

乔丹杨,王瑾婷,刘帆,等. MCC引发的一次短时强降水环境场和云参数特征[J]. 陕西气象, 2025(2):1-8.

文章编号:1006-4354(2025)02-0001-08

MCC引发的一次短时强降水环境场和云参数特征

乔丹杨^{1,2},王瑾婷¹,刘帆¹,卢晔^{2,3},高萌¹,谢逸雯¹

(1. 咸阳市气象局,陕西咸阳 712000;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 宝鸡市气象局,陕西宝鸡 721000)

摘要:利用常规观测资料、欧洲中心 ERA5 再分析资料以及 FY-4A 卫星定量产品,对 2022 年 7 月 15 日陕西关中东部中尺度对流复合体(mesoscale convective complex, MCC)引发的一次短时强降水过程发生的环境场和云特性参数进行了分析。结果表明:(1)此次过程发生在副高、短波槽和低涡切变线共同影响的环流背景下,前期受副高控制不稳定能量持续积累,水汽条件充沛,在地面辐合线动力抬升作用下触发对流,造成短时强降水。(2)大范围短时强降水发生在 MCC 成熟阶段,当 $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积达到最大时,降水强度达到最大,当 $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积开始减小时,降水强度开始减弱。(3)短时强降水主要分布在地面辐合线附近,且其上空对应的冷云区 $T_{\text{BB}} \leq -72\text{ }^{\circ}\text{C}$,同时云顶高度发展至 16 km 以上。短时强降水发生前, TBB 呈波动下降、云顶高度呈波动上升的特征。当 TBB(T_{BB})、TBB 平均值(T_{BBavg})和 TBB 最小值(T_{BBmin})越小,最大 TBB 梯度(G)和 TBB 变化率(R)越大时,雨强越大。

关键词: MCC; 短时强降水; FY-4A; 黑体亮度温度(TBB); 云顶高度(CTH)

中图分类号: P458.3

文献标识码: A

近年来,全球各地极端天气事件频发^[1],中国大部分地区强降水和极端强降水事件发生频率与强度均呈上升趋势^[2-5]。从黄河流域近 50 a 极端降水事件时空演变特征来看,21 世纪以来黄河流域降水强度及极端强降水呈显著增加趋势^[6-7]。关中位于陕西省中部,地貌为三面环山向东敞开的河谷盆地,下垫面差异明显,暴雨大多发生在 7—8 月,具有阶段性和集中性的特点,短时强降水时有发生^[8-11],常造成城市积涝、山洪和地质灾害等风险,因此对短时强降水天气的监测和预报尤为重要。

随着近几年卫星遥感技术的快速发展,国内外诸多学者开展了基于各类卫星产品的降水云团

云特性参数研究。桂海林等^[12]发现云顶温度、云光学厚度和云粒子平均尺度三者与降水概率具有较高相关性。高洋等^[13]应用卫星资料对“21·7”河南暴雨云宏微物理特征分析发现,对流云团光学厚度的极大值提前于降水量极大值的出现时间,光学厚度的跃增和较大值的维持可预示强降水的出现和降水强度的增大时间。还有研究表明,黑体亮度温度(black-body temperature, TBB)的发展、合并与对流云团的快速发展、合并、加强有较好的对应关系^[14],强降水中心对流云团平均面积变化和 TBB 变化与站点降水强度变化特征较为一致^[15],云顶最低 TBB 与小时雨强成

收稿日期: 2024-03-29

作者简介: 乔丹杨(1992—),女,陕西咸阳市人,硕士,工程师,主要从事强对流天气预报预警技术研究。

通信作者: 王瑾婷(1992—),女,陕西宝鸡人,硕士,工程师,主要从事短期天气预报技术研究。

基金项目: 中国气象局预报司 2023 年复盘总结专项(FPJZ2023-133);秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2023Y-15);陕西省自然科学基金基础研究计划青年课题(2023-JC-QN-0311);咸阳市气象局科学技术研究项目(2023SJZL-3)

反比, TBB 梯度和降温率与小时雨强成正比^[16]。张夕迪等^[17]发现 TBB 与地面降水强度之间具有较好的对应关系。孙绍辉等^[18]以红外亮温和亮温差作为参数, 建立雨强查算表, 对降雨区雨强估算的准确率大于 80%。诸多研究表明降水云团 TBB 和降水强度密切相关, 但都以定性分析居多, 缺乏定量化分析, 且基于多种卫星产品对中尺度对流复合体 (mesoscale convective complex, MCC) 云参数特征的研究更是鲜见。

以 2022 年 7 月 15 日陕西关中东部 MCC 引发的一次大范围短时强降水天气为例, 对其发生的环境场及 MCC 云团卫星定量化产品特征进行分析, 探索云特性参数与短时强降水之间的关系, 以期对短时强降水监测预警提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料说明

