

高空槽背景下宝鸡太白一次强对流天气过程 诊断分析

郑丹

陕西太白县气象局, 陕西 宝鸡

收稿日期: 2026年2月12日; 录用日期: 2026年3月11日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

本文利用多源观测数据、探空资料及环流场数据, 对2025年5月21~22日宝鸡太白强降水过程进行诊断分析, 结果表明: 此次过程是高空槽-中层切变-低空急流-地面低压多尺度系统协同作用的结果, 500 hPa槽前正涡度区提供大尺度背景, 700 hPa切变线触发扰动, 850 hPa偏南风急流输送充足水汽与能量, 地面低压倒槽增强辐合; 水汽条件呈现干层→整层高湿→弱湿的演变, 水汽通量散度的辐散-强辐合-弱辐合是降水阶段转变的核心驱动; 热力上形成强对流不稳定层结, 垂直速度的下沉→强整层上升→减弱直接驱动水汽垂直输送与能量释放。太白县因地形抬升叠加环流系统, 出现以大雨为主、局地极端降水的空间分布特征。

关键词

高空槽, 强降水, 宝鸡太白县, 诊断分析

Diagnostic Analysis of a Strong Convective Weather Process in Baoji Taibai under the Background of High-Altitude Trough

Dan Zheng

Shaanxi Taibai County Meteorological Bureau, Baoji Shaanxi

Received: February 12, 2026; accepted: March 11, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

In this paper, the multi-source observation data, sounding data and circulation field data are used to diagnose and analyze the heavy precipitation process in Taibai, Baoji on May 21~22, 2025. The

results show that the process is the result of the synergy of the multi-scale system of the high-altitude trough-middle shear-low jet-ground low pressure. The positive vorticity area in front of the 500 hPa trough provides a large-scale background, the shear line at 700 hPa triggers the disturbance, the southerly jet at 850 hPa transports sufficient water vapor and energy, and the ground low pressure inverted trough enhances convergence. The water vapor condition presents the evolution of dry layer-high humidity-weak humidity. The divergence-strong convergence-weak convergence of water vapor flux divergence is the core driving force of the precipitation stage transition. Thermally, a strong convective unstable stratification is formed, and the vertical velocity sinking-strong whole layer rising-weakening directly drives the vertical transport of water vapor and energy release. Due to the topographic uplift superimposed circulation system, Taibai County has the spatial distribution characteristics of heavy rain and local extreme precipitation.

Keywords

High-Altitude Trough, Heavy Precipitation, Baoji Taibai County, Diagnostic Analysis

Copyright © 2026 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

强对流天气作为一种突发性、高强度的灾害性天气系统，常伴随短时强降水、雷暴大风、冰雹等极端现象，其影响范围虽局地但破坏力极强，对区域工农业生产、交通运输、生态环境及人民生命财产安全构成严重威胁。陕西省地处中国西北地区东部，地形复杂多样，涵盖陕北黄土高原、关中平原及陕南秦巴山区，特殊的地貌格局与季风气候交汇特征，使得该区域成为强对流天气的高发区之一。宝鸡市作为关中西部重要节点城市，位于秦岭北麓与黄土高原过渡带，强对流天气呈现出“短时强度大、空间分布不均、触发机制复杂”的独特特征，其预报预警难度尤为突出。

近年来，随着气象观测技术的革新与数值模拟方法的发展，国内外学者针对陕西省及宝鸡市强对流天气开展了大量针对性研究，为揭示其形成机制、优化预报方法提供了重要支撑。乔丹杨等[1]利用多源数据资料分析了2022年关中东部中尺度对流复合体(MCC)引发的短时强降水过程，发现 $TBB \leq -72^\circ\text{C}$ 冷云区与16 km以上云顶高度对短时强降水强度具有显著指示意义，韩洁等[2]通过对比关中西部2023年3次不同类型强对流过程，明确了不稳定层结参数与垂直风切变的关键阈值，区分了短时强降水、冰雹与雷暴大风的动力热力差异，井宇等[3]基于2017~2022年观测数据，揭示了陕北和关中东部分别为雷暴大风高发区，暖型雷暴大风占比显著高于冷型，且不同区域环流型与环境参数存在明显分异。针对宝鸡地区的专项研究中，乔丹杨等[4]采用相似预报法对宝鸡市2020~2021年短时暴雨和雷暴大风进行预报检验，显著优于传统配料法，为区域强对流客观预报提供了新路径，孟妙志等[5]利用宝鸡多普勒雷达资料，分析了关中秋季两次飑线过程的中尺度特征，发现槽前型过程依赖低涡切变与雷暴高压切变线触发，槽后型过程则以地面干线为主要触发机制，王文波等[6]结合延安多普勒雷达、风廓线雷达等多源资料，指出 0°C 与 -20°C 层高度、强垂直风切变及三体散射回波可作为强冰雹预警的关键判据。此外，井宇等[7]分析了陕西夏季短时暴雨的时空特征，发现陕南中西部为短时暴雨高频区，陕北和关中峰值出现在午后至夜间，为区域降水日变化规律研究提供了基础数据。

上述研究虽在强对流天气的环流背景、触发机制、预报指标等方面取得了诸多进展，但受限于地形复杂性与天气系统的局地化特征，陕西省不同区域强对流的精细化成因、多尺度系统相互作用机制，以

及极端事件的概率预估等仍存在薄弱环节。尤其在全球气候变化背景下，强对流天气的频次与强度呈现出显著的异常特征，现有预报模型的适应性与预警时效仍需进一步提升。因此，基于多源观测数据与高分辨率数值模拟，深入开展陕西省及宝鸡市强对流天气的精细化特征与预报技术研究，对于完善区域防灾减灾体系、降低灾害风险具有重要的科学价值与实践意义。

2. 天气实况简介

受高空槽东移和低涡共同影响，2025年5月21日20:00~22日20:00，陕西省大部出现雷暴并伴有不同强度的降水天气，其中榆林东部、延安东部和西南部、渭南大部、宝鸡中北部、咸阳北部、商洛北部出现雷暴大风。榆林东部部分、延安东部局地、宝鸡北部局地、西安东部及南部山区、汉中南部、安康中南部、商洛南部、秦岭山区有短时强降水。宝鸡太白县此次降水过程呈现“强度整体偏高、分布差异显著”的特征，覆盖县域主要乡镇与关键地理区域降水量区间在3.8~47.6 mm，极值差达43.8 mm，反映区域内降水不均，全县平均降水量29.5 mm，整体偏向大雨量级，全县有83.3%的站点达到大雨量级，仅1个站点为小雨，说明此次强对流过程以强降水为主，覆盖范围广(表1)。

Table 1. Precipitation statistics from 20:00 on May 21, 2025 to 20:00 on May 22, 2025

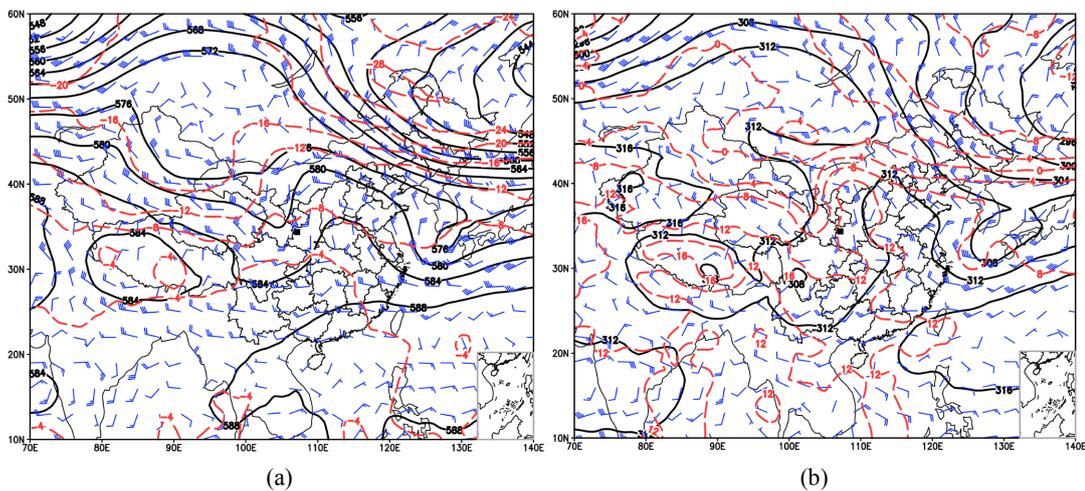
表 1. 2025年5月21日20:00~22日20:00 降水量统计

降水等级	站点数量(个)	占比(%)
大雨	15	83.3
中雨	2	11.1
小雨	1	5.6

3. 诊断分析

3.1. 环流背景

500 hPa 中高纬度为多波动西风气流，高原东部存在短波槽，等高线呈西南 - 东北向倾斜，对应宝鸡上空为槽前区域，温度场显示，宝鸡处于暖平流区，且 500 hPa 高度场为 580 位势什米，处于槽前正涡度区，利于上升运动发展(图 1(a))。700 hPa 宝鸡上空存在切变线，且有低涡环流，配合偏南风暖湿气流输送，形成中层暖湿气流通道(图 1(b))。850 hPa 宝鸡上空为强盛的偏南风急流，对应 28℃ 暖中心，风场呈明显的辐合区，与 700 hPa 切变线配合，形成低层辐合系统(图 1(c))。海平面气压场显示宝鸡处于地面低压倒槽顶部，且有冷锋前部的弱辐合区，与低空暖湿气流叠加，形成上冷下暖的不稳定层结(图 1(d))。



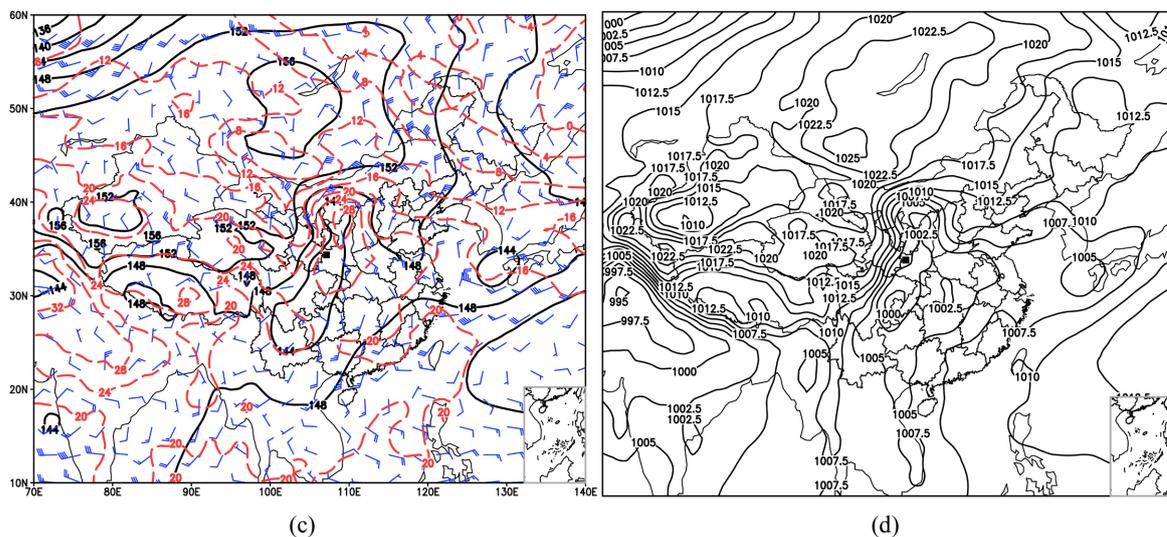


Figure 1. Circulation situation at 20:00 on May 21, 2025. (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa, (d) Sea level pressure field
图 1. 2025 年 5 月 21 日 20:00 环流形势。(a) 500 hPa、(b) 700 hPa、(c) 850 hPa、(d) 海平面气压场

综上所述，此次宝鸡降水过程是高空槽 - 中层切变 - 低空急流 - 地面低压多尺度系统协同作用的结果，500 hPa 槽提供大尺度背景，700 hPa 切变线触发扰动，850 hPa 急流输送水汽与能量，地面低压倒槽增强辐合，最终导致宝鸡出现中到大雨、局地暴雨的对流性降水。

3.2. 相关诊断量

3.2.1. 水汽条件

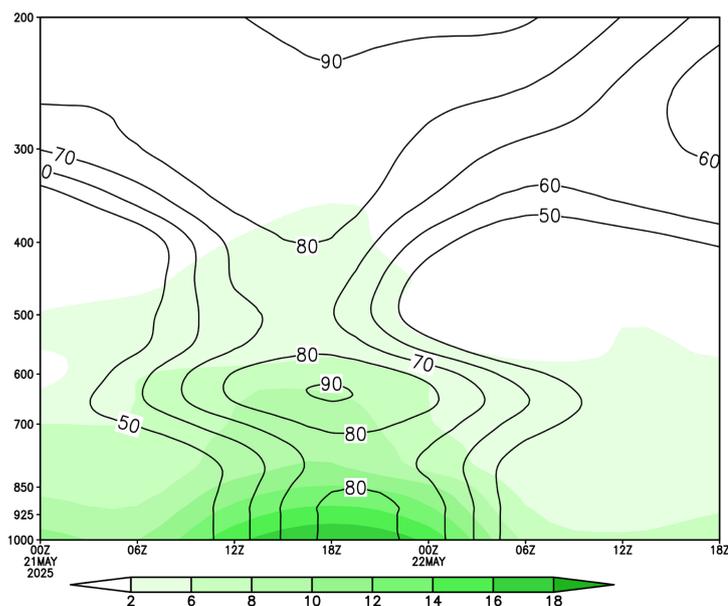


Figure 2. Time-height profile of specific humidity and relative humidity in Baoji from 08:00 on May 21 to 02:00 on May 23
图 2. 5 月 21 日 08:00~23 日 02:00 宝鸡比湿与相对湿度时间高度剖面

从比湿垂直分布情况分析(图 2) 5 月 21 日 08:00 近地面(1000 hPa)比湿 $< 5 \text{ g/kg}$ ，中层(700 hPa 以上)比湿 $< 2 \text{ g/kg}$ ，整层水汽匮乏；仅近地面相对湿度 $\approx 50\%$ ，中层 $< 30\%$ ，处于“干层”状态。21 日 20:00

后水汽爆发阶段，近地面(1000 hPa)比湿升至 10 g/kg 以上，700 hPa 以下比湿 ≥ 8 g/kg，整层水汽显著增加，700 hPa 以下相对湿度 $\geq 80\%$ (等值线闭合高值区)，形成“整层高湿区”；22 日 02:00)中层(600 hPa)出现相对湿度 90%的高值中心，水汽垂直分布均匀。22 日 08:00~14:00)近地面比湿维持在 8~10 g/kg，中层比湿 ≥ 6 g/kg；700 hPa 以下仍维持 $\geq 80\%$ 的高湿区，但高值中心强度略有减弱，降水持续，但强度较峰值时段略有降低，20:00 后水汽消退阶段，近地面比湿降至 5 g/kg 以下，中层比湿 < 4 g/kg，整层相对湿度 $< 70\%$ ，高湿区消失。

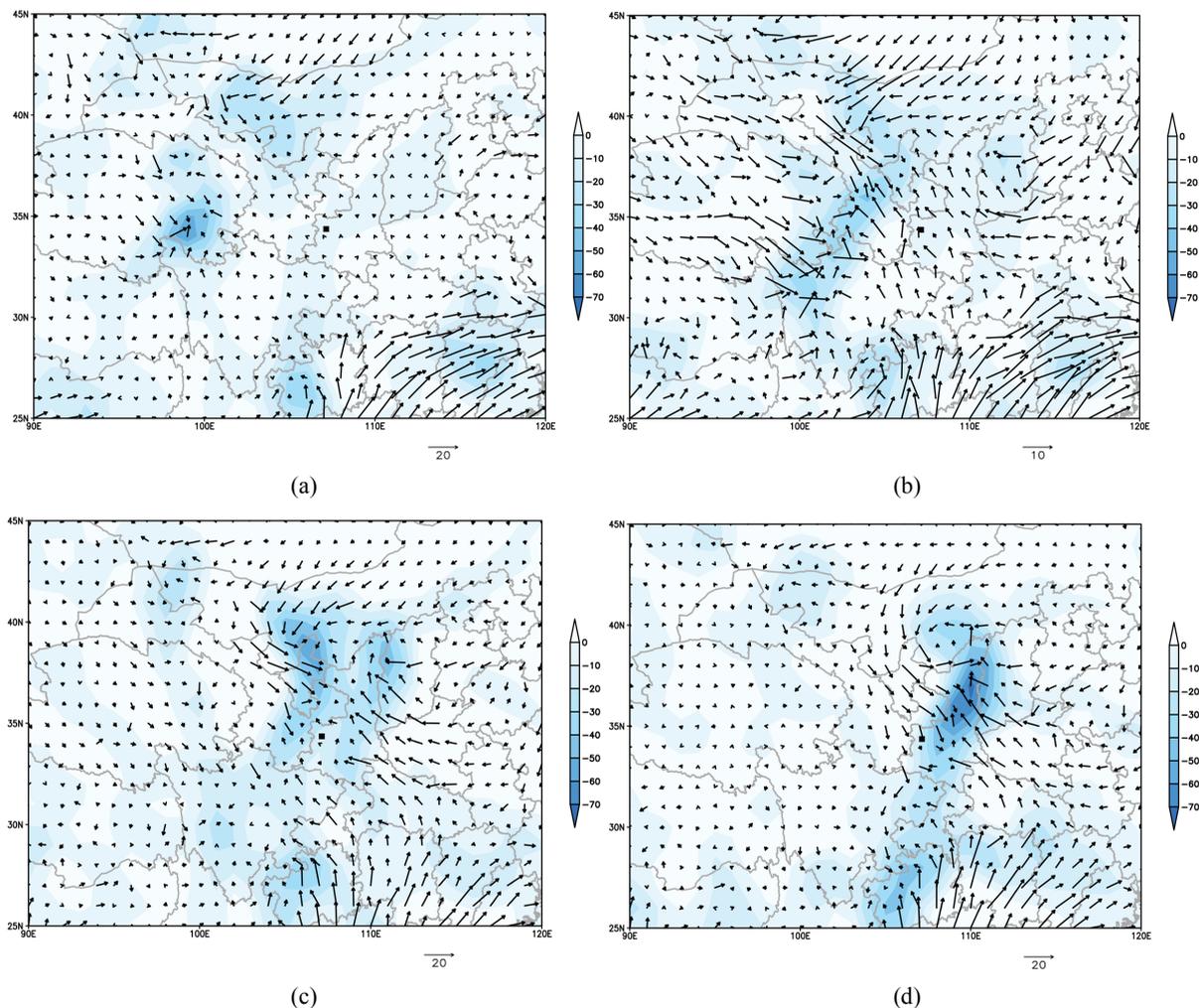


Figure 3. Water vapor flux divergence and water vapor flux vector distribution. (a) 08:00, 21 May; (b) 14:00, 21 May; (c) 20:00, 21 May; (d) 02:00, 22 May

