

李明娟, 郭大梅, 冯典, 等, 2023. 弱天气系统强迫下一次突发性大暴雨成因分析 [J]. 高原气象, 42 (4): 934-948. LI Mingjuan, GUO Damei, FENG Dian, et al, 2023. Mechanism Analysis of an Abrupt Torrential Rain Event under Weak Synoptic Forcing [J]. Plateau Meteorology, 42 (4): 934-948. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2022. 00101.

弱天气系统强迫下一次突发性大暴雨成因分析

李明娟, 郭大梅, 冯典, 赵奎锋, 刘嘉慧敏, 屈丽玮

(陕西省气象台, 陕西 西安 710015)

摘要: 2021 年 7 月 18 日西安东北部、渭南南部等地出现突发性暴雨、大暴雨及局地特大暴雨天气, 全球模式和多个中尺度模式漏报, 为了深入认识此类暴雨天气发生发展机制, 提高其预报准确率, 本文利用高空、地面观测、ERA5 再分析、FY-2G 云顶亮温 TBB、临潼激光雷达风矢量、泾河雷达及微波辐射计等数据对此次大暴雨发生的环流形势、环境场条件、中尺度对流系统发展演变及触发机制进行分析。结果表明: (1) 此次大暴雨天气是在弱天气系统强迫下发生的, 大暴雨区位于 500 hPa 大陆高压边缘, 850 hPa 和 700 hPa 无切变线和暖平流、无较大风速输送水汽, 地面无冷锋或暖锋。(2) 大暴雨发生前环境场有着有利的抬升、充沛的水汽和不稳定能量等条件。地面弱降水造成低的大气抬升凝结高度和云底高度, 有利于中尺度对流系统的生成及提高降水效率; 低层偏东风风速增大并维持较大风速为大暴雨区输送充沛水汽及能量, 大气有一定的对流有效位能, 中低层弱上升运动使得暴雨区有着较厚的湿层和较大的整层可降水量。(3) 突发性大暴雨由准静止孤立的中- β 尺度对流系统造成, 中- β 尺度对流系统由多个中- γ 或中- β 尺度对流单体组成。对流单体最先在骊山附近生成, 结构松散, 组织性差, 单体反射率因子有较低的质心及高效率暖云降水特征。(4) 地面弱冷空气造成的地面辐合线与骊山地形抬升、灞河谷地狭管效应共同作用触发对流单体, 产生强降水, 形成地面冷池。冷池出流形成地面辐合线主要在泾河东侧高温、高湿、高能区触发多个新的对流单体。大暴雨区中- β 尺度对流系统后向传播, 其中多个中- γ 或中- β 尺度对流单体自东北向西南方向缓慢移动, 形成“列车效应”, 经过泾河造成大暴雨天气。(5) 对于弱天气系统强迫下的暴雨预报, 需要增强对其形成机制的认识及新型观测资料的使用, 密切关注前期弱降水对近地面增湿和抬升凝结高度的影响, 增大的低层风对暴雨区水汽和不稳定能量的输送, 地面弱冷空气及地形的触发作用, 结合多家中尺度数值模式预报的极值, 综合考虑突发性大暴雨的可能性。

关键词: 突发性大暴雨; 弱天气系统强迫; 中- β 尺度对流系统; 低层偏东风

文章编号: 1000-0534 (2023) 04-0934-15 中图分类号: P458.1*21.1 文献标识码: A

DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2022. 00101

1 引言

秦岭北麓西安、渭南等地北侧为渭北塬区, 南依秦岭, 由于秦岭的背风波效应, 此地区年平均降水量低于黄土高原延安以南地区和秦岭南坡 (杜继稳等, 2007)。陕西日常天气预报中发现, 由于地形的影响, 西安、渭南地区暴雨预报难度较大, 尤其是在天气系统强迫的垂直运动不明显弱天气系

统强迫下 (李琴和邓承之, 2021; 潘留杰等, 2015; 肖现等, 2015) 的暴雨, 容易漏报。2021 年 7 月 18 日西安东北部、渭南南部等地出现暴雨、大暴雨, 局地 12 h 超过 140mm 的特大暴雨天气, 且有大于 50 mm $\cdot$ h $^{-1}$ 的极端短时强降水 (俞小鼎, 2013) 并伴有雷电。按照陕西突发性暴雨的定义的三个条件: (1) 中心降雨雨强 ≥ 30 mm $\cdot$ (6h) $^{-1}$, 且 ≥ 50 mm $\cdot$ (12h) $^{-1}$;

