

李姝霞,袁小超,王国安,等.2023.一次暴雪过程的高架雷暴环境条件及雷达特征[J].暴雨灾害,42(5):541–553. LI Shuxia, YUAN Xiaochao, WANG Guoan, et al. 2023. Synoptic conditions and radar characteristics for elevated thunderstorm during a snowstorm event in Henan Province [J]. *Torrential Rain and Disasters*,42(5):541–553 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2022–109

一次暴雪过程的高架雷暴环境条件及雷达特征

李姝霞^{1,2},袁小超³,王国安⁴,王其英^{1,2}

(1. 开封市气象防灾减灾重点实验室,开封 475000;2. 河南省开封市气象局,开封 475000;
3. 河南省气象台,郑州 450003;4. 河南省气象探测数据中心,郑州 450003)

摘要:2021年2月24—25日河南出现一次伴高架雷暴的暴雪天气过程,各级气象台站业务预报对该过程中雷暴均漏报,对降雪量级预报也偏小。利用常规气象观测资料、双偏振雷达产品和NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 逐6h再分析资料,重点分析了这次暴雪过程中高架雷暴的环境条件及双偏振雷达参量特征。结果表明:(1)东移加深的中纬度高空槽、700 hPa发展北上的西南急流与地面扩散南下的冷空气等天气尺度系统相互作用触发对流,造成暴雪过程出现高架雷暴。(2)该过程最强水汽输送位于700 hPa,水汽通量大值带位于河南沿黄河一带,河南上空水汽充足,为中层不稳定层结建立和对流触发提供了有利的热力条件。(3)低槽前部两个次级环流圈上升支叠加为雷暴发生和降雪增强维持提供了强的上升运动;0—6 km较强垂直风切变有利于对称不稳定发展;700 hPa西南风急流辐合作用配合高空槽大尺度强迫使得中高层不稳定能量释放,从而触发对流。(4)高架雷暴发生时,雷达回波强度 ≥ 45 dBz、顶高超过 -20 °C层,“牛眼”结构和辐合上升区长时间维持有利于产生雷暴;雷达双偏振参量相关系数(CC)较小(0.7~0.9)、差分相移率(K_{DP})较大($0.5^\circ \sim 0.7^\circ \cdot \text{km}^{-1}$)和差分反射率(Z_{DR}) > 2 dB是高架雷暴发生时的主要特征,回波强度 > 55 dBz并伴有较大 K_{DP} ($0.5^\circ \sim 0.7^\circ \cdot \text{km}^{-1}$)与雷电频发和强降雪时段相对应。

关键词:暴雪;高架雷暴;不稳定条件;低空急流;双偏振参量

中图分类号: P458.1¹

文献标志码: A

DOI: 10.12406/byzh.2022–219

Synoptic conditions and radar characteristics for elevated thunderstorm during a snowstorm event in Henan Province

LI Shuxia^{1,2}, YUAN Xiaochao³, WANG Guoan⁴, WANG Qiyi^{1,2}

(1. *Kaifeng Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Kaifeng 475000*; 2. *Kaifeng Meteorological Office of Henan Province, Kaifeng 475000*; 3. *Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003*;
4. *Henan Meteorological Observation and Data Center, Zhengzhou 450003*)

Abstract: A snowstorm event followed by the elevated thunderstorm occurred in Henan Province from February 24 to 25 in 2021. The operational forecast of all meteorological stations failed to capture the thunderstorm of this event, with the snowfall being underestimated. Using the conventional meteorological observations, the dual polarization weather radar products, and the NCEP/NCAR reanalysis with special resolution of 1° and temporal resolution of 6 h, we conducted the analysis of the synoptic conditions and the characteristics of the dual polarization radar parameters for the elevated thunderstorm during this event. Results are as follows. (1) Due to the interaction of synoptic scale systems such as the mid-latitude upper trough moving eastward and deepening, the southwest jet developing northward at 700 hPa, and the cold air diffusing southward from the surface, the convection is triggered, which resulted in the elevated thunderstorms during the snowstorm event. (2) The strongest water vapor transport is located at 700 hPa, the great value belt of water vapor flux is located in the region along the Yellow River in Henan, and there is the abundant water vapor over Henan in this event, which provide favorable thermodynamic condition for the establishment of unstable stratification in the middle level and the triggering of convection. (3) The superposition of upward branches of two secondary circulations in front of the trough provides strong upward motion for the occurrence of thunderstorms and the maintenance of snowfall. The strong vertical wind shear at 0–6 km is beneficial to the development of symmetric instability. The instability energy in the

收稿日期: 2022–10–30;定稿日期:2023–07–12

资助项目: 河南省科技厅科技攻关项目(212102310025);河南省气象科学技术研究项目(KZ202002);2022年度开封市科技发展计划项目(22LH001, 22LH002)

第一作者: 李姝霞,主要从事天气预报及灾害性天气研究。E-mail:1183388520@qq.com

通信作者: 袁小超,主要从事天气预报和灾害性天气研究。E-mail:123349818@qq.com

mid-and upper-level is released due to the convergence of southwest wind jet at 700 hPa and the large-scale forcing by the upper trough, thus triggering convection. (4) When the elevated thunderstorm occurs, the intensity of radar echo is greater than or equal to 45 dBz and its top height is over -20°C . The "bull's eye" structure and maintain of the convergence rising area are favorable for generating the thunderstorm. The main characteristics of dual polarization radar parameters during the elevated thunderstorm are that the correlation coefficient (CC) is low of 0.7–0.9, the specific differential phase (K_{DP}) is high of $0.5^{\circ}-0.7^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$, and the differential reflectivity factor (Z_{DR}) is more than 2 dB. Echo intensity over 55 dBz with large K_{DP} of $0.5^{\circ}-0.7^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ corresponds to the period of frequent lightning and heavy snowfall.

Key words: elevated thunderstorm; snowstorm; instability condition; low-level jet; dual-polarization radar parameter

引言

2021年2月24—25日,河南沿黄(河)及以北地区出现一次伴随雷暴的雨雪天气过程。该过程累积降水量大,河南8市共22个自动气象站24 h累积降水量突破其建站以来2月份历史同期极值,其中河南中部降雪期间伴有密集雷电,小时降雪量 $>10\text{ mm}$,表现出明显的对流特征,降雪给河南沿黄及以北地区交通运输、电力输送、农业生产等带来严重影响。

近年来,对我国不同地区的暴雪天气过程,气象工作者从其形成的大尺度环流特征、热力和动力条件、锋生强迫和不稳定机制、物理量诊断以及雷达观测特征等方面做了大量研究,取得众多有价值的成果(李兆慧等,2011;顾佳佳和武威,2015;杨祖祥等,2019;冯丽莎等,2020)。周雪松和谈哲敏(2008)、崔慧慧和苏爱芳(2019)在研究暴雪机理时均指出,锋面次级环流是造成暴雪的主要原因;高空急流轴南压使得低空急流发展北上,高低空急流耦合激发次级环流圈上升支,为暴雪发生发展提供了强烈的上升运动。对于国内雷暴与暴雪共存的对流现象,自20世纪90年代以来就备受关注(丁栋生和李树林,1994;王仁乔和宋清翠,1999)。以往对这种现象的研究表明:冬季中高纬度产生雷暴的对流触发高度常在边界层以上(姚静等,2018;陈淑琴等,2019);有利的大尺度环流背景是冬季强对流天气产生的重要条件,对流层中层增温增湿及适宜的触发机制是对流天气产生的关键(苏德斌等,2012;郭兰,2014;翟亮等,2018);动力、地形抬升条件对高架雷暴的产生起到重要作用,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了逆温层之上的动力抬升条件(农孟松等,2013;曹舒娅等,2018)。高架雷暴的概念最初由Colman (1990a; 1990b)在20世纪90年代提出。俞小鼎等(2012)将在大气边界层以上被触发的雷暴称之为高架雷暴,并指出中国的高架雷暴常发生在早春和深秋,且出现在锋面冷空气一侧(冷锋后或暖锋前),灾害性天气以冰雹为主。还有一些研究表明:中层对流不稳定区有利于上升运动向高层发展,强垂直风切变和中高

层暖湿气流使得大气湿斜压性增强,产生倾斜对流,从而触发高架雷暴(郭大梅等,2012;郑丽娜等,2013;李典南等,2019)。有关统计研究结果显示:高架对流发生时往往伴随较强的冷垫及锋面逆温,其常发生在温差超过 6°C 的逆温层之上(刘洲洋等,2018);700 hPa作为关键层,其西南暖湿急流输送水汽的同时与冷涡后部冷空气交汇于黄淮地区形成的辐合切变线,是暴雪发生的重要动力抬升机制,低空急流对暖湿气流的输送和高空急流使冷平流侵入是高架对流的触发机制(鲍媛媛等,2015;孔凡超等,2015)。上述成果和结论对开展冬季暴雪和对流天气机理研究、指导冬季雨雪天气预报实践具有重要意义。然而,目前用于预报业务的数值模式中的对流参数化方案主要考虑边界层内部发展的对流,并不能预报高架雷暴的形成和发展(吴乃庚等,2013;俞小鼎等,2016)。

2021年2月24—25日河南发生的暴雪伴高架雷暴就是一次典型的冬季对流天气,各级气象台站对该过程雷暴出现漏报,且降雪量级预报偏小,尤其是位于雷暴区中心的郑州、开封附近其偏小程度更大。河南冷季高架对流是小概率事件(宋清芝等,2011),一般只闻雷声,不见或少见闪电,相比一般高架对流,该过程雷暴发生时间早、闪电密度大、持续时间长,人工观测雷声大、天空可见明显闪电,引起民众和媒体高度关注。另外,双偏振多普勒天气雷达为探测冬季对流天气提供了更多信息。双偏振雷达对其周边约30~150 km范围冬季降水属性的探测和判定基本准确,整体上能正确识别降水粒子相态(姚晨等,2018;杨祖祥等,2019)。以往国内应用双偏振雷达产品对暴雪过程中高架雷暴演变特征的分析几乎是空白。为此,本文应用常规气象观测资料、双偏振雷达产品和NCEP再分析资料等,利用天气学分析与诊断方法,分析了上述河南暴雪过程中高架雷暴的环境条件及双偏振雷达参量特征,以期今后同类灾害性天气预报预警提供参考。

1 资料与天气实况

1.1 资料说明

采用2021年2月24—25日多源观测资料和再分析资料,具体包括:(1)地面观测资料、探空资料和

FY-4A 卫星云图资料;(2) 美国环境预报中心(NCEP)全球资料同化系统(GDAS)的NCEP GDAS/FNL逐6 h再分析资料(空间分辨率 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$),共含26个标准等压层(1 000—10 hPa)的风、水汽通量、假相当位温、垂直速度等;(3) 郑州双偏振雷达基本反射率因子、径向速度、风廓线以及差分相移率(KDP)、零阶滞后相关系数(CC)和差分反射率因子(ZDR)等产品;(4) 河南省逐小时闪电定位资料。

1.2 天气实况

2021年2月24日12时—25日05时(北京时,下同),河南省出现一次降雨、雨夹雪、暴雪天气过程(以下简称“2·24”过程),河南中部降雪期间伴有密集雷暴,表现出总降水量大、降水时段集中、小时降雪强度

强的特点。当年2月24日08时—25日08时,安阳、鹤壁、新乡、郑州等8个地市22个气象站24 h累积降水量(08—08时)突破其建站以来2月份历史同期极大值。该过程暴雪主要出现在河南沿黄及以北地区(图1a),其中特大暴雪出现在新乡西北部、鹤壁等地,24 h最大降雪量出现在新乡的辉县,该站纯雪量达到35.6 mm,小时最大降雪量(11.0 mm)出现在新乡的封丘站,开封站和郑州站次之,分别为10.4 mm和10.0 mm(图1c)。该过程降雨24日12时首先出现在豫西,从当日15时开始降水自西向东转为降雪;21时后,省会郑州转为纯雪,降雪强度增大,22—23时郑州1 h降雪量达到10.0 mm;22时后,封丘、开封由雨夹雪转为纯雪;到25日05时,河南大部降雪趋于停止。

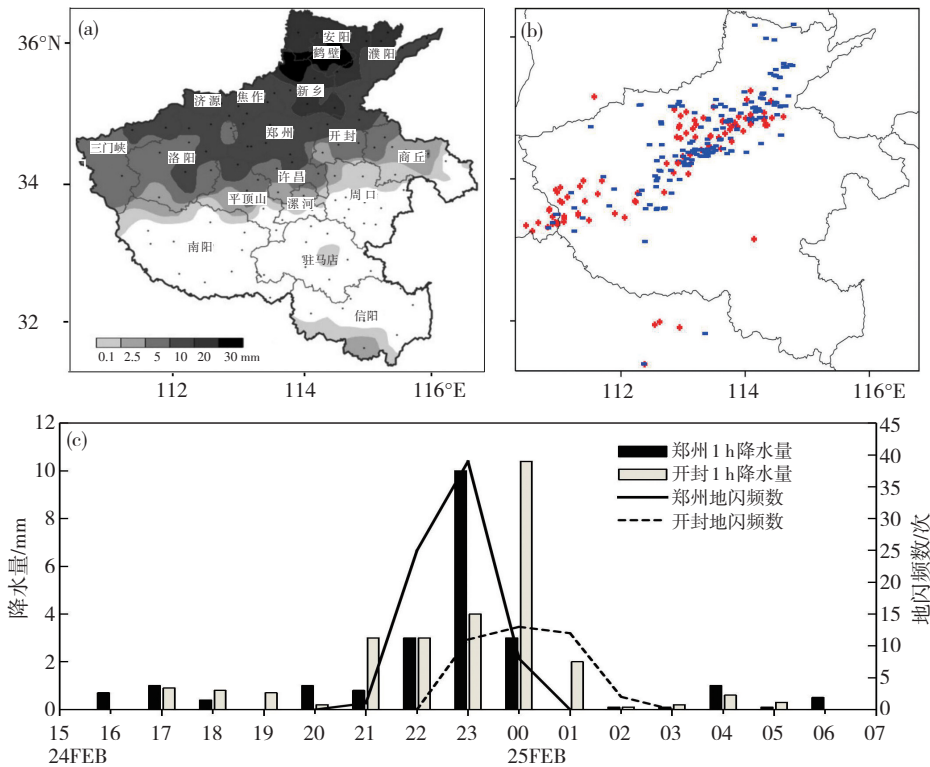


图1 2021年2月24日08时—25日08时河南省24 h累积降雪量(a,单位: mm)与24日20时—25日00时地闪(b;红色“+”为正地闪,蓝色“-”为负地闪)分布,以及24日15时—25日07时郑州、开封站逐小时降水量(柱状,单位: mm)与地闪频数(折线,单位: 次)变化(c)

Fig.1 Distribution of (a) the 24-hour accumulated snowfall (unit: mm) from 08:00 BT 24 to 08:00 BT 25 and (b) the cloud-to-ground lightning from 20:00 BT 24 to 00:00 BT 25 February 2021 in Henan Province, and (c) variation of the hourly rainfall (columnar, unit: mm) and cloud-to-ground lightning frequency (broken line, unit: times) at Zhengzhou and Kaifeng stations from 15:00 BT 24 to 07:00 BT 25 February 2021. Symbols red “+” and blue “-” in fig.b mark positive and negative cloud-to-ground lightning, respectively

“2·24”过程期间,河南省逐小时闪电定位资料显示,雷电活动主要集中在24日20时—25日00时(图1b),闪电密集时段对应于强降雪时段,闪电密集区位于三门峡、洛阳两地南部以及郑州、开封、新乡和焦作地区南部,呈东北—西南向带状分布。从闪电监测数据看,24日18时有零星闪电开始出现在豫北和豫西,各地闪电频数不超过 $5\text{次}\cdot\text{h}^{-1}$ (图略);20时,闪电频数

逐渐增加,其密集区呈东北—西南向带状分布;当日21时到25日00时,上述闪电密集带自西向东缓慢移动影响河南沿黄一带。从郑州、开封两代表站逐时地闪频数与降水量变化图(图1c)看出,郑州地闪出现前的15—20时,其逐时降雨量多在1.0 mm或以下。当日21时—25日01时,随着地闪频数增加,降雪强度明显增大,尤其是当日22—23时,郑州地闪频数达39次,

降雪量增大到 10.0 mm ; 当日 23 时—25 日 00 时, 开封地闪频次在 $11 \sim 13 \text{ 次} \cdot \text{h}^{-1}$ 之间, 降雪量从 $4.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 增大为 $10.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$; 25 日 02 时后, 随着地闪减弱消失, 降水强度明显减弱。可见, 该过程地闪频数与降雪强度之间呈现明显的正相关。

2 环流背景与影响系统

2 月 23 日 08 时(图略), 500 hPa 高空图上, 欧亚中高纬地区维持“两槽一脊”环流型, 中纬度以纬向环流为主, 宁夏到成都有一低槽, 槽前正涡度平流使得低层辐合系统发展; 700 hPa 陕西中部有一东西向切变线, 切变线两侧为西南风与东南风形成的辐合, 河南位于西南气流中, 风速为 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 河南全省比湿 (q) $< 4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 湿空气达到饱和; 850 hPa 四川地区有一低涡, 冷温度槽从河北北部经河南西北部向低涡东北部延伸, 暖切变线位于江淮之间且位置偏南。24 日 20

时, 500 hPa 低槽东移到河南西部地区并发展加深(图 2a), 河南受槽前西南气流影响; 700 hPa 偏南风速增大, 形成 $\geq 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流(郑州西南风速达到 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), 其轴线伸向河南沿黄附近, 暖切变线东延北抬至山西南部至河南北部(图 2b), 强盛的西南暖湿气流使得河南上空温、湿度增大, 温度露点差 ($T - T_d$) 为 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$, 24 h 变温在 $1.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 以上。850 hPa 冷槽在山西、河北南部到河南北中部发展成为 $-4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的闭合冷中心, 随着河南北中部冷空气加强和位于江淮的暖切变线南侧暖湿气流发展北上, 锋区在河南中东部明显加强, 同时暖切变线逐渐演变为东北—西南向倒槽式切变线, 河南北中部位于切变线西北侧的冷区中(图 2c), 冷空气为高空西南暖湿气流抬升提供了冷垫。25 日 08 时(图略), 500 hPa 层 504 dagpm 冷涡中心稳定在贝加尔湖以北地区, 中纬度低槽北缩东移出河南, 同时随着 700 hPa 和 850 hPa 切变线东移北上, 河南降水结束。

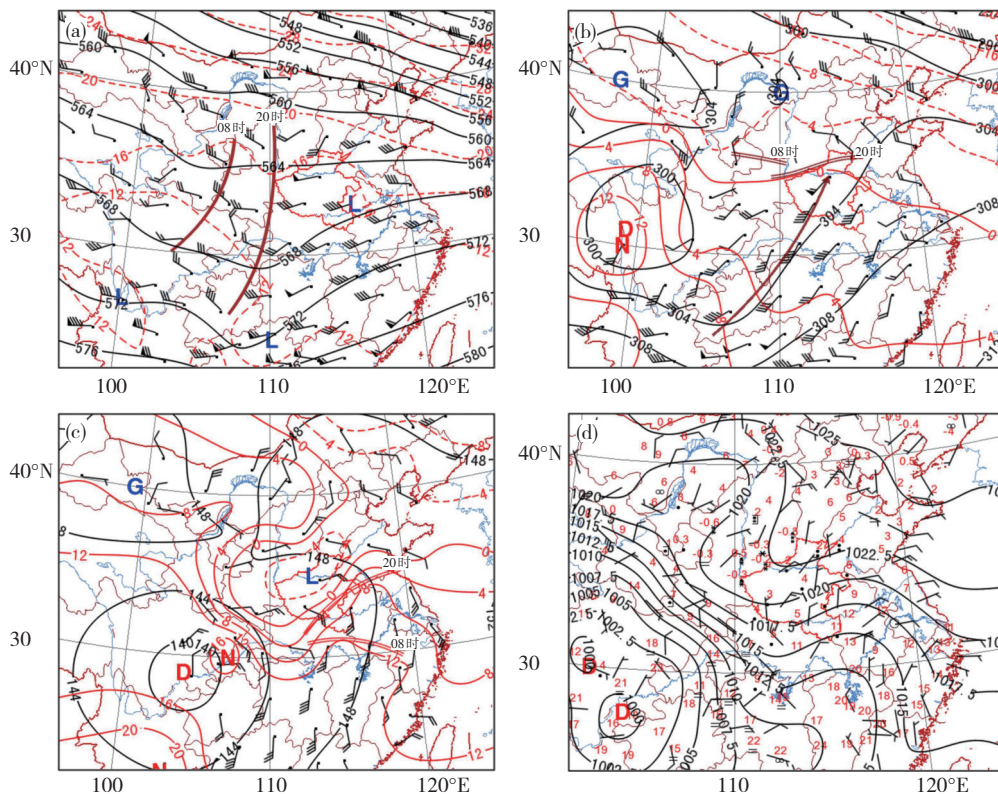


图2 2021年2月24日20时500 hPa (a, 棕色粗实线为槽线)、700 hPa (b, 棕色双实线为切变线, 棕色箭头线为低空急流) 和850 hPa (c, 红色双实线为切变线) 高度场(等值线, 单位: dagpm) 与风场(风羽, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 以及地面天气图[d, 等值线为海平面气压场(单位: hPa), 风羽为风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)]

Fig.2 Geopotential height field (contours, unit: dagpm) and wind field (barbs, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa and (c) 850 hPa and (d) the surface synoptic chart at 20:00 BT 24 February 2021. Brown thick solid line in Fig.2a denotes the trough line. Brown double solid line and brown line with arrow in Fig.2b denote the shear line and low-level jet stream, respectively. Red double solid line in Fig.2c denotes the shear line. Contours and barbs in Fig.2d denote the sea level pressure field (unit: hPa) and wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), respectively

地面图上, 2月22日夜间(图略), 冷空气自华北扩散南下后, 河南一直处于华北到东北冷高压底部的偏北到东北气流中。24日08时(图略), 分股南下的冷空

气从华北地区东部回流影响河南, 到14时陕西北部、山西南部、河南西部的暴雪区 24 h 降温幅度达 $6 \sim 11 \text{ } ^\circ\text{C}$, 随着降雪区东移, 冷空气持续东移南下。24

日20时(图2d),冷高压经河南北部持续向西南方向伸展,地面倒槽由安徽向山东发展,河南北中部位于倒槽北侧的偏北气流中。正是低层(850 hPa及以下)倒槽北侧的冷空气为河南北部和中东部雨转雪及高架对流形成提供了冷垫。

综上所述可知,中纬度高空低槽东移加深、700 hPa西南急流发展北上与地面冷高压南伸等天气尺度系统相互作用,造成“2·24”过程暴雪伴高架雷暴;另外,850 hPa偏东风与偏南风气旋性辐合加强了辐合上升和水汽补充,以及850 hPa以下冷空气持续南下提供低层冷垫,成为有利暴雪伴高架雷暴发生的环境条件。下文对该过程中高架雷暴形成机制及其双偏振雷达特征进行重点分析。

3 高架雷暴的环境条件分析

3.1 不稳定条件分析

3.1.1 对流不稳定

假相当位温(θ_{sc})反映大气的温湿状况,其水平分布代表大气中能量的分布特征,垂直分布反映大气对

流不稳定。本文用 $\Delta\theta_{sc}$ 表示大气对流稳定度。当 $\Delta\theta_{sc} > 0$ 时表示大气层结不稳定, $\Delta\theta_{sc} < 0$ 时表示大气层结稳定。NCEP再分析资料 θ_{sc} 显示(图略),2月24日河南雷暴区中层 $\Delta\theta_{sc} < 0$ 。因此,利用郑州探空资料进一步分析垂直方向上 θ_{sc} 的演变特征。探空显示,24日08—20时,郑州700 hPa以下 $\Delta\theta_{sc} < 0$,大气层结稳定,这与低层存在冷垫、中高层为中性或弱对流不稳定有关。这种配置是高架雷暴产生的重要特征之一(俞小鼎等,2016;曹舒娅等,2018)。24日08时(图3a),800—600 hPa之间 $\Delta\theta_{sc} > 0$ 为对流不稳层,但对流不稳层较浅薄,其他层次间 $\Delta\theta_{sc}$ 均小于0;此时对流有效位能(CAPE)为0,无对流天气出现。当日20时(图3b),700—250 hPa之间(除600—500 hPa外) $\Delