

王晓芳, 李山山, 汪小康, 等, 2022. 秦巴山脉“4·23”区域性暴雨的若干异常特征[J]. 气象, 48(3): 345-356. Wang X F, Li S S, Wang X K, et al, 2022. Anomalous characteristics of regional torrential rain in Qinling and Daba Mountains on 23 April 2021 [J]. Meteor Mon, 48(3): 345-356 (in Chinese).

秦巴山脉“4·23”区域性暴雨的若干异常特征^{*}

王晓芳 李山山 汪小康 李 超 杨 浩 崔春光 祁海霞

中国气象局武汉暴雨研究所暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205

提 要: 利用逐小时降水、雷达、FY-4A 卫星等观测资料及 ERA5 逐时再分析资料, 分析了 2021 年 4 月 23 日秦巴山脉大范围区域性暴雨过程的中尺度特征、水汽和环流异常特征, 结果表明, 该次暴雨过程范围大, 多站降水量突破历史同期极值, 且大巴山区出现了山地突发性暴雨事件。500 hPa 秦巴山脉异常的“东高西低”环流形势维持使得青藏高原至陕西间的气压梯度力增大, 中层西风气流增强。中低层多尺度天气系统的叠加作用是造成该次暴雨的背景动力条件, 西南低涡前方的东南气流一方面与北侧偏东风形成的切变线为暴雨发生提供了环境场的辐合上升运动, 另一方面将西南气流和偏南气流带来的水汽输送到秦巴山脉汇聚。同期近海台风和东北冷涡活动相关联的环流导致东北路径的水汽输送异常强(贡献达到 30%), 成为本次暴雨过程水汽来源的独特之处。与历史同期比, 偏南通道和东北通道的水汽路径上比湿都是异常的正距平, 说明暴雨期水汽来源丰沛。暴雨过程主要由西南低涡前方的一个中尺度对流系统活动造成, 大巴山区迎风坡对气流的地形抬升与环境场偏南气流的辐合上升叠加, 对流活动强, 降水强度大且突发性强; 而秦岭山区近地面是偏东风在山前辐合抬升, 中层为西南引导气流的环境场上升运动, 比大巴山区降水期的上升运动弱, 主要以层云降水为主, 但持续时间长, 累计降水量大。异常环流条件下多尺度系统相互作用、异常水汽输送结合地形影响是秦巴山脉暴雨发生的主要原因。

关键词: 秦巴山脉, 山地暴雨, 多尺度相互作用, 异常水汽输送

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.093002

Anomalous Characteristics of Regional Torrential Rain in Qinling and Daba Mountains on 23 April 2021

WANG Xiaofang LI Shanshan WANG Xiaokang LI Chao YANG Hao CUI Chunguang QI Haixia
Hubei Key Laboratory of Heavy Rain Monitoring Warning Research, Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan 430205

Abstract: Using hourly precipitation, radar, FY-4A satellite and other observational data, and ERA5 hourly reanalysis data, this paper analyzes the mesoscale characteristics, moisture and circulation anomalies of the large-scale regional torrential rain process in the Qinling and Daba Mountains on 23 April 2021. The results showed that the heavy rain occurred in a large area, and the precipitation at many stations broke through the historical extreme values. Meanwhile abrupt extreme torrential rain attacked the Daba Mountains. At 500 hPa, the abnormal “high in the east and low in the west” circulation situation over the Qinling and Daba Mountainous area increased the pressure gradient between Shaanxi and the western Qinghai-Tibet Plateau, causing the mid-level westerly airflow to have increased. At the same time, the superimposition of the mid- and low-level multi-scale weather systems provided the background dynamic condition for the torrential rain. The southeast airflow in front of the southwest vortex and the easterly wind on

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1507200)、国家自然科学基金项目(41975058、41620104009、91637211)和湖北省气象局科技发展基金项目(2019Z03、2021Q04)共同资助

2021 年 6 月 20 日收稿; 2021 年 9 月 30 日收修定稿

第一作者: 王晓芳, 主要从事中尺度气象学研究. E-mail: wangxf@whihr.com.cn

the north side formed a shear line that caused the convergence ascending motion of the environmental field while the other side transported the water vapor brought by the southwesterly airflow and the southerly airflow to the Qinling and Daba Mountains to converge. The circulation associated with the long-distance typhoon and the northeast cold vortex activity in the same period caused the abnormal water vapor transportation (30%) of the northeast path to be the unique source of water vapor for this torrential rain process. Compared with the same period in history, the specific humidity on the water vapor path of the south passage and the northeast passage was abnormally positive, indicating that there was abundant water vapor during the torrential rain period. The torrential rain process was mainly caused by the activity of a mesoscale convective system (MCS) in front of the southwest vortex. The topographical uplift of the windward slope of the Daba Mountains and the convergent ascending of the southerly airflow in the environmental field were superimposed. Sufficient water vapor at the lower level was transported vertically to the upper level by strong ascending motion, with strong convective activity, severe hourly rainfall and strong abruptness. However in the Qinling Mountains, the easterly wind converged and rose in front of the mountain, and the ascending movement of the environment field with southwestern airflow in the middle layer was weaker than that in the Daba Mountainous area during the severe precipitation period, and was dominated by stratiform precipitation. But the severe precipitation lasted for a long time, so the accumulated precipitation was a lot. In a word, multi-scale system interactions, abnormal water vapor transport combined with topographical influence under abnormal circulation conditions are the main reasons for the occurrence of this torrential rain process in the Qinling and Daba Mountains.

Key words: Qinling and Daba Mountains, mountain torrential rain, multi-scale interaction, abnormal water vapor transport

引 言

暴雨引发的洪涝灾害是我国主要的自然灾害,特别是在地形复杂的西部山地,暴雨尤其是突发性暴雨引发山洪带来的滑坡、泥石流、塌方等次生灾害,有时是毁灭性的灾难,如 2010 年 8 月 8 日舟曲特大泥石流事件(赵玉春和崔春光,2010;曲晓波等,2010)。牛若芸等(2018)统计表明我国西北和西南地区每年均约有 3 次区域性暴雨发生,而四川东北部大巴山到陕南秦岭山区位于西部山地东部,秦巴山脉一方面是暴雨多发地,另一方面地势陡峭,地表多石质土壤,遇有暴雨冲刷,极易诱发山洪及其次生灾害(陆本燕等,2011;黄楚惠等,2020)。

西部山区暴雨的发生与东亚夏季风活动有密切关系(王宝鉴等,2004;黄玉霞等,2017),强夏季风年,到达东亚夏季风西北影响区的水汽通量显著增加,该区降水偏多,弱夏季风年则反之。台风活动也往往造成西部山区暴雨的发生,侯建忠等(2006)统计陕西极端暴雨与台风活动相关率达到 87%,并指出近海台风活动对陕西暴雨过程的低层水汽和能量输送、高层 300 hPa 高空急流作用是关键。四川

(包括大巴山区)极端暴雨事件的 39%与台风活动有关(肖递祥等,2017)。上述表明近海台风活动带来的充沛水汽是秦巴山脉暴雨发生发展的有利条件,此外追踪不同高度水汽输送路径、源地及其贡献表明西北暴雨过程还存在异常的随西风气流的西路水汽输送和绕高原的东路水汽输送(陶健红等,2016;孔祥伟等,2021)。陈栋等(2007)进一步研究表明,在四川盆地东西两侧为高压、南北为低压控制的“鞍”型环流背景条件下,一方面可以使盆地低涡迅速聚集、合并发展,另一方面受地形阻挡和西伸的西太平洋副热带高压作用在四川盆地东部形成向北的急流辐合带,同时由于两支气流输送大量的水汽,暖湿空气在川东地区形成高温高湿的辐合区。

黄玉霞等(2019)指出复杂地形区域是西北东部日暴雨极值的大值区,如秦岭山区南麓佛坪—宁陕是暴雨日极值大于 550 mm 的中心,关中以北坡地是日暴雨极值中心,这些暴雨中心常位于山脉南侧坡地到平原的过渡带上,与气流在山脉迎风坡辐合抬升作用有关。毕宝贵等(2006)通过数值模拟发现,秦岭使大巴山、汉江河谷和陕北降水增加,对降水的影响通过地形产生的垂直次级环流来实现,降水增加的幅度随地形高度呈正相关。此外,秦巴山