作者简介：李明娟（1978-），女，陕西合阳人，高级工程师，主要从事天气预报和暴雨机理研究。E-mail：122584008@qq.com

通信作者：郭大梅（1978-），女，江苏徐州人，高级工程师，主要从事天气预报和暴雨机理研究。E-mail：271801757@qq.com

(2) 暴雨站数 ≥ 3 个站且连片(利用现有国家气象观测站);(3) 暴雨发生前 12 h, 在 $95^{\circ}\text{E}-110^{\circ}\text{E}$, $27.5^{\circ}\text{N}-42.5^{\circ}\text{N}$ 范围内, 500 hPa 无明显低值系统(杜继稳等, 2007)。2021 年 7 月 18 日的暴雨雨强、暴雨站数、500 hPa 环流形势(大陆高压边缘, 无明显低值系统)满足陕西突发性暴雨条件, 为突发性暴雨、大暴雨。对于此次暴雨, 短期预报时效内欧洲中心全球细网格模式和其他多个中尺度模式漏报, 仅广东中尺度模式报出泾河大暴雨。模式使用中, 对于暴雨, 中尺度模式有时会空报, 欧洲中心模式空报较少, 预报员常常参考欧洲中心数值模式。但此次大暴雨天气欧洲中心模式仅预报了中雨以下量级, 预报员在短期时效内只预报了中雨, 而对短时预报由于不清楚暴雨成因, 只能依靠雷达回波发布预警。

对于突发性暴雨的研究, 气象工作者做了一些研究工作。此类暴雨征兆不明显, 局地性强, 雨强大, 降水时段集中, 具有典型的中小尺度特征, 造成的灾害及次生灾害严重, 预报难度大(杜继稳等, 2004); 与副热带高压、弱冷空气、重力波诱发、中低层锋生的加强有关(刘勇和杜川利, 2006; 谢家旭和李国平, 2021; 邱贵强等, 2018); 中- β 尺度对流云团造成(井喜等, 2008), β 中尺度辐合线和 γ 小尺度辐合线为触发机制(张楠等, 2018; 唐佳等, 2021), 冷池驱动对流系统连续传播(徐珺等, 2018); 地形的作用有重要影响(王丛梅等, 2018; 王婧羽等, 2022), 中尺度对流系统下山增强, 导致局地强降水(李琴和邓承之, 2021), 过山气流由于地形海拔高度的变化而产生的地形适应运动, 以爬流运动为主, 绕流运动次之(金妍和李国平, 2021)。

尽管突发性暴雨已经完成了一些研究工作, 但突发性暴雨成因复杂, 预报难度大, 仍需进一步加强研究。本文对 2021 年 7 月 18 日陕西一次突发性大暴雨发生的环流形势、环境场条件、中尺度对流系统发展演变及触发机制进行分析, 增强对此类暴雨的认识, 以期为此类天气预报提供参考。

2 数据来源及降水概况

2.1 数据资料

所用资料为高空常规观测及地面逐小时和逐 10 分钟自动站降水量、湿度、温度、逐 5 min 风场数据, ERA5(欧洲中期天气预报中心第五代) $0.25^{\circ} \times$

0.25° 逐时大气再分析资料(Hersbach et al, 2018), FY-2G(风云卫星 2G)逐时平均云顶亮温 TBB $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 数据, 西安临潼激光雷达风矢量产品, 泾河 C 波段的雷达资料和微波辐射计探测的逐 2 min 水汽密度、相对湿度。

2.2 降水概况

受短波槽影响, 2021 年 7 月 17 日 02:00(北京时, 下同)-15:00 陕北地区出现分散性的短时强降水。17 日 15:00-23:00 陕北南部至关中北部塬区出现分散性局地短时强降水天气, 最大雨强 $64.9 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。17 日 21:00 至 18 日 03:00 中尺度对流系统经过秦岭北麓西安东北部、渭南南部地区减弱, 部分地区出现弱降水, 1 h 降水量不超过 2mm。本研究区域为秦岭北麓西安东北部、渭南南部[图 1(a)], 文中涉及的地图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)4508 号和审图号为 GS(2019)3082 号的标准地图制作, 底图无修改。西安东北部、渭南南部突发性大暴雨开始于 18 日 04:00, 图 1(a)是 7 月 18 日 04:00-16:00 累积降水量, 按照国家标准 GB/T 28592-2012 降水量等级(国家气象中心, 2012) $12 \text{ h} \geq 30 \text{ mm}$ 为暴雨, $12 \text{ h} \geq 70 \text{ mm}$ 为大暴雨, $12 \text{ h} \geq 140 \text{ mm}$ 为特大暴雨, 西安东北部、渭南南部自动站共 104 个站出现暴雨, 29 个站为大暴雨, 其中国家基本气象站西安泾河降水量达 104.3 mm , 1 个站为特大暴雨(临潼铁炉), 降水量达 160.8 mm 。18 日 04:00-11:00 西安东北部地区、渭南南部地区有多个站点出现 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的短时强降水并伴有闪电, 18 日 04:00-05:00 [图 1(b)]临潼骊山附近有 5 个站次雨强大于 $50 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 最大雨强出现在铁炉, 为 $71 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ [图 1(c)], 18 日 07:00-11:00 泾河有 3 个站次雨强大于 $20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, 最大雨强为 $44 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ [图 1(c)]。可见, 此次突发性大暴雨具有局地性强、雨强大、时段集中等明显的中小尺度对流特征。

3 环流形势

2021 年 7 月 17 日 20:00 突发性暴雨发生前, 500 hPa [图 2(a)]西太平洋副热带高压偏北偏东, 588 dagpm 控制中国东北东部-朝鲜半岛东部及日本东南部以东地区, 西脊点 126.6°E , 41.3°N 。中国东海东部及江苏西南部-安徽中南部地区分别有一低压。大陆高压控制中国西部地区, 高压中心位于青海中南部, 588 dagpm 控制陕西以西地区, 陕

