

李悦绮,倪洪波,倪萍,等. 西安地区一次罕见“雷打雪”天气成因分析[J]. 陕西气象, 2025(4):1-8.

文章编号:1006-4354(2025)04-0001-08

西安地区一次罕见“雷打雪”天气成因分析

李悦绮,倪洪波,倪萍,郝辛凯,丑岩

(中国飞行试验研究院,西安 710089)

摘要:“雷打雪”不仅会造成飞行视程障碍,雷暴闪电还会对飞机无线电罗盘及通讯设备造成干扰和破坏。利用 MICAPS 常规观测资料、阎良机场逐小时能见度、云状云高、风向风速、降水量等观测资料、FY-4 卫星云图、ERA5 再分析资料等,分析了 2023 年 11 月 11 日一次发生在西安地区的罕见雷暴伴随降雪天气过程成因及机制。结果表明:本次过程中高纬环流背景为“两槽一脊”,陕西受高压影响,具有较强的气压梯度,在地面形成冷垫,厚度为 2 km,逆温层厚度为 45 hPa,为高架雷暴的生成提供基础条件。本次过程水汽主要来源于孟加拉湾,主通道在 700 hPa 高度层;11 日凌晨及上午的 700 hPa 切变线,对流层中低层的水汽弱辐合和西北强冷空气是此次“雷打雪”现象降雪的主要诱因。

关键词:高架雷暴;雷打雪;逆温层;条件性对称不稳定

中图分类号:P458.1

文献标识码:A

雷暴是指在对流旺盛的积雨云中发展形成的中小尺度对流天气,常伴有闪电、雷鸣、阵雨、大风,有时还会出现冰雹、龙卷等天气现象^[1]。狭义上指伴有雷电现象的深厚对流^[2],具有突发性强、生命史短、局地性显著等特征,常伴有冰雹、大风、短时强降水等强对流性天气^[3-4],往往造成重大人员伤亡、财产损失,对国民经济造成巨大危害^[5-10]。

大量观测资料表明,年平均雷暴日数分布表现为夏季多、冬季少^[11-12]。西北地区气象站雷暴历史资料表明,夏季雷暴最强,春秋次之,冬季几乎无雷暴发生^[13-14]。目前,关于夏秋季节雷暴成因、特征、预报、监测预警的研究较多^[15-24],但在不同地区、不同季节,雷暴发生的各种条件阈值不尽相同^[25-26]。

秋冬季节中高纬地区大气中水汽含量偏少,不利于发生对流性天气,降水多以稳定性降水为主。雷暴在具备充足水汽的海岸附近或者大湖周围发生的概率较大^[27]。冬季雷暴天气非常少见,

而大范围的暴雪与雷暴、冰雹共存的天气过程更是罕见^[28]。1990 年,王仁侨等^[29]研究“雷打雪”天气,认为 700 hPa 低涡前部西南气流爆发性增暖增湿,覆盖在 850 hPa 冷空气之上,形成了潜在不稳定,是“雷打雪”的成因。后续研究进一步表明,“雷打雪”与高架对流关系密切^[30-31]。

虽然“雷打雪”的高架对流特征发现较早^[32],但直到 20 世纪 90 年代,美国学者^[33-34]从一些个例统计中提出高架雷暴概念,并指出高架雷暴一般发生于锋面冷空气一侧,雷暴云底在边界层以上。Wilson 等^[35]研究指出,高架雷暴发生时近地面层几乎维持冷空气团,垂直风向存在显著逆温,地面冷空气团难以穿过逆温层进而获取能量,雷暴是由逆温层之上的气块绝热上升获得能量的。

近年来,我国学者对高架对流的研究不断深入,在统计特征^[36]、判别标准及环流背景、雷达特征、天气类型、形成机制^[37]、区域高架雷暴时空分布特征和锋面环境特征以及不稳定机制^[38]、“雷打雪”事件天气分型^[39]等方面取得了一定的成果。

收稿日期:2024-08-12

作者简介:李悦绮(1998—),女,汉族,陕西三原人,硕士,助工,主要从事航空气象技术研究及试飞气象保障。

基金项目:工业和信息化部民用飞机专项科研项目(MJZ5-XXXX)