脉暴雨过程常常伴随青藏高原低值系统东移(傅慎明等,2011;李国平和张万诚,2019)和西南低空急流的影响(肖红茹等,2021)。在有利大尺度天气背景下,西南低涡环流、切变线等天气系统辐合环流激发的MCS是造成秦巴山脉暴雨发生的关键(孙建华等,2015)。

2021年4月23日陕西南部的关中—秦巴山脉出现了一次区域大范围的暴雨过程,该次强降水引发陕西省内9条河流出现11次洪峰,国道县(乡)道路发生了多处塌方、小面积泥石流,交通中断。本文主要对这次秦巴山脉大范围区域性暴雨过程进行降水特征、多尺度影响系统、水汽输送、地形可能影响等展开分析。

1 资料和方法

本文所用资料:国家和区域站逐小时降水、雷达拼图、FY-4A卫星等观测资料,以及水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 、垂直25层的ERA5再分析资料。

方法:单站破纪录的降水量根据陕西国家观测站4月历史同期数据对比挑出的最大值,也称之为

单站降水极值。距平场算法:用1979—2021年ERA5逐时再分析资料合成4月00—23时的位势高度、风、湿度等物理量的平均值作为气候值,再用2021年4月23日逐时物理量值与气候值进行差值分析得到物理量的距平。中尺度对流系统(MCS)识别方法,根据国家气象中心Zheng et al(2008)基于面积重叠法(Arnaud et al,1992)开发的卫星云图MCS识别追踪系统——SatImage Viewer,识别标准为:MCS云团低于 -52°C ,冷云覆盖面积 $\geq 5 \times 10^4 \text{ km}^2$,持续时间大于6 h,面积最大时偏心率大于0.7。水汽轨迹聚类采用基于拉格朗日方法的HY-SPLIT后向轨迹模式,这里后向追踪5 d。

2 秦巴山脉强降水特征

2021年4月21—26日,秦巴山脉特别是陕西省南部出现了持续性降水天气,其中23日08时至24日08时陕西关中及其南部的秦岭、大巴山出现了2021年首场区域性大范围暴雨天气(图1a),陕西省关中地区为零散站点暴雨,暴雨成片区主要分

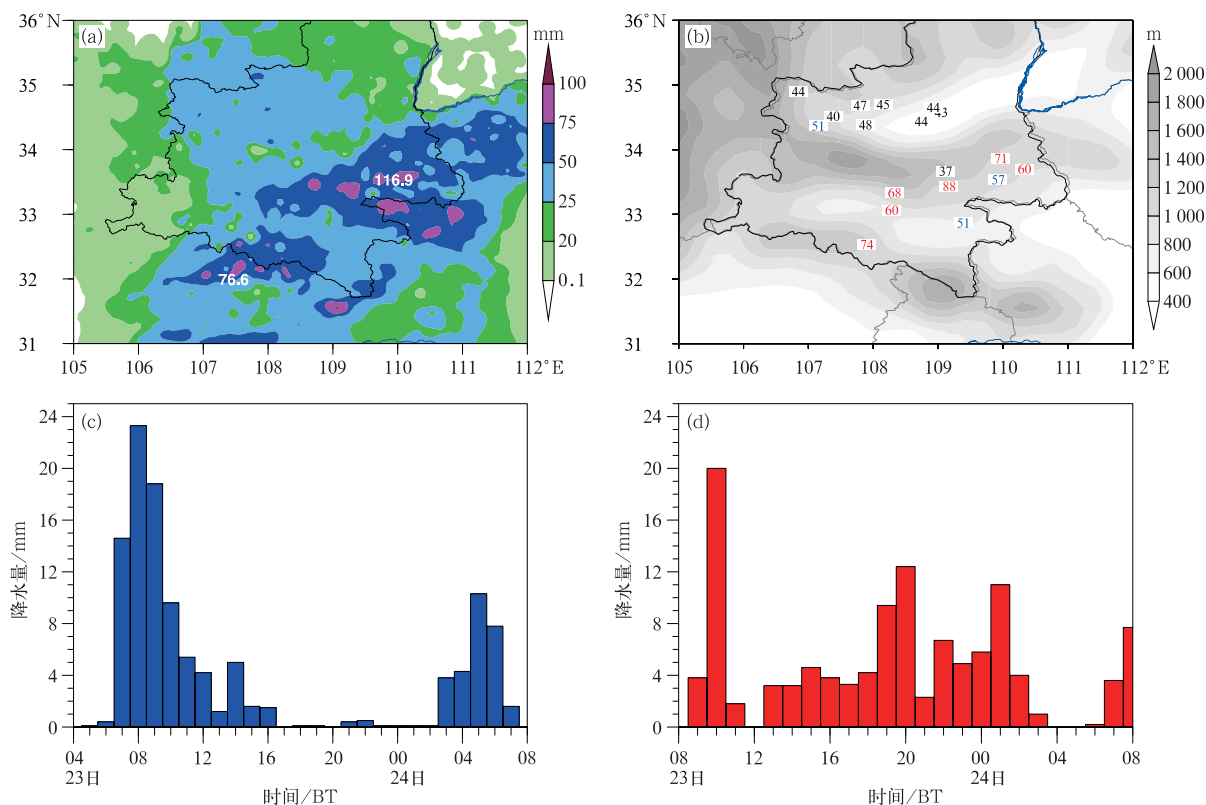


图1 2021年4月23日08时至24日08时(a)24 h累计降水量,(b)24 h降水量超过历史极值站点填图(阴影为地形高度);(c)四川富顺县五间房村站,(d)陕西山阳县十里铺街道站小时降水量演变

Fig. 1 Precipitation from 08:00 BT 23 to 08:00 BT 24 April 2021

(a) 24 h accumulated rainfall, (b) distribution of stations with 24 h accumulated rainfall exceeding historical extremes (shadow; topography height), (c, d) evolution of hourly rainfall at (c) Wujianfangcun Station in Fushun County of Sichuan and (d) Shilipu Street Station in Shanyang County of Shaanxi

布在汉中东部、商洛和安康地区,其中商洛市山阳县十里铺街道站降水量最大(116.9 mm),23日09—10时最大小时降水量为20 mm(图1d),陕西省内降水时间长、雨强小。与陕西相邻的四川东北部、湖北西北部、河南西部等地也均有成片的暴雨区,并有多站3 h降水量超过50 mm,具有突发性,如四川省富顺县五间房村站24 h降水量超过90 mm,其中23日06—09时3 h超过57 mm,07—08时小时降水量为24 mm(图1c),达到了山地突发性暴雨事件标准(Chen et al, 2021),对流性降水明显,可见此次大范围长时间持续的暴雨过程中含有山地突发性暴雨事件。

尽管陕西境内23日强降水对流弱,但为关中—陕南4月历史上最强区域性暴雨过程,共有18个国家站24 h降水量突破4月历史极值(图1b),陕西东南部破历史极值站点降水均超过50 mm,关中地区则在40~51 mm,可称之为陕西南部4月极端强降水过程。

3 暴雨过程多尺度天气系统的叠加作用

为了解23日暴雨过程的成因,这里先分析多尺度影响系统、水汽条件。23日08时500 hPa西太平洋副热带高压因受台风舒力基影响较同期明显要偏西偏北(图2a),中高纬度为强大的蒙古高压,它稳定维持期间与副热带高压形成南北几乎打通的高压坝。位于青藏高原东北部的低涡东偏南移动过程中与该高压坝间的气压梯度不断增大,使得低涡东南部西南风加大,其大值区正好位于四川北部;同时正涡度平流随高原低涡东移输送至四川北部—陕南一带,有利于盆地中低层低涡环流加深发展。在海平面气压图上(图2b)陕西处在东高西低形势下,有利于西南地区地面低压向其东北的陕西南部扩展。

中低层700 hPa存在一支从青藏高原南侧经云贵高原到达大巴山南侧的西南风急流,也形成了包括盆地、陕西省在内整个高原东侧的气旋性环流(图2c)。850 hPa,四川盆地出现了西南低涡(图2d),秦巴山脉为偏南风急流和偏东风急流的汇合,辐合明显,急流中心最大风速达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且中低层湿度增大;此外由偏东气流和西南低涡前方的偏南气流形成的切变线正好位于秦巴山脉,为暴雨的发生提供了良好的动力条件。