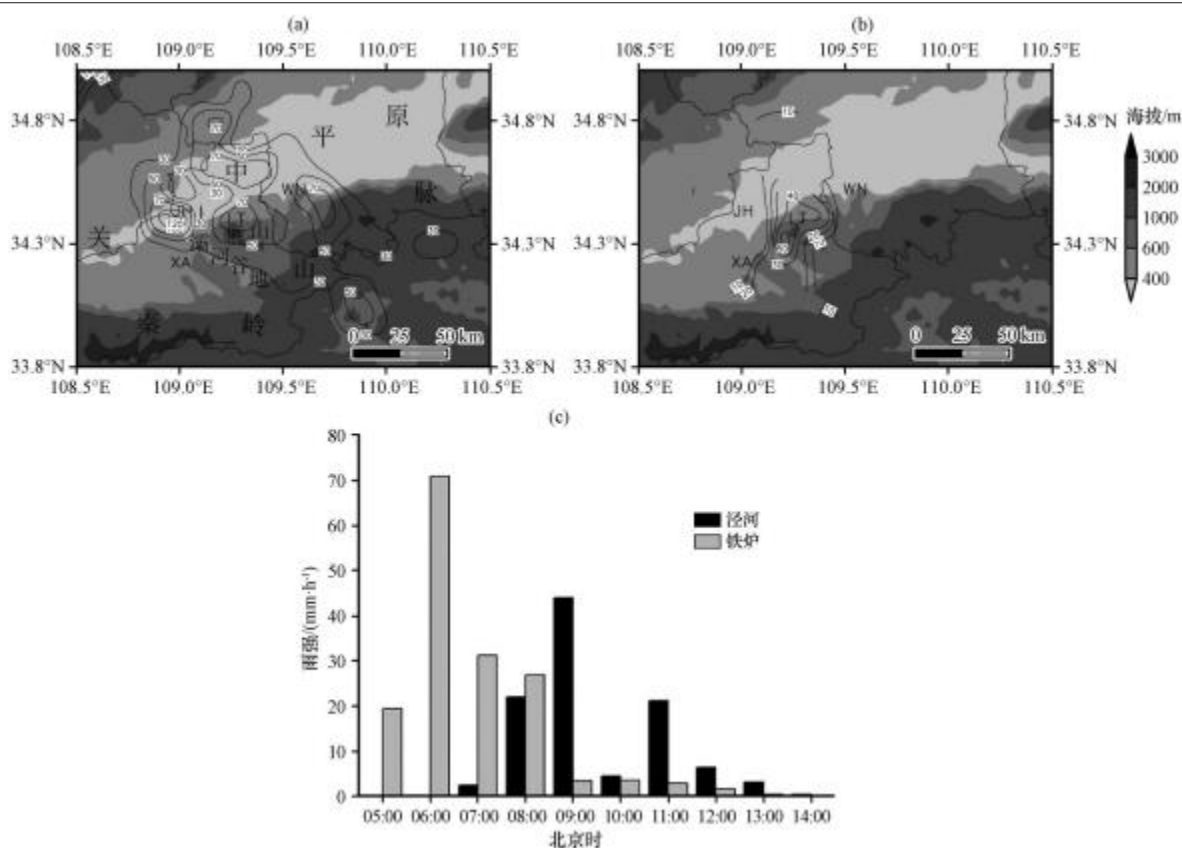


图1 2021年7月18日04:00-16:00大于30mm降水区域(a,等值线,单位:mm),18日04:00-05:00降水量(b,等值线,单位:mm)及泾河站、铁炉站18日05:00-14:00逐小时雨强(c)

XA为西安,WN为渭南,JH为泾河,LT为临潼;图(a)、(b)中阴影为地形(单位:m)

Fig. 1 Precipitation larger than 30 mm from 04:00 to 16:00 (a, contour, unit: mm), precipitation from 04:00 to 05:00 (b, contour, unit: mm), hourly rain intensity of Jinghe station and Tielu station from 05:00 to 14:00 (c) on 18 July 2021. XA, WN, JH, LT represents Xi'an, Weinan, Jinghe, Lintong, respectively;

In Fig. 1 (a) and (b), the shaded is Topography (unit: m)

西位于大陆高压边缘偏北气流中,西安、渭南暴雨区500 hPa无明显的天气系统,无强的温度平流,斜压性弱。分析700 hPa和850 hPa风场和温度线发现,700 hPa[图2(b)]陕西为一致的偏北风,泾河风速 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,850 hPa[图2(c)]泾河为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏东风,突发性大暴雨区无明显切变线和较大的风速为大暴雨区输送充沛的水汽,无暖平流。18日03:00突发性大暴雨发生前地面图上(图略)无明显的冷锋或暖锋。可见,本次大暴雨天气是在弱天气系统强迫下发生的。

4 突发性大暴雨的环境场条件

4.1 探空分析

分析17日20:00泾河站(图3)探空图可知,对流有效能(cape)为 $1775\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,地面到905 hPa温度露点差大于 10°C ,905~700 hPa温度露点差大于