刘洲洋等^[38]通过分析 2000—2015 年中国泛华北地区冷季的高架雷暴时间,指出条件性对称不稳定和弱条件稳定或近湿中性大气层结下的锋生强迫引发的较强上升运动是华北冷季高架对流的主要不稳定机制。郑丽娜等^[39]将山东省的“雷打雪”事件分为暖平流型和海效应型,并细致归纳了两类事件发生时有关要素场和物理量场特征。郭大梅等^[40]分析了 2016 年初冬陕西一次高架雷暴天气过程,指出西安地区不稳定机制为条件性对称不稳定,强垂直风切变和中高层暖湿气流增强了大气的斜压性,产生倾斜对流。曹舒娅等^[41]对 2007—2016 年冷季发生在江苏地区的 12 次典型的高架雷暴进行特征分析表明,逆温层顶之上的不稳定浅层和上下层强垂直风切变分别为高架雷暴的发生提供弱热力不稳定和强动力不稳定条件,强垂直风切变、850 hPa 附近强烈的锋生次级环流,高空槽前正涡度平流随高度增加以及高层辐散、低层辐合造成的抽吸作用,为高架雷暴的发生和维持提供逆温层之上的动力抬升条件。

地形对高架雷暴的形成或有重要的影响。美国学者^[32-35]研究表明,高架对流主要发生在落基山脉以东的大平原地区,北部的内陆以及山地区域则几乎没有。我国已有研究^[25,42-43]显示,华北平原、东北平原、长江中下游平原由于地势平坦,近地层有利于形成冷垫;同时,低空急流也更易将较多的水汽输送到这些地区,并在冷垫之上爬升形成高架雷暴。上述研究对于国内低海拔湿润区域高架雷暴的诊断、预报、预警具有一定的参考意义。但在我国西北干旱、半干旱地区,冷季大气水汽含量较少,降水云系通常为不带电的层云,不易产生对流性天气。同时,半干旱区下垫面复杂多变^[44],也不利于冷垫的形成和维持,冷季雷暴发生较少。阎良机场地处关中平原,南部受秦岭山脉阻挡,不稳定天气较少,冬季试飞保障侧重点为能见度、低云、飞机结冰等,对于强对流天气这类夏季频发、冬季罕见的试飞高影响天气缺乏研究。本次过程中,数值模式对于 24 h 降雪量预报较为准确,但未能准确预报雷电,这是由于业务数值模式的对流参数化方案中,通常假定深厚湿对流都

是基于地面的,并不能预报出高架对流的形成和发展,很容易造成高架对流漏报^[45]。因此本文分析了 2023 年 11 月 11 日阎良机场一次罕见的“雷打雪”过程及其成因和机制,为今后西安地区初雪、冬雷天气预报和“雷打雪”天气背景的试飞气象保障提供技术参考。

1 资料及方法

所用资料包括:(1)阎良机场整点地面气象观测资料;(2)中国气象局 MICAPS 系统下发的 2023 年 11 月 10—11 日地面观测资料、探空资料;(3)ERA5 大气再分析资料(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$);(4)FY-4 卫星 $10.8 \mu\text{m}$ 红外通道云图(时间分辨率为 15 min);(5)全国闪电定位资料。基于多源资料,运用天气学原理和诊断分析方法,分析 2023 年 11 月 11 日西安市发生的“雷打雪”天气过程的特点、成因和机制。

2 天气过程

2.1 降水概况

2023 年 11 月 11 日西安地区出现了一次罕见的“雷打雪”天气过程,导致西安市碑林区、西咸新区和临潼区出现暴雪现象,陕西省人大机关大院站 06—07 时最大降水量达到 13.3 mm,07—08 时最大降水量为 4.5 mm,24 h 累计降水量自西向东、由南至北增加(图 1)(文中涉及的所有地图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为[GS(2019)1822 号]的标准地图制作)。雷暴现象出现在 07 时至 08 时 30 分,间断维持 1 h 30 min,全市一共发生闪电 6 次,且出现 3 次强度大、危害

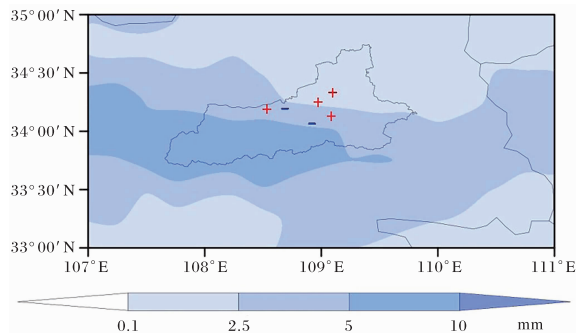


图 1 2023-11-10T20—11T20 陕西省降水分布及闪电定位(红色“+”号和蓝色“-”号分别表示正闪和负闪)

性强的正地闪,本次强对流天气过程由西向东发展。“雷打雪”天气发生时,雷暴闪电会造成飞机无线电罗盘及通讯设备的干扰和破坏。在雷雨云中或其附近飞行,会引起飞机强烈颠簸、积冰,甚至引起飞机失火引发空难等,对于试飞气象安全保障极具挑战性。