使用资料包括: (1) 2022 年 7 月 15 日 08 时—16 日 08 时 (北京时, 下同) 陕西省 1 816 个自动气象站日降水量、小时降水量、温度、露点温度、气压和风向风速等观测资料及西安泾河站探空资料。(2) 环流形势分析使用欧洲中期天气预报中心 (European centre for medium-range weather forecasts, ECWFMF) 提供的 ERA5 逐小时再分析资料, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。(3) 卫星定量产品分析采用国家卫星气象中心提供的 FY-4A 静止气象卫星 AGRI 仪器载荷的 L2 级产品中 TBB 和云顶高度 (cloud top height, CTH) 等资料, 其中 TBB 采用 NOM Channel12 (中心波长 $10.8 \mu\text{m}$) 的数据。以上产品空间水平分辨率为 $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, 全圆盘成像仪观测时间为每 15 min

一次, 中国区域观测时间为每 5 min 一次。

1.2 皮尔逊相关系数

采用皮尔逊相关系数对此次过程的 TBB 和降水强度的相关性进行评估。皮尔逊相关系数是一种衡量两个变量之间线性相关程度的统计量, 取值范围为 $[-1, 1]$, 1 表示完全正线性相关, -1 表示完全负线性相关, 0 表示无线性相关, 计算公式如下。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (1)$$

式中, N 为小时雨强达到 20 mm 以上的总站次 (198 站次), X 和 Y 分别表示单站小时降水量和该时次内 TBB 平均值, \bar{X} 和 \bar{Y} 分别表示所有计算站点的小时降水量平均值和 TBB 平均值。

2 天气概述

2.1 降水特征

2022 年 7 月 15 日傍晚至 16 日清晨, 陕西关中一带出现大范围暴雨天气, 其中渭南出现大暴雨。降水量分布显示 (图 1a), 暴雨落区主要集中在关中东部, 共出现 264 站暴雨及 26 站大暴雨, 最大降水量为渭南蒲城紫荆公园站 153 mm。据统计, 此次过程有 252 站突破建站以来日降水量极值。从小时降雨量来看 (图 1b), 关中东部出现短时强降水的时段为 15 日 21:00 至 16 日 06:00, 多站小时降雨量突破建站以来历史极值。其中, 15 日 23 时出现短时强降水的站数最多, 达 66 站次, 16 日 00 时为此次过程中的最强降水时段, 该时次渭南市蒲城县兴镇雨强达 81.8 mm/h。可见,

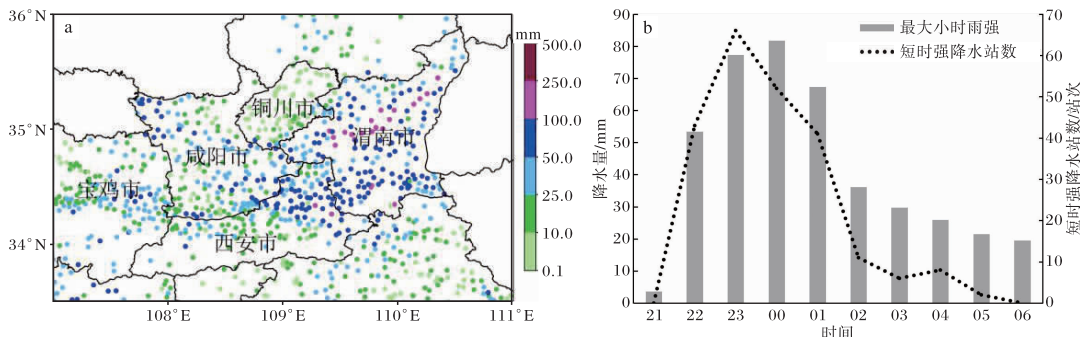


图 1 2022-07-15T08—16T08 关中附近累积降水量分布图 (a) 和关中东部最大小时降雨量与短时强降水站数时序变化图 (b) (审图号为 GS(2019)3082 号, 下同)

本次过程具有降水时段集中、极端性强和影响范围广等特点。

2.2 环流形势

7月15日08时500 hPa天气图上(图2a),西太平洋副热带高压(下简称副高)呈东西带状分布,588 dagpm 线脊点位于100°E附近,关中东部处于副高边缘。此外,700 hPa 河套西侧有一低涡并有切变线配合,低涡和切变线附近有强烈的上升运动。受副高外围暖湿气流作用,甘肃南部和陕西大部均处于850 hPa 饱和湿区。20时(图2b),500 hPa 低槽东移发展,经向度逐渐加大,700 hPa 低涡中心移至陕北上空,关中上空处于切变线前侧,同时低涡东南侧有西南暖湿气流输