5°C ,486 hPa温度露点差为 42°C ,低层和中层的大气较干。大气抬升凝结高度较高,距地面1619 m,0~6 km垂直风切变 $9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,为弱的垂直风切变, 0° 层较高,位于5.05 km高度处。虽然CAPE值较大,由于低层大气较干,抬升凝结高度较高,并没有触发强对流降水,18日07:00之前泾河无短时强降水。

4.2 突发性大暴雨发生前地面弱降水的作用

突发性大暴雨发生前8h,17日20:00关中北部出现短时强降水,17日21:00至18日03:00西安东北部、渭南地区雷达图为层状云回波,部分地方出现弱降水,最大1h降水量小于2mm。地面上弱降水使得暴雨区(西安东北部和渭南南部)相对湿度明显增大,17日20:00[图4(a)]暴雨区相对湿度为40%~50%,18日03:00[图4(b)]暴雨区相对湿度大

于 80%，骊山附近大于 90%。17 日 23:00 至 18 日 03:00 气温仍维持在 24~28 °C，比关中北部、西部高

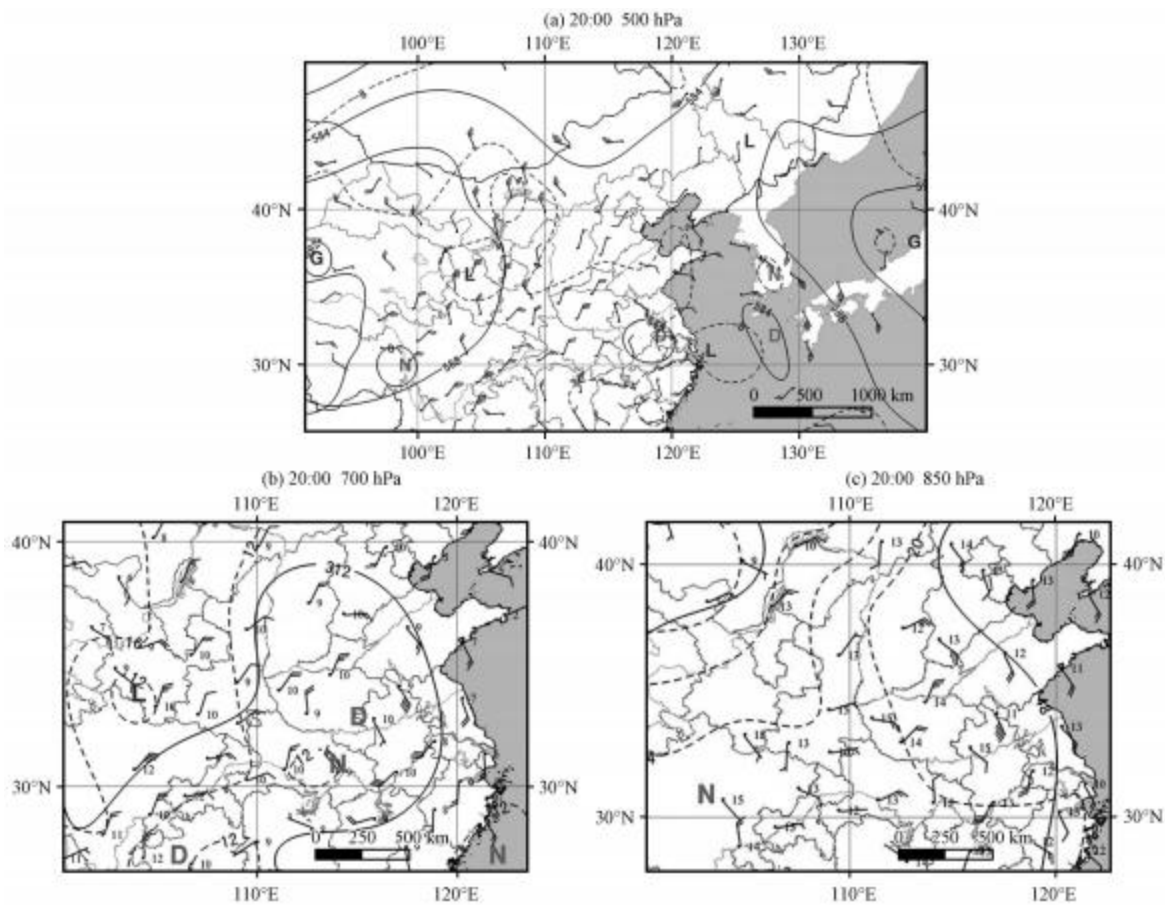


图2 2021年7月17日20:00 500 hPa (a) , 700 hPa (b) 及 850 hPa (c) 环流形势

虚线为温度场 (单位 : $^{\circ}\text{C}$), 风向杆为风场 (单位 : $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 黑实线为位势高度场 (单位 : dagpm) ,
小黑数字为 700 hPa 和 850 hPa 比湿 (单位 : $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Fig. 2 The circulation situation at 500 hPa (a) , 700 hPa (b) and 850 hPa (c) on 17 July 2021. The dotted line indicates temperature field (unit : $^{\circ}\text{C}$) , wind barb indicates wind field (unit : $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) , black solid line indicates the potential height field (unit : dagpm) , the smaller black number indicates specific humidity (unit : $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

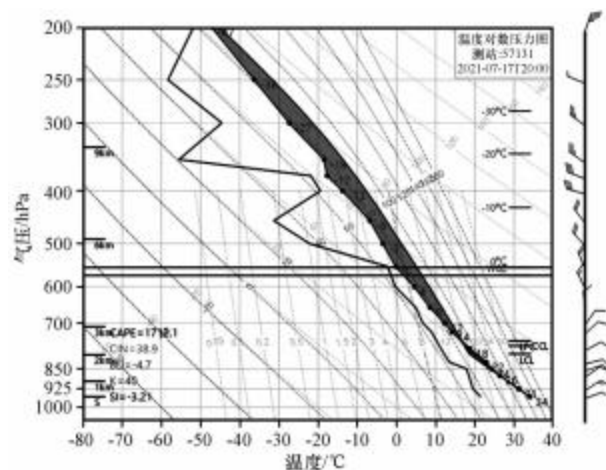


图3 2021年7月17日20:00 泾河站 $T\text{-ln}p$ 图

Fig. 3 $T\text{-ln}p$ of Jinghe Station at 20:00 on 17 July 2021

出 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$, 露点温度为 $21\sim 23^{\circ}\text{C}$, 暴雨区仍为高温高湿区。此外 , 暴雨区大气抬升凝结高度大幅度降低 , 17日 20:00 泾河抬升凝结高度距离地面

1619 m , 18 日 03:00 仅为 310 m , 低的抬升凝结高度使得较弱的抬升即有可能触发对流 , 有利于中尺度对流系统的生成 (Brooks et al , 2003) , 抬升凝结高度低则云底高度低 , 降水蒸发量小 , 这对提高降水效率非常有利 (孙继松 , 2017) 。

4.3 突发性大暴雨的水汽和能量条件

暴雨的发生需要充沛的水汽条件 (Chen et al , 2005 ; Zhang et al , 2006 ; 丁一汇 , 2015 ; 张俊兰等 , 2021 ; 陈宏等 , 2021 ; 刘红武等 , 2021 ; 任丽等 , 2021 ; 布和朝鲁等 , 2022 ; 王美月等 , 2022 ; 李生辰等 , 2022 ; 蒋伊蓉等 , 2022) , 17 日 20:00 850 hPa 和 700 hPa 均无较大的风速向暴雨区输送水汽 , 泾河探空大气整层可降水量 48mm , 而泾河 12 h 降水量 104mm , 仅仅靠本地的水汽显然是不够的 , 大暴雨区充沛的水汽条件是如何形成的呢 ?

分析泾河雷达垂直风廓线和临潼激光测风雷

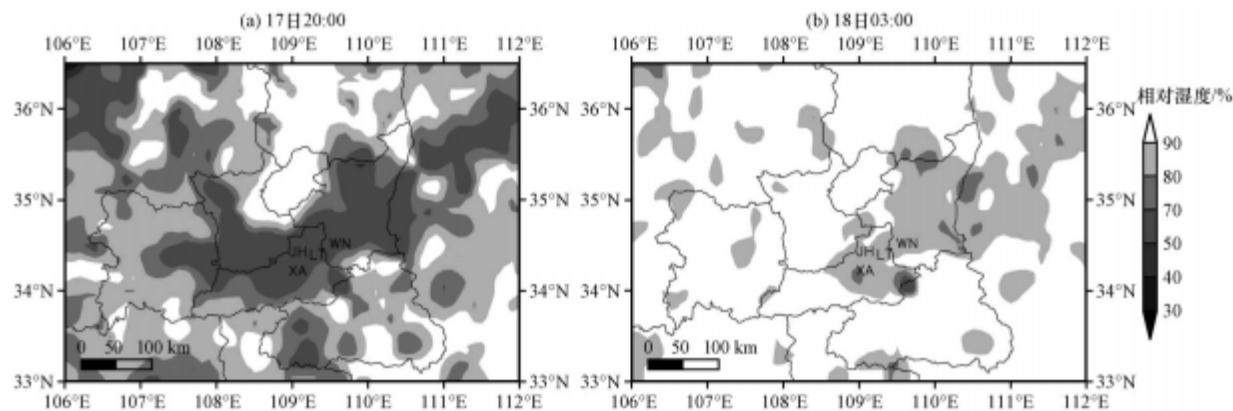


图4 2021年7月17日20:00 (a)和18日03:00 (b)地面相对湿度(单位: %)

XA为西安, WN为渭南, JH为泾河, LT为临潼

Fig. 4 Relative humidity on surface at 20:00 on 17 (a) and at 03:00 on 18 (b) July 2021. Unit : %.