2.2 阎良机场气象要素变化

11月11日,阎良机场16时前为阴天,16时后为多云。05:30—09:20先后出现小雨、雨夹雪和小雪现象,降水时间持续了3 h 50 min,累计降水量0.2 mm。在阴天时段,云底高维持在1 200~1 500 m。机场风速较小,06—20时,平均风速仅为1.2 m/s,除15时外,其他正点观测时次风速均 ≤ 2.0 m/s。机场风向变化较大,上午以东南风为主,下午以西南风为主,风向在 $129^{\circ}\sim 255^{\circ}$ 之间。机场能见度出现了较大幅度的波动,由降水前的10 km最低降低到3 km,午后再次好转至10 km,傍晚前后又降低至4 km,空军气象标准(GJB6702-2009)^[46]认为能见度低于4 km即为复杂天气,而这次“雷打雪”天气不仅使得能见度低于复杂天气标准,其引发的能见度反复变化使得试飞气象保障极具难度。

3 天气形势分析

3.1 高空形势

11月10日20时500 hPa(图2a),中高纬度呈两槽一脊形势,贝加尔湖西部地区有一反气旋活动,脊线向东北方向延伸,日本海上空有气旋活动,自其中心向西伸出一东西走向的低压槽,影响至内蒙古北部地区,环流经向度较大,预示着有强冷空气活动。中低纬度地区副热带高压呈东西带状分布,位于华南沿海。青藏高原东部至新疆东部地区有弱脊。华北南部至长江中下游为偏西气流,急流位于华北至日本海一带,西安位于500 hPa急流南侧。200 hPa高度上,在日本海至我国华北地区有显著的高空急流活动,高空急流中心风速超过60 m/s,陕西处于低压槽前,上空有偏西急流,西安处于高空急流的后部,存在风速的辐散。同时次700 hPa环流场上(图2b),贝加尔湖高脊的前部为东北风,最大风速超过20 m/s,风向在内蒙古一带转变成西北风。中国黄海地区为偏西风,风速超过20 m/s。华南地区处于副热带高压的北部,为西南风,西南风和西北风在甘肃形成一明显的切变,陕西南部的西南风达到6 m/s,西安处于切变线南侧。

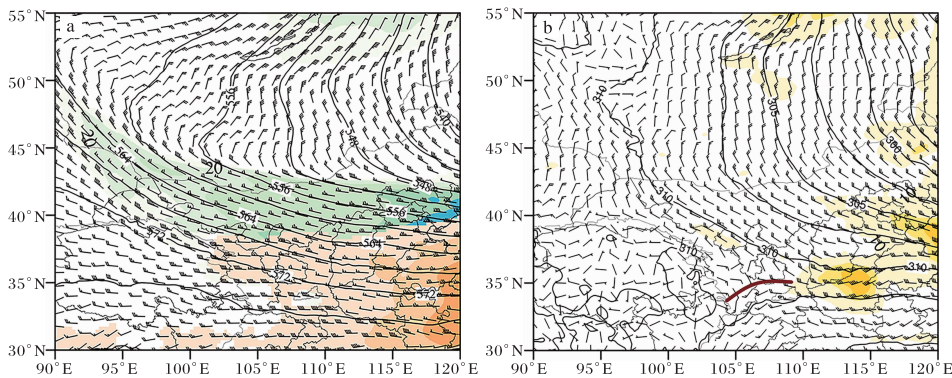


图2 2023-11-10T20 500 hPa高度场(黑色等值线;单位为dagpm)、风速 >16 m/s(冷色填色)及200 hPa风速 >40 m/s(暖色填色)叠加图(a),700 hPa高度场(黑色等值线;单位为dagpm)、切变线(棕色曲线)及风速 >10 m/s(暖色填色)叠加图(b)

3.2 地面形势

2023年11月10日20时地面等压线图如图3所示。分析图3可知,在蒙古国至我国北部地区有强大的高压活动,且高压中心位于蒙古国西部,中心气压达到1 048 hPa,高压向东伸出的脊

区位于辽宁一带。我国东部地区在高压环流的影响下,为偏北风控制,陕西受高压影响,具有较强的气压梯度。强大的大陆高压呈现南压状态,其形成的北风能够将北方冷空气向南输送,在近地面形成冷垫。

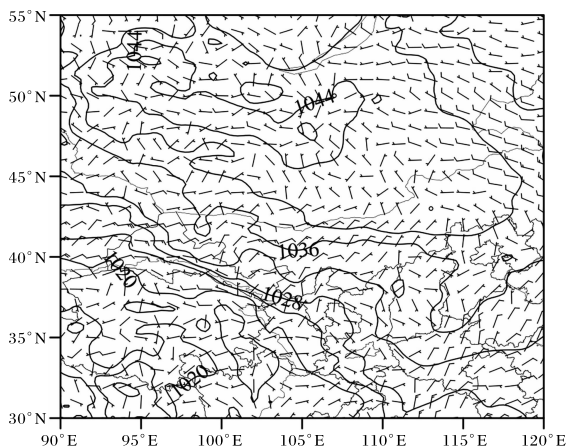


图3 2023-11-10T20 地面等压线(黑色等值线; 单位为 hPa)和 10 m 风场(风羽)