送,冷暖空气在关中地区交汇,锋生作用强烈,良好的动力和水汽条件为关中东部短时强降水的发生提供了有利条件。

由于前期关中地区长时间处于副高控制下,不稳定能量不断积累并迅速攀升。15日20时西安泾河站探空资料(图略)显示,大气层结呈“上干冷、下暖湿”结构,对流层中下层接近饱和,暖云层厚度达5 km左右,具有较高的降水率,环境参数显示,850 hPa 和500 hPa 温差($t_{850-500}$) ≥ 20 °C,总指数(TT) ≥ 40 °C,SI指数为 -2.4 °C,K指数达41 °C,CAPE值为2 135 J/kg,表明大气处于强位势不稳定状态,仅需一定上升运动即可触发对流。

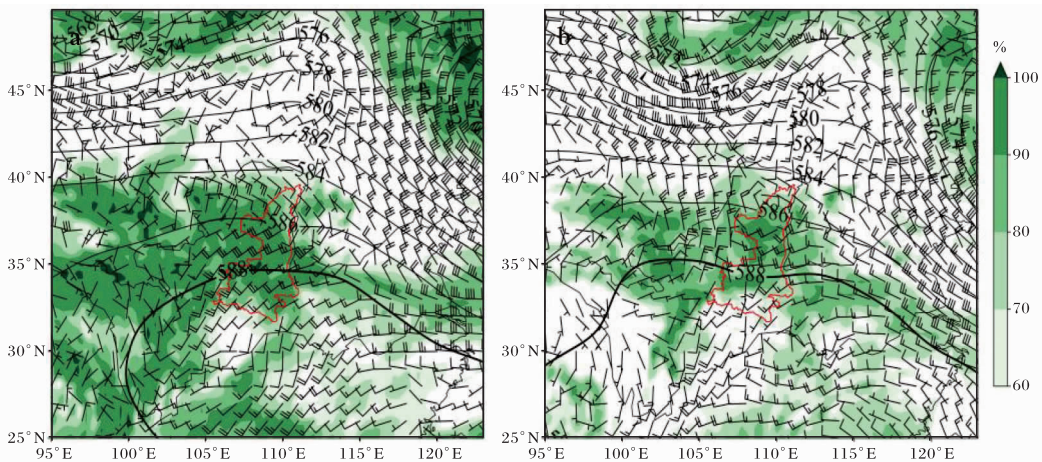


图2 2022-07-15 500 hPa 位势高度场(等值线,单位为 dagpm)、700 hPa 风场(风羽,单位为 m/s)与850 hPa 相对湿度场(填色)(a 08时,b 20时)

2.3 中尺度系统

中尺度辐合线或辐合中心是触发对流产生的重要条件之一。对此次降水过程中的地面辐合线演变进行分析,15日21:00(图3a),宝鸡中部和西安东部分别有中尺度涡旋A和B存在,咸阳南部至西安中部存在地面辐合线,辐合线西侧为西北风,由北部高海拔地形下偏北气流俯冲触地形成,东侧为边界层环境气流导致的偏东风,该时次内中尺度涡旋B和地面辐合线逐渐开始合并增强,在辐合线和中尺度涡旋附近出现了15~50 mm/h强降水。22:00(图3b),地面辐合线东移至西安东北部,另外在渭南北部出现一条东北—西南向的辐合线,强降水出现在辐合线附近,并且短时强

降水站数达到本次过程中最多。此外,偏北气流受到秦岭北麓的地形抬升作用,在西安西北部也造成了局地强降水。23:00(图3c),西安东北部至渭南中部的地面辐合线稳定维持,对应时次出现单站最大小时降雨量81.8 mm。16日00:00(图3d),从甘肃东部而来的下坡风逐渐占据关中东东部地区,西北风与偏东风在渭南北部形成东北—西南向辐合线,辐合线附近小时降水量最大达67.4 mm。同时,在秦岭北麓地形动力抬升作用下西安地区出现了小范围15 mm/h以上降水。01:00(图略)地面风场演变为偏西风 and 偏北风,地面辐合线消失,降水强度和范围也随之减小。