图 3. 水汽通量散度与水汽通量矢量分布。(a) 5 月 21 日 08:00、(b) 5 月 21 日 14:00、(c) 5 月 21 日 20:00、(d) 5 月 22 日 02:00

结合 5 月 21 日 08:00~22 日 02:00 宝鸡(图中黑色方块)的水汽通量散度与水汽通量分布及天气实况分析可知，21 日 08:00，宝鸡处于弱水汽通量区(气流分散)，水汽通量散度为弱正值(水汽辐散)，整层水汽供应不足(图 3(a))，14:00 南风水汽通量开始向宝鸡输送，水汽通量散度转为弱负值(水汽弱辐合)，但辐合范围较小，对应宝鸡出现分散性雷阵雨(图 3(b))，20:00，南风水汽通量显著增强并向宝鸡汇聚，水汽通量散度呈现明显负值区(强水汽辐合)，充足的水汽在此处集中，配合前期热力不稳定条件，触发了宝鸡的中到大雨、局地暴雨，强对流降水达到峰值(图 3(c))，22 日 02:00，水汽通量虽仍向宝鸡输送，但水汽通量

散度的负值辐合强度有所减弱, 对应降水强度逐步降低但仍维持(图 3(d))。整体来看, 水汽通量的“输送-汇聚”与水汽通量散度的辐散-弱辐合-强辐合-弱辐合演变, 是宝鸡此次降水酝酿-触发-爆发-减弱过程的核心水汽驱动机制。

3.2.2. 热力条件

5月21日08:00宝鸡区域K指数 ≈ 35 , 处于中等不稳定区, 强不稳定中心($K \geq 40$)位于四川盆地(图 4(a)), 21日14:00(图 4(b))宝鸡区域K指数升至37~39, 进入强不稳定前期, 强不稳定区($K \geq 40$)向东北扩展, 逼近宝鸡西侧, 宝鸡周边开始出现分散性雷阵雨, 热力不稳定逐步增强。21日20:00(图 4(c))宝鸡区域K指数达40, 处于强不稳定核心区, 强不稳定区完全覆盖宝鸡, 且与水汽输送区叠加, 宝鸡出现中到大雨、局地暴雨, 强对流降水达到峰值。从08:00~20:00, 宝鸡K指数呈现中等不稳定-强不稳定的持续增强, 与天气实况高度对应: 08:00 K指数不足, 仅积累不稳定能量, 无降水, 14:00 K指数逼近强不稳定阈值, 触发分散雷阵雨, 20:00 K指数达强不稳定标准, 叠加充足水汽与动力抬升, 形成强对流降水。

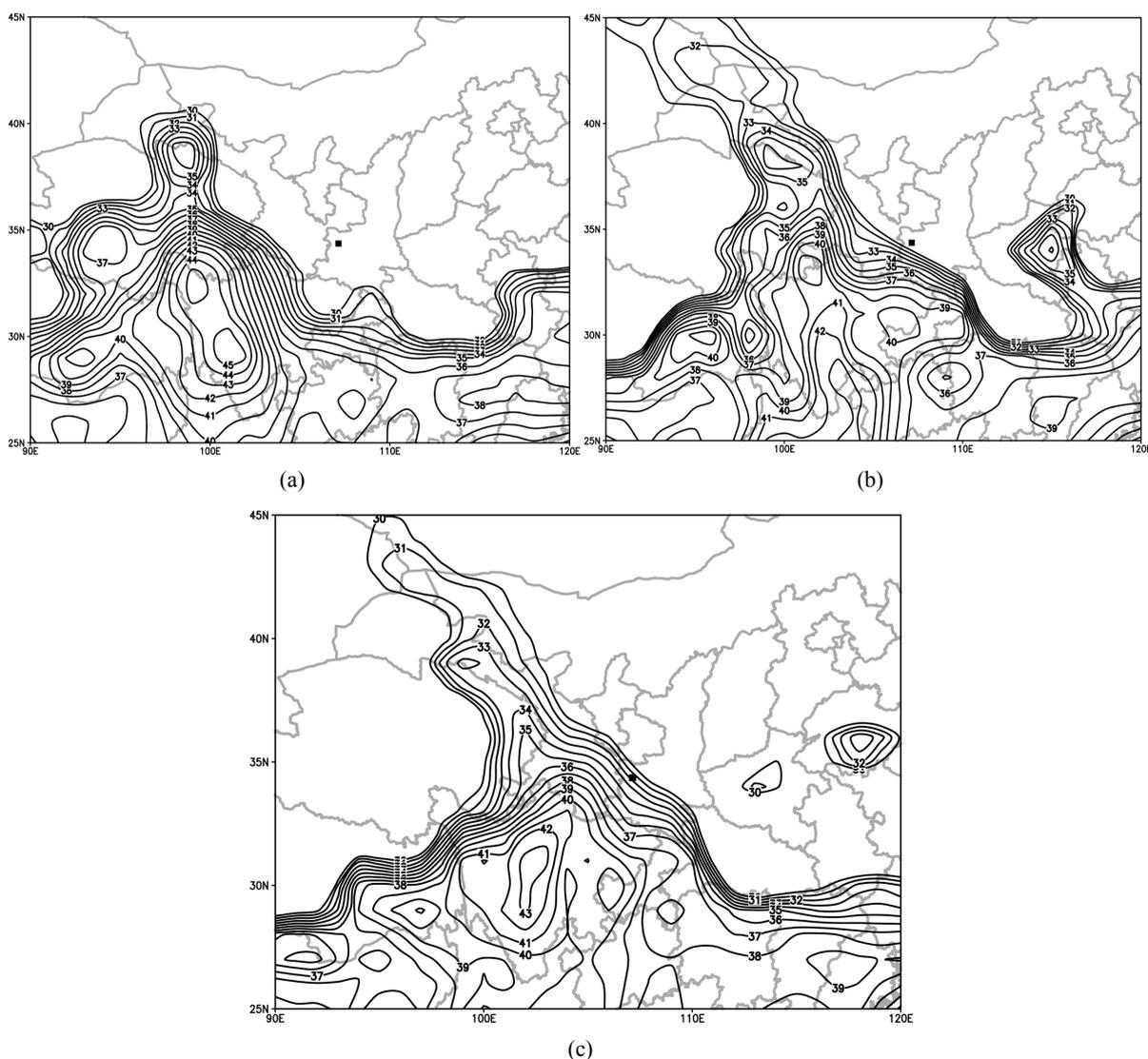


Figure 4. K exponential distribution. (a) 08:00, 21 May; (b) 14:00, 21 May; (c) 20:00, 21 May

图 4. K 指数分布。(a) 5月21日08:00、(b) 5月21日14:00、(c) 5月21日20:00

3.2.3. 垂直运动

5月21日08:00~22日02:00宝鸡区域的垂直速度时间-高度剖面图分析显示(图5), 21日08:00, 宝鸡整层垂直速度以弱正值(下沉运动)为主, 仅近地面有微弱上升, 20:00后700 hPa以下出现弱负值区(弱上升运动), 且随时间向高空扩展; 22日02:00前后, 500~700 hPa出现-1.8 Pa/s的强上升运动中心, 且上升运动覆盖近地面至500 hPa的整层, 强上升阶段与宝鸡强对流降水的峰值时段完全对应, 22日08:00后上升运动中心强度减弱至-1.2 Pa/s左右, 且高空逐渐转为下沉运动, 对应降水强度逐步降低。垂直速度的下沉→弱上升→强整层上升→上升减弱, 是宝鸡此次大范围降水从酝酿到爆发再到减弱的核心动力标志, 强上升运动的出现与维持直接驱动了水汽的垂直输送和不稳定能量的释放, 是强对流降水形成的关键动力条件。

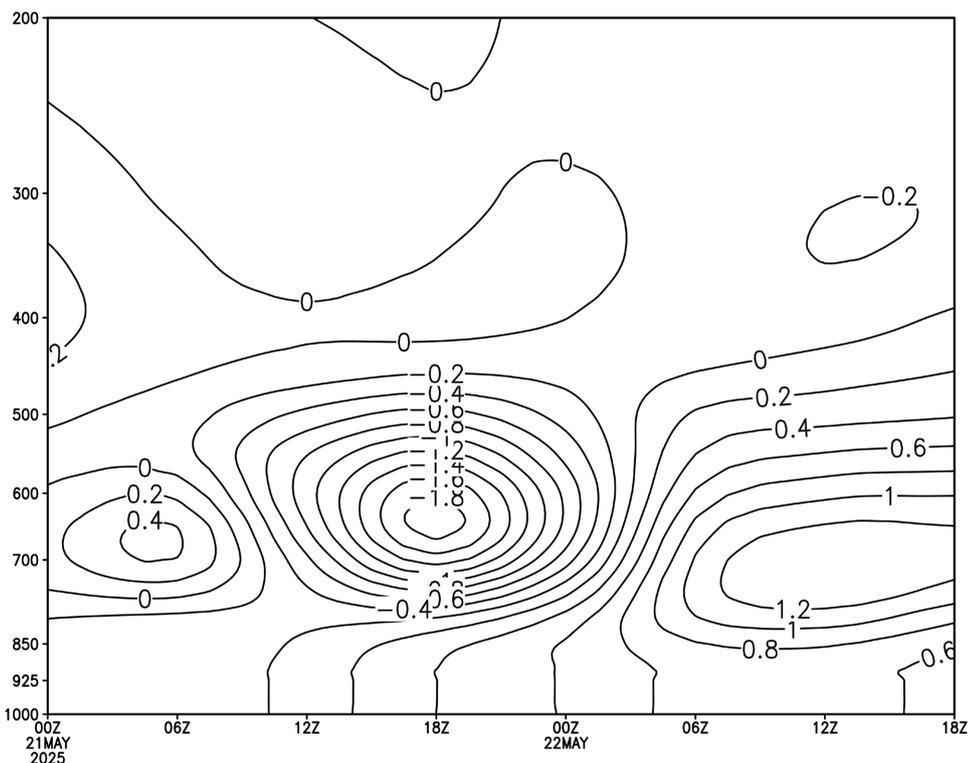
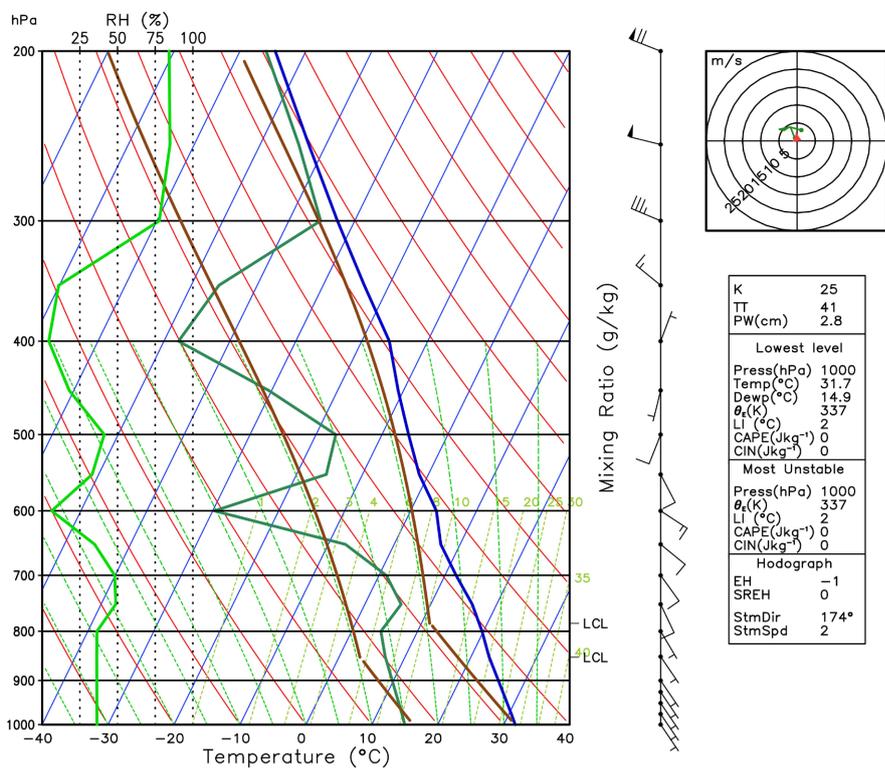


Figure 5. Vertical velocity time-height profile of Baoji from 08:00 on May 21 to 02:00 on May 23

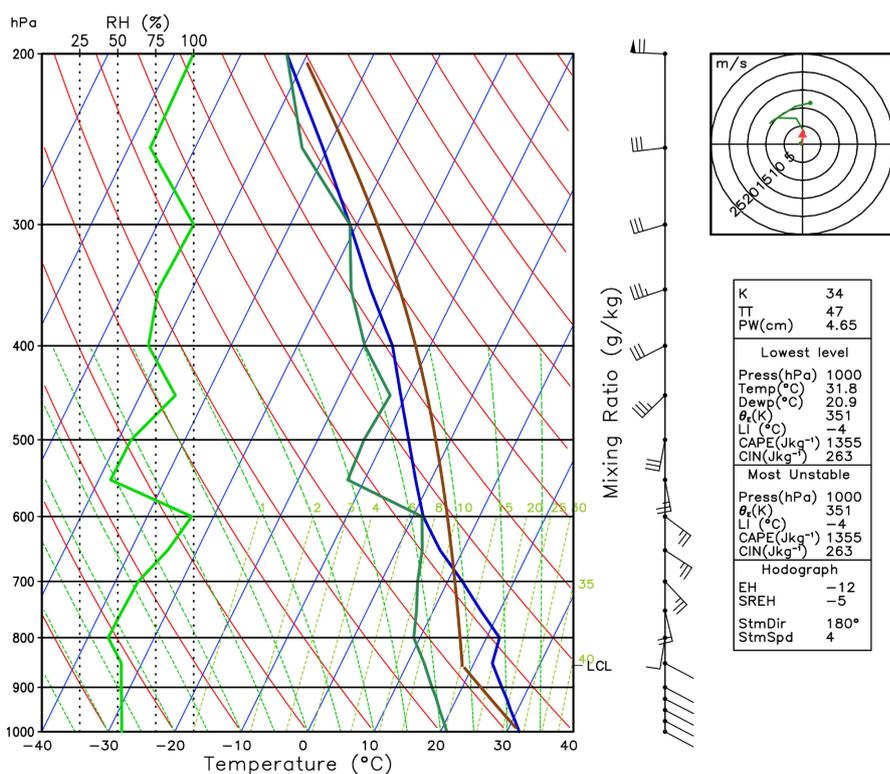
图 5. 5月21日08:00~23日02:00宝鸡垂直速度时间高度剖面

3.3. 探空分析

5月21日08:00(图6(a)), K指数为 25°C , CAPE为0: 无不稳定能量, 层结呈中性, 可降水量2.8 cm, 可降水量低, 整层水汽不足; 近地面温度露点差 $>10^{\circ}\text{C}$ (湿度低), 中层(700 hPa以上)差 $>15^{\circ}\text{C}$ (干燥), 此时热力不稳定弱、水汽不足, 不具备引起强对流的条件。20:00 K指数逐渐上升至 34°C , LI减小至 -4°C 、CAPE = 1355 J/kg, 宝鸡出现高不稳定能量, 层结转为强对流不稳定。20:00强对流条件完全具备(图6(b)), 结合前期环流(低空急流 + 中层切变), 宝鸡此时出现强对流降水, 表现为短时强降水、雷暴。综上所述, 从08:00~20:00, 斜温图呈现弱能量-低水汽-强能量-高水汽的突变, 核心驱动是: 低空急流将南海水汽持续输送至宝鸡, 地面增温 + 中层冷空气渗透, 形成上冷下暖的强不稳定层结, 中层切变与地面低压倒槽的辐合抬升, 导致强对流天气的出现。



(a)



(b)

Figure 6. Skew T diagram. (a) At 08:00 on 21 May, (b) At 20:00 on 21 May

图 6. 宝鸡斜温对数压力图。(a) 5月21日 08:00、(b) 5月21日 20:00

4. 结论

1) 此次宝鸡太白强对流天气是多尺度环流系统协同作用的典型案例：500 hPa 高空槽提供大尺度动力背景，700 hPa 切变线与 850 hPa 偏南风急流构成中低层“切变-急流”配置，地面低压倒槽增强辐合，多系统叠加形成了“高层辐散-低层辐合”的垂直动力结构，为强对流的触发与维持提供了关键条件，而太白县的地形抬升进一步放大了降水强度，导致区域内降水分布差异显著。

2) 水汽与热力条件的阶段性演变是强对流爆发的核心支撑：水汽方面，低空急流的持续输送使整层比湿从不足 5 g/kg 升至 10 g/kg 以上，水汽通量散度由辐散转为强辐合，形成整层高湿区；热力方面，K 指数从中等不稳定升至强不稳定($\geq 40^{\circ}\text{C}$)，CAPE 从 0 J/kg 增至 1355 J/kg，配合“上冷下暖”的层结特征，为强对流积累了充足的不稳定能量，二者的同步增强是降水从“酝酿”到“爆发”的关键转折。

3) 垂直运动的时空演变直接调控降水强度变化：21 日 20:00 前后中层出现 -1.8 Pa/s 的强上升运动中心，且覆盖近地面至 500 hPa 整层，对应降水峰值；22 日 02:00 后上升运动强度减弱，降水逐步降低，表明垂直上升运动的强度与范围是此次强对流降水强度与持续时间的直接动力标志，这一特征可为类似过程的短时临近预警提供参考依据。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 韩洁, 任欢, 王小龙, 等. 关中西部三次不同类型强对流天气对比分析[J]. 陕西气象, 2025(3): 1-9.
- [3] 井宇, 陈闯, 赵强, 等. 陕西雷暴大风时空分布和气象条件分析[J]. 干旱气象, 2024, 42(4): 576-587.
- [4] 乔丹杨, 卢晔, 贺瑶. 相似预报法在关中西部强对流预报中的应用和检验[J]. 陕西气象, 2023(2): 8-13.
- [5] 孟妙志, 卢晔, 王仲文, 等. 关中秋季飚线天气成因和中尺度特征分析[J]. 陕西气象, 2017(2): 1-6.
- [6] 王文波, 宁欣婷, 杨丽, 等. 延安一次强冰雹天气多源观测资料分析[J]. 陕西气象, 2025(3): 10-17.
- [7] 井宇, 陈闯, 姚静, 等. 陕西夏季短时暴雨时空特征分析[J]. 陕西气象, 2025(2): 19-25.