由图2c,2d看到,在秦巴山脉对流层中低层除

了切变线外,还存在三个与暴雨过程有关的低值系统:盆地西南低涡、东北冷涡、近海台风。通过这些系统形成了两条强的水汽输送通道(图2d):一是700 hPa和850 hPa上来自孟加拉湾和南海的偏南风急流水汽输送;二是850 hPa和925 hPa上的偏东风急流,它由多尺度天气系统形成:925~850 hPa(图略)在山东半岛发展的低涡与近海台风外围环流相关联,即台风外围东侧气流向北运动过程中与山东半岛低涡环流相融合,通过该低涡气旋性旋转,台风外围偏南气流在渤海湾转向西南方向运动,到达河南后又转为偏东气流向西汇合到陕南地区。由于环流相互影响,洋面上水汽输送气流通过近海台风和东北冷涡环流相关联依次旋转为偏南风急流、偏东风气流、北风急流,最后在东北冷涡西南侧北风急流一部分转为偏东风急流,从而将海洋上充沛水汽通过不同风向急流成功输送到陕西南部地区(图2d),上述过程是这次暴雨过程水汽输送较为特殊之处。

图2e,2f进一步给出了23日08时和14时相对湿度、相当位温、经向风和垂直运动合成环流的垂直分布。在23日08—14时秦巴山脉对流层低层800~700 hPa存在一条弱的相当位温锋区($31^{\circ} \sim 35^{\circ} \text{N}$),锋区随时间向北移动。08时降水主要位于大巴山南侧,此时可以看到偏南风沿大巴山南坡爬坡上升运动显著(图2e),且湿层深厚,相对湿度大于90%的厚度从地面延伸至350 hPa,同时在200 hPa高度也存在一相对湿度大值中心。14时以后,锋区北移,相对湿度大值区也北移至秦岭一带,湿度体现了与大巴山南坡类似的变化,但高湿区范围减小,特别是200 hPa高度湿度大值区偏北。由相当位温垂直分布看到,大巴山和秦岭降水期间基本是相对稳定的层结,但分别在600~500 hPa和600~400 hPa厚度层出现了不稳定层,厚度较薄。

4 秦巴山脉南北降水差异和降水过程的中尺度特征

利用风云卫星TBB资料识别23日暴雨过程主要由一个MCS活动造成(图3),MCS维持时间长达19 h,在700 hPa西南引导气流影响下向东北移动,最后在河南西北部消失(图3a)。MCS随时间偏心率渐渐变小,有效半径增加,结合图3c~3f中TBB分布可知云系范围随时间扩大,沿东西方向明显拉长,云顶TBB随时间先增加,到23日17时开

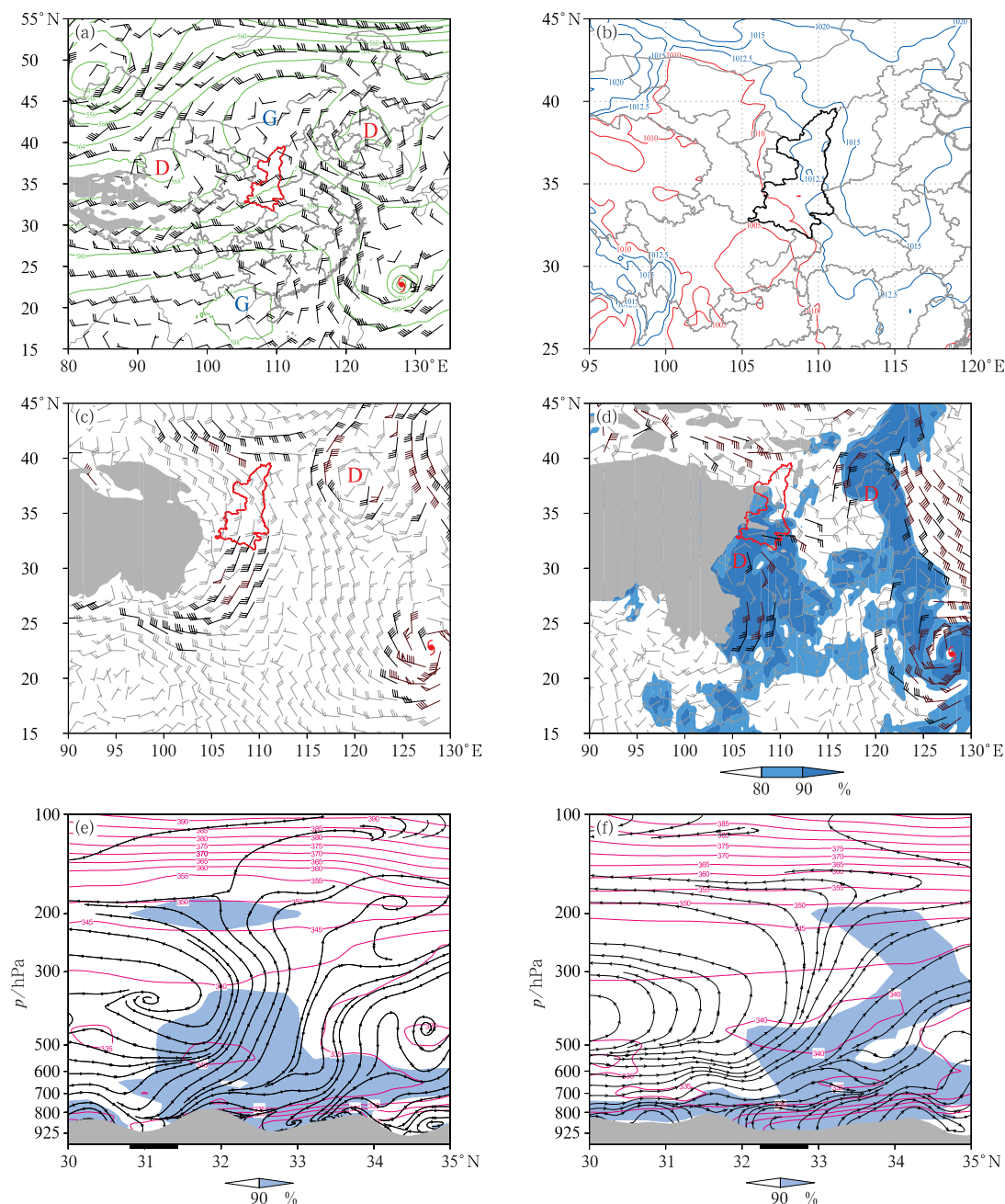


图2 2021年4月23日08时(a,b,c,d,e)和14时(f)天气形势
 (a)500 hPa 风场(风羽,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和位势高度场(绿线,单位:dagpm), (b)海平面气压场(单位:hPa),
 (c)700 hPa 风场, (d)850 hPa 风场(风羽,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和相对湿度(填色)、
 (e)沿 109°E 的流场(v 和 w)、相对湿度(浅蓝色阴影)、相当位温(紫色线,单位:K)垂直剖面
 (粗黑线为大巴山山坡区域), (f)同图 2e, 但为 14 时, 沿 110°E 的剖面(粗黑线为汉水河谷区)
 (图 2a~2d 中红色或黑色实线为陕西省界)

Fig. 2 The weather situation at (a, b, c, d, e) 08:00 BT and (f) 14:00 BT 23 April 2021
 (a) 500 hPa wind field (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and geopotential height field (green line, unit: dagpm),
 (b) sea level pressure field (unit: hPa), (c) 700 hPa wind field
 (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and relative humidity (colored), (e) meridional vertical cross-section of
 relative humidity (light blue shadow), equivalent potential temperature (purple line, unit: K)
 for v and w along 109°E of (thick black line: the hillside area of Daba Mountain),
 (f) same as Fig. 2e, but at 14:00 BT along 110°E (thick black line: the Hanshui River Valley Area)
 (The red or black solid lines in Figs. 2a–2d are the provincial boundaries of Shaanxi Province)

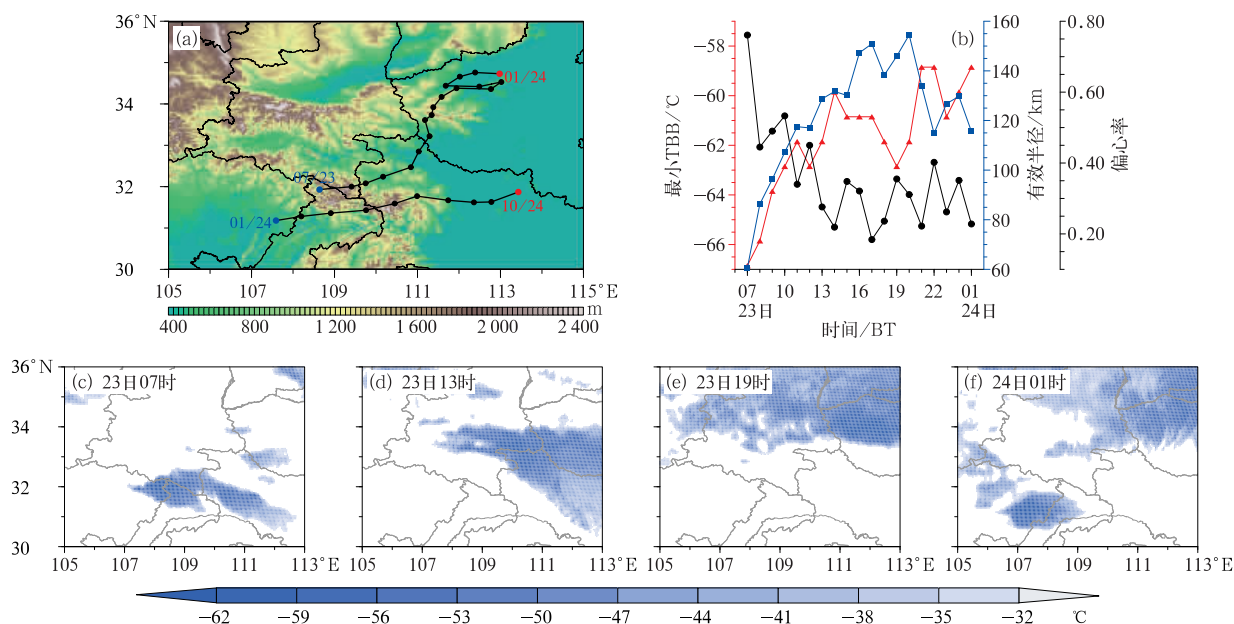


图 3 2021 年 4 月 23—24 日 FY-4A 卫星资料分析

(a) 追踪 MCS 轨迹(阴影为地形高度), (b) MCS 云系逐时最小 TBB、有效半径、偏心率变化, (c~f) 不同时间 TBB 分布

Fig. 3 Analysis of FY-4A satellite data in 23–24 April 2021

(a) MCS trajectory tracking (shadow: terrain height), (b) hourly minimum TBB, effective radius, and eccentricity change of the MCS, (c–f) TBB distribution at different times

始降低后又增加,这表示开始时刻在大巴山南侧山坡上形成的 MCS 呈现为准圆形、对流强、面积小,是一个发展较强的对流系统。在 MCS 移动到大巴山北侧后 TBB 升高,对流属性明显减弱,东西方向最大有效半径可达 155 km,呈现出以稳定降水为主的大范围层状云系,其中在 23 日 18—20 时范围最大(图 3b)。

23—24 日秦巴山脉暴雨过程中还有另一个 MCS 活动过程,从 23 日 01 时开始在大巴山南坡上生成,向东移动主要影响川东北和湖北地区降水(图 3a),这是另一个对流活动降水过程,此处不做详细介绍。

在秦岭相对集中降水时段,图 3a 显示 MCS 云系质心位于湖北西北部、河南西部等地,即秦岭山区东南部,这也解释了秦岭山区降水云系对流性较弱,主要是大范围层云(图 3c~3f),其中镶嵌少量对流(图 4d~4i),带来局地小时强降水,如出现在与地形有关的秦岭南坡陕西山阳县部分区域站的降水(图 1d)。此外,23 日 13 时开始在秦巴山脉北侧关中地区的气旋性环流辐合形成的较弱云系开始发展并东移,与低层偏东急流进入秦岭和大巴山之间河谷,风速辐合明显,使得东北移动的西南低涡云系增

强,云团进一步发展,下午与关中发展东移云团在秦岭山区汇合,秦岭南坡降水增强,表现出了一些局地对流云特征(图 4f~4h)。

23 日暴雨过程主要分为两个阶段:一是 23 日 02—10 时大巴山区域降水阶段,二是 23 日 10 时到 24 日 03 时秦岭山区及其以南河谷区域降水阶段,此阶段包含了关中一带降水时段:23 日 14—23 时。下文分两个阶段进一步分析秦岭山区南北降水过程的中尺度特征。

4.1 大巴山南坡降水中尺度特征和地形影响

第一阶段的强降水落区主要位于大巴山区南侧的迎风坡,降水首先在大巴山南侧坡地发展,小时雨强大于 15~20 mm 的降水出现在 23 日 06—10 时(图 5a, 5b),强降水落区站点成片且集中,即具有显著的对流特征。从组合反射率因子拼图看,此阶段山前 MCS 的回波呈现明显的组织化特征(图 4a~4c),大于 45 dBz 的强对流单体呈线状纬向排列在大巴山南坡上,新对流单体主要在山脉坡前被激发并向北即山脉方向移动,相对弱的层状回波随引导气流渐渐向大巴山山脊方向扩展(图 4c)。

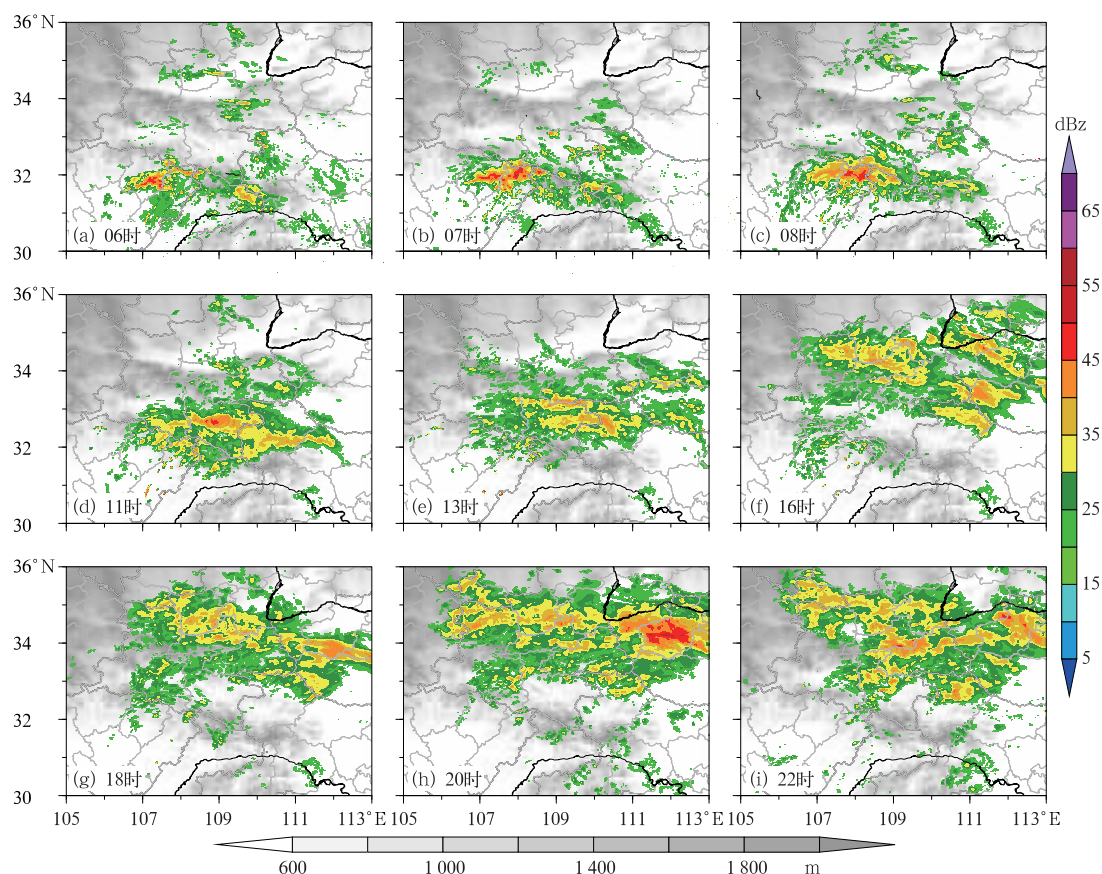


图4 2021年4月23日06—22时不同时刻的雷达组合反射率因子(填色)拼图
(阴影为地形高度,下同)

Fig. 4 Composite reflectivity (colored) of Doppler radar from 06:00 BT to 22:00 BT 23 April 2021
(shadow: terrain height, same below)

在此阶段大巴山区域 700 hPa 为明显的偏南暖湿气流(图 2c), 850 hPa 风速超过 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的偏南风 and 偏东气流构成切变线。最大湿度层位于 800 hPa 高度以下, 强降水发生前, 局地比湿最大, 湿层厚(图 5c)。平行切变线垂直流场和湿度场分布(图 5c), 对流低层偏南气流在迎风坡前发生气旋性切变转为偏东气流, 一部分偏东气流越过山脉, 在近地面沿山坡做下沉运动(图 5c 中 $108.5^{\circ} \sim 107^{\circ}\text{E}$ 处), 一部分遇到低层切变线区域辐合上升气流作上升运动。垂直于大巴山的合成环流, 中低层偏南风急流带来了的暖湿水汽在大巴山山坡前汇聚(图 5d), 地形高处地面温度较坡前平地低, 于是湿润的暖气流沿地形冷下垫面升温, 从而切变线南侧上升运动更加容易发展; 同时山前偏南风受到大巴山地形阻挡, 风速明显减弱, 又进一步加强了大巴山山坡上的辐合上升运动, 地形抬升作用显著, 利于地形坡地激发新对流, 随着上升运动对流垂直发展增强, 从而云系变厚, 受到 700 hPa 以上的西南气流引

导向北运动, 这就形成了图 4a~4c 中新对流在山前激发, 成熟的强对流回波位于山坡, 弱的层云回波位于山脊, 强降水主要在大巴山南侧山坡上发展。

4.2 秦岭—关中地区降水中尺度特征和地形影响

23 日 11 时以后小时降水大于 5 mm 的落区渐渐向北即秦岭发展, 降水先在秦岭和大巴山之间的汉水河谷集中增强, 小时降水量大多为 5~15 mm, 强度较第一阶段明显减弱, 对流弱, 层云回波占绝对优势。但随着降水向秦岭南坡发展, 出现了一些散点强对流回波, 少数站点小时降水量超过 20 mm (图 6a, 6b), 此阶段小时雨强虽小, 但持续时间长, 约有 17 h, 从而累计降水量大, 导致多个国家站突破历史同期极值, 暴雨区范围明显比第一阶段大(图 5a, 5b)。

23 日 11 时(图 4d), 雷达拼图显示一条带状回波在大巴山和秦岭之间的汉水河谷发展, 之后组织性强的回波主要在秦岭东南侧坡地上发展维持。14 时

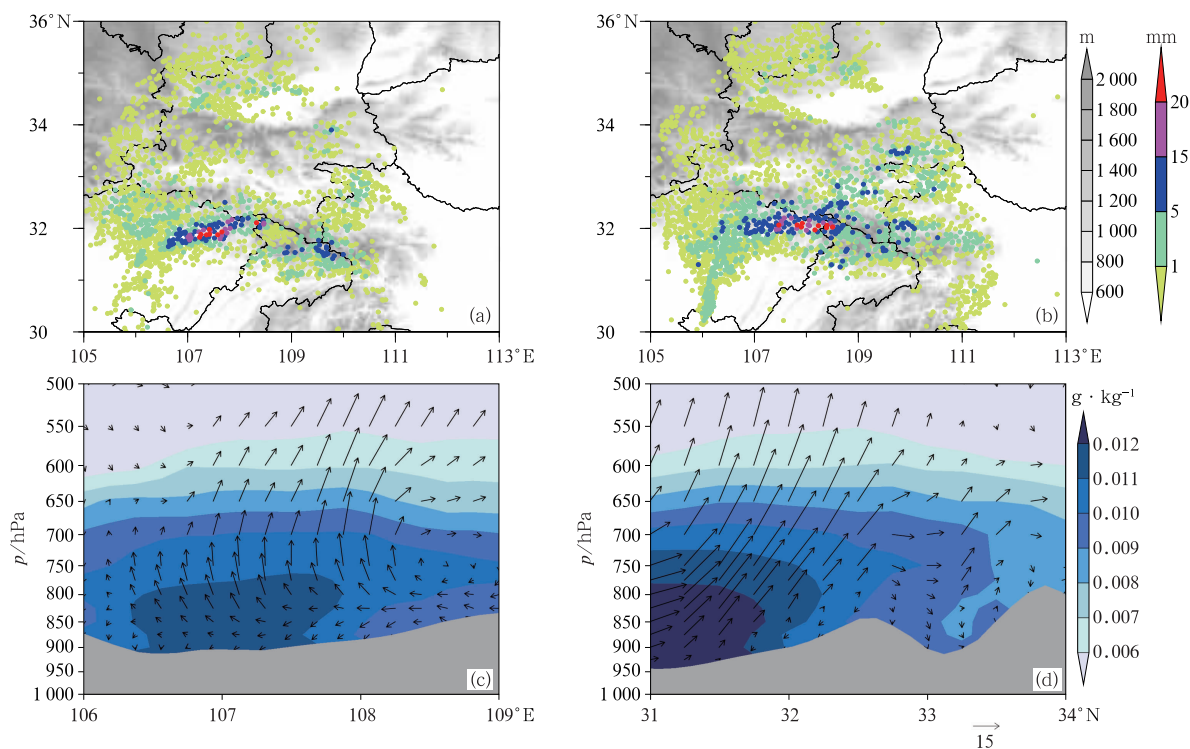


图 5 2021 年 4 月 23 日 (a, c) 07 时, (b, d) 09 时的 (a, b) 小时降水 (填色),
(c) 沿 32°N u 和 w , (d) 沿 107.5°E v 和 w 的合成流场 (矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
和比湿垂直分布 (填色)

Fig. 5 (a, b) Distribution of hourly precipitation, (c, d) vertical movement and specific humidity
(colored): (c) along 32°N u and w composite flow field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
(d) along 107.5°E v and w composite flow field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) on 23 April 2021
(a, c) 07:00 BT, (b, d) 09:00 BT

关中地区弱对流发展,回波主体随时间向南扩展与汉水河谷向北移动的回波渐渐融合,到 19 时形成中间强回波、南北弱回波的大范围回波结构,并覆盖了秦岭山区,大于 40 dBz 的回波零散分布,回波组织性差。新的强回波单体仍在南侧和东侧激发,并向秦岭山区移动(图 4d~4i)。

此阶段 850 hPa 因西南低涡和东北冷涡稳定增强发展,与其相关联的环流在汉水河谷形成了偏东风急流(图 6c)。近地层 925 hPa 上一股较强的东北气流,因秦巴山脉地形屏障,进入狭窄的汉水河谷地带,风速迅速增大至 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6d),形成了边界层急流(Du and Chen, 2019),边界层急流和低空急流的存在及其带来的暖湿水汽为河谷对流单体激发、回波发展提供了极为有利的动力和水汽条件。沿强降水带的风场和湿度场垂直剖面表明,在强降水落区东侧近地层 $110^{\circ} \sim 111^{\circ}\text{E}$ 附近偏东气流的上升运动较明显(图 6e, 6f),且河谷上升运动比秦岭坡

前强。偏东气流在秦岭南侧迎风坡爬升运动主要在近地层至 750 hPa,地形影响显著。

5 气候变化背景下的水汽异常输送

5.1 背景场和比湿异常特征

用 1979—2021 年 ERA5 逐时再分析资料合成 4 月 00—23 时各物理量的平均值作为气候值,计算 2021 年 4 月 23 日逐时物理量值与气候值的差值,进一步分析其暴雨过程环流异常和水汽异常的特征。

500 hPa 中高纬环流“两槽一脊”型,中高纬度高度距平场呈现为明显的东部正距平,西部特别是巴尔喀什湖槽区显著的负距平,进一步加深了“东高西低”环流型,增大了高低压之间的气压梯度,导致环流场上低压环流加强、高原及南侧西风气流增大,这有利于陕西暴雨的高空环流配置。在我国东北地

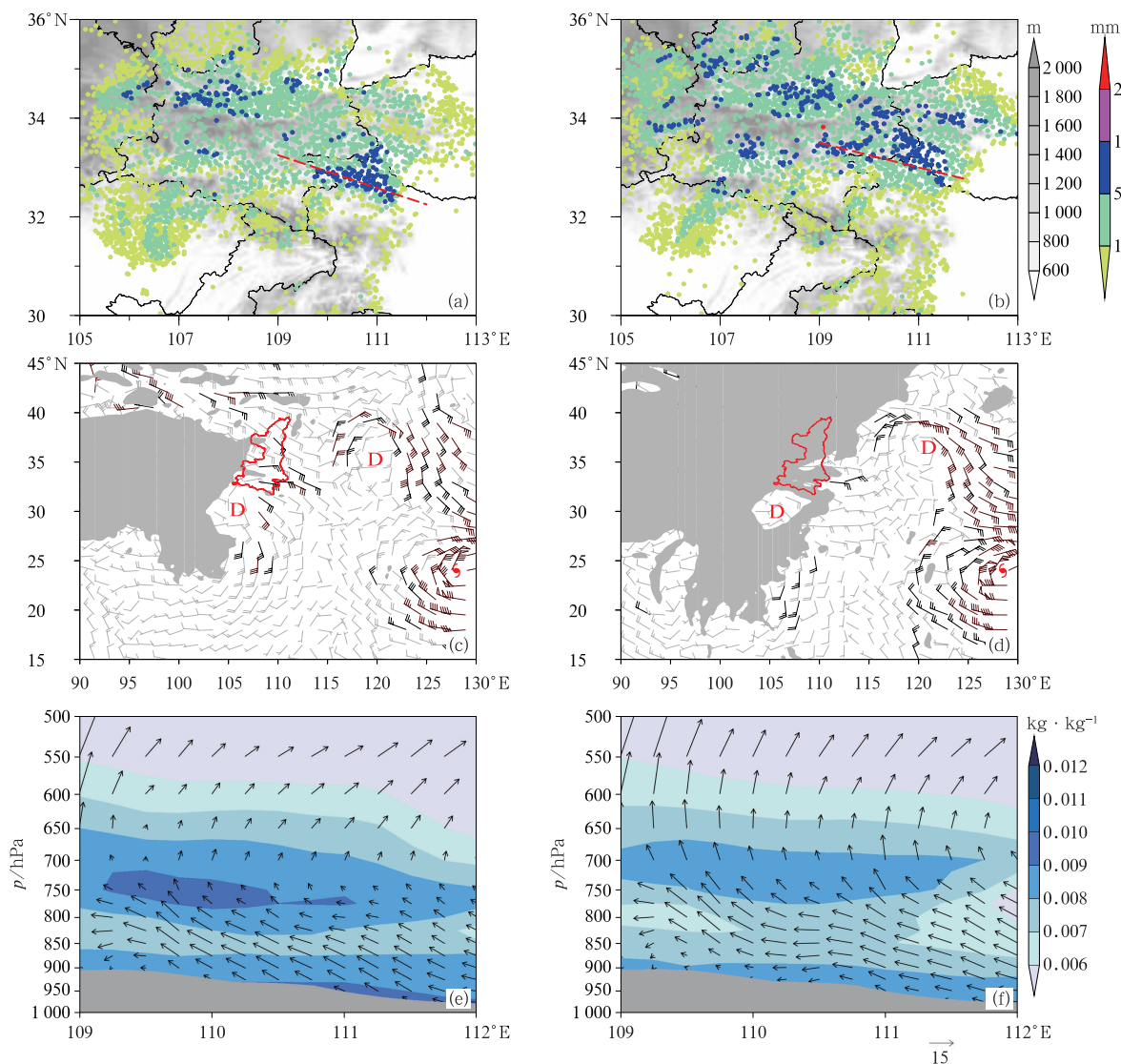


图6 2021年4月23日(a)16时和(b)18时的小时降水,(c)14时850 hPa低空急流以及(d)14时925 hPa边界层急流,(e)沿图6a、(f)沿图6b中虚线做 u 和 w 剖面的流场(矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和比湿垂直(填色)分布

Fig. 6 (a, b) Hourly precipitation at (a) 16:00 BT and (b) 18:00 BT, (c) the 850 hPa low-level jet at 14:00 BT, (d) the 925 hPa boundary layer jet at 14:00 BT, (e, f) the flow field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in the cross-sections of u and w and specific humidity vertical distribution (colored) along the dashed line in (e) Fig. 6a and (f) Fig. 6b respectively, on 23 April 2021

区有气旋性环流距平,说明东北冷涡存在且发展较强,在低涡西侧的反气旋性环流及其南侧的偏东气流也逐渐增强,同时,青藏高原南侧的气旋性环流也显示暴雨过程伴随着更强的南支槽活动。这两支异常环流是暴雨水汽输送通道的关键影响因素(图7a)。

中低层,西南低涡和台风区域均为高度场负距平,东北冷涡强度相对偏弱。风场距平上,除了台风舒力基区域异常风速正距平大外,在东北冷涡外围东北气流、西南低涡东部偏南风风速正距平均超过

$8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这些正异常风速出现,导致秦巴山脉水汽的异常输送,为暴雨发生提供良好的水汽来源输送通道。南侧异常的偏南风与北侧异常的偏东风,在增加水汽输送的同时,也在陕西尤其是陕西中南部形成了强的风切变和辐合。除此之外,台风的出现,导致距平场在台湾以东洋面出现了强的气旋性涡旋环流异常,其北侧的偏东气流则有利于暴雨的水汽供应(图7b)。

除了中层和低层环流的显著异常以外,引发此次暴雨的另一个重要原因是低层水汽含量的异常。

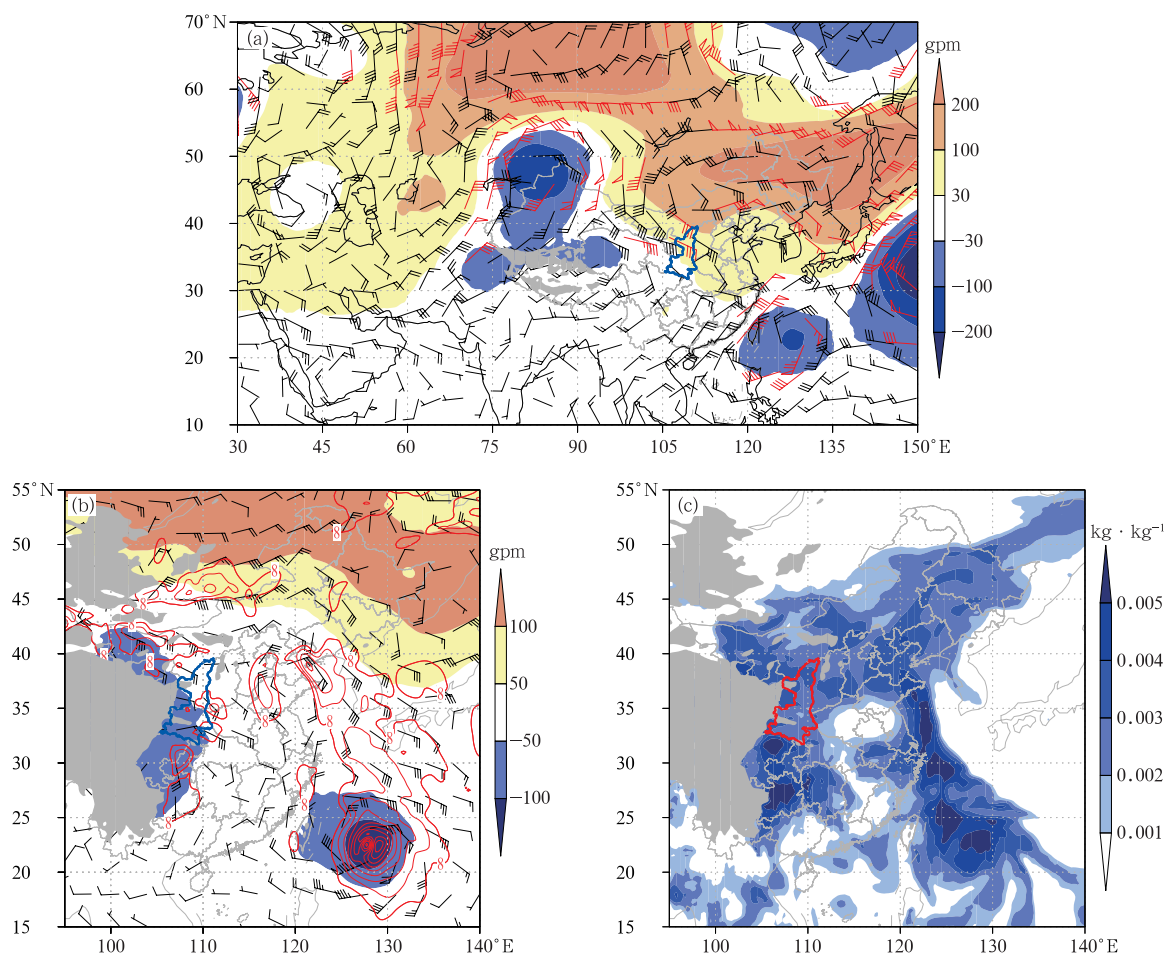


图 7 2021 年 4 月 23 日 08 时 (a) 500 hPa 平均位势高度(填色)和风场(风羽,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)距平, (b) 850 hPa 平均位势高度(填色)和风场(风羽,红线为风速距平值,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)距平, (c) 850 hPa 比湿距平

Fig. 7 (a) The 500 hPa average geopotential height anomaly (colored) and wind field anomaly (barb, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) 850 hPa average geopotential height anomaly (colored) and wind field anomaly (barb, red line: wind speed anomaly, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and (c) 850 hPa specific humidity anomaly at 08:00 BT 23 April 2021

4 月 23 日,陕西尤其是中南部地区及其西侧出现了强度超过 $0.005 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的水汽含量正偏差,其强度可与海上的台风环流场中的水汽含量正偏差相当,且这种正偏差在降水过程中始终维持,为暴雨的发生提供了重要的水汽条件(图 7c)。

5.2 水汽异常输送特征

采用 HYSPLIT 后向轨迹模式模拟 4 月 23 日暴雨过程水汽轨迹,并与历史同期 4 月陕西秦巴山脉水汽输送对比,模拟时段选取 1982—2021 年 4 月 23—24 日(其中 2021 年 4 月 23—24 日为此次暴雨过程,其他年份同期作为气候态的对比时段),初始场水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,模拟区域根据降水分布特点,同时考虑地形差异,由于水汽输送多集中在对流

层中低层,因此,选取地面以上 1 000 m 作为模拟的初始高度。模拟空气块后向追踪 5 d 的三维运动轨迹,每 6 h 输出一次轨迹点的位置。

水汽轨迹聚类表明,此次暴雨过程中离地 1 km 高度有 4 条水汽输送通道,以贡献多少排序依次为西南路径、东北路径、东南局地路径、西北路径。来自西南和东南暖湿区域的水汽仍是重要的水汽来源,占 56%,轨迹条数合计占 50%。另一条重要水汽路径来自东北方向,水汽贡献为 30%,由于该路径从西太平洋向北,经过渤海后转向西南,因此水汽有所耗损,轨迹条数占 32%。而偏西路径由较干旱的中亚地区以及经青藏高原东侧到达暴雨区,水汽和轨迹条数贡献分别为 14% 和 18%(图 8a)。同期气候态的水汽输送路径显示,最大水汽贡献来自东

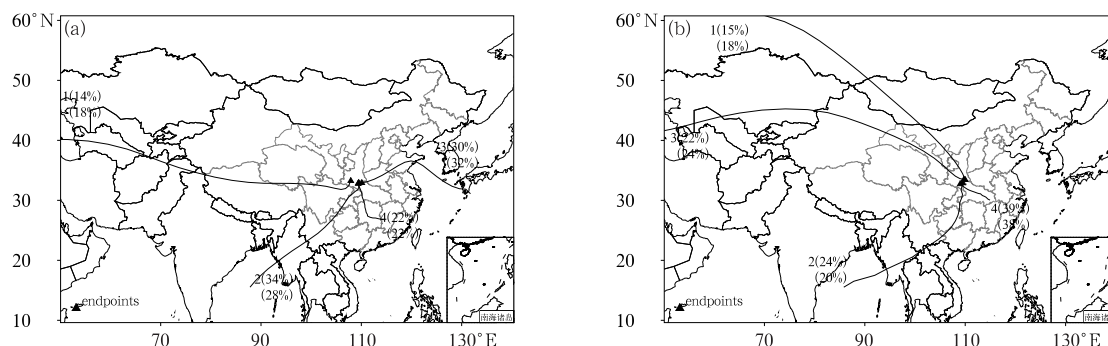


图8 (a)2021年4月23—24日暴雨过程和(b)同时期1982—2021年气候平均态的水汽输送轨迹聚类通道分析
(上面数字表示通道水汽百分率,下面数字表示通道轨迹条数百分率)

Fig. 8 Water vapor transport trajectory cluster channel analysis for (a) the torrential rain process in 23—24 April 2021 and (b) the average climate state during the same period from 1982 to 2021
(The upper and lower figures indicate the percentage of water vapor in the channel, the number of channel trajectories percentage, respectively)

偏南方向,达到39%,西南路径其次,为24%,另外两条水汽路径均来自西北方向,分别为15%和22%,均不经过青藏高原。此次暴雨过程与气候态相比,一条来自东海的水汽输送路径是其独特的水汽来源,贡献达到30%(图8a)。

综上所述,此次暴雨过程的水汽输送异常表现为:一是近海台风舒力基和东北冷涡环流相互作用带来的东北水汽通道,增加了秦巴山脉降水过程中的水汽条件;二是较干的西风水汽通道通过青藏高原向东输送,与高原槽东移影响相关,而气候态上西北两条路径均不经过高原地区。

6 结 论

本文利用逐小时降水、雷达、FY-4A卫星等观测资料,及ERA5逐时再分析资料,分析了2021年4月23日秦巴山脉大范围区域性暴雨过程的降水特征、多尺度影响系统、水汽异常输送、地形影响,得到以下结论:

(1)2021年4月23日秦巴山脉暴雨过程出现较早,范围大,陕西南部地区超过历史同期极值,在大巴山前的强降水达到山地突发性暴雨事件标准。暴雨过程主要由西南低涡前方的一个MCS活动造成,降水由南向北发展,第一阶段大巴山脉降水主要位于四川东北部、湖北西北部等地,对流较强,小时雨强大。第二阶段主要位于陕南、河南,降水对流性弱,以层状云的稳定性降水为主。

(2)多尺度天气系统的叠加。23日500 hPa秦巴山脉异常的“东高西低”环流形势造成秦巴山脉到其西部青藏高原间的气压梯度力增大,中层西风气

流增强。中低层同时存在高原槽东移、西南低涡、近海台风和东北冷涡等多个天气系统叠加影响。西南低涡前方的东南气流与北侧的偏东风形成的切变线为暴雨发生提供了环境场的辐合上升运动。近海台风和东北冷涡相关联的环流导致汉水河谷的偏东急流、西南低涡东侧的偏南风急流为暴雨过程带来了充足的水汽。

(3)水汽的异常输送。较早出现的台风舒力基活动与东北冷涡环流作用,带来的低层来自台风外围气流经东北冷涡环流,从黄渤海地区向陕南输送,该水汽输送占30%,而历史同期这条水汽输送通道的贡献并不重要。其次来自孟加拉湾和南海的低层水汽在内陆地区汇合,由发展强盛的西南低涡前方的东南气流输送到秦巴山脉汇聚,西南路径和东南路径水汽输送合占56%。

(4)地形对强降水的增幅作用明显。大巴山脉迎风坡对气流的地形抬升与环境场偏南气流的辐合上升叠加,上升运动强,将低层充足的水汽垂直输送至高层,对流活动强,小时降水强度大,突发性强。而秦岭山区近地面是偏东风在山前辐合抬升,中层为西南引导气流的环境场上升运动,比大巴山区降水期的上升运动弱,主要以层云降水为主,但持续时间长,累计降水量大。

参考文献

- 毕宝贵,刘月巍,李泽椿,2006. 秦岭大巴山地形对陕南强降水的影响研究[J]. 高原气象,25(3):485-494. Bi B G, Liu Y W, Li Z C, 2006. Study on influence of the mechanical forcing of mesoscale topography on the extremely heavy rainfall in southern Shaanxi on 8—9 June 2002[J]. Plateau Meteor, 25(3):485-494(in Chinese).
- 陈栋,李跃青,黄荣辉,2007. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发

- 展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用[J]. 大气科学, 31(2):185-201. Chen D, Li Y Q, Huang R H, 2007. The physical process analyses of the southwest vortex development and its effect on heavy rainfall in eastern Sichuan under the saddle pattern background of large-scale circulations[J]. Chin J Atmos Sci, 31(2):185-201(in Chinese).
- 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等, 2011. 梅雨期青藏高原东移对流系统影响江淮流域降水的研究[J]. 气象学报, 69(4):581-600. Fu S M, Sun J H, Zhao S X, et al, 2011. A study of the impacts of the eastward propagation of convective cloud systems over the Tibetan Plateau on the rainfall of the Yangtze-Huai River Basin[J]. Acta Meteor Sin, 69(4):581-600(in Chinese).
- 侯建忠, 王川, 鲁渊平, 等, 2006. 台风活动与陕西极端暴雨的相关特征分析[J]. 热带气象学报, 22(2):203-208. Hou J Z, Wang C, Lu Y P, et al, 2006. Activity of typhoons and extreme rainstorms in Shaanxi Province[J]. J Trop Meteor, 22(2):203-208(in Chinese).
- 黄楚惠, 李国平, 张芳丽, 等, 2020. 近 10a 气候变化影响下四川山地暴雨事件的演变特征[J]. 暴雨灾害, 39(4):335-343. Huang C H, Li G P, Zhang F L, et al, 2020. Evolution characteristics of mountain rainstorms over Sichuan Province in the past ten years under the influence of climate change[J]. Torr Rain Dis, 39(4):335-343(in Chinese).
- 黄玉霞, 王宝鉴, 黄武斌, 等, 2019. 我国西北暴雨的研究进展[J]. 暴雨灾害, 38(5):515-525. Huang Y X, Wang B J, Huang W B, et al, 2019. A review on rainstorm research in Northwest China[J]. Torr Rain Dis, 38(5):515-525(in Chinese).
- 黄玉霞, 王宝鉴, 王研峰, 等, 2017. 东亚夏季风的变化特征及其对甘肃夏季暴雨日数的影响[J]. 中国沙漠, 37(1):140-147. Huang Y X, Wang B J, Wang Y F, et al, 2017. Variation of East Asian summer monsoon and its influences on summer rainstorm days in Gansu, China[J]. J Desert Res, 37(1):140-147(in Chinese).
- 孔祥伟, 杨建才, 李红, 等, 2021. 河西走廊西部干旱区一次极端暴雨天气的水汽特征分析[J]. 气象, 47(4):412-423. Kong X W, Yang J C, Li H, et al, 2021. Analysis on water vapor characteristics of an extreme rainstorm in the arid region of western Hexi Corridor[J]. Meteor Mon, 47(4):412-423(in Chinese).
- 李国平, 张万诚, 2019. 高原低涡、切变线暴雨研究新进展[J]. 暴雨灾害, 38(5):464-471. Li G P, Zhang W C, 2019. Recent advances in the research of heavy rain associated with vortices and shear lines come from the Tibetan Plateau[J]. Torr Rain Dis, 38(5):464-471(in Chinese).
- 陆本燕, 刘伯权, 吴涛, 等, 2011. “7.23”商洛特大暴雨山阳县校舍灾害调查研究[J]. 灾害学, 26(2):102-106. Lu B Y, Liu B Q, Wu T, et al, 2011. Investigation of damages to school buildings by large-scale rainstorm of 7.23 Shanyan County[J]. J Catastrophol, 26(2):102-106(in Chinese).
- 牛若芸, 刘凌华, 刘为一, 等, 2018. 1981—2015 年中国 95°E 以东区域性暴雨过程时、空分布特征[J]. 气象学报, 76(2):182-195. Niu R Y, Liu C H, Liu W Y, et al, 2018. Characteristics of temporal and spatial distribution of regional rainstorm processes to the east of 95°E in China during 1981—2015[J]. Acta Meteor Sin, 76(2):182-195(in Chinese).
- 曲晓波, 张涛, 刘鑫华, 等, 2010. 舟曲“8.8”特大山洪泥石流灾害气象成因分析[J]. 气象, 36(10):102-105. Qu X B, Zhang T, Liu X H, et al, 2010. Analysis on the meteorological causes for the 8 August 2010 massive mudslide in Zhouqu, Gansu Province[J]. Meteor Mon, 36(10):102-105(in Chinese).
- 孙建华, 李娟, 沈新勇, 等, 2015. 2013 年 7 月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征[J]. 气象, 41(5):533-543. Sun J H, Li J, Shen X Y, et al, 2015. Mesoscale system study of extreme rainfall over Sichuan Basin in July 2013[J]. Meteor Mon, 41(5):533-543(in Chinese).
- 陶健红, 孔祥伟, 刘新伟, 2016. 河西走廊西部两次极端暴雨事件水汽特征分析[J]. 高原气象, 35(1):107-117. Tao J H, Kong X W, Liu X W, 2016. Analysis on water vapor characteristics of two extreme rainstorm events in western Gansu Corridor[J]. Plateau Meteor, 35(1):107-117(in Chinese).
- 王宝鉴, 黄玉霞, 何金海, 等, 2004. 东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系[J]. 高原气象, 23(6):912-918. Wang B J, Huang Y X, He J H, et al, 2004. Relation between vapour transportation in the period of East Asian summer monsoon and drought in Northwest China[J]. Plateau Meteor, 23(6):912-918(in Chinese).
- 肖递祥, 杨康权, 俞小鼎, 等, 2017. 四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J]. 气象, 43(10):1165-1175. Xiao D X, Yang K Q, Yu X D, et al, 2017. Characteristics analyses of extreme rainstorm events in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 43(10):1165-1175(in Chinese).
- 肖红茹, 王佳津, 肖递祥, 等, 2021. 四川盆地暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 47(3):303-316. Xiao H R, Wang J J, Xiao D X, et al, 2021. Analysis of warm-sector rainstorm characteristics over Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 47(3):303-316(in Chinese).
- 赵玉春, 崔春光, 2010. 2010 年 8 月 8 日舟曲特大泥石流暴雨天气过程成因分析[J]. 暴雨灾害, 29(3):289-295. Zhao Y C, Cui C G, 2010. A study of rainstorm process triggering Zhouqu extremely mudslide on 8 August 2010[J]. Torr Rain Dis, 29(3):289-295(in Chinese).
- Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, 2008. Climatological distribution and diurnal variation of mesoscale convective systems over China and its vicinity during summer[J]. Chin Sci Bull, 53(10):1574-1586.
- Arnaud Y, Desbois M, Maizi J, 1992. Automatic tracking and characterization of african convective systems on meteosat pictures[J]. J Appl Meteor Climatol, 31(5):443-453.
- Chen Y R X, Wang X F, Huang L, et al, 2021. Spatial and temporal characteristics of abrupt heavy rainfall events over Southwest China during 1981-2017[J]. Int J Climatol, 41(5):3286-3299.
- Du Y, Chen G X, 2019. Heavy rainfall associated with double low-level jets over Southern China. Part II: convection initiation[J]. Mon Wea Rev, 147(2):543-565.