从地面辐合线和降水演变可见,此次过程地

面辐合线的位置和短时强降水落区基本吻合,表明地面辐合线是此次短时强降水天气的主要触发

和维持机制,秦岭北麓地形抬升作用也有利于降水增加。

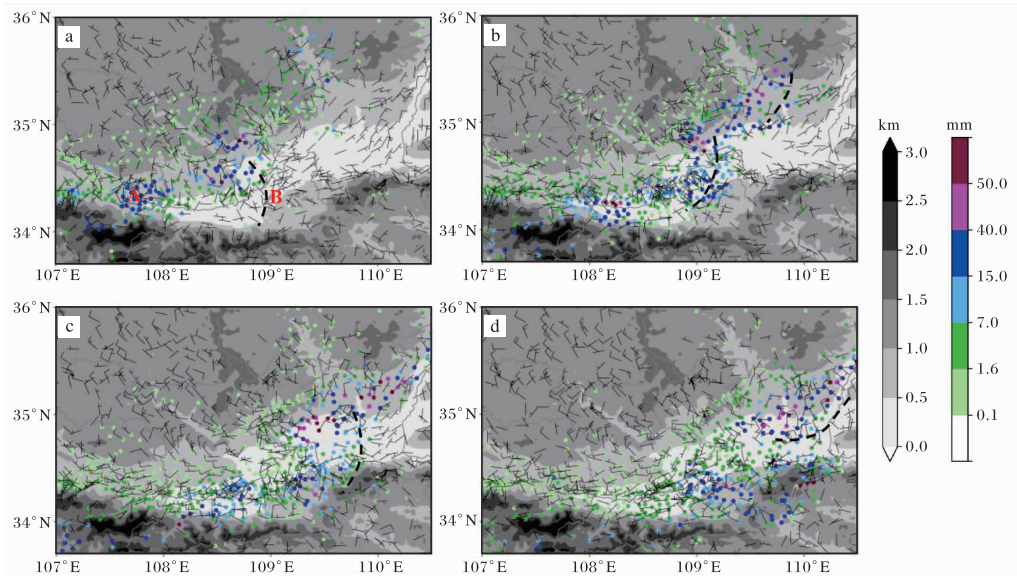


图3 2022-07-15T21—16T00 地面风场(风羽,单位为 m/s)和站点 1 h 降雨量(圆点)分布
(a 15 日 21 时,b 15 日 22 时,c 15 日 23 时,d 16 日 00 时;黑色虚线为地面辐合线;A、B 为中尺度涡旋;填色为海拔高度)

3 卫星反演云参数特征

3.1 TBB 演变特征

FY-4A 产品中的 TBB 由云顶亮温定标转换而来,其能够定量化揭示降水云系的演变特征^[19]。从环流形势分析可知,15 日白天河套西部低涡切变线东移发展,配合 500 hPa 副高外围暖湿气流,首先在甘肃东部和陕北地区产生了弱降水,当降水云团从庆阳经咸阳北部移入陕西时,由于对流条件转好和地面辐合线的触发,对流迅速发展。从云系演变来看,16:30(图略),甘肃庆阳有小团积云向东传播发展,在咸阳北部造成小范围短时强降水,云顶中心 TBB 迅速下降,下降速率远超过其他地区,表明对流云团正处于强烈垂直发展阶段,随后,在 700 hPa 西北气流引导下由咸阳北部移入关中。21:30(图 4a)该云团主体移至关中中部,受咸阳、西安交界处地面辐合线触发加强,云顶中心 $T_{BB} \leq -62$ °C, -62 °C 冷中心边缘为 TBB 梯度大值区,已具有深对流特征,短时强降水发生在 TBB 低值中心区域。22:30(图 4b),冷云范围进一步扩大至关中东部,云团形态逐渐由近圆形演变为椭圆形,长轴呈东北—西南

向,短时强降水区范围也随之增大,分布在地面辐合线附近及 $T_{BB} \leq -72$ °C 冷云区,该时次内短时强降水站点数达到最多。23:30(图 4c),云团范围继续扩大,边界光滑、清晰,冷中心边界 TBB 梯度也不断增大,随着地面辐合线的东移,短时强降水雨带向东北方向略有移动,与 $T_{BB} \leq -72$ °C 冷云区范围重合,出现了单站最大雨强(81.8 mm/h)。00:30(图 4d),暴雨云团移动缓慢,边界十分清晰,冷云面积和云团边界 TBB 梯度均达到此次过程中最大,之后冷云面积和云团边界 TBB 梯度迅速减小,云团主体开始松散并减弱,降水范围和强度也逐渐减小至结束。

从冷云面积演变(图 5a)来看, ≤ -32 °C 和 ≤ -52 °C 冷云面积从 17:30 开始逐渐增加,在 21:00—03:00 持续的 6 h 内, ≤ -32 °C 冷云面积达到 10.0×10^4 km² 左右,并在 21:30—22:30 出现一次跃增;22:30 左右, ≤ -32 °C 冷云面积达到最大(10.6×10^4 km²)。另外,在 18:30—03:30 持续的 9 h 内, ≤ -52 °C 冷云面积达到 5.0×10^4 km² 以上,22:00 左右, ≤ -52 °C 冷云罩偏心率(短轴/长轴)达到最大,约为 0.75,此时关中地区发

