$),采用天气学诊断分析方法,对 2022 年 4 月 25—30 日(“4·25”过程)和 2023 年 5 月 21—22 日(“5·22”过程)两个极端强降水过程的环流形势、不稳定条件、热力、动力结构和不稳定层结以及超低空急流进行分析与研究。

2 结果与分析

2.1 降水特征对比分析

2022 年 4 月 25—30 日和 2023 年 5 月 21—22 日桂林地区出现突发性特大暴雨过程。这两次过程降雨中心分别位于桂林的北部和中部地区。“4·25”

过程发生在低涡暖湿气流影响,高空槽和冷空气都不是很明显的天气形势下,从 24 日夜间开始一直持续到 30 日,最强阶段主要集中在 25 日 08 时—26 日 08 时。本次过程有四个特点:一是过境慢,持续时间长,自 24 日 20 时开始,到 28 日 20 时基本结束;二是范围大,降水中心停留在中北部,南部几乎没有明显降水;三是短时强度大,最大小时雨强出现在 25 日 22 时龙胜平等气象观测站为 102.8 mm,24 h 最大雨量为 172.0 mm(龙胜平等);四是夜雨特征明显,强降雨主要集中在前半夜至凌晨阶段,白天小雨甚至无雨。“5·22”过程发生在中高层小槽发展东移引导切变线南下,西南暖低压发展的天气形势下,本次过程有以下几个主要特点:一是持续时间短,22 日 01 时开始,到 09 时左右基本结束;二是降水中心主要集中在中部地区;三是短时强度大,主要集中在 22 日 05—08 时,最大小时雨强出现在 22 日 06 时秀峰甲山琴潭气象观测站为 160.6 mm,24 h 最大雨量为 329.9 mm(秀峰甲山琴潭);四是夜雨特征明显,强降雨主要集中在凌晨阶段。

“4·25”过程为暖区暴雨,而“5·22”过程为锋面暴雨,二者存在比较明显的差异,相同点则是夜雨特征异常显著。由于这两次降水过程均发生在过程性降水前的南风气流里,模式对“4·25”暖区对流的刻画和捕捉能力有限以及对锋面暴雨量级考虑偏小,市级预报员对其降水的极端性也估计不足,均对这两次暴雨的预报存在较大偏差。

2.2 环流形势对比分析

分析“4·25”过程发生前高低层的环流形势(4 月 25 日 20 时,图 1a),广西上空 500 hPa 为偏西气流控制,副热带高压脊线位于南海北部,广西北部达到急流标准为 $20 \sim 28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;850 hPa 低涡切变从山东半岛一直延伸到云南中南部地区,华南地区处于切变线南侧的西南气流中;925 hPa 为 $4 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南气流控制。25 日白天低涡切变东移,500~700 hPa 桂林为槽后西偏北气流控制,低层为低切变南侧强西南气流控制,桂林站西南风增至 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;25 日 20 时到 26 日 08 时 500~700 hPa 西北部高空槽东移影响我市北部,副高北部减弱,850 hPa 切变线由东北—西南向顺转成东北偏东—西南偏西走向,从贵州—湖南南部及广西北部东移,并于 25 日 20—23 时在桂林市西北部形成切变线及低压环流,地面桂林市处于倒槽顶端低压环流中。“5·22”过程发生前(5 月 21 日 20 时,图 1b)广西上空 500 hPa 大部为

副高控制;850 hPa 低涡切变从江苏一直延伸到云南中南部地区,华南地区处于切变线南侧的西南气流中;925 hPa 为偏南气流控制,地面处于低压倒槽中;21 日白天,西南暖低压发展,中低层西南急流加强,桂林、芷江达 $18\sim 20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。受副高西北侧偏南暖湿气流影响,桂林出现晴热天气,最高气温达 $34\text{ }^{\circ}\text{C}$,西南急流为夜间强对流暴雨提供强不稳定能量和水汽条件。21 日夜间,700 hPa 小槽发展东移,850 hPa 偏北气流南移,推动切变线南压影响桂林,由于切变两侧偏南偏北气流都较强,造成的辐合抬升作用强,为桂林大暴雨提供强的动力条件;上半夜桂林仍维持高温高湿不稳定层结,为后半夜强降水提供对流不稳定条件。

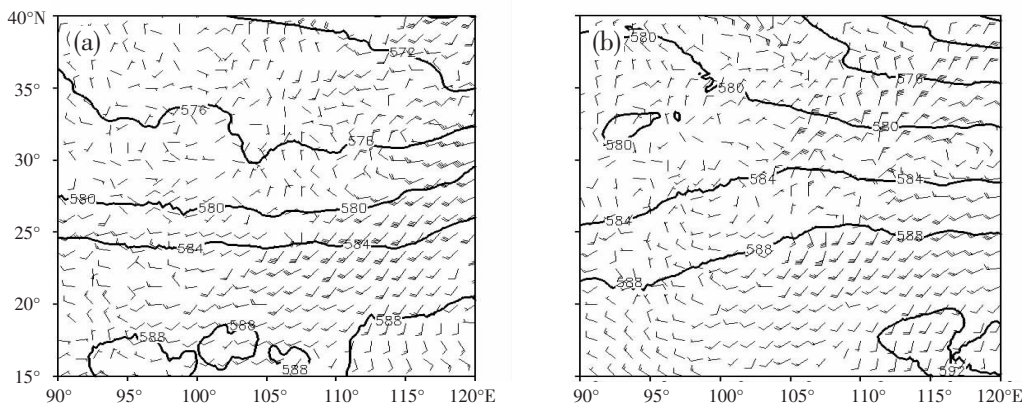


图1 500hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm)及 850hPa 风场(风羽)

(a)2022 年 4 月 25 日 20 时;(b)2023 年 5 月 21 日 20 时

2.3 不稳定条件对比分析

“4·25”过程发生前桂林站 $T-\ln P$ 图(2022 年 4 月 25 日 20 时,图 2a)显示,700 hPa 以下为偏南气流控制,风随高度顺转;温湿层结曲线从 800 hPa 向上开口形成喇叭状,呈上干冷下暖湿特征。对流有效位能 $CAPE$ 值由 4 月 25 日 08 时 $119.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加到 25 日 20 时 $1749\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, CIN 值从 $119.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $42.5\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, K 指数由 $38.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $31.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, SI 指数由 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,自由对流高度(LFC)从 692.7 hPa 下降到 873.7 hPa,平衡高度(EL)344.7 hPa 上升到 161.7 hPa(表 1)。

“5·22”过程发生前桂林站 $T-\ln P$ 图(2023 年 5 月 21 日 20 时,图 2b)显示,600 hPa 以下为偏南气流控制,风随高度顺转;温湿层结曲线从 850 hPa 向上开口形成喇叭状,呈上干冷下暖湿特征。对流有效位能 $CAPE$ 值由 5 月 21 日 08 时 $776.2\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加

从环流形势分析可知,两次过程发生时 500~700 hPa 高原东侧均有小波动发展,“4·25”过程副高强度弱,脊线位置位于南海南部,588 dagpm 线位于 $20\text{ }^{\circ}\text{N}$,而“5·22”过程副高强度强,脊线位置位于南海北部,副高控制了广西大部地区,588 dagpm 线位于 $25\text{ }^{\circ}\text{N}$ 。“4·25”过程冷空气较弱,而“5·22”过程冷空气较强;暴雨前低层切变线虽未南下进入广西境内,但其南侧的西南气流均在夜间出现增强,大暴雨出现在切变线南侧西南气流增强的过程中。暴雨前地面均处于低压倒槽中。“4·25”为暖区暴雨,尽管最强时段也有冷空气入侵但很弱,所以降雨强度相对较弱,但持续时间长,但“5·22”过程为锋面系统影响,冷空气强度强,锋面过境快,降雨强度强,持续时间短。

到 21 日 20 时 $2398.9\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, CIN 值从 $38.0\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 下降到 $29.6\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$, K 指数由 $36.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $28.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, SI 指数由 $0.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $-1.16\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度(WBZ)从 4 754.4 m 下降到 3 747.9 m,平衡高度(EL)由 207.5 hPa 上升到 143.0 hPa(表 1)。

从 $T-\ln P$ 图及探空物理量演变可以看出,两次过程低层均为偏南气流控制,中低层水汽饱和,中高层有干冷空气侵入;两次过程发生前能量在白天均存在大量积聚的过程,对流抑制有效位能均显著下降,具备良好的热力不稳定条件,表明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;平衡高度(EL)的升高说明对流能达到的最大高度在增大,也就是说在桂林探空站附近云体的理论伸展高度在增加。上述分析表明良好的环境条件为暴雨的形成提供较好的水汽和热力不稳定条件。

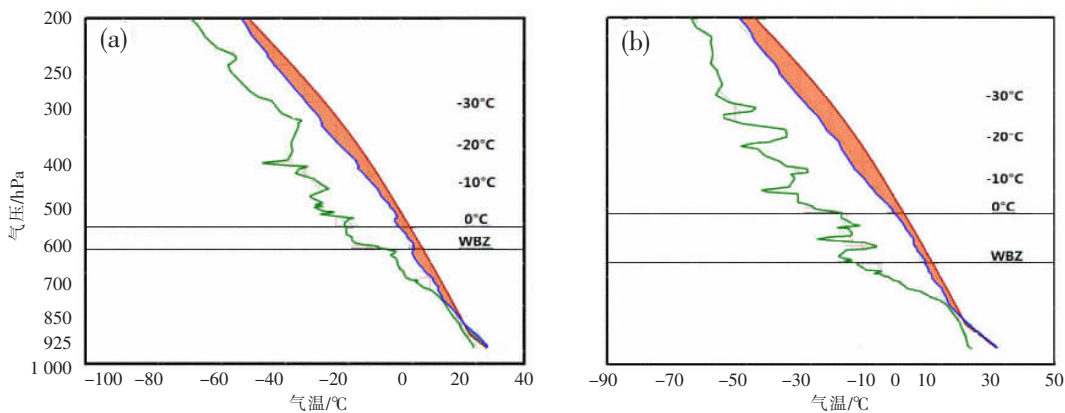


图2 2022年4月25日20时(a)和2023年5月21日20时(b)桂林站 T - $\ln P$ 图
(其中绿线为露点层结曲线,蓝线为温度层结曲线,红线为状态曲线)

表1 2022年4月25日08—20时和2023年5月21日08—20时桂林探空站物理量

时间 (年-月-日-时)	$CAPE/J \cdot kg^{-1}$	$CIN/J \cdot kg^{-1}$	$K/^{\circ}C$	$SI/^{\circ}C$	WBZ/m	LFC/hPa	EL/hPa
2022-04-25-08	114.5	119.6	38.9	-1.44	4 240.2	692.7	344.7
2022-04-25-20	1 749.9	42.5	31.3	-0.10	4 216.5	873.7	161.7
2023-05-21-08	776.2	38.0	36.0	0.89	4 754.4	851.5	207.5
2023-05-21-20	2 398.9	29.6	28.8	-1.16	3 747.9	855.0	143.0

2.4 动力结构和不稳定层结对比分析

2.4.1 散度对比分析

分析“4·25”过程最强阶段降水中心龙胜平等和“5·22”过程桂林站上空的散度随时间演变可以看出,“4·25”过程(图3a)龙胜平等上空25日20时850 hPa以下为散度负值区,850 hPa至450 hPa为散度正值区,20时当低空急流开始发展加强时,龙胜平等上空转为低层辐合高层辐散的结构,龙胜平