3.3 卫星监测

静止气象卫星可以提供大范围、全天候的云图信息,是中小尺度对流天气监测的重要工具。通过卫星资料来监测和预测对流云团的活动,有助于对暴雨、强对流等灾害性天气进行客观且实时的追踪和预警。对流初生监测对于提前预警这类灾害性天气有着尤为关键的作用^[46]。通过 10 日 20:00—11 日 08:00 FY-4B 红外卫星云图分析对流云发展演变过程可知,10 日 20 时对流云系自高原东侧生成,由偏西气流引导发展东移,23 时经甘肃东南部,对流云系主体于 11 日 02 时移至关中地区,08 时对流云系云顶黑体温度高值区出现在西安地区,最低值达到 -42°C ,对流云顶最高达 9 km(图略),之后随时间减弱东移。

4 “雷打雪”天气形成机制分析

4.1 水汽条件

水汽条件是西安冬季降雪和对流天气发生不可或缺的条件^[47-48]。分析 500、600 hPa(图略)和 700、850、925 hPa 高度层上的水汽通量及风场分布(图 4),可以看出低层(700~925 hPa)水汽通量在中低层较为显著,700 hPa 上水汽通量值存在高值区(图 4a)。通过流场分布也可以看到,本次“雷打雪”过程的水汽输送主通道处在 700 hPa 高度层,由西南气流将来源于孟加拉湾及南海的水汽引导输送至陕西,陕西北部强盛的西北冷空气阻碍了西南气流向北的水汽输送,致使水汽最

远仅到达陕北南部,并在关中地区产生较强辐合(图 4a)。850 hPa(图 4b)与 925 hPa(图 4c)高度层,从西伯利亚南下的强冷空气经渤海、黄海及东海由回流偏东风将暖湿气流输送至陕西地区,与 850 hPa 高度层相比,925 hPa 上水汽输送更强,这表明水汽输送在垂直场上并不连续。

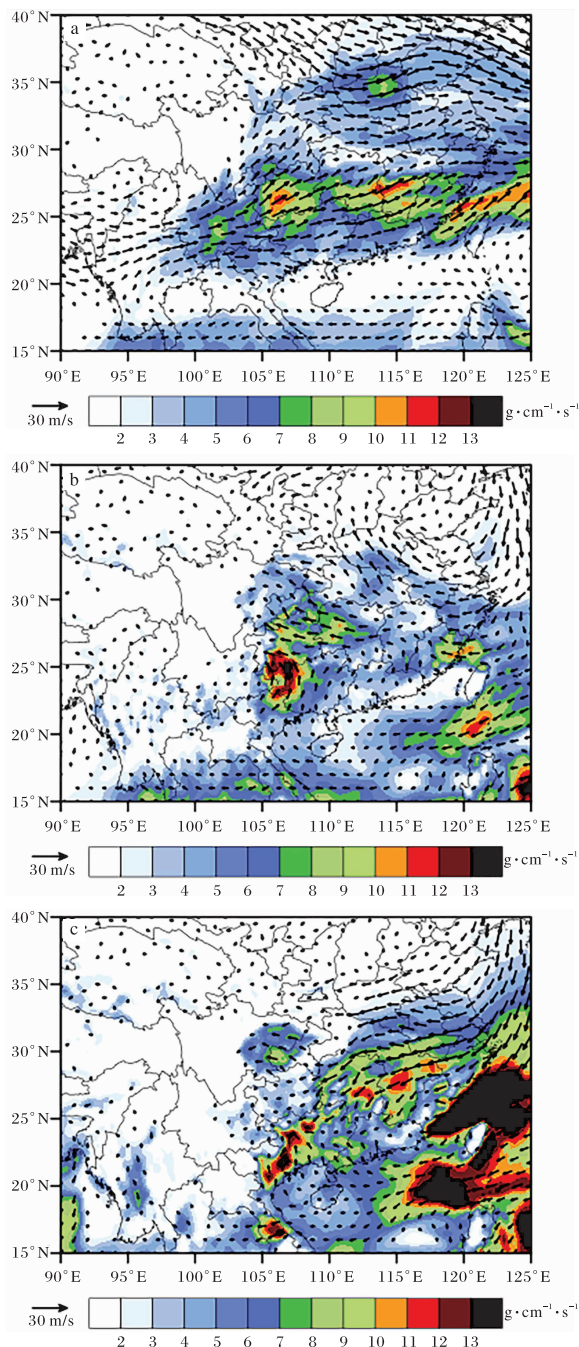


图4 2023-11-10T20 水汽通量(填色;单位为 $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$ 和水平风场(箭头)(a 700hPa;b 850 hPa;c 925 hPa)