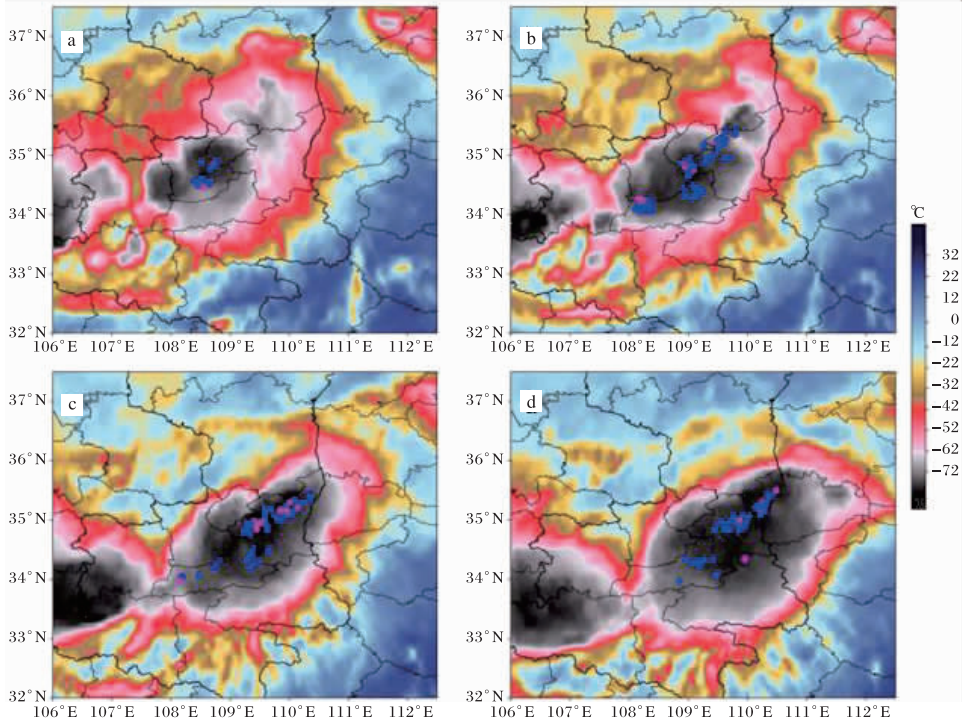


图 4 2022-07-15 FY-4A 静止气象卫星黑体亮度温度(TBB)和对应时次短时强降水站点分布图(蓝色圆点为雨强 ≥ 20 mm/h 站点,紫色圆点为雨强 ≥ 50 mm/h 站点;a 15日 21:30, b 15日 22:30,c 15日 23:30,d 16日 00:30)

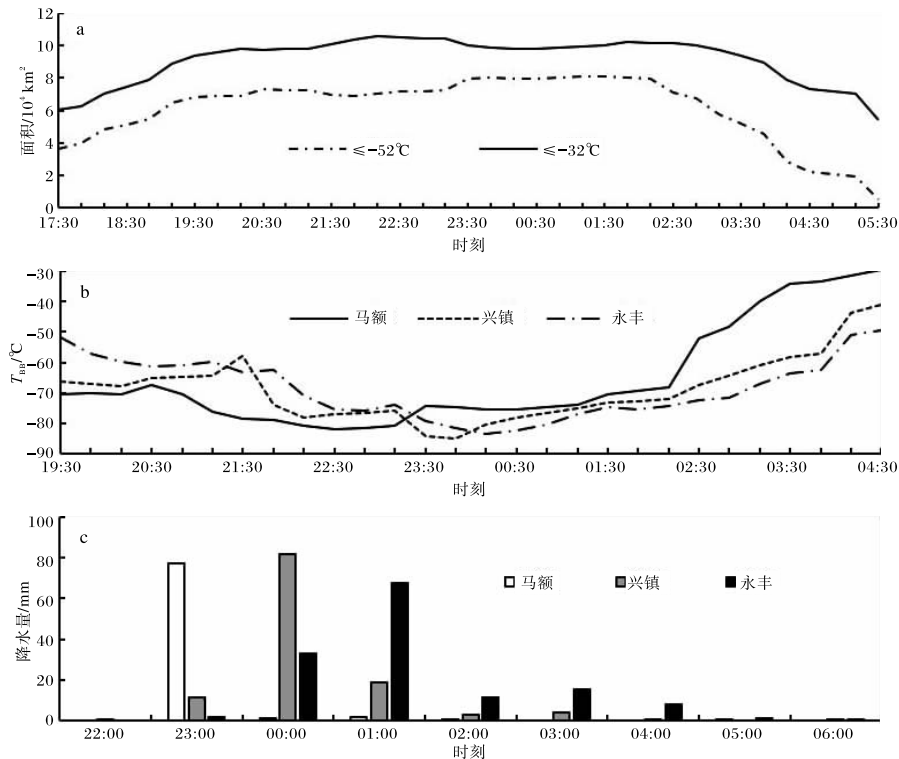


图 5 2022-07-15—16 强降水期间冷云面积变化(a)及马额站、兴镇站和永丰站黑体亮度温度(T_{BB})(b)、小时降水量(c)时序变化图

生短时强降水的站数达到峰值。23:00 之后,单站小时雨强达到最大, $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云罩面积增至最大,暴雨云团处在快速发展阶段,至01:00左右达到最大 $8.1 \times 10^4\text{ km}^2$,该时次单站小时雨强达到最大。

根据上述冷云罩面积变化和短时强降水范围和强度变化特征,可以判断关中地区短时强降水的影响系统为 MCC。在 MCC 发展阶段(21:00—22:00), $\leq -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积均达到最大,大范围短时强降水出现在此阶段,并在 $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积达到峰值时出现最大雨强。当 $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积开始减小时,降水强度开始减弱。冷云面积变化对大范围短时强降水的发生时段也具有指示意义。

选取此次过程中雨强达到 20 mm/h 以上的 148 个站点作为样本,TBB 取 1 h 平均值,对 15 日 20 时至 16 日 05 时时段内 TBB 均值和小时降水量进行 Pearson 相关性分析,发现两者呈极显著相关($P < 0.01$),相关系数为 -0.45 ,即 TBB 值越小,小时雨强越大。以三原马额站、蒲城兴镇站和永丰站(分别为 15 日 23 时、16 日 00 时和 01 时小时雨强最大站点)为例进一步分析 TBB 的演变特征(图 5b),发现三站 TBB 均呈现波动式下降的趋势,马额站分别在 20:30 和 21:50 出现 TBB 陡降,并在 22:30 达到最小值;兴镇站在 21:30 和 23:10 出现 TBB 陡降,23:50 达到最小值;永丰站在 21:50 和 23:10 出现 TBB 陡降,16 日 00:10 达到最小值。三站 TBB 降速均在 $-8\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 以上。

16 日 01:30 以后,对流云团开始东移减弱,上述各个站点的 TBB 也开始上升。从时间上看,三站 TBB 达到最小值的时间超前于短时强降水时段 20~60 min。因此,当单站 TBB 出现陡降并下降至 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下时,需注意对短时强降水的监测。

徐双柱等^[20]研究发现,云团边界最大 TBB 梯度、TBB 随时间的变化率与对流云团发展强度也具有一定相关性。一般来说,TBB 越小,TBB 梯度和 TBB 变化率越大,意味着上冲云顶高度越高,云顶纹理越丰富,对流发展越旺盛。选取 15 日 21 时至 16 日 03 时期间小时降水量最大的站点对其云特性参数进行计算(表 1),分析 TBB 平均值(T_{BBavg})、TBB 最小值(T_{BBmin})、最大 TBB 梯度(G)和 TBB 变化率(R)等参数对降水强度的指示作用。当小时降水量介于 $20 \sim 40\text{ mm}$ 时, T_{BBavg} 和 T_{BBmin} 处于 $-70 \sim -60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,最大 G 和 R 分别为 $7\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ 和 $3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$;当小时降水量介于 $50 \sim 80\text{ mm}$ 时, T_{BBavg} 和 T_{BBmin} 分别约为 $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大 G 和 R 分别为 $10\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ 和 $13\text{ }^{\circ}\text{C/h}$;当小时降水量大于 80 mm 时, T_{BBavg} 和 T_{BBmin} 分别达到 $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, G 和 R 分别为 $10\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ 和 $16\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 。以平均值来看,当 $T_{\text{BBavg}} \leq -73\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $T_{\text{BBmin}} \leq -74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $G \geq 8\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ 且 $R \geq 9\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ 时,发生短时强降水的可能性极大。以上分析表明,小时雨强与 T_{BBavg} 、 T_{BBmin} 、 G 和 R 等云特性参数关系密切,当 T_{BBavg} 和 T_{BBmin} 越小, G 和 R 越大时,小时降水量越大。

表 1 2022-07-15—16 强降水期间逐小时最大降水量站点对应的云特性参数统计

站点	降水量/mm	$T_{\text{BBavg}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{BBmin}}/^{\circ}\text{C}$	$G/(^{\circ}\text{C/km})$	$R/(^{\circ}\text{C/h})$
方里	53.4(22 时)	-76	-77	8	7
马额	77.3(23 时)	-75	-75	10	13
兴镇	81.8(00 时)	-78	-80	10	16
永丰	67.4(01 时)	-75	-75	9	12
杏林	36.2(02 时)	-69	-70	7	3
下庙	29.8(03 时)	-63	-67	5	2
平均值		57.7	-73	-74	8