等降水开始加强,中低层最大辐合中心位于700 hPa出现在21—22时,与龙胜平等地区降水最强烈的时段对应。“5·22”过程(图3b)桂林站上空从22日00时开始850 hPa以下一直维持散度负值区,高层维持散度正值区,22日00时—08时,维持低层辐合高层辐散的结构,桂林地区从22日00时开始出现降水,低层最大辐合中心出现在05时—07时,与桂林地区降水最强阶段对应。

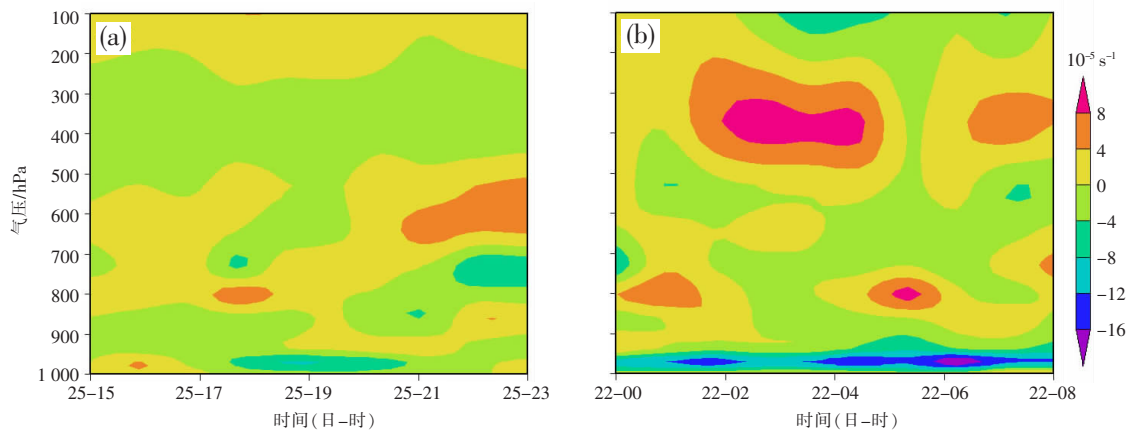


图3 2022年4月25日19时—26日00时(a)和2023年5月22日00时—09时(b)散度(单位: $10^{-5} s^{-1}$)

2.4.2 涡度对比分析

分析“4·25”过程最强阶段降水中心龙胜平等和“5·22”过程桂林站上空的涡度随时间演变可以看

出,“4·25”过程(图4a)25日19时—26日00时龙胜平等上空900~350 hPa始终维持深厚的正涡度层,随时间发展涡度加强,25日23时涡度大值中心

下移至低层,龙胜平等上空相伴出现较强的正涡度区和负散度区,对暴雨产生和维持十分有利。“5·22”过程(图4b)22日00时—09时桂林站上空850 hPa以下为正涡度层,随着时间发展至22日06时出现

