

# 2021年秋季平凉东部罕见大暴雨成因分析

王丽娜

甘肃省平凉市气象局, 甘肃 平凉

收稿日期: 2023年6月19日; 录用日期: 2023年7月20日; 发布日期: 2023年7月27日

---

## 摘要

基于常规观测资料及NCEP再分析资料, 从影响系统、物理量诊断、云图及雷达回波分析2021年秋季出现在平凉东部罕见大暴雨过程形成的成因, 结果发现: 此次大暴雨过程是在异常偏强的西太平洋副热带高压位置偏北较强而且维持稳定, 其西北侧暖湿气流强盛, 不断向平凉东部暴雨区输送源源不断的水汽, 低层切变线辐合系统长时间维持在平凉东部, 同时叠加地面辐合线, 增幅了对流降水, 导致灵台极端强降水的出现。

---

## 关键词

秋季, 罕见, 大暴雨, 异常

---

# Analysis of Rare Heavy Rain in the East of Pingliang in Autumn 2021

Lina Wang

Pingliang Meteorological Bureau of Gansu Province, Pingliang Gansu

Received: Jun. 19<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 20<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 27<sup>th</sup>, 2023

---

## Abstract

Based on the conventional observation data and NCEP reanalysis data, the causes of the rare rainstorm process in the east of Pingliang in autumn 2021 were analyzed from the perspectives of impact system, physical quantity diagnosis, cloud map and radar echo. The results showed that: the process of this rainstorm was strong and stable in the north of the abnormally strong Western Pacific subtropical high, the strong warm and wet air in the northwest side of the rainstorm continued to transport water vapor to the east of Pingliang rainstorm area, the convergence system of the low-level shear line maintained in the east of Pingliang for a long time and the ground convergence line, which increased the convective precipitation and led to the extremely heavy precipita-

tion in Lingtai.

## Keywords

**Autumn, Rare, Heavy Rain, Abnormal**

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

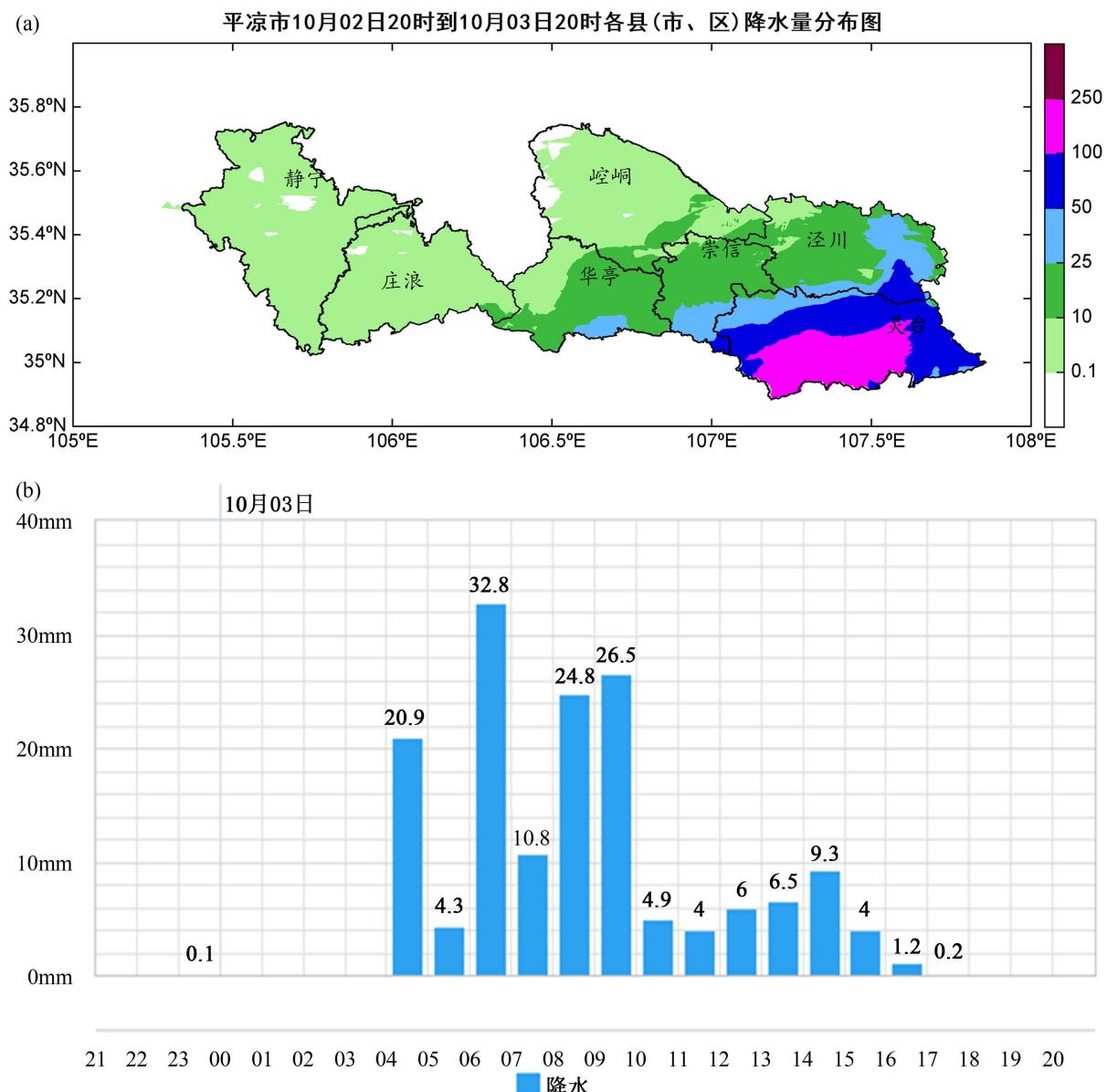
平凉位于甘肃东部，地处中纬度地带，青藏高原的东北边缘，常年主要受中高纬度西风气流控制，东南季风影响较弱，属温带半干旱半湿润的大陆性季风气候。年平均降水量为 422.9 mm~599.0 mm，西部静宁最少，东部灵台最多，二者相差 176 mm。根据对平凉多年气候变化的分析研究，夏季降水集中多雹洪，秋季阴雨日多，9 月常出现连阴雨天气，10 月以后，降水减少。暴雨是平凉灾害天气之一，一年多发生在夏季，秋季比较罕见。近年来平凉市暴雨日数总体有所减少，对于久旱转涝的情形下出现大暴雨，甚至是极端性的大暴雨，其造成的灾害是不可预估的，因此，暴雨洪灾的预报预测和防治始终是气象防灾减灾的重点任务之一。

随着全球气候变暖，我国致洪暴雨呈增多趋势，很多气象学者[1]-[8]已经对暴雨做了不同方面的研究和关注，大多数极端洪灾发生在传统的“七上八下”的主汛期时段，本地也不例外，历史上甘肃平凉东部极端暴雨出现在 7 月，9 月之后鲜有暴雨发生，此次大暴雨过程为历史同期罕见，本文主要通过分析其成因特点，以期为实际预报预测业务提供参考。

## 2. 过程概况

2021 年 10 月 2 日夜间开始到 3 日白天，平凉东部普降中雨，灵台出现大暴雨，日降水量达 116 mm (图 1(a))，区域站超过 100 mm 以上的站点有 12 个，大降水中心出现在灵台百里古城为 153.6 mm (图 1(b))，过程中共有 17 站次出现短时强降水，最大小时雨强为 42.9 mm，出现在灵台的郑家洼(3 日 10 时~11 时)，大暴雨多个站点有 2~4 个时次连续出现短时强降水，主要降水时段在 3 日 04 时~14 时。从西北区东部国家站降水分布来看，暴雨带呈东北西南走向共 12 站，自延安南部(3 站) - 铜川北部(1 站) - 咸阳北部(3 站) - 宝鸡西北部(2 站) - 庆阳东南部(正宁) - 天水东部(清水) - 平凉东部(灵台)，灵台为大暴雨中心。大暴雨过后 4~6 日上述地区降水持续，平凉东部部分地方又出现暴雨，截止降水过程结束，灵台累计雨量达 223 mm。此次强降水过程是入秋以来同期罕见的，突破了灵台县 10 月份有气象记录以来历史极值(10 月降水极值：1994 年 132.9 mm)。可见，此次降水过程持续时间长，累积雨量大，时空分布不均，具有极端降水的特点。

此次大暴雨过程共造成灵台县 13 个乡镇不同程度受灾。据初步统计，国道 G244 公路、省道 S203 公路、县道灵蒲公路部分路段边坡出现塌方，并导致部分供电设施受损，经及时抢修，大部分已恢复正常供电。地质灾害隐患点涉及人口已全部转移并妥善安置，2 个乡镇 73 座蔬菜大棚、19 户农户住房不同程度受损。10 月 3 日 22 时许，中台镇南店子村东庄社(G244 沿线)发生一处山体滑坡地质灾害，据初步推断，滑坡体积约 150 万立方米，共造成 18 处房屋不同程度受损，受灾群众已提前组织撤离并妥善安置，无人员伤亡报告。



**Figure 1.** (a) Precipitation distribution in Pingliang from 20:00 on the 2nd to 20:00 on the 3rd of October, 2021; (b) hourly precipitation variation trend of Baili Ancient town of Lingtai

**图 1.** (a) 2021 年 10 月 2 日 20 时~3 日 20 时平凉市降水量分布图、(b) 灵台百里古城逐小时降水量变化趋势

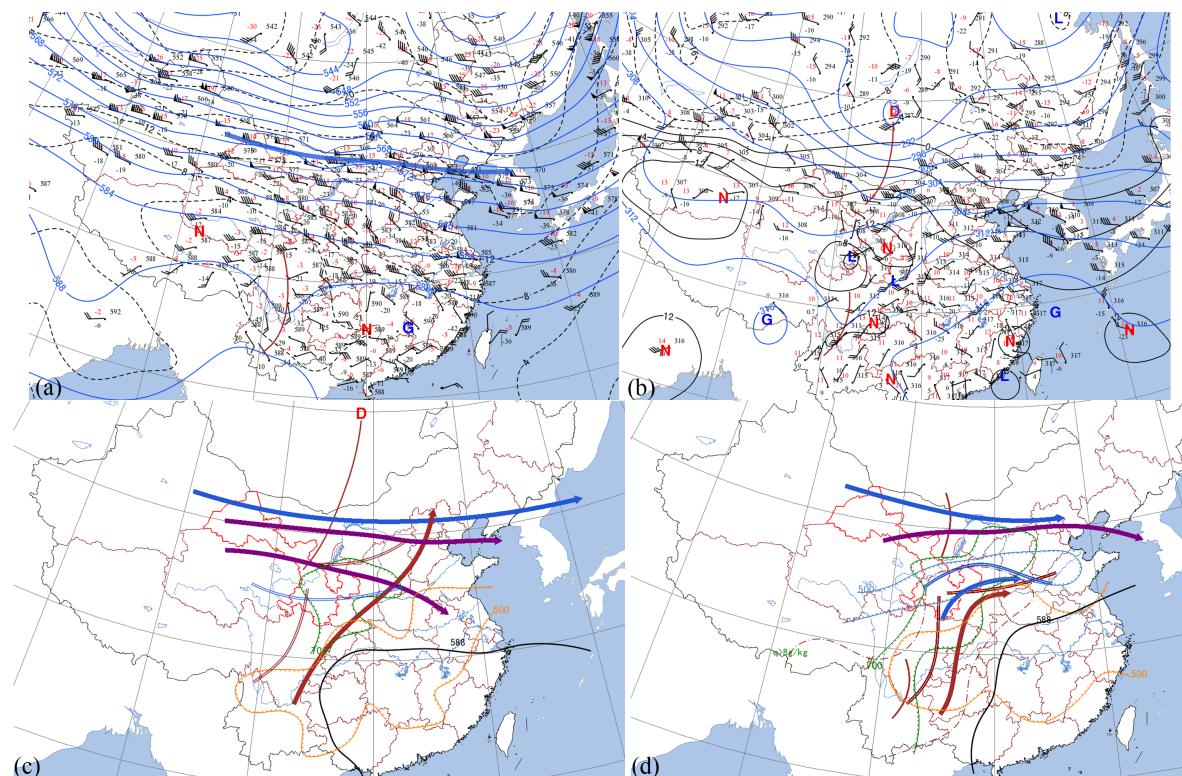
### 3. 影响系统

#### 3.1. 高空形势分析

此次降水过程期间大气环流形势稳定，异常偏强的西太平洋副热带高压(以下简称副高)先西伸北抬，后稳定维持在黄淮地区，与西风带低值系统在甘肃陇东—陕西—山西形成稳定的东高西低的环流形势，有利于这些地方长时间出现降水天气。

过程前期，10月2日08时500 hPa高空图上(图2(a))，中高纬环流为两槽一脊型，贝加尔湖为高压脊，东北和乌拉尔山地区为冷槽，副高588线呈东西带状，位于北纬30°附近，四川盆地南部有短波槽发展，西北地区为纬向西风环流，平凉上空为西北气流控制；700 hPa(图2(b))中高纬与500 hPa环流类似，

贝加尔湖附近为北脊南涡分布，河套北部为低槽，陇东暖区较强，高原东部偏南气流发展。2日20时(图2(c))，500 hPa 贝加尔湖南部形成一低涡，北纬30°~40°为多波动的纬向环流，副高西伸脊点东退至东经105°以东，河套以北有西风急流，临夏-天水-陇东南部形成横向切变线(暖式切变)；200 hPa 陕北一带存在明显的分流区，平凉东部处在高空急流出口区右侧；700 hPa 贝加尔湖低涡南压，副高外围维持一支孟加拉湾、四川至陕西的西南暖湿急流，风速18 m/s~20 m/s，辐合明显，陇东北侧的冷式切变线与高原东部南北向的冷切变线形成对峙，陇东地区处于低空急流左侧，切变线右侧。3日08时(图2(d))，500 hPa 中高纬度仍为两槽一脊型，高原上又有短波槽形成，副高西端继续东退，北侧北抬，副高外围高层偏南风急流(大风速超过20 m/s)形成，平凉上空西南风速也增大至20 m/s，位于急流轴附近；700 hPa 平凉处在槽前偏西气流，风力有所减小，低空急流仍维持，冷平流已经扩散南下，平凉-天水-陇南为南北向切变，平凉东部灵台位于东北-西南向切变线右侧，低空急流左侧，利于产生暴雨的天气尺度背景形成。3日20时(图略)500 hPa 副高北侧继续北抬，高压中心592线登陆东南沿海，南支槽维持，副高外围南风减小，平凉上空风速减小为14 m/s，700 hPa 转为偏东风控制，切变线东移南压，低空急流明显减弱，夜间平凉东部降水强度也相应减弱。4~6日副高维持稳定，其西北侧暖湿气流强盛，北侧不断有弱冷空气扩散南下，且高原东部及陇东东北部不断新生切变线，冷暖空气在陇东地区交汇，导致大暴雨过后仍持续降水，但整体强度明显减弱，平凉东部部分乡镇出现暴雨。



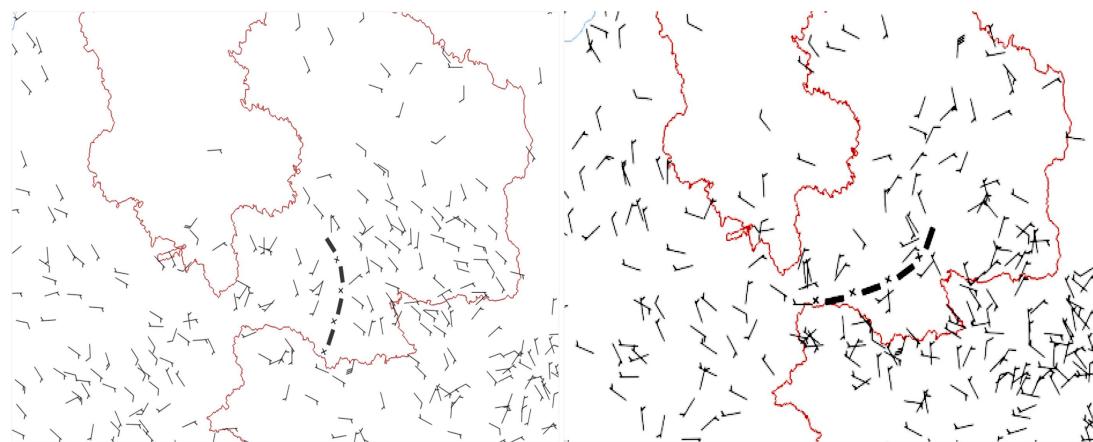
**Figure 2.** (a) Upper air condition on 500 hPa and (b) upper air condition on 700 hPa at 08:00 on October 2<sup>nd</sup> (c) influence system at 20:00 on October 2<sup>nd</sup> and (d) 08:00 on October 3<sup>rd</sup>

**图2.** (a) 10月2日08时500 hPa高空形势、(b) 700 hPa高空形势、(c) 2日20时影响系统、(d) 3日08时影响系统

### 3.2. 地面形势分析

从地面3小时降水演变来看，强降水时段主要从3日05时开始，05时~08时之间的3小时内灵台县降水量超过50毫米(53.1)，这与期间连续2个时次出现短时强降水的贡献有很大关系，暴雨具有明显的

对流性，短时暴雨一般与中小尺度系统有直接关系。分析地面气压场及风场发现，2日14时~20时西北地区为热低压控制，平凉东部地面温度较高，但相对前一日较低，前期地面增温明显(10月1日平凉市各站最高气温均突破当日历史极值)，积聚了足够的热量，易触发强对流。20时(图3)东部泾川、灵台有西南风与偏东风的辐合线生成，2日23时~3日05时高原西北部至新疆北部有冷高压切入，高原东部仍为热低压控制，有利于对流降水的产生。3日08时地面风场上，平凉东部有偏北风与偏南风的辐合线形成，此时锋面已过河东一带，平凉东部处于冷锋前部，转为锋前降水。14时冷锋过境移入陕西关中一带，灵台降水强度明显减弱。

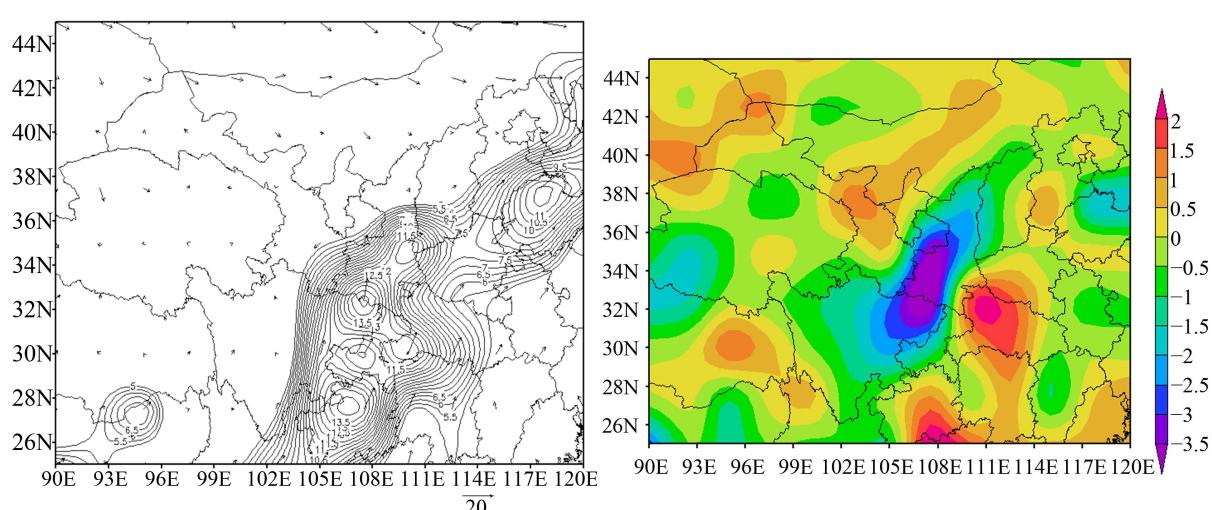


**Figure 3.** Surface wind field at 20:00 on the 2<sup>nd</sup> (left) and 08:00 on the 3<sup>rd</sup> (right) of October  
**图3.** 10月2日20时(左)、10月3日08时(右)地面风场

从上面分析可以发现，此次平凉东部大暴雨的主要影响系统是在副高外围西北侧西南暖湿气流，强降水发生区主要位于高空西风急流出口右侧，低空南风急流左侧，配合低涡切变，加之地面辐合线的增幅作用形成。

#### 4. 物理量特征分析

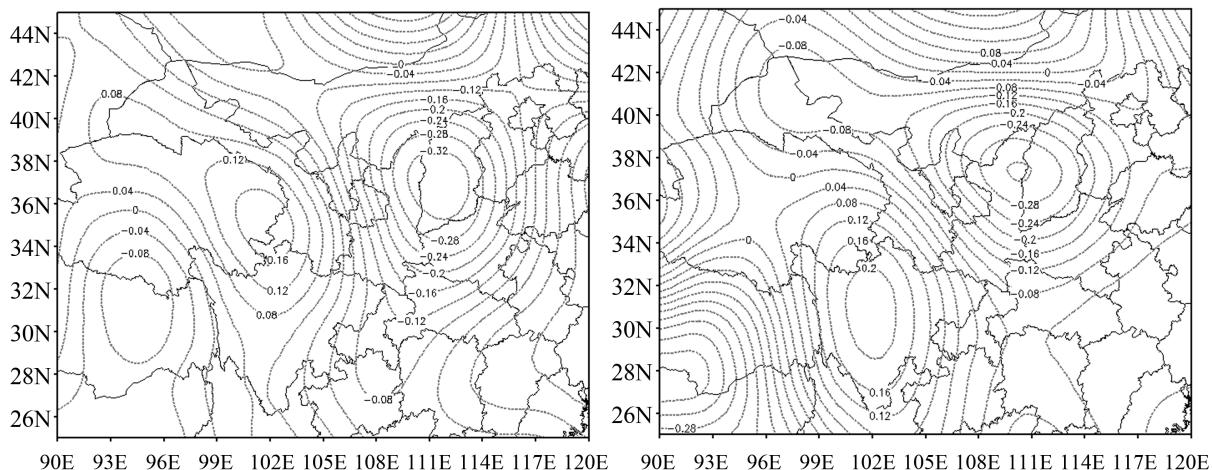
##### 4.1. 充沛的水汽输送



**Figure 4.** Water vapor flux field on 700 hPa (left) and divergence field on 850 hPa (right) at 08:00 on October 3<sup>rd</sup>  
**图4.** 10月3日08时 700 hPa 水汽通量场(左)、850 hPa 水汽通量散度场(右)

充沛的水汽是强降水发生的必要条件，从相对湿度垂直分布看(图略)，暴雨前期 2 日 20 时，平凉上空  $\geq 80\%$  的高湿中心有 2 个，分别位于 400 hPa、700 hPa 附近，500 hPa~600 hPa 为相对低值区，湿度大值区位于甘肃中部至南部；3 日 02 时，对流层上部乃至近地层 850 hPa 相对湿度陡增至 90% 以上，水汽条件明显改善；暴雨发生时 3 日 08 时河东地区 500 hPa~700 hPa 相对湿度在 80%~90% 之间，700 hPa 湿度大值区与暴雨区对应；3 日 20 时~6 日 08 时中低层一直维持高湿状态，为降水持续提供了有利的水汽条件。分析 700 hPa 比湿场(图略)可以发现，暴雨发生前后 2 日 20 时~5 日 20 时，陇东南至陕西一带比湿维持较高值，普遍在  $8 \text{ g/kg} \sim 9 \text{ g/kg}$ ，陕西局地超过  $10 \text{ g/kg}$ ，这样的比湿条件对 10 月来说，水汽含量很充沛，充分满足了强降水发生的水汽需求。再分析水汽通量场发现，2 日 20 时~3 日 08 时，西南地区至西北东部一致的偏南气流将孟加拉湾的水汽向北源源不断输送至暴雨或强降水区，700 hPa 水汽辐合还不明显，但近地层 850 hPa 水汽辐合区已明显加强，西北地区东南部西南-东北向水汽输送通道建立(图 4)，3 日 20 时 700 hPa 水汽辐合区加强并维持，与暴雨区叠加，这为强降水区提供了充足的水汽来源。

## 4.2. 动力抬升条件



**Figure 5.** Vertical velocity fields of 500 hPa (left) and 700 hPa (right) at 02:00 on the 3<sup>rd</sup> of October

**图 5.** 10 月 3 日 02 时 500hPa(左)、700 hPa(右)垂直速度场

分析垂直速度场发现，2 日 20 时，700 hPa~500 hPa 陇东以北为辐合上升中心，3 日 02 时(图 5)，陇东东部至陕北一带为上升运动区，高层 500 hPa 辐合中心偏东，低层 700 hPa 辐合中心在陕北为  $-0.32 \text{ Pa/s}$ ，05 时高层辐合区加强东移至山西，低层辐合区有所减弱。从涡度时间垂直剖面分布看(图略)2 日 20 时~3 日 08 时平凉东部 700 hPa 以上至 400 hPa 为正涡度区，涡度中心位于 500 hPa，上升运动较强，利于强降水的产生。

## 4.3. 不稳定条件分析

2 日 20 时崆峒站探空图上(图 6)，近地层为南风，且风随高度顺时针旋转，有弱的暖平流，中高层风向逆时针旋转，冷平流明显，对流有效位能 CAPE 值较大为  $979.1 \text{ J/kg}$ ，并有一定的对流抑制能量，700 hPa 以上到对流层中层存在干层，下湿上干有利于层结不稳定的产生。3 日 08 时中低层相对湿度较大，水汽含量高，近低层风向转为偏北风，且风随高度逆时针旋转，冷平流侵入本地，CAPE 减小为  $65.8 \text{ J/kg}$ ，说明夜间能量已经释放，而对流抑制能量增大，对流发展已不利，暖云层厚度较厚为 3330 米，指示有利于高效率降水的产生。

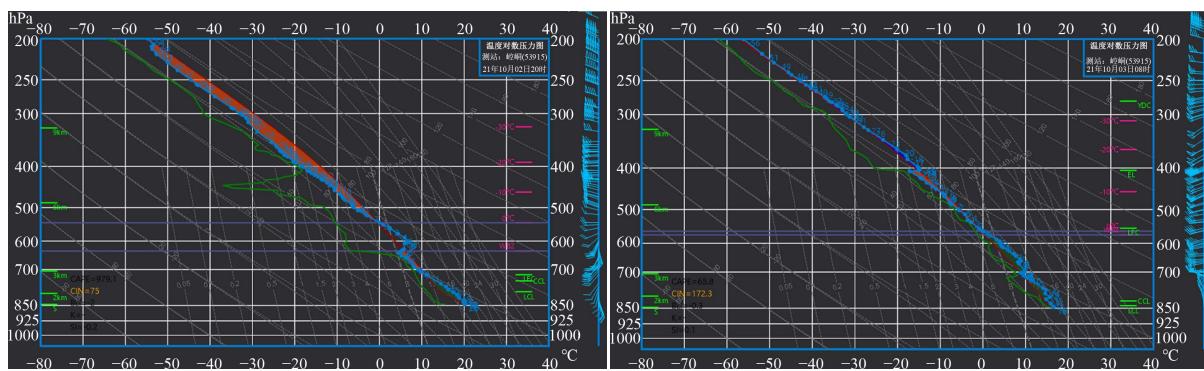


Figure 6. Kongtong Station sounding map at 20:00 on October 2<sup>nd</sup> (left) and 08:00 on October 3<sup>rd</sup> (right)

图 6. 10月2日20时(左)、3日08时(右)崆峒站探空图

## 5. 雷达回波及云图特征

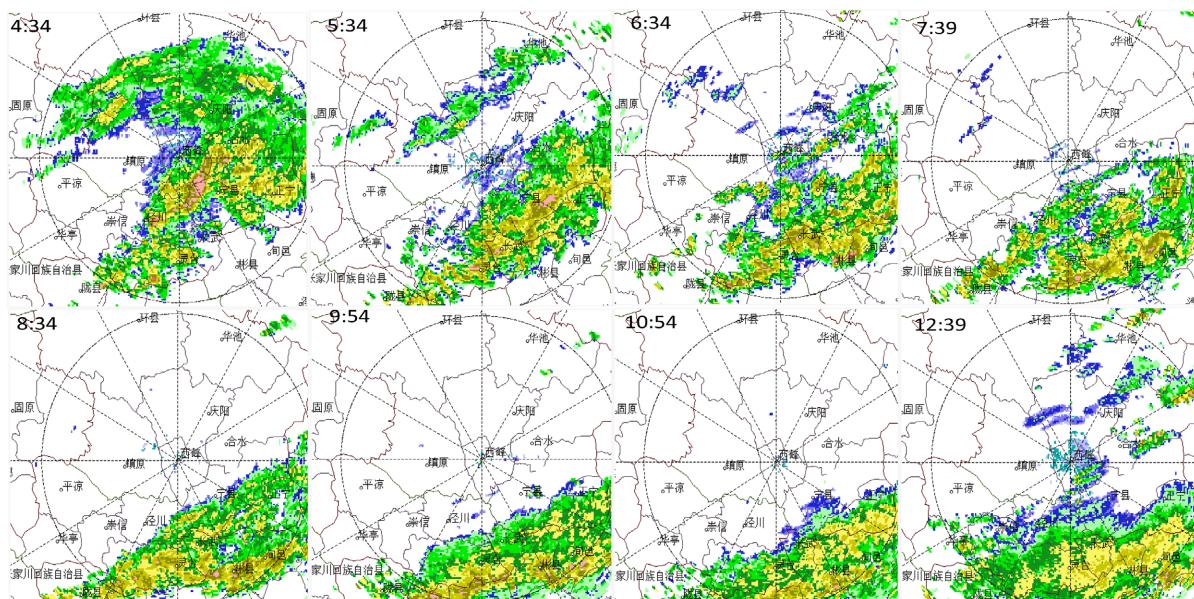


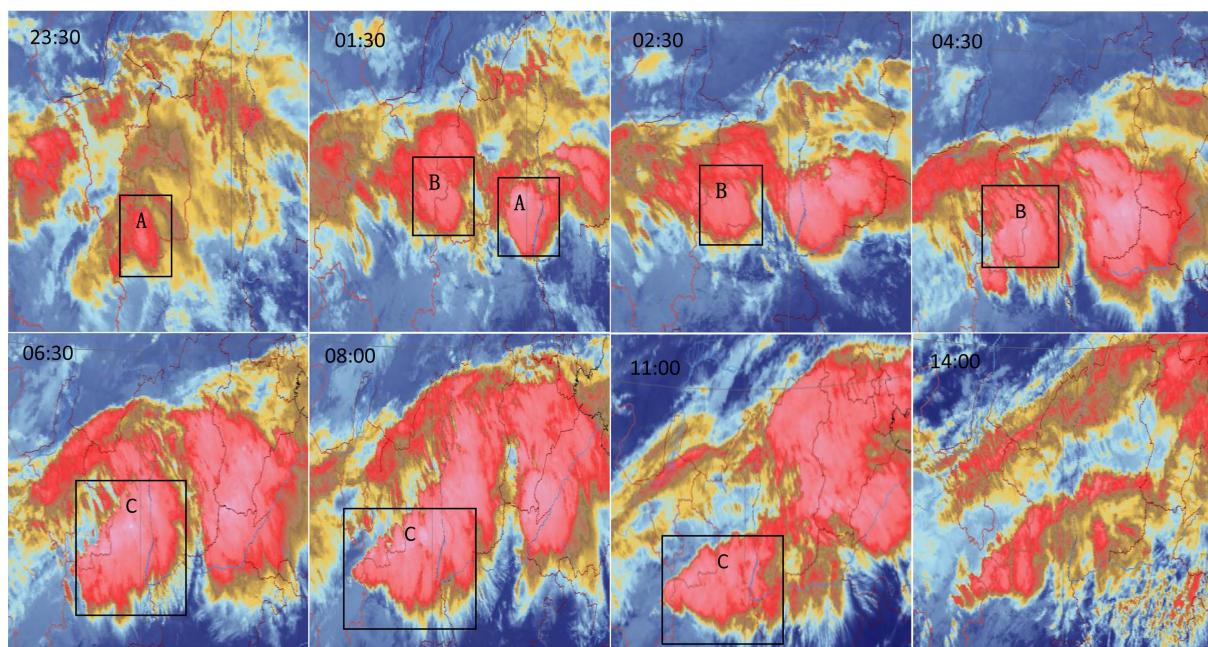
Figure 7. Evolution of combined reflectance of radar echoes from 4:34~12:39 on October 3<sup>rd</sup>

图 7. 10月3日 4:34~12:39 雷达回波组合反射率演变

从西峰雷达站组合反射率演变来看(图 7)，3 日 3 时之前回波主要在西峰境内，平凉东北部与西峰交界的泾川有弱回波，3 时 30 分以后，平凉东部有几个分散的单体发展，回波强度在 35 dBz 左右，4 时 30 分泾川东部及灵台的单体强度有所加强，但结构松散，西峰境内的强回波东移至宁县，强度达 45 dBz~50 dBz，回波对流性特征明显，有利于短时强降水的发生，此后南部与陕西交界的陇县、千阳一带不断新生单体，向东北移动与灵台境内的回波连接合并，灵台境内开始出现短时强降水，6~8 时庆阳境内强回波东移南压，随着前一轮降水回波的缓慢东移，宝鸡西北部不断有新单体在其后部生成，强度仍维持在 40 dBz 以上并向东北移入灵台，使得系统移动缓慢，灵台附近不断有新的单体生成和经过，列车效应明显，由于对流雨带中强降水单体重复经过同一个地点，出现大的累计降水量。10 时以后强降水回波东移南压，灵台境内回波强度减弱，但仍维持在 30 dBz~35 dBz 之间，直到 18 时降水回波消散，可见，降水回波在灵台境内移速慢，使得降水有较长的持续时间，对雨量的累积很有利。

分析云图演变(图 8)发现，2 日 23:30 对流云团 A 已进入平凉东部，云顶亮温最低达 214.6 k，云团尺

度为 100 多公里，3 日 00 点后此云团东北移向庆阳，01 时左右有一大尺度云团 B 从西北方向沿崆峒东南移向平凉东部，云顶亮温最低达  $213.3\text{ k}$ ，南北向尺度达 250 公里，02 时该对流云团前沿已进入东部泾川、灵台，04 时在宝鸡境内不断生成小尺度的对流云团进行补充，与之前的对流云团 B 尾部合并，06 时结构紧密的对流云团 C 形成，与暴雨带的影响范围重叠，尺度范围扩大至 400 多公里，灵台境内云顶亮温最低达  $206.5\text{ k}$ ，低值中心在陕北为  $198.6\text{ k}$ ，此后云团 C 后部不断新生小尺度的对流云团与其合并，影响范围继续扩大，云顶亮温最低达  $203.5\text{ k}$ ，移速缓慢，11 时云团 C 东北端逐渐断裂，其西南端后部仍有小尺度对流云团生成合并，重复经过暴雨发生区，造成持续性强降水，14 时云团 C 结构松散并分裂为多个小尺度的对流云团，对应强降水时段也相应减弱。



**Figure 8.** Evolution of cloud image from 23:30 on October 2<sup>nd</sup> to 14:00 on October 3<sup>rd</sup>

**图 8.** 10月 2 日 23:30~3 日 14:00 云图演变

## 6. 小结

- 1) 此次大暴雨过程主要是在副高外围西南暖湿气流稳定影响平凉东部的背景下，低层切变线辐合系统长时间维持在平凉东部，叠加地面辐合线对降水的增幅作用，导致灵台极端强降水的出现。
- 2) 充沛的源源不断的水汽供应及有利的动力抬升机制，加之不稳定能量的释放，触发了多站多个时段出现短时强降水，导致累加雨量较大，产生大暴雨。
- 3) 相对于暖季暴雨而言，发生在秋季 10 月的暴雨尤其是大暴雨是历史同期罕见的，这主要是副高位置偏北较强而且维持稳定，其西北侧暖湿气流强盛，水汽供应充沛，为暴雨区输送源源不断的水汽条件而形成。
- 4) 雷达回波的列车效应和后向传播现象明显，使得降水回波反复经过同一地点平凉东部暴雨区，造成持续时间长且累计雨量大的强降水。

## 参考文献

- [1] 梁萍, 何金梅, 陈隆勋, 等. 华北夏季强降水的水汽来源[J]. 高原气象, 2007, 26(3): 460-465.

- [2] 孙照渤, 黄艳艳, 倪东鸿. 我国秋季连阴雨的气候特征及大气环流特征[J]. 大气科学学报, 2016, 39(4): 480-489.
- [3] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [4] 张景, 周玉淑, 沈新勇, 等. 2016 年京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条件分析[J]. 大气科学, 2019, 43(4): 930-942.
- [5] 周璇, 孙继松, 张琳娜, 等. 华北地区持续性极端暴雨过程的分类特征[J]. 气象学报, 2020, 78(5): 761-777.
- [6] 刘雅楠, 刘熙明, 邹海波, 等. 江西西北部地形对一次大暴雨过程影响的数值模拟分析[J]. 气象与减灾研究, 2021, 44(2): 105-114.
- [7] 凌婷, 段艺萍, 肖雯, 等. 一次登陆台风倒槽暴雨过程的初步诊断[J]. 气象与减灾研究, 2018, 41(4): 262-269.
- [8] 韩美, 廖晨菲, 林小红, 等. 一次热带低压伴随中尺度锋生的暴雨天气过程分析[J]. 气象与减灾研究, 2022, 45(3): 187-195.