注: T_{BBavg} 表示 TBB 平均值; T_{BBmin} 表示 TBB 最小值; G 表示最大 TBB 梯度; R 表示 TBB 变化率。

3.2 云顶高度演变特征

一般认为短时强降水由对流性降水造成^[21],即大范围层云降水中伴有的积云对流。FY-4A提供的云顶高度产品能够定量反演云顶的发展高度,进而分析大范围层云中的积云对流特征。21:00(图略),由甘肃庆阳向关中东部移来的MCC云团正处于发展阶段,云顶中心高度在14~18 km,但此时18 km云顶高度区范围较小,仅在咸阳北部造成小范围的短时强降水,短时强降水区域与18 km云顶高度所在区域一致。22:30(图6a),随着MCC向东移动,咸阳、西安、渭南以及铜川等地上空的云顶高度持续增加,18 km以

上的云顶高度范围不断扩大,形状呈现椭圆状,此时短时强降水站次迅速增多,分布在秦岭北麓渭河流域西安咸阳段、渭南北部和铜川南部等地。MCC旺盛发展至23:30(图6b),椭圆状云顶范围向东北—西南方向扩展,16 km以上云顶高度面积囊括了整个关中东部地区,相较上一时次雨强有所增大。01:30以后,随着系统东移,云顶高度逐渐下降,降水趋于结束。从落区来看,此次过程的短时强降水站点均分布在16 km以上的云区范围中,其中大部分站点处于18 km以上的云区范围,表明云顶高度能够通过反映对流发展旺盛程度而为短时强降水落区提供一定指示作用。

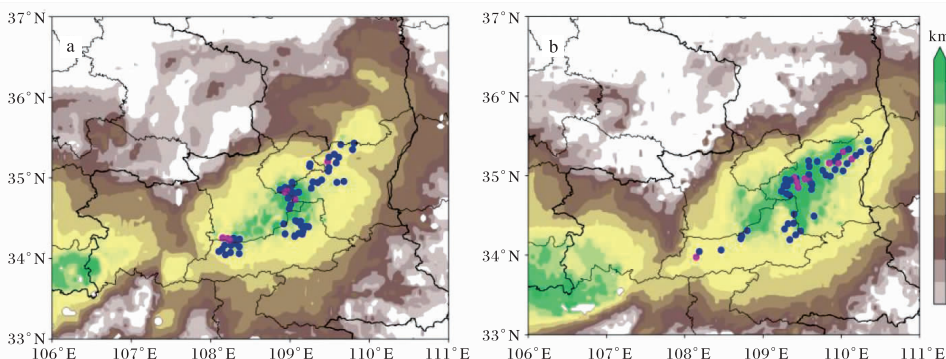


图6 2022-07-15 云顶高度(填色)和对应时次短时强降水站点分布图(蓝色圆点为雨强 ≥ 20 mm/h 站点,紫色圆点为雨强 ≥ 50 mm/h 站点;a 22:30, b 23:30)

同样地,对马额、兴镇和永丰三站的云顶高度变化分析发现(图7),从20:30开始,三站云顶高度呈波动上升特征,并分别在23:30、23:30和00:20经过陡升达到最大(19 277、22 413和20 926 m),之后三站云顶高度波动式下降。值得

注意的是,兴镇和永丰两站云顶高度达到最大值的时段较短时强降水的出现时间提前30~40 min。因此,当单站云顶高度出现快速上升,云顶高度超过18 km时,也需注意是否有短时强降水的发生。

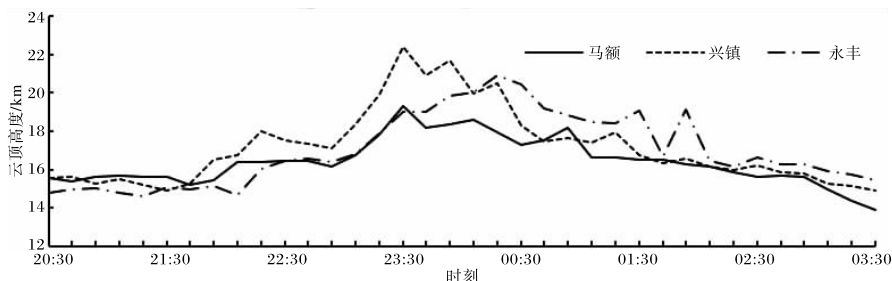


图7 2022-07-15—16 强降水期间马额站、兴镇站和永丰站云顶高度时序变化

4 结论与讨论

通过对一次MCC引发的短时强降水天气过程环境场及云特性参数分析发现,FY-4A卫星

定量产品能够较好地监测预报MCC的发展和增强过程,对短时强降水的发生具有指示作用。主要结论如下。

(1)2022年7月15日陕西关中东部发生的短时强降水过程具有降水时段集中、极端性强和影响范围广的特点。暴雨发生在副高、短波槽和低涡切变线共同影响的环流背景下,前期受副高控制不稳定能量持续积累,水汽条件充沛,在地面辐合线动力抬升作用下触发对流造成短时强降水。