为了进一步分析此次“雷打雪”天气过程的水汽条件,利用 ERA5 再分析资料,给出了 10 日 08 时至 11 日 23 时西安地区平均比湿和水汽通量散度高度-时间剖面图(图 5)。分析可知,本次过程中对流层中低层(700~900 hPa)水汽条件较好,水汽通量辐合主要发生于 10 日午后和 11 日凌晨及上午,水汽通量辐合并非起始于地面,而是在 850~700 hPa 高度层存在弱辐合,符合高架雷暴的特点,这也是此次“雷打雪”现象降雪的主要原因。

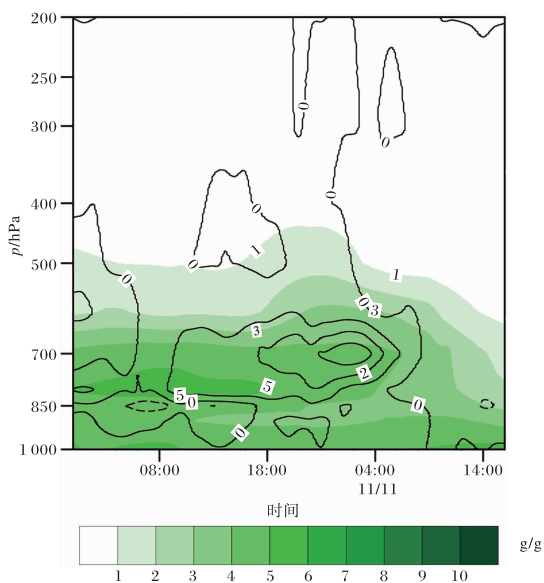


图 5 2023-11-10—11 日西安区域(33°N~35°N、107°E~112°E)平均水汽通量散度(等值线;单位为 $10^{-8} \text{ g}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa})$)和比湿(填色)时空演变

4.2 不稳定条件

4.2.1 对流有效位能 利用 ERA5 再分析资料给出 10 日 08、14、20 时及 11 日 08 时陕西地区对

流有效位能(CAPE)空间分布(图 6)。分析得出,本次过程 CAPE 高值出现在午后至夜间,高值区位于陕甘宁交界处(图 6a),CAPE 中心值强度随时间呈先增加后减弱的趋势,而其空间分布呈西南向东北带状分布,高值中心由 10 日 08:00(图 6a)的陕甘宁交界处南压至 11 日 08:00(图 6b)青藏高原与甘肃川北交汇处,中心值变化较小,西安市区 CAPE 值很小,呈东西带状分布,位置偏南。

4.2.2 大气层结特征 西安泾河站 10 日 20 时(图 7a)和 11 日 08 时(图 7b)探空显示,在此次“雷打雪”天气发生前和发生时,CAPE 均为 0 J/kg 。本次过程假相当位温最大值为 44.09 K ,位于 721.5 hPa 高度层上,订正后最优 CAPE 为 19.4 J/kg ,对流抑制指数(CIN)仅为 1.3 J/kg ,虽然 CAPE 值较小,但在 CIN 值趋近于零的情况下,只需要很弱的抬升强迫就能够产生对流天气^[47]。此次高架雷暴产生的必要条件是冷垫和逆温层的存在^[25]。由探空曲线可知,11 日对流过程发生前,泾河站存在显著冷垫和逆温层,冷垫厚度为 2 km,冷垫底部和顶部的温差为 $7 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。泾河站逆温层在 770~815 hPa 附近,逆温层厚度为 45 hPa,温差达 $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不稳定层结处于对流层中层 700~500 hPa 之间,厚度为 200 hPa,湿层处于对流层中低层,整层为“上干下湿”的不稳定层结。雷暴过程发生后(11 日 08 时),泾河站逆温层消失,湿层显著增加。

深入探讨本次过程中深厚冷垫的形成原因,一方面,西安位于陕西省关中平原,秦岭山脉横亘

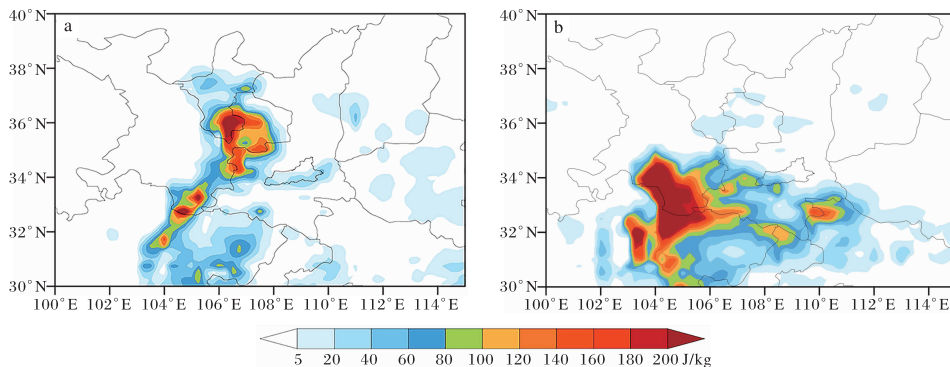


图 6 2023-11-10—11 对流有效位能(CAPE)(a 10 日 08 时; b 11 日 08 时)