XA , WN , JH , LT represents Xi ' an , Weinan , Jinghe , Lintong , respectively

达风场可以看出,大暴雨发生前低层偏东风风速增大并维持较大风速。17日18:30-20:00临潼激光测风雷达低层偏东风及泾河雷达1.2 km以下的偏东风由原来的 $2\sim4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 逐渐增大至 $6\sim10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [图5

(a)],至18日03:30临潼暴雨触发前[图5(b)]低层仍维持着 $6\sim8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏东风。ERA5再分析数据相应时段也可以看到低层维持 $6\sim10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏东风(图略)。

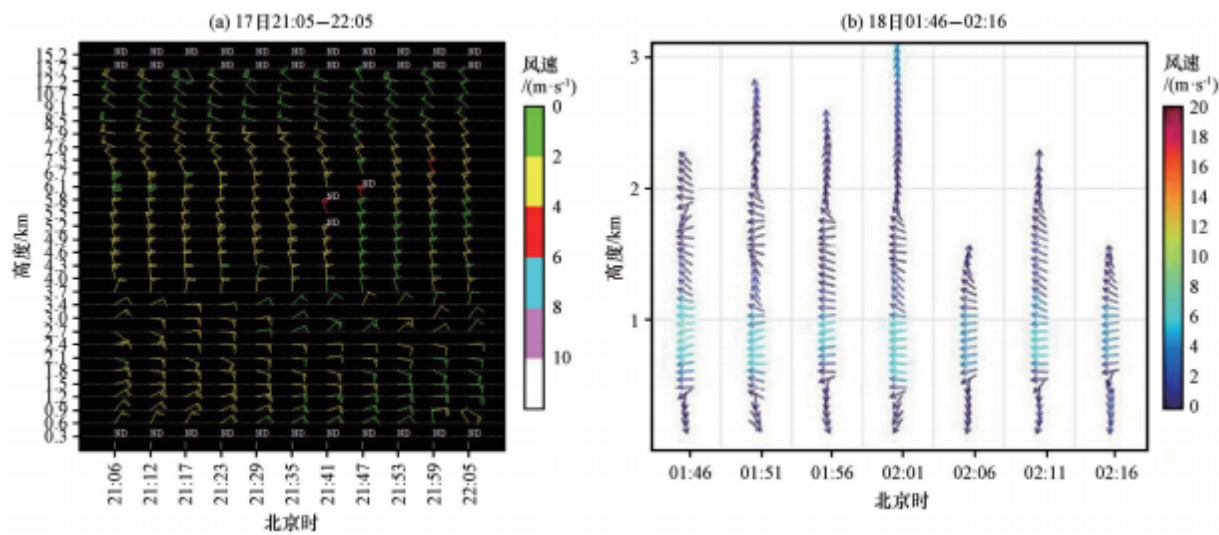


图5 2021年7月17日21:06-22:05泾河雷达垂直风廓线(a,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和18日01:46-02:16

临潼激光测风雷达风场(b,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 5 Vertical wind profile of Jinghe radar from 21:05 to 22:05 on 17 (a , unit : $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) ,and wind field of Lintong laser wind lidar from 01:46 to 02:16 on 18 (b , unit : $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) July 2021

在通常情况下,湿度的局地变化,取决于第一项水汽平流和第二项水汽垂直交换,即水汽的局地变化方程(朱乾根等,2007)为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -V \cdot \nabla_h q - w \cdot \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1)$$

式中: q 为比湿(单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$); t 为时间(单位: s); V 为水平风的全速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); w 为垂直速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); z 为高度(单位: m)。

从大暴雨附近 (109.75°E , 34.75°N) 比湿度平流随时间变化剖面 [图 6 (a)] 可见, 17 日 20:00 至 18 日 04:00 850 hPa 以下比湿平流均为正值, 17 日 21:00 - 23:00 比湿平流达到 $1.2 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 根据水汽的局地变化方程可知比湿随着时间增大。沿着 34.75°N 作比湿和风场垂直剖面可以看到, 17 日 20:00 至 18 日 05:00 在大暴雨区附近 (109°E - 110°E) 有 $6 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 低层偏东风向大暴雨区输送比湿,

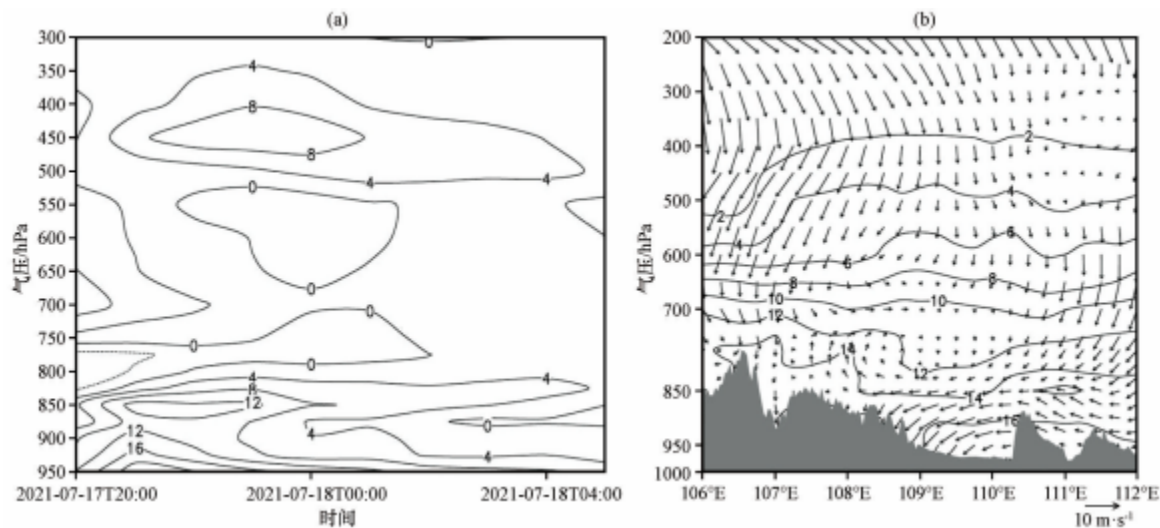


图6 2021年7月17日20:00至18日05:00大暴雨区附近(34.75°N, 109.75°E)比湿平流垂直剖面(a, 单位: $\times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和18日03:00沿34.75°N风场(矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和比湿场(实线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)的垂直剖面(b)

阴影为地形

Fig. 6 Vertical section of specific humidity advection (unit: $\times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) near the torrential rain area (34.75°N, 109.75°E) from 20:00 on 17 to 05:00 on 18 July 2021 (a), and vertical section of wind (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and specific humidity (solid line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) along 34.75°N at 03:00 on 18 July 2021 (b). The shaded area is terrain

850 hPa 以下比湿逐渐增大, 17 日 20:00 大暴雨区上空 (109°E-110°E) 900 hPa 比湿均低于 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 17 日 23:00 增大到 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 18 日 03:00 $14 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 伸展到 850 hPa [图 6 (b)]附近, 900 hPa 比湿大于 $16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见, 低层偏东风将东侧较大的比湿向

暴雨区输送, 低层正的比湿平流增大了大暴雨附近的局地水汽。

分析 17 日 20:00 至 18 日 04:00 云图、风场和上升运动发现, 大暴雨区有低云覆盖 (图略), 低层有偏东风的辐合 [图 7 (a)]及弱的上升运动 (109°E,

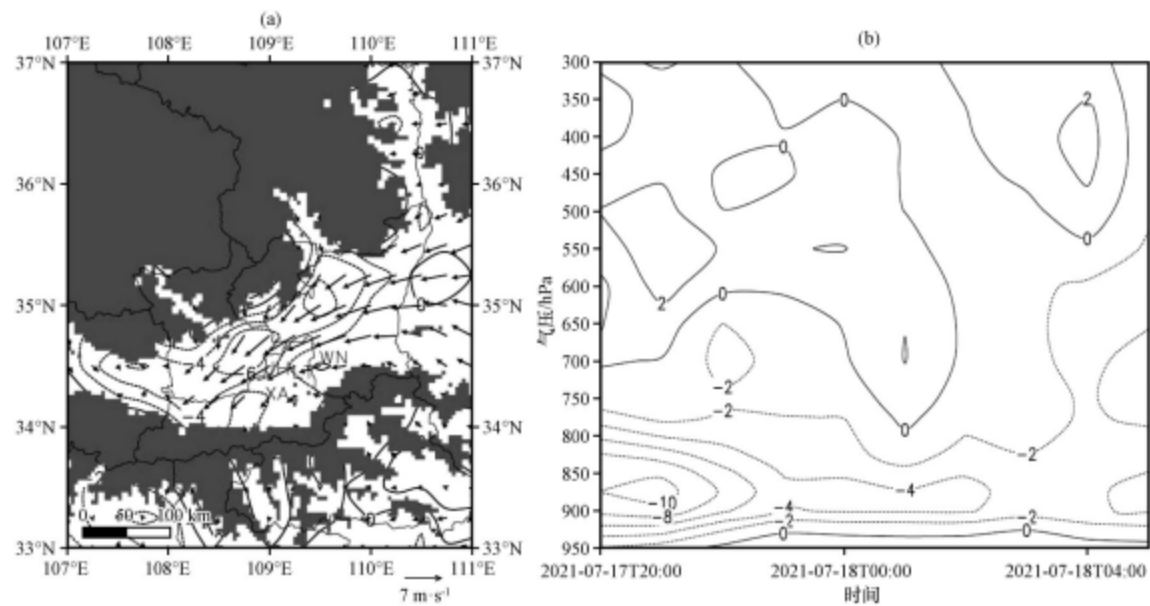


图7 2021年7月18日03:00 900 hPa 风场(矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和散度场(等值线, 单位: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) (a) 和2021年7月17日20:00至18日05:00 (109°E, 34.5°N) 上升速度垂直剖面(单位: $\times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) (b)

(a) 中阴影为地形

Fig. 7 Superposition of wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and divergence field (contour, unit: $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) of 900 hPa at

03:00 on 18 July 2021 (a) , and vertical section of ascending velocity (unit : $\times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) from 20:00 on 17
to 05:00 on 18 July 2021 (b) . In Fig. 7 (a) , the shaded area is terrain

34. 5°N)[图 7 (b)]。17 日 20:00 至 18 日 05:00 泾河附近 (109°E, 34. 5°N) 水汽垂直交换项随时间变化垂直剖面 [图 8 (a)]表明, 800 hPa 以下 $-w \frac{\partial q}{\partial z}$ 均大于 0, 18 日 02:00-04:00 550 hPa 以下 $-w \frac{\partial q}{\partial z}$ 大于 0, 850 hPa 以下有 $1.0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的比湿平流。根据水汽的局地变化方程可知正比湿平流使得大暴雨区局地水汽增大。分析泾河附近整层可降水量