(2)(2)过程期间,产生短时强降水的中尺度系统为MCC,生命史持续约6h,大范围短时强降水发生在MCC成熟阶段。当 $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积达到最大时,雨强达到最大,当 $\leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷云面积开始减小时,降水强度开始减弱。

(3)短时强降水主要分布在地面辐合线附近、 $T_{\text{BB}}\leq -72\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及云顶高度发展至16km以上的冷云区。短时强降水发生前,TBB呈波动下降、云顶高度呈波动上升的特征。当TBB、 T_{BBavg} 和 T_{BBmin} 越小,G和R越大时,雨强越大。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2023.
- [2] MA S M, ZHOU T J, STONE D A, et al. Detectable anthropogenic shift toward heavy precipitation over Eastern China [J]. Journal of Climate, 2017, 30(4): 1381-1396.
- [3] 贺冰蕊, 翟盘茂. 中国1961—2016年夏季持续和非持续性极端降水的变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(5): 437-444.
- [4] LI W, CHEN Y. Detectability of the trend in precipitation characteristics over China from 1961 to 2017 [J]. International Journal of Climatology, 2020, 41: 1980-1991.
- [5] 江洁, 周天军, 张文霞. 近60年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. 大气科学, 2022, 46(3): 707-724.
- [6] DONG X, ZHANG S, ZHOU J, et al. Magnitude and frequency of temperature and precipitation extremes and the associated atmospheric circulation patterns in the Yellow River Basin (1960-2017), China [J]. Water, 2019, 11(11): 2334.
- [7] 慎璐璐, 杨艳芬, 吴晶, 等. 黄河流域极端气候事件时空变化规律[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 231-242.
- [8] 刘帆, 蔡惠文, 高萌, 等. 西安一次短时暴雨的双偏振雷达特征[J]. 陕西气象, 2024(2): 1-7.
- [9] 高宇星, 王瑞英, 杜萌萌, 等. 西安一次突发性短时暴雨环境条件及成因分析[J]. 陕西气象, 2023(6): 26-32.
- [10] 刘嘉慧敏, 马晓华, 黄少妮, 等. 陕西中南部初夏和盛夏暴雨过程对比分析[J]. 陕西气象, 2019(1): 1-11.
- [11] 马晓华, 马青, 刘嘉慧敏, 等. “7·11”陕西区域性暴雨诊断及预报着眼点[J]. 陕西气象, 2019(4): 1-7.
- [12] 桂海林, 诸葛小勇, 韦晓澄, 等. 基于Himawari-8卫星的云参数和降水关系研究[J]. 气象, 2019, 45(11): 1579-1588.
- [13] 高洋, 蔡森, 曹治强, 等. “21·7”河南暴雨环境场及云的宏微观特征[J]. 应用气象学报, 2022, 33(6): 682-695.
- [14] 王清平, 秦贺, 程海艳, 等. 天山北坡中部一次短时暴雨的卫星反演云参数特征及成因分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(6): 1580-1589.
- [15] 牛宁, 姜晓飞, 张昕, 等. 风云四号卫星产品在一次暴雨天气过程分析中的应用[J]. 卫星应用, 2022, 123(3): 42-48.
- [16] 张晓茹, 陈豫英, 姚姗姗, 等. 贺兰山东麓一次局地强对流暴雨的中尺度特征[J]. 气象, 2022, 48(7): 801-812.
- [17] 张夕迪, 孙军. 葵花8号卫星在暴雨对流云团监测中的应用分析[J]. 气象, 2018, 44(10): 1245-1254.
- [18] 孙绍辉, 李万彪, 黄亦鹏. 利用Himawari-8卫星红外图像反演降雨[J]. 北京大学学报, 2019, 55(2): 215-226.
- [19] 咸迪, 方翔, 贾煦, 等. 风云四号气象卫星天气应用平台及其应用[J]. 卫星应用, 2020(2): 20-24.
- [20] 徐双柱, 吴涛, 张萍萍. 风云3号气象卫星资料在暴雨预报中的应用[J]. 灾害学, 2011, 26(3): 97-102.
- [21] 杨涛, 杨莲梅, 刘凡, 等. 中国西天山两次短时强降水过程雨滴谱特征研究[J]. 大气科学, 2023, 47(5): 1495-1509.