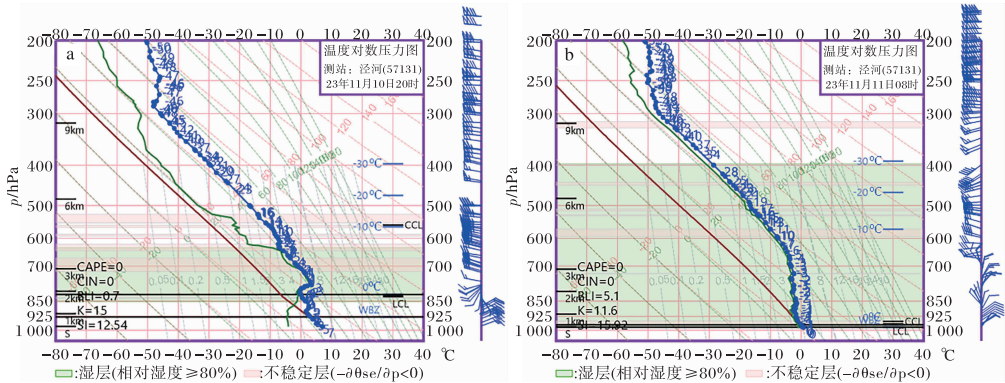


图 7 2023-11-10—11 西安泾河站探空(a 10 日 20 时;b 11 日 08 时)

于其南部。源于西北地区向南移动的冷空气在平原地区聚集,并且受到秦岭山脉的阻挡,进而形成了较为稳定的冷垫,这为强对流天气的出现筑牢了根基。与此同时,本次过程处于强西北冷空气沿河西走廊持续补充南下的天气背景之中,存在着陆气相互作用的情况。在夜间,冷垫因地面冷却辐射速度较快,致使其上部的空气随之冷却,这种相互作用保障了深厚的冷垫在夜间得以维持。

4.2.3 假相当位温 为了进一步分析此次“雷打

雪”天气过程大气层结的演变特征,绘制了沿 109°E 的假相当位温、垂直速度及风向的纬向垂直剖面图(图 8)。分析表明,11 月 10 日 20 时(图 8a),西安地区 850 hPa 以下为假相当位温低值区,受冷空气影响,850~700 hPa 高度层假相当位温随高度减小,大气不稳定,有利于对流发生,对应的垂直速度为弱上升运动。11 日 08 时(图 8b),西安地区假相当位温随高度增加,大气层结稳定,下沉运动加强。

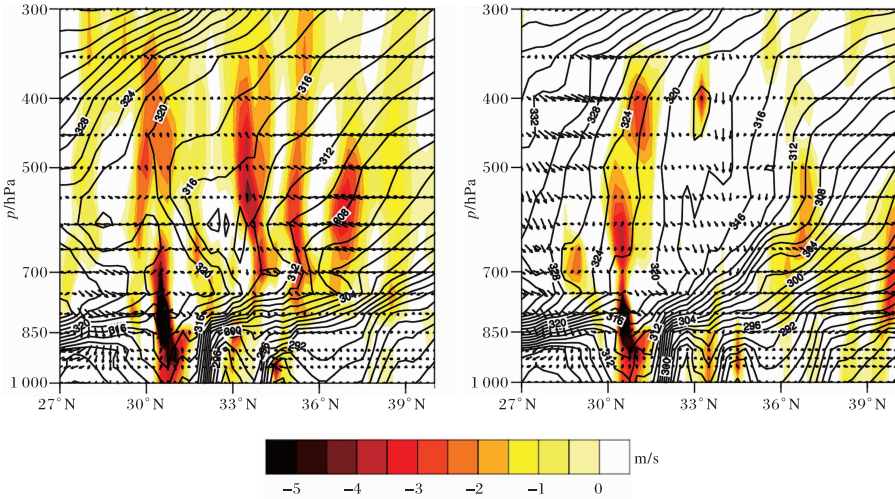


图 8 2023-11-10—11 沿 109°E 假相当位温(等值线;单位为 K)、垂直速度(填色;单位为 m/s)和风场(风羽)的纬度-高度剖面图(a 10 日 20 时;b 11 日 08 时)