和微波辐射计探测的水汽密度、相对湿度可见较大的整层可降水量和较厚的湿层。泾河附近整层可降水量 [图 8 (b)] 17 日 20:00 为 49 mm, 18 日 05:00 增大至 55 mm。17 日 22:00 至 18 日 05:00 泾河地面至中高层有着较大的水汽密度, 图 9 (a) 可见地面到 1 km 附近水汽密度均大于 $13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 7 km 以下均大于 $1 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。17 日 22:00 至 18 日 05:00 泾河地面至中高层有着较大的相对湿度, 地面到 7 km 相对湿度均大于 60% [图 9 (b)]。

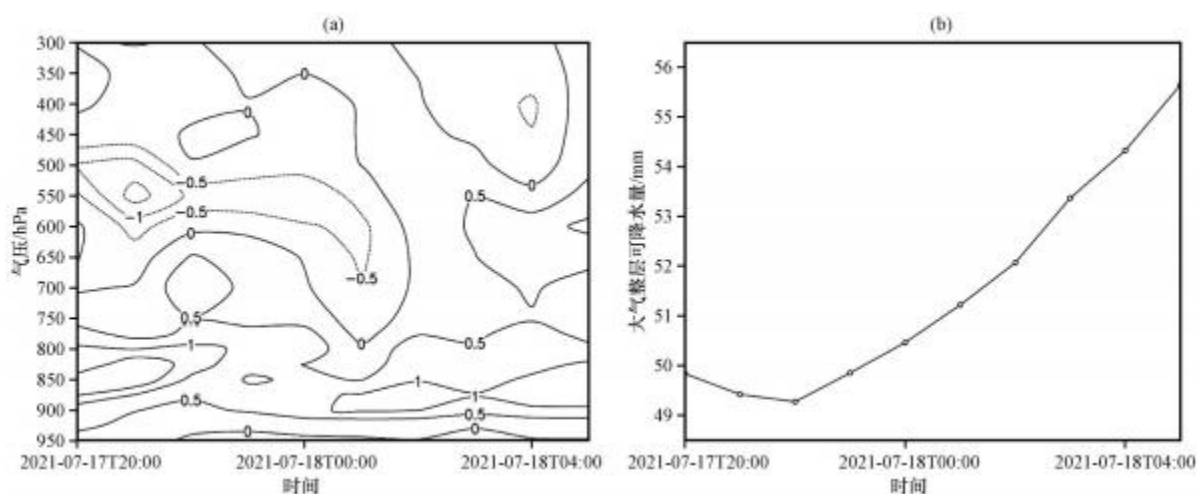


图 8 2021 年 7 月 17 日 20:00 至 18 日 05:00 大暴雨区 (109°E, 34. 5°N) 水汽垂直交换量垂直剖面 (a, 单位: $\times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) 和大气整层可降水量 (b)

Fig. 8 Profile of water vapor exchange of the torrential rain area (109°E, 34. 5°N) (a, unit: $\times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and precipitable amount of total atmosphere (b) from 20:00 on 17 to 05:00 on 18 July 2021

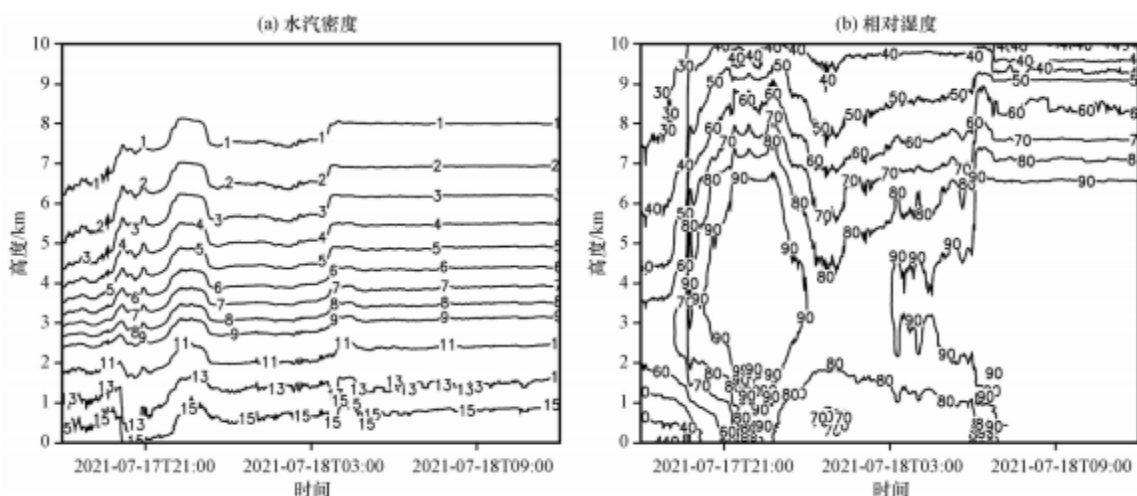


图 9 泾河微波辐射计 2021 年 7 月 17 日 18:00 至 18 日 12:00 的水汽密度 (a, 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和相对湿度 (b, 单位: %) 垂直剖面

Fig. 9 Water vapor density (a, unit: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) and relative humidity (b, unit: %) of Jinghe microwave radiometer from 18:00 on 17 to 12:00 on 18 July 2021

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/135002230333011141>