最大涡度中心位于850 hPa,桂林上空相伴出现强的正涡度大值区和负散度区,有利于强降水的产生与发展,这与桂林地区降水最强时段对应吻合。

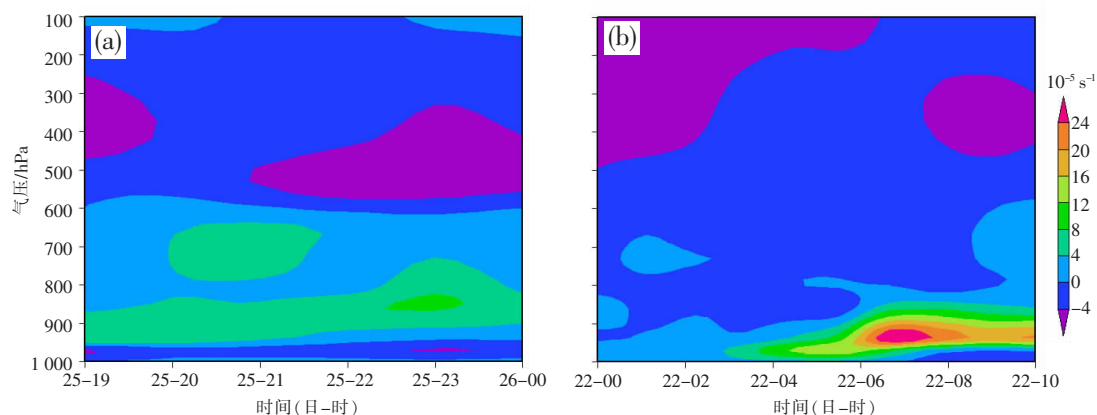


图4 2022年4月25日19时—26日00时(a)和2023年5月22日00时—09时(b)涡度(单位: 10^{-5}s^{-1})

2.4.3 假相当位温对比分析

分析“4·25”过程龙胜平等25日08时—26日08时的 θ_{se} 场高度随时间变化的剖面图(图5a)可以看出,龙胜平等25日14时—19时近地面为强暖湿中心, θ_{se} 中心强度达到350 K, 对流层中低层为位势不稳定层结, 中高层有弱干冷空气侵入, 到20时前后位势不稳定增强, 随后触发对流, 产生降水; “5·22”过程桂林21日08时—22日08时 θ_{se} 场高度随时间变化的剖面图(图5b)可见, 桂林地区从21日10时—22日00时, 地面为高温高湿中心, θ_{se} 中心强度 $>355 \text{ K}$, 最强中心 $>365 \text{ K}$, 对流层中低层为位

势不稳定层结, 中高层有强干冷空气侵入, 到22日00时前后位势不稳定增强, 随后触发对流, 产生降水。

从动力结构和位势不稳定层结分析, 两次过程发生前后, 暴雨中心地区均一直维持低层辐合高层辐散的结构, 并且相伴出现强的正涡度区, 且对流层中低层均为位势不稳定层结, 中高层有干冷空气侵入。这样有利的动力不稳定和层结不稳定条件, 有利于对流触发, 为强降水的发展提供有利条件: 层结不稳定和抬升作用。“5·22”过程相较于“4·25”过程, 异常强的层结不稳定和抬升作用对极端强降水触发起到十分重要的作用。

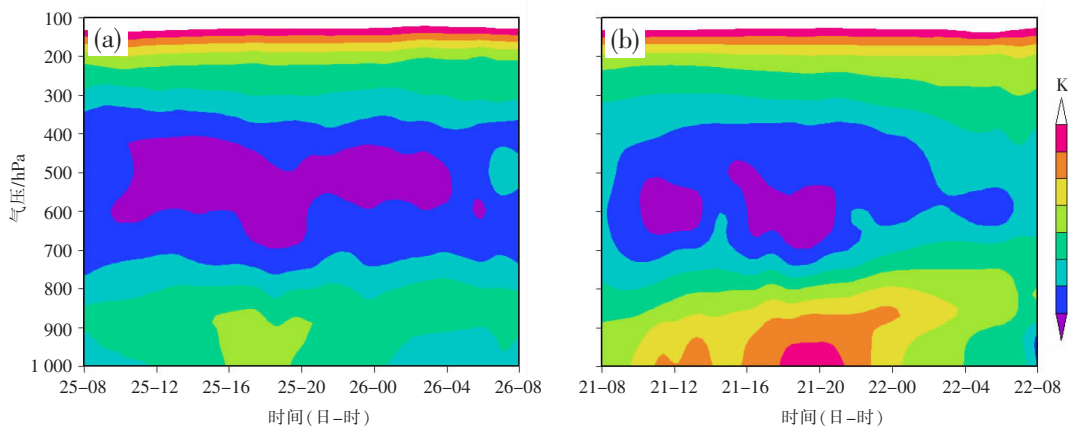


图5 2022年4月25日19时—26日00时(a)和2023年5月22日00时—09时(b)假相当位温(单位: K)

2.5 低空急流的水汽输送对比分析

分析“4·25”过程最强阶段降水发生前(25日20时, 图6a)925 hPa水汽通量及水汽通量散度可以看出, 925 hPa低空急流形成显著的水汽通道, 急流对

应的水汽通量 $\geq 16 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 急流核对应的水汽通量 $\geq 22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 给暴雨的产生和维持提供充沛的水汽输送。龙胜平等处于急流前端, 20时在平等上空存在一个明显的水汽通量辐合大值

区,水汽通量散度中心 $\leq -12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。“5·22”过程最强阶段降水发生前(22日05时,图6b)广西上空925 hPa为西南急流,所形成的水汽通道对应的水汽通量 $\geq 21 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,急流核中心的水汽通量 $\geq 27 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,桂林处在急流前端,从水汽通量散度可以看出,桂林地区上空存在 $\leq -16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 水汽辐合中心,说明最强降水发生前低层水汽非常充足,为极端强降水产生提供了十

分有利的水汽条件。

两次暴雨过程发生前及过程中广西上空一直维持西南气流。超低空急流输送的暖湿气流不断在龙胜平等地区和桂林市区辐合,可见,超低空急流为极端强降水的产生提供稳定持续的水汽条件。“5·25”过程相较于“4·25”过程,超低空急流所带来的水汽条件更强。

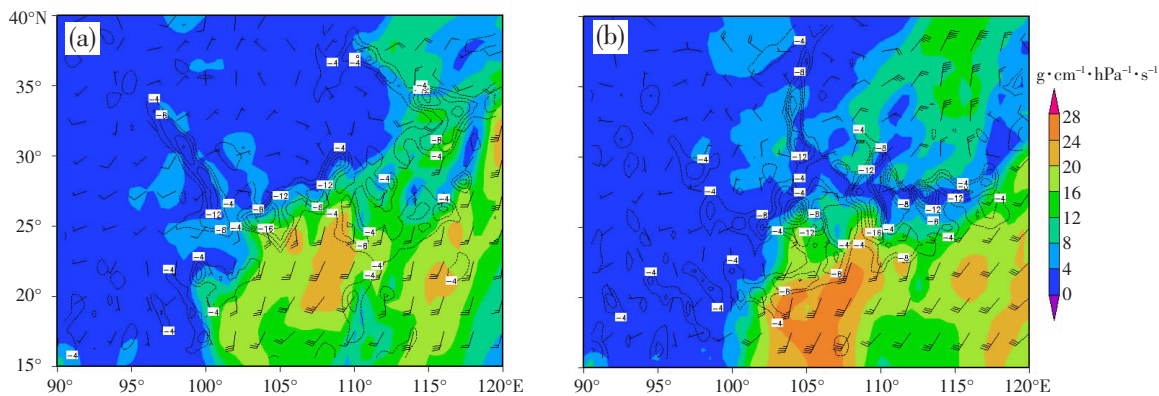


图6 2022年4月25日20时(a)和2023年5月22日05时(b)925hPa水汽通量(阴影,单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)、水汽通量散度(等值线,单位: $10^{-8} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)、全风速图(风羽,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

3 结论与讨论

利用地面高空常规观测资料和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA5再分析资料(时间分辨率为1h,水平分辨率为 $0.25^\circ\times 0.25^\circ$),对2022年4月25—30日(“4·25”过程)和2023年5月21—22日(“5·22”过程)两个极端强降水过程进行详细分析,得到以下主要结论:

(1)“4·25”过程为暖区暴雨过程,“5·22”过程为锋面暴雨过程;两次过程均发生在高温高湿的环境下,“4·25”过程具有持续时间久、范围大、短时雨强大和夜雨特征明显的特征;“5·22”过程具有持续时间短、降水中心范围小、短时雨强大和夜雨特征明显的特征。

(2)两次过程均发生在500~700 hPa高原东侧有小波动发展的天气尺度下,有利的环境条件为极端暴雨的形成提供较好的水汽和热力不稳定条件,异常强的层结不稳定和抬升作用对极端强降水的发展提供有利条件。“4·25”过程存在弱冷空气在中层侵入,而“5·22”过程是地面冷锋携带深厚的冷空气南压引起。这是“4·25”暖区暴雨过程与“5·22”锋面暴

雨过程的重要区别之一。

(3)超低空急流建立强劲的水汽通道,水汽输送强度与急流强度正相关。两次过程的强降水中心存在水汽通量辐合大值区,超低空急流输送的暖湿气流为强降水的产生提供稳定持续的水汽条件。两次过程相同特征是夜雨特征显著,这可能与急流的时间脉动相关,在暴雨最强时段出现时,“5·22”过程925 hPa急流比“4·25”过程更强,但“4·25”过程持续时间较长,可能存在多次脉动。

仅针对“4·25”暖区暴雨过程和“5·22”锋面暴雨过程,“4·25”过程范围广、持续时间长,是中高层不断有小槽过境,对低层暖湿气流的抬升作用以及低空急流持续脉动的影响;而“5·22”过程范围更集中、持续时间短,则是高空槽东移引导切变线南下,地面冷锋过境所造成的,因此持续时间短,但强度更大。此外,本研究分析发现,“5·22”过程的环流形势、环境条件、热力、动力结构和不稳定层结以及低空急流等条件较“4·25”过程更为有利,还需通过大量类似个例的总结分析,才能探明锋面暴雨和暖区暴雨的形成机理,进而找到锋面暴雨和暖区暴雨的预报着眼点和预报思路。

参考文献:

- [1] ZHAI P, ZHANG X, WAN H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. *Journal of climate*, 2005, 18(7): 1096–1108.
- [2] ZHU J. Impact of climate change on extreme rainfall across the United States [J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, 18(10): 1 301–1 309.
- [3] 李红梅, 周天军, 宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. *大气科学*, 2008(2): 358–370.
- [4] 齐道日娜, 何立富, 王秀明, 等. “7·20”河南极端暴雨精细观测及热动力成因[J]. *应用气象学报*, 2022, 33(1): 1–15.
- [5] 高晓梅, 任广治, 王向前, 等. 2018 年山东一次极端暴雨的环境场特征分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2023, 17(5): 56–63.
- [6] 张芳, 张芳华, 孔期, 等. 2018 年 5 月 21 日四川盆地极端大暴雨的中尺度成因和预报偏差分析[J]. *气象*, 2022, 48(6): 691–704.
- [7] 黄芳, 刘国忠, 黄增俊, 等. “22·06”广西极端暴雨过程低空急流作用[J]. *气象研究与应用*, 2023, 44(3): 1–8.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 冀翠华, 李姝霞. 开封“7·19”大暴雨天气过程的极端性分析[J]. *气象与环境科学*, 2021, 44(4): 53–62.
- [11] 李博, 吕桂恒, 高飞, 等. 鲁西南 2020 年两次区域性大暴雨过程形成机制分析[J]. *气象科技*, 2022, 50(5): 702–712.
- [12] 张江涛, 何丽华, 李江波, 等. 河北“23·7”极端暴雨过程特征及成因初探[J]. *大气科学学报*, 2023, 46(6): 884–903.
- [13] 张入财, 田金华, 陈超辉, 等. 郑州“7·20”特大暴雨极端性成因分析[J]. *气象与环境科学*, 2022, 45(2): 52–64.
- [14] 吴乃庚, 温之平, 邓文剑, 等. 华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J]. *气象科学*, 2020, 40(5): 605–616.
- [15] 何立富, 陈涛, 孔期. 华南暖区暴雨研究进展[J]. *应用气象学报*, 2016, 27(5): 559–569.
- [16] 刘泳涛, 万永建, 陈映强, 等. 潮汕地区暖区暴雨分型及其环流形势特征[J]. *广东气象*, 2022, 44(4): 1–5.
- [17] 田付友, 杨舒楠, 郑永光, 等. 北京地区两次极端特大暴雨过程中短时强降水环境条件对比分析[J]. *暴雨灾害*, 2021, 40(1): 27–36.
- [18] 钱卓蕾, 马洁华, 沈晓玲, 等. 弱天气强迫背景下浙江两次暖区大暴雨过程成因分析[J]. *气象科技*, 2022, 50(5): 713–723.
- [19] 陈芳丽, 姜帅, 李明华, 等. 边界层急流在粤东暴雨中心两次极端强降水过程中的作用[J]. *气象*, 2021, 47(3): 290–302.
- [20] 马长健, 李艳, 徐邦琪. 双低空急流对“21·7”河南极端暴雨的影响[J]. *大气科学*, 2023, 47(5): 1611–1625.
- [21] 覃皓, 农孟松, 邱滋, 等. 2022 年广西“龙舟水”暖区暴雨中低空急流的日变化机制[J]. *气象研究与应用*, 2023, 44(1): 20–25.
- [22] 李青春, 程丛兰, 全继萍, 等. 夏季两次不同强度暴雨过程的低空急流特征及其作用对比分析[J]. *气象*, 2022, 48(11): 1 384–1 401.
- [23] 李向红, 张雅昕, 周希源, 等. 2022 年桂林“龙舟水”降水特征及形成机制分析[J]. *气象研究与应用*, 2023, 44(1): 26–32.
- [24] 陈绍河, 蒋承志, 林文桦, 等. 广西防城港山区“6·16”大暴雨成因机制及数值模式误差分析[J]. *气象研究与应用*, 2022, 43(3): 93–97.
- [25] 孙素琴, 郑婧, 支树林, 等. 一次由“列车效应”引发的梅雨锋暴雨研究[J]. *高原气象*, 2015, 34(1): 190–201.
- [26] 蒋亚平, 农明哲, 马智, 等. 2022 年广西“6·11”极端暴雨成因及预报偏差分析[J]. *气象研究与应用*, 2023, 44(1): 57–63.
- [27] 陆小晓, 农孟松, 唐昌秀, 等. 弱引导气流背景下广西西部特大暴雨天气过程分析[J]. *气象研究与应用*, 2021, 42(2): 90–94.

Comparative analysis of the causes of two extreme heavy rainfalls during the previous flood season in northern Guangxi

PAN Shiqiu¹, TANG Xiaoqin², TANG Yi¹, OUYANG Rongqian¹, YANG Wei¹, LI Xianghong^{1*}

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

2.Gongcheng Meteorological Bureau, Guangxi Gongcheng 542500, China)

Abstract: Two extreme precipitation processes, April 25—30, 2022 (the "4·25" process) and May 21—22, 2023 (the "5·22" process), are analyzed by using conventional ground-based upper-air observations and the ERA5 reanalysis data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) to explore the triggering mechanisms of these two processes. April 25—30, 2022 ("4·25" process) and May 21—22, 2023 ("5·22" process) to explore the triggering mechanism of these two processes. The results show that: (1) Both processes occur in the weather scale of 500~700 hPa with small fluctuations developing on the east side of the plateau, and the "4·25" process is characterized by long duration, large range, strong short-term rain and obvious night rain. The "5·22" process is characterized by a short duration, small range of precipitation center, strong short-term rain and obvious night rain. (2) The favorable environmental conditions provide better conditions in terms of water vapor and thermal instability for the formation of heavy rainfall. However, the environmental conditions of the "5·22" process are stronger, and the unusually strong laminar instability and uplift provide favorable conditions for the development of the extreme heavy precipitation on "5·22" process. (3) The ultra-low-altitude jet establishes a strong water vapor channel, and there is an area of large water vapor flux convergence in the center of heavy precipitation in the two processes, and the warm and humid air transported by the ultra-low-altitude jet provides stable and continuous water vapor conditions for the generation of heavy precipitation.

Key words: extreme heavy rainfall; ultra-low-level jet; rainfall characteristics; pre-flood season