5 结论及讨论

分析了 2023 年 11 月 11 日西安地区一次罕见的“雷打雪”天气过程,得到以下结论。

(1)本次“雷打雪”天气过程发生在西高东低的环流背景下,东亚槽延伸至内蒙古北部地区,环流经向度较大,有利于强冷空气南下活动。对流

天气过程发生时,西安处于 700 hPa 低压槽前部,500 hPa 存在偏西急流。本次过程我国东部地区受高压环流的影响,强大的大陆高压形成的北风能够将北方冷空气向南输送,在地面形成冷垫。雷暴发生区域位于冷锋后冷区内,距离地面锋面 350~450 km。

(2)本次“雷打雪”过程的水汽输送主通道处在 700 hPa 高度层,由西南气流将来源于孟加拉湾及南海的水汽引导输送至陕西,水汽通量辐合主要发生于 10 日午后和 11 日凌晨及上午,在 850 hPa~700 hPa 高度层存在弱辐合,符合高架雷暴的特点。西北强冷空气和对流层中低层水汽辐合是此次“雷打雪”过程降雪的主要诱因。

(3)本次对流天气过程西安市区 CAPE 值很弱,呈东西带状分布,位置偏南。过程发生前泾河站均存在显著冷垫和逆温层,冷垫厚度为 2 km,逆温层在 770 hPa~815 hPa 附近,其厚度为 45 hPa。深厚冷垫的形成成为高架雷暴发生提供必要条件,高纬度大环流背景差异和夜间陆气相互作用是此次过程中冷垫形成及维持的原因。

参考文献:

- [1] 章澄昌. 飞行气象学[M]. 北京:气象出版社,2008: 85.
- [2] 杨波,王园香,蔡雪薇. 我国华南江南春季雷暴气候特征分析[J]. 热带气象学报,2019,35(4):470-479.
- [3] 马晓玲,李德帅,胡淑娟. 青海地区雷暴、冰雹空间分布及时间变化特征的精细化分析[J]. 气象,2020,46(3):301-312.
- [4] 王婷波,周康辉,郑永光. 我国中东部雷暴活动特征分析[J]. 气象,2020,46(2):189-199.
- [5] 陆汉城,杨国祥. 中尺度天气原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2000: 251-288.
- [6] 许霖,姚蓉,王晓雷,等. 湖南省雷暴大风的时空分布和变化特征[J]. 高原气象,2017,36(4):993-1000.
- [7] 黄玉霞,王宝鉴,王研峰,等. 1974—2013 年甘肃冰雹日数的变化特征[J]. 气象,2017,43(4):450-459.
- [8] 盛杰,郑永光,沈新勇,等. 2018 年一次罕见早春飏线大风过程演变和机理分析[J]. 气象,2019,45(2):141-154.
- [9] 杨银,李岩瑛,陈豫英,等. 基于 Copula 函数的甘肃河东短时强降水特征分析[J]. 气象,2019,45(5): 632-640.
- [10] 陈云辉,许爱华,许彬,等. 江西一次极端雷暴大风过程的中尺度特征与成因分析[J]. 暴雨灾害,2019,38(2):126-134.
- [11] 巩崇水,曾淑玲,王嘉媛,等. 近 30 年中国雷暴天气气候特征分析[J]. 高原气象,2013,32(5): 1442-1449.
- [12] 赵煜飞,刘娜. 中国对流性天气现象观测资料质量控制及其年、季节特征分析[J]. 冰川冻土,2017,39(6):1232-1240.
- [13] 杨晓玲,丁文魁,袁金梅,等. 河西走廊东部大风气候特征及预报[J]. 大气科学学报,2012,35(1): 121-127.
- [14] 张春松,杨晓玲,刘蓉,等. 甘肃武威市雷暴天气时空分布特征[J]. 干旱气象,2015,33(4):659-665.
- [15] 孙继松,陶祖钰. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象,2012,38(2):164-173.
- [16] 廖晓农. 华北秋季强弱线型对流发展时天气尺度环境条件探讨[J]. 气象,2013,39(3):291-301.
- [17] 王晓峰,许晓林,张蕾,等. 上海“0731”局地强对流观测分析[J]. 高原气象,2014,33(6):1627-1639.
- [18] 刘维成,陶健红,邵爱梅,等. 雷电监测预警预报技术简述[J]. 干旱气象,2014,32(3):446-453.
- [19] 郑永光,周康辉,盛杰,等. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报,2015,26(6): 641-657.
- [20] 柳志慧,王式功,尚可政,等. 天山南麓雷暴日短期预报研究[J]. 沙漠与绿洲气象,2016,10(2): 43-49.
- [21] 李浚河,耿建军,张浙妍,等. 2013 年北京地区一次强对流天气过程分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2016, 10(2):25-30.
- [22] 吴海英,陈海山,刘梅,等. 长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J]. 气象,2017,43(2): 141-150.
- [23] 马月枝,苏爱芳,叶东,等. 2014 年 7 月 14 日新乡强对流过程成因分析[J]. 气象与环境科学,2017, 40(1):54-63.
- [24] 赵定池,李毅,尤伟,等. 拉萨地区夏季夜间雷暴的物理量指数分析[J]. 气象与环境科学,2017,40(1):114-119.
- [25] 王秀明,俞小鼎,周小刚. 雷暴潜势预报中几个基本问题的讨论[J]. 气象,2014,40(4):389-399.
- [26] 陈淑琴,周昊,张蔺廉,等. 浙东冬季和夏季两次强雷暴天气过程对比分析[J]. 气象与环境科学, 2018,41(2):60-68.

- [27] 苏德斌,焦热光,吕达仁. 一次带有雷电现象的冬季雪暴中尺度探测分析[J]. 2012, 38(2): 204-209.
- [28] 姚静,井宇,刘勇,等. 2016 年陕西地区首场伴随“高架雷暴”区域性暴雪过程机理分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 24-32.
- [29] 王仁乔,宋清翠. “雷打雪”现象发生机制初探[J]. 气象, 1990, 16(3): 45-48.
- [30] 孔凡超,李江波,张迎新,等. 华北冷季一次大范围雷暴与暴雪共存天气过程分析[J]. 气象, 2015, 41(7): 833-841.
- [31] 刘晓岳,于海鹏,盛夏,等. 半干旱区一次罕见“雷打雪”天气形成机制分析[J]. 气象, 2020, 46(12): 1596-1607.
- [32] MEANS L L. On thunderstorm forecasting in the central united states[J]. Monthly Weather Review, 1952, 80(10): 165-189.
- [33] COLMAN B R. Thundertorms above frontal sufaes in eirnoments without postive CAPE; Part I: Aclimatology[J]. Monthly Weather Review, 1990, 1189(5): 1103-1122.
- [34] COLMAN B R. Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE ;Part II : Organization and instability mechanisms [J]. Monthly Weather Review, 1990, 118(5): 1123-1144.
- [35] WILSON W J, ROBERTS D R. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective [J]. American Meteorological Society, 2016, 134(1): 23-47.
- [36] 盛杰,毛冬艳,沈新勇,等. 我国春季冷锋后的高架雷暴特征分析[J]. 气象, 2014, 40(9): 1058-1065.
- [37] 俞小鼎,周小刚,王秀明. 中国冷季高架对流个例初步分析[J]. 气象学报, 2016, 74(6): 902-918.
- [38] 刘洲洋,俞小鼎,王秀明,等. 中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J]. 气象, 2018, 44(2): 258-267.
- [39] 郑丽娜,张子涵,夏金鼎. 山东省“雷打雪”事件分型及其成因分析[J]. 气象, 2019, 45(8): 1075-1084.
- [40] 郭大梅,章丽娜,王秀明,等. 2016 年初冬陕西一次高架雷暴天气过程分析[J]. 气象, 2018, 44(11): 1404-1413.
- [41] 曹舒娅,韦芬芬,孙伟,等. 2014 年初春江苏一次高架雷暴成因分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2019, 13(4): 88-95.
- [42] 狄潇泓,王小勇,肖玮,等. 高原边坡复杂地形下短时强降水的云型特征分类[J]. 气象, 2018, 44(11): 1445-1453.
- [43] 赵娴婷,王晓芳,王珏,等. 2016 年 7 月 18—20 日湖北省特大暴雨过程的中尺度特征分析[J]. 气象, 2020, 46(4): 490-502.
- [44] 王迪,牛淑贞,曾明剑,等. 河南省分类强对流环境物理条件特征分析[J]. 气象, 2020, 46(5): 618-628.
- [45] 冯丽莎,宋攀,郑飞,等. 2016 年初冬河南区域暴雪过程诊断分析[J]. 大气科学, 2020, 44(1): 13-26.
- [46] 中国航空综合技术研究所. 地面气象观测要求: GJB 6702-2009 [S]. 中航工业 301 所, 2009.
- [47] 白玉兰,刘刚,周鑫,等. FY-4A 资料在 2023 年 7 月 1 日宁安极端冰雹天气过程中的应用分析[J]. 黑龙江气象, 2024, 41(3): 9-12.
- [48] WU M, LUO Y. Mesoscale observational analysis of lifting mechanism of a warm-sector convective system producing the maximal daily precipitation in China's mainland during pre-summer rainy season of 2015 [J]. Journal of Meteorological Research, 2016, 30(5): 719-736.