

# 甘肃省河东地区一次暴雨天气特征以及成因分析

刘 扬<sup>1</sup>, 邓卓雅<sup>1</sup>, 李 瞳<sup>1</sup>, 罗王军<sup>2</sup>

<sup>1</sup>甘肃省天水市气象局, 甘肃 天水

<sup>2</sup>甘南州气象局, 甘肃 甘南

Email: 277645092qq.com

收稿日期: 2021年6月16日; 录用日期: 2021年7月13日; 发布日期: 2021年7月20日

## 摘 要

利用逐小时ERA5再分析资料和常规气象资料, 从环流形势、中尺度特征、物理量诊断等方面, 对2019年8月2日甘肃省河东地区一次区域性暴雨天气过程的特征和成因进行分析。结果表明: 这是一次上干下湿的环境条件下, 由低层切变线触发而产生的一次暴雨天气过程; 暴雨落区与相对湿度大于90%的区域及能量锋的位置相对应; 台风“韦帕”外围的暖湿气流为此次暴雨过程提供了充沛的水汽; 地形的抬升作用进一步增强了上升运动, 促进对流发展; 风切变导致不稳定能量的释放是造成局地强降水的重要原因, 湿位涡分量等值线密集区对降水落区具有一定的指示意义。

## 关键词

暴雨, 物理量诊断, 水汽输送, 湿位涡

# The Weather Characteristics and Cause Analysis of a Heavy Rain in Hedong Area of Gansu Province

Yang Liu<sup>1</sup>, Zhuoya Deng<sup>1</sup>, Tong Li<sup>1</sup>, Wangjun Luo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tianshui Meteorological Bureau, Tianshui Gansu

<sup>2</sup>Gannan Meteorological Bureau, Gannan Gansu

Email: 277645092qq.com

Received: Jun. 16<sup>th</sup>, 2021; accepted: Jul. 13<sup>th</sup>, 2021; published: Jul. 20<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on ERA5 reanalysis data and conventional meteorological data, the characteristics and causes of a regional rainstorm weather process which occurred in East of the Yellow River, Gansu Province on August 2, 2019 were analyzed from the aspects of circulation situation, mesoscale characteristics, and physical quantity. The results show that the rainstorm weather process is triggered by the low-level shear under the environmental conditions of upper dry and wet lower. The rainstorm area corresponds to the area where the relative humidity is greater than 90% and the energy front formed. The warm humid air around the typhoon "Weipa" provided abundant water vapor for the rainstorm process. The uplift caused by terrain further enhanced the upward movement and promoted the development of convection. The release of unstable energy caused by wind shear is an important cause of strong local precipitation, and the dense area of the wet potential vorticity component is an indicator of the precipitation area.

## Keywords

Rainstorm, Physical Diagnosis, Moisture Transport, Moist Potential Vorticity

Copyright © 2021 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

甘肃省位于中国西北地区，地形狭长，地处黄土高原、青藏高原和内蒙古高原三大高原的交汇地带，以山地高原地貌为主，境内天气复杂多变，暴雨等强对流天气频发，但由于其特殊的地质条件，在暴雨的影响下极易造成泥石流、山体滑坡等次生灾害，此类灾害时空分布特点与暴雨分布特点具有一定的相似性。因此，分析暴雨天气过程演变特点和规律，对提高预报预警质量，预防地质灾害，从而趋利避害，保障人民民生等方面具有重要意义。已有许多学者对西北暴雨的发展演变特征做了研究，取得了一些成果[1] [2] [3] [4] [5]。钱正安[6]指出，西北暴雨主要受外来水汽输送影响，夏秋暴雨的主要水汽源地在台海区，孟加拉湾是晚春暴雨的重要水汽源地。黄玉霞[7]等人将西北暴雨特征分为四型，并指出东亚夏季风与暴雨日数分型密切相关。段海霞[8]等人对甘肃省一次暴雨过程进行数值模拟，发现喇叭口地形对局地降水有明显的增幅作用，地形的动力抬升是造成强降水的主要原因。本文期望通过对河东地区一次暴雨过程分析，为此类暴雨的预报研究提供一些参考。

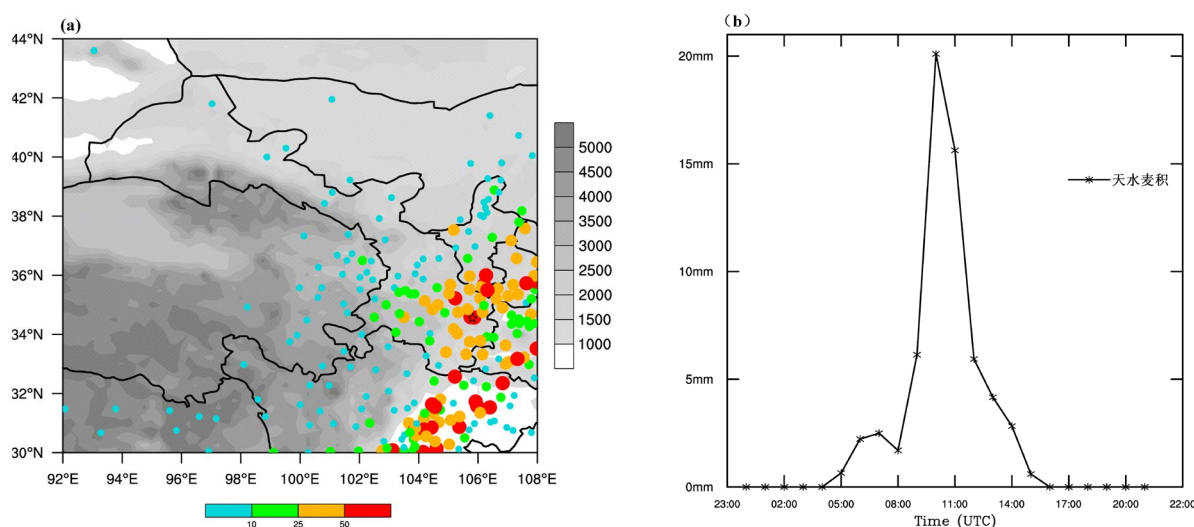
## 2. 研究方法

本文主要采用水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 、时间间隔为 1 h 的 ERA5 再分析资料和常规高空、地面观测资料，从环流形势、中尺度特征、动力热力条件等方面出发，研究本次降水过程特征，分析本次强降水的影响因子，探讨降水的形成机制，为此类天气过程的预报提供一些借鉴。

## 3. 降水实况

2019 年 8 月 2 日 00 时~3 日 00 时(世界时)甘肃省发生一次较强的暴雨天气过程。此次降水主要覆盖甘肃河东地区，其中陇南、天水、庆阳等市州局部出现暴雨，24 h 累积降水量最大值出现在天水市麦积

区(图 1(a)), 降水量达 75 mm。从降水量时间序列图上来看(图 1(b)), 降水从 08 时开始突然加大, 10 时达到最强随后减弱, 降水过程从开始到结束共持续不到 10 h。综合来看, 此次降水是一次突发性强、降水区域集中、降水量大的天气过程, 受此强降水影响, 部分地区发生城市内涝, 农作物受灾严重, 水毁道路情况频发, 造成较大的经济损失, 为人民的生产生活带来严重的影响。



**Figure 1.** (a) The distribution of cumulative precipitation from 00:00 on August 2nd to 00:00 hours on August 3, 2019; (b) Precipitation time series at the center of precipitation maximum (34.6°N, 105.7°E)

**图 1.** (a) 2019 年 8 月 2 日 00 时~3 日 00 时 24 h 累积降水量分布(单位: mm); (b) 降水大值中心处(34.6°N, 105.7°E)降水时间序列图

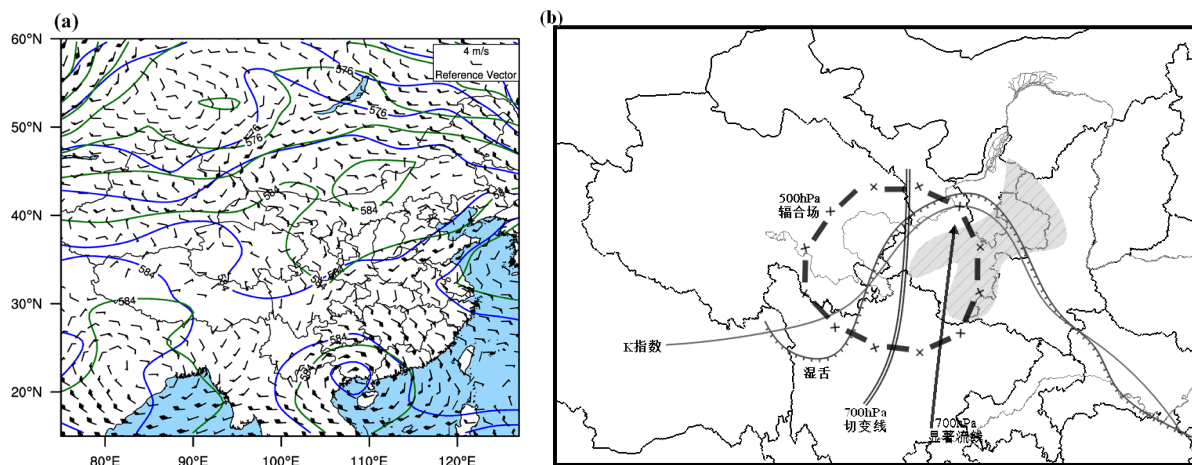
#### 4. 环流形势分析

2019 年 8 月 2 日 00 时(图 2(a)), 500 hPa 高纬度为强度较弱的“两槽一脊”, 副高(588 线)稳定维持在 115°E 以东, 中纬度青海省存在西南—东北向倾斜槽脊, 脊前低槽位于青海、甘肃和四川三省交界处, 此处风场有明显辐合, 使得脊前南下冷空气在槽内堆积。到 2 日 12 时, 中纬度倾斜槽脊逐渐向东收缩, 受副高阻挡, 脊前槽加深并逆转, 槽内辐合气流加强且东移至甘肃河东地区与宁夏上空, 覆盖整个降水区域。700 hPa 上呈现东高西低的环流形势, 甘肃位于东侧高压系统前端, 被偏南气流控制, 暖湿空气随 2019 年第 7 号台风“韦帕”的外围自东南沿海跨四川盆地输送至河东地区, 降水区位于切变线东侧。

综合来看, 本次降水过程是在高低层系统协同影响下发生的, 500 hPa 上中纬度横槽稳定维持, 南下冷空气在槽内辐合堆积, 加之低层暖湿气流的输送形成高层干冷、低层暖湿的配置, 使得降水区域累积了大量不稳定能量, 在低层切变线的触发作用下产生局地降水。

#### 5. 中尺度分析

2 日 00 时低层 700 hPa 上有一条湿舌覆盖四川、甘肃和宁夏南部(图 2(b)), 湿舌最远北伸至白银市北部, 天水、陇南部分地区相对湿度达 90% 以上, 此时 500 hPa 上甘肃河东地区为一相对的干区, 呈现上干下湿的不稳定趋势。K 指数 > 36°C 的等值线与湿舌几乎重叠, 覆盖整个降水区, 此区域沙氏指数 SI < 0, 有不稳定能量的累积。另外, 700 hPa 上, 在川青甘三省交界处存在东南风和西北风切变线, 500 hPa 高度上此处存在流场辐合, 低层切变线 with 中低层流场的辐合是有利于降水发生发展的动力形式。从总温度场上来看, 河东地区位于等总温度的密集区, 存在明显的“Ω 型”等能量比线, 天水、定西和陇南地区都处于能量锋处, 对激发强对流和暴雨十分有利。



**Figure 2.** (a) 500 hPa circulation pattern on August 2, 2019 (the blue contour represents 00:00, and the green contour represents 12:00); (b) the concept map of Influence System (the shaded area is the precipitation area)

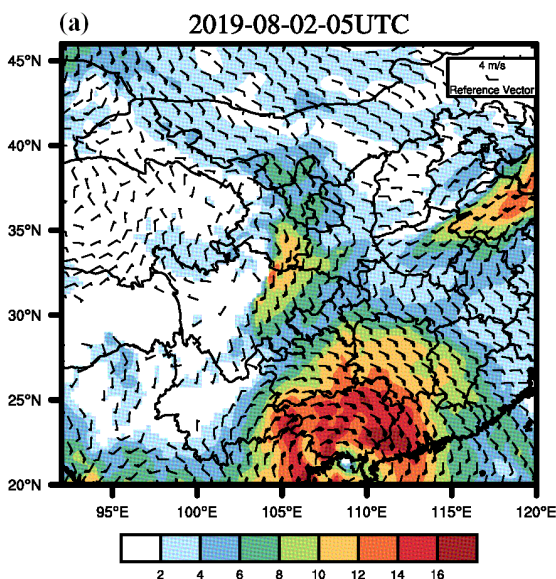
**图 2.** (a) 2019 年 8 月 2 日 500 hPa 环流形势(蓝色等值线为 00 时, 绿色等值线为 12 时); (b) 影响系统概念图(阴影部分为降水区域)

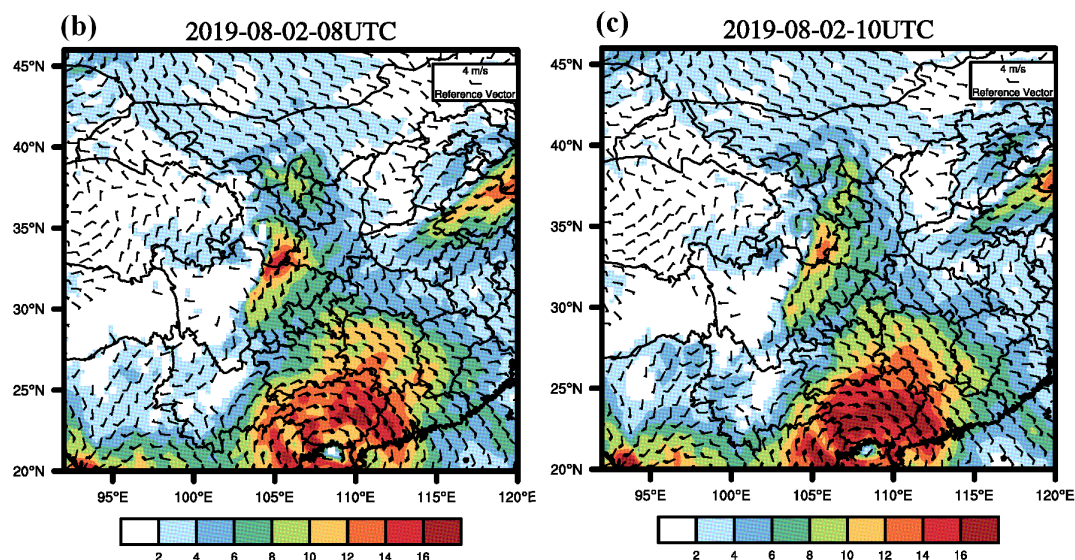
## 6. 物理量场诊断分析

### 6.1. 水汽条件

降水是大气中水汽相变的过程, 水汽作为暴雨产生的必要条件之一, 直接决定着降水的持续时间以及降水量的大小, 局地良好的水汽条件配合充分的水汽输送是产生一次强降水的前提[9]。

水汽通量对水汽输送的强度以及水汽输送路径有很好的指示意义, 由图 3 可得, 随着 2019 年第 7 号台风“韦帕”在广西沿海地区的登陆, 热带洋面上的水汽通过台风外围偏东气流向内陆补充, 气流受川西高原阻挡, 在四川盆地内转向为偏南气流后越秦岭, 源源不断的输送至甘肃河东地区, 大量的水汽补充为降水提供了条件, 刘子臣等[10]也指出, 台风外围气旋性环流中的偏东或偏南气流可以成为水汽输送带, 将水汽输送到暴雨区。至 2 日 08 时, 即强降水开始前 2 h 左右, 水汽通量达到最大, 约为  $16 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ , 随后开始减小, 水汽通量极值中心向南偏移, 此时暴雨中心与水汽通量极值区有很好的对应关系。





**Figure 3.** Wind field (Wind vector, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and Water vapor flux (Color shaded region, unit:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at 700 hPa on August 2, 2019 [(a) 0500UTC, (b) 0800UTC, (c) 1000UTC]

**图 3.** 2019 年 8 月 2 日 700 hPa 上 (a) 0500UTC, (b) 0800UTC, (c) 1000UTC 风场(风矢量, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 和水汽通量(彩色阴影, 单位:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

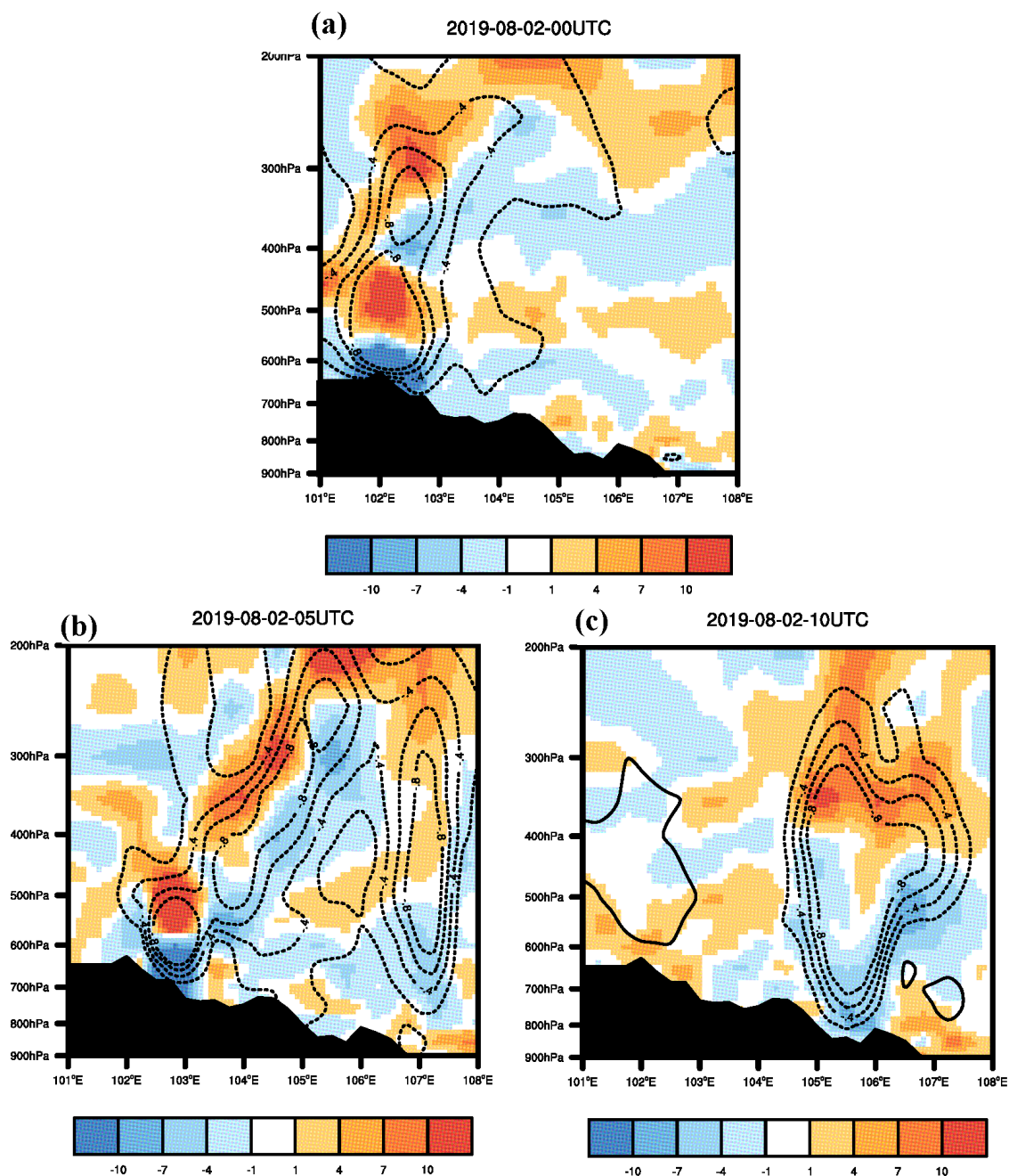
从风场上看, 降水区域一直受偏南气流的影响, 风速约为  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 至 2 日 05 时, 在暴雨中心西北侧出现明显的辐合中心并随着时间不断发展, 到 11 时也就是暴雨发生时刻, 辐合达到最强。到强降水结束, 流场的辐合才逐渐解体, 局地风场的辐合贯穿了整个降水过程, 降水的发展与局地辐合中心强弱具有一致性, 水汽通量极值区的位置也对降水落区有很好的预测作用, 低层辐合配合大量水汽输送很可能是影响降水发展的重要原因。

## 6.2. 垂直运动分析

一次暴雨的发生除了需要充足的水汽供应之外, 还需要一定的动力机制。不稳定能量触发释放形成强烈的垂直运动, 垂直运动将低层水汽输送到高空冷却凝结形成云, 从而产生降水[11]。

从降水大值中心垂直剖面图上来看(图 4), 2 日 00 时, 在剖面左端地形上方有一明显的高层辐散低层辐合的散度场分布, 对应高低两个上升中心, 并有向东倾斜的趋势。低层上升中心位于 500 hPa, 高层上升中心位于 350 hPa, 但在  $104^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$  范围内(降水区)无明显上升运动, 此时降水还未发生。到 2 日 05 时, 原来位于左端地形上方的上升运动沿地形向下移动, 但低层系统移动慢, 高层移动快, 上升运动明显向东倾斜, 降水区主要受 500 hPa 以上高层的垂直运动影响, 此时降水处于初期阶段。到 2 日 10 时, 整个降水区( $104^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ )被独立的上升运动覆盖, 强度达到  $0.8 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$  以上, 降水极值位置与强上升中心位置相吻合, 降水处于旺盛期, 与 05 时相比, 上升运动沿地形整体东移, 并在迎风坡处稳定维持, 一直到 22 时才完全消亡。

从流场和涡度场上来, 降水发生前(图 5(a)), 低层气流受地形抬升产生上升运动, 在暴雨区( $104^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ )内高低层都存在正负涡度交替的现象。到降水发展期(图 5(b)), 低层受地形抬升到高层的上升气流在强的西风影响下向下游扩展, 暴雨区高层逐渐被正涡度覆盖, 500 hPa 以下形成明显的局地环流, 局地环流很可能影响云微物理过程, 使得云滴生长周期变长, 为随后到来的强降水蓄力。到降水旺盛期(图 5(c)), 暴雨区高层整层几乎被正涡度覆盖, 局地环流减弱, 被上升运动取代, 大云滴克服升力降至地面, 造成暴雨。



**Figure 4.** Divergence field (Color gradation, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and vertical velocity field (Contour, unit:  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ) profile along  $34.6^\circ\text{N}$  on August 2, 2019 [(a) 0000UTC, (b) 0500UTC, (c) 1000UTC]

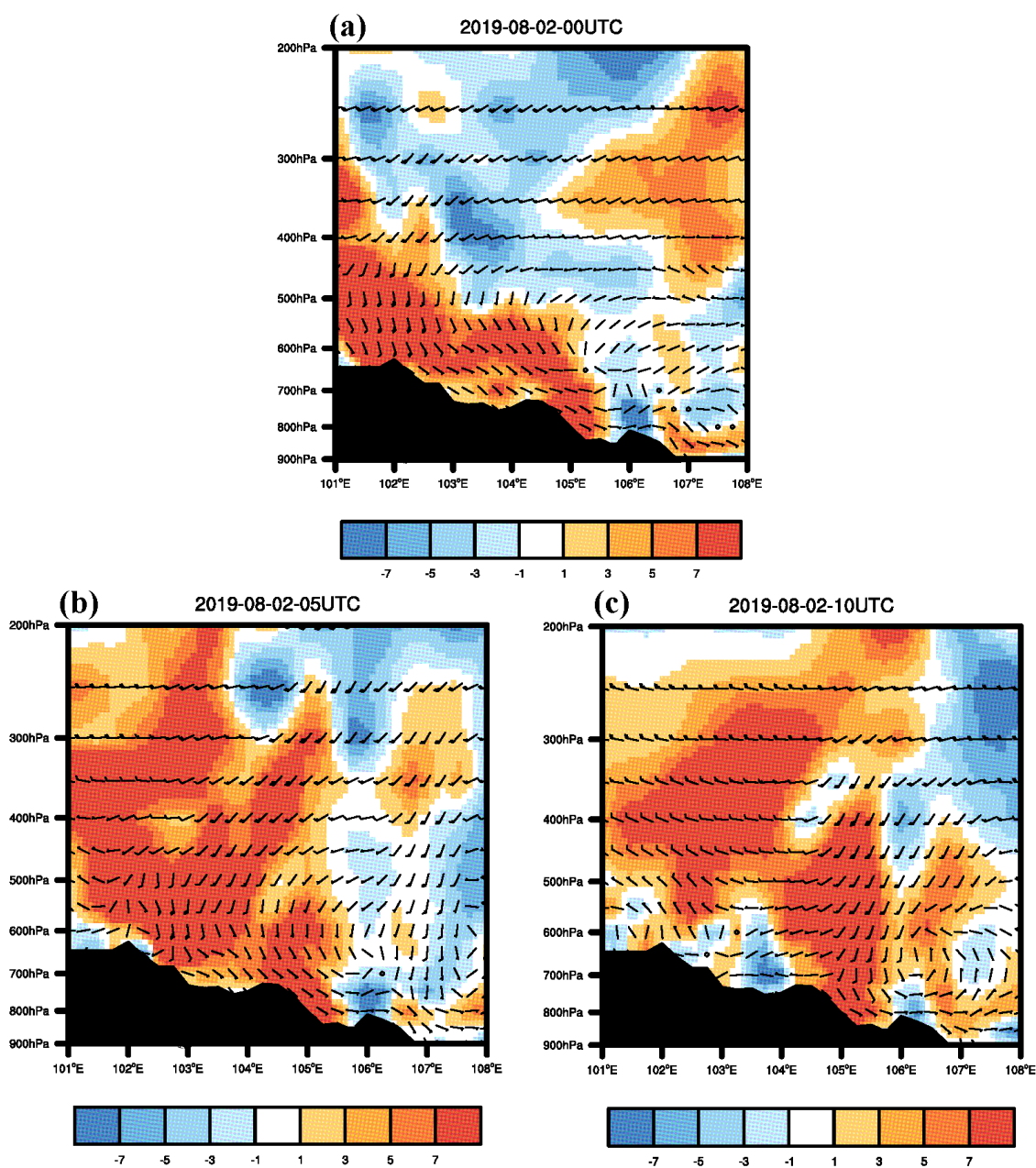
**图 4.** 2019 年 8 月 2 日 (a) 0000UTC, (b) 0500UTC (c) 1000UTC 沿  $34.6^\circ\text{N}$  散度场(色阶, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )和垂直速度场(等值线, 单位:  $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )剖面

总的来看, 本次降水过程中, 山地地形对暖湿气流的抬升, 导致低层水汽辐合, 在强上升运动的作用下, 低层水汽不断向高空供应助力积云对流发展, 使得云滴不断增大, 最终导致强降水的产生。

### 6.3. 稳定度分析

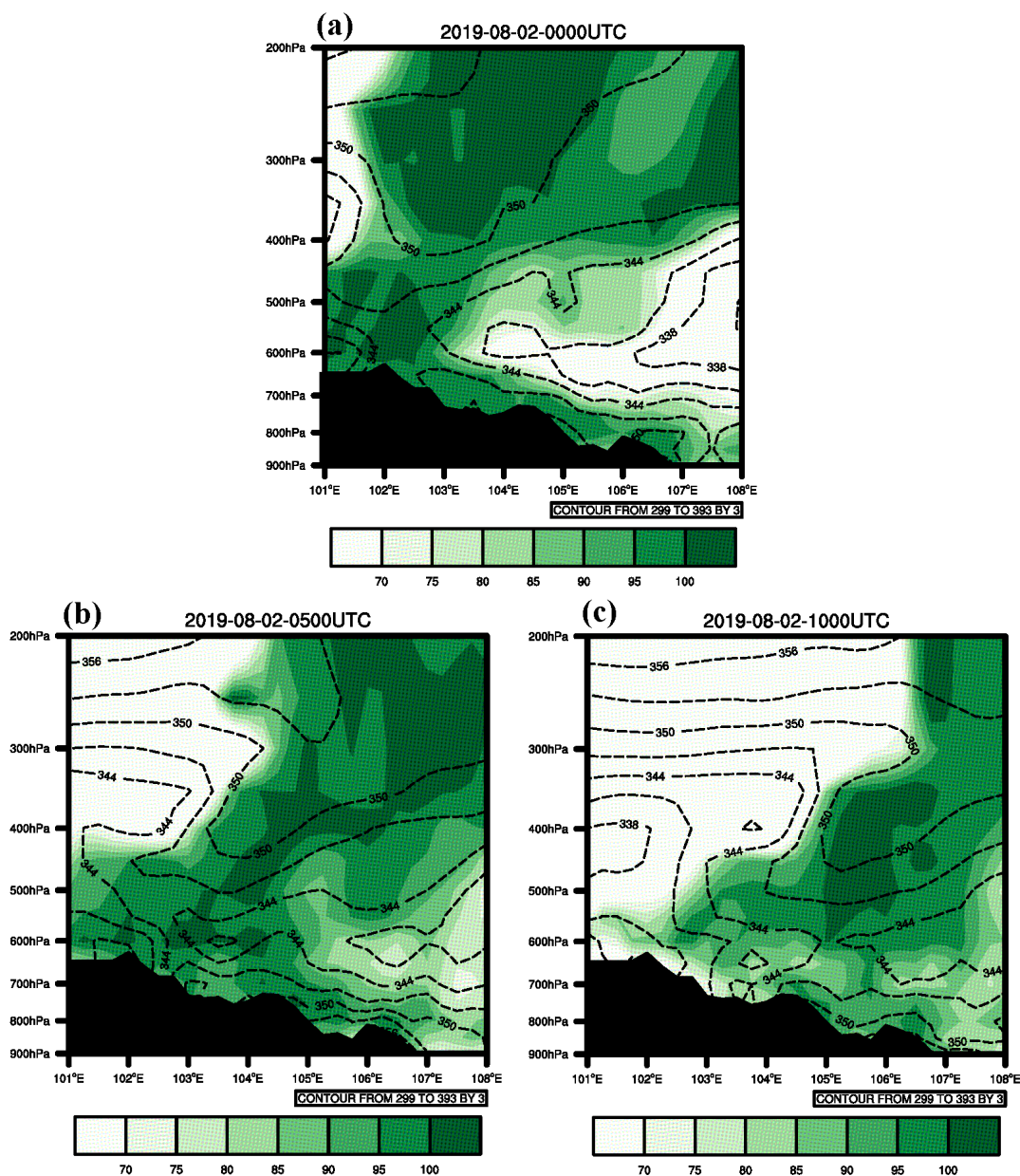
一般将假相当位温随高度减小 ( $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$ ) 视为位势不稳定的判据, 从  $\theta_{se}$  和相对湿度垂直剖面图(图

6)上来看, 2日00时, 在 $104^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ 范围内500 hPa以下为 $\theta_{se}$ 线密集区, 此区域明显的上干下湿的分布特征表示此范围具有明显的位势不稳定, 不稳定能量的累积是强降水发生的条件。2日05时, 高层干冷空气向下游入侵, 降水区域低层的不稳定能量逐渐减小,  $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$ 范围缩小至600 hPa以下, 随着低层偏南气流暖湿空气的输送使得低层水汽加强, 降水区域整层相对湿度达到70%以上。到暴雨阶段即2日10时, 高层完全被干冷空气占领, 不稳定能量的释放达到最大化, 强烈的上升运动的将低层水汽协卷至高层凝结加强降水, 使得降水区域内相对湿度持续加大。



**Figure 5.** Vorticity field (Color gradation, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and flow field (Contour, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) profile along  $34.6^{\circ}\text{N}$  on August 2, 2019 [(a) 0000UTC, (b) 0500UTC, (c) 1000UTC]

**图 5.** 2019 年 8 月 2 日 (a) 0000UTC, (b) 0500UTC, (c) 1000UTC 沿  $34.6^{\circ}\text{N}$  涡度场 (色阶, 单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) 和流场 (等值线, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 剖面



**Figure 6.** Relative humidity field (Color gradation, unit: %) and False equivalent potential temperature (Contour, unit: K) profile along 34.6°N on August 2, 2019 [(a) 0000UTC, (b) 0500UTC, (c) 1000UTC]

**图 6.** 2019 年 8 月 2 日上(a) 0000UTC, (b) 0500UTC, (c) 1000UTC 沿 34.6°N 相对湿度场(色阶, 单位: %) 和假相当位温(等值线, 单位: K)剖面

### 7. 湿位涡分析

位涡(PV)作为降水过程中热力和动力的配置关系的诊断因子常常被用于预测暴雨过程的生消发展, 然而在降水过程中, 水汽作为主要影响因子, 其与温压场的配置关系也对降水天气系统的发生发展具有重要意义。吴国雄[12]在原始动力方程的基础上, 推导出了考虑水汽的湿位涡(MPV)方程, 并证明在绝热无摩擦的饱和湿空气中湿位涡守恒, P 坐标系下的湿位涡(MPV)表达式为:

$$MPV = -g \left( f\vec{k} + \nabla \times \vec{V} \right) \cdot \nabla \theta_e = const \quad (1)$$



其中,  $f$  为科氏力参数,  $\theta_e$  为假相当位温,  $\vec{V}$  为风矢量, 湿位涡被分解为湿正压项(MPV<sub>1</sub>)和湿斜压项(MPV<sub>2</sub>), 公式为:

$$\text{MPV}_1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} \quad (2)$$

$$\text{MPV}_2 = g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式(2、3)中,  $\zeta$  为相对涡度,  $u$ 、 $v$  表示风速。

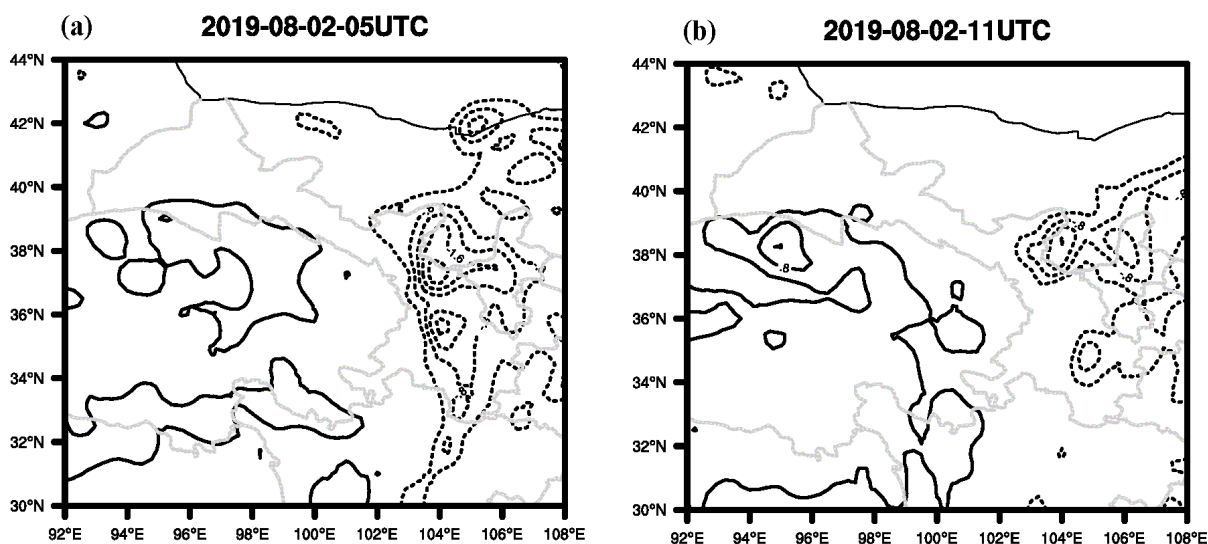
一般将湿位涡看作条件对称不稳定的判据, 当  $\text{MPV}_1 < 0$  时, 此时大气层结可能存在对流不稳定, 此时大气中具有条件对称不稳定的倾斜上升气流[13]。从  $\text{MPV}_1$  的分布(图 7)上来看, 700 hPa 上降水区域主要以  $\text{MPV}_1$  的负值为主, 位于  $\text{MPV}_1$  等值线密集区,  $\text{MPV}_1$  的极值中心位于暴雨中心西北侧, 强度达 -1.0 PVU。到 2 日 11 时即降水旺盛期, 降水区域的  $\text{MPV}_1$  减弱, 暴雨中心与  $\text{MPV}_1$  极值区相吻合。从沿暴雨中心所做的垂直剖面图上来看, 降水前期, 600 hPa 以下 104°E~107°E 的降水区域主要以负值为主, 600 hPa 以上以正值为主。到降水旺盛期, 垂直方向上  $\text{MPV}_1$  下负上正的分布更为清晰, 但强度相比有所减小, 这种分布形势有利于不稳定能量的释放。当  $\text{MPV}_2 < 0$  时, 说明此时大气中存在较强的垂直风切变, 气层具有斜压性[13]。从湿位涡斜压项( $\text{MPV}_2$ )上来看(图 8), 在降水大值区的北侧出现的正负值交替的密集区, 且随时间不断加强, 这主要是因为 700 hPa 以下存在偏南风和偏北风的垂直风切变, 大气中具有较强的斜压性。

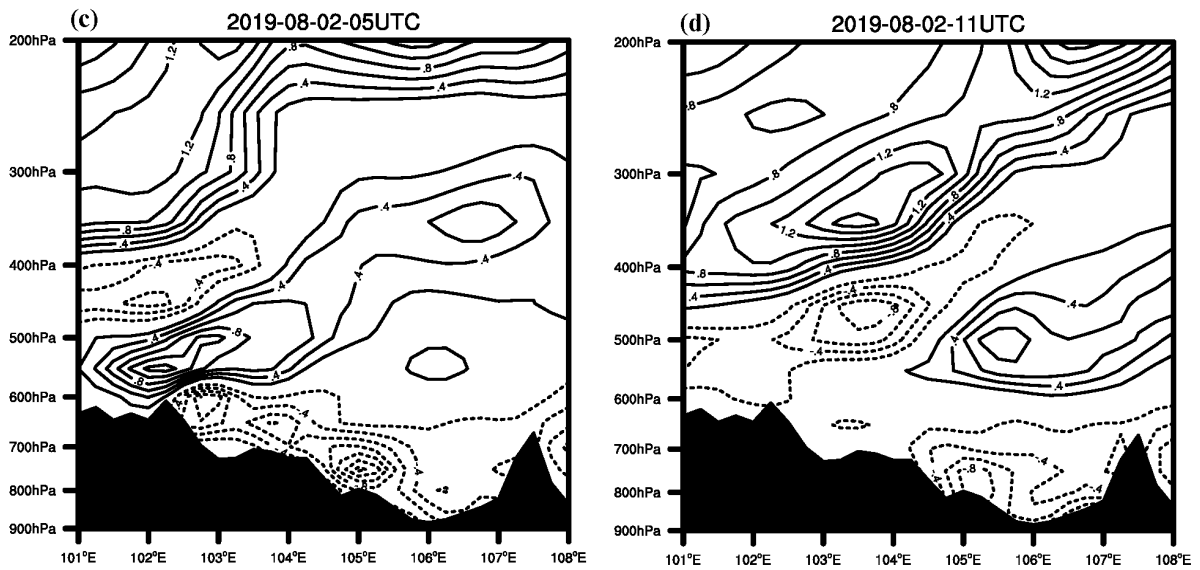
综合来看, 在暴雨初期, 降水区域低层累积大量不稳定能量, 在低层不断加强的垂直风切变作用下, 不稳定能量释放助力对流的发生发展, 这是此次暴雨产生的重要原因。另外, 700 hPa 上  $\text{MPV}$  两个分量等值线密集区都出现在暴雨区偏北侧, 这对降水落区有一定的指示意义。

## 8. 结论

通过对 2019 年 8 月 2 日发生在甘肃省河东地区的一次暴雨过程分析, 得到如下结论:

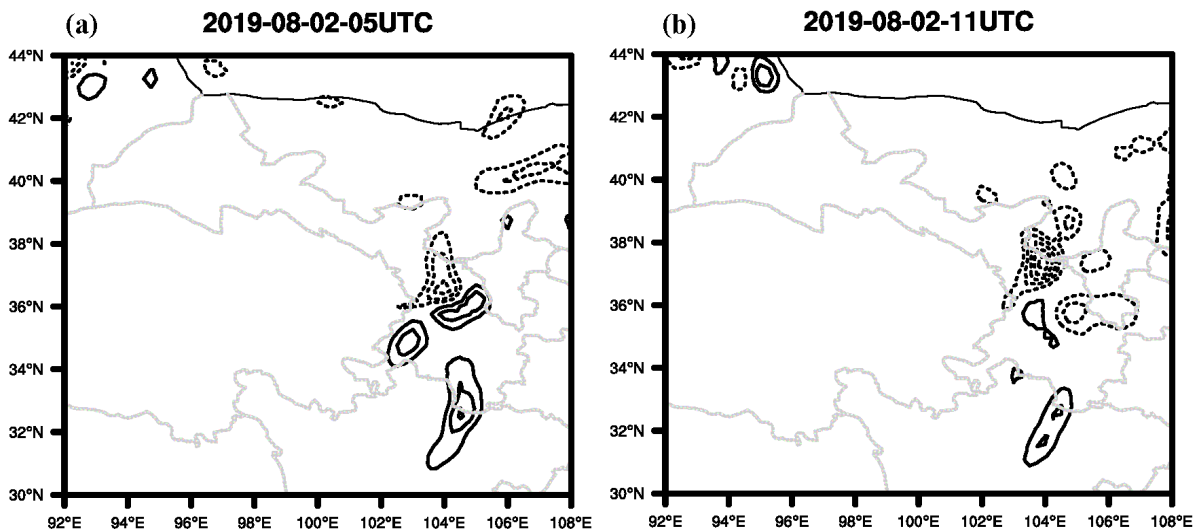
1) 本次天气过程主要是由高低层系统协同影响下引发的暴雨过程, 500 hPa 上中纬度短波横槽内不断累积南下冷空气, 700 hPa 上偏南暖湿气流不断向降水区补充, 形成高层干冷、低层暖湿的不稳定配置, 使得大气不稳定程度增加, 在切变线的触发作用下产生区域性降水。





**Figure 7.** The distribution of  $MPV_1$  [(a) 0500UTC, (b) 1100UTC] and along  $34.6^\circ N$  Vertical section of  $MPV_1$  [(c) 0500UTC, (d) 1100UTC] at 700 hPa on August 2, 2019 (unit: PVU,  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{s} \cdot \text{kg})$ )

**图 7.** 2019 年 8 月 2 日 700 hPa 上(a) 0500UTC, (b) 1100UTC 的  $MPV_1$  的分布以及(c) 0500UTC, (d) 1100UTC 沿  $34.6^\circ N$  的  $MPV_1$  的垂直剖面图(单位: PVU,  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{s} \cdot \text{kg})$ )



**Figure 8.** The distribution of  $MPV_2$  [(a) 0500UTC, (b) 1100UTC] at 700 hPa on August 2, 2019 (unit: PVU,  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{s} \cdot \text{kg})$ )

**图 8.** 2019 年 8 月 2 日 700 hPa 上(a) 0500UTC, (b) 1100UTC 的  $MPV_2$  的分布(单位: PVU,  $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{K}/(\text{s} \cdot \text{kg})$ )

2) 从中尺度分析来看, 河东地区不稳定性较强, 相对湿度大于 90% 区域与暴雨落区有很好的对应关系。此外, K 指数与 SI 指数均符合当地对流天气发生时不稳定参数阈值, 暴雨落区与能量峰位置相吻合。

3) 本次过程具有较好的本地水汽条件, 外来水汽输送主要受台风“韦帕”的影响, 台风外围偏东风在川西地形阻挡下转为偏南风后长驱直入河东地区, 水汽通量极值区也与降水落区有较好的对应。

4) 本次降水过程受地形影响较大, 暖湿气流在地形的抬升作用下使得低层水汽输送到高空助力积云对流发展, 最终导致强降水的产生。

5) 利用湿位涡综合动力和热力因素,发现本次过程中风切变导致不稳定能量的释放是造成局地强降水的重要原因,MPV 分量等值线密集区对降水落区具有一定的指示意义。

## 参考文献

- [1] 黄玉霞,王宝鉴,黄武斌,段伯隆,杨秀梅.我国西北暴雨的研究进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):515-525.
- [2] 《西北暴雨》编写组.西北暴雨[M].北京:气象出版社,1992.
- [3] 侯书勋,张婉莹,陈震等.一次东移西北涡暴雨过程的诊断分析[J].气象与环境学报,2018,34(5):9-15.
- [4] 毕旭,张弘,刘慧敏,等.陕西北部一次暴雨过程的中尺度对流系统分析[J].陕西气象,2007(2):13-15.
- [5] 李春虎.西北干旱和暴雨研究综述[J].干旱气象,2003,21(1):1-7.
- [6] 钱正安,蔡英,宋敏红,等.2018.中国西北旱区暴雨水汽输送研究进展[J].高原气象,37(3):577-590.
- [7] 黄玉霞,王宝鉴,王研峰,黄武斌.甘肃省夏季暴雨日数特征及其与大气环流关系[J].高原气象,2017,36(1):183-194.
- [8] 段海霞,刘新伟.喇叭口地形对一次暴雨影响的数值试验[J].干旱气象,2009,27(4):327-333.
- [9] 朱乾根.天气学原理和方法[M].第4版.北京:气象出版社,2007.
- [10] 刘子臣,梁生俊,张建宏.登陆台风对黄土高原东部暴雨的影响[J].高原气象,1997,16(4):67-74.
- [11] 高守亭,冉令坤,李小凡.大气中尺度动力学基础及暴雨动力预报方法[M].北京:气象出版社,2015.
- [12] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁.湿位涡和倾斜涡度发展[J].气象学报,1995,53(4):387-405.
- [13] 徐红,王文.一次暴雨过程中重力波和湿位涡分析[J].现代农业科技,2015(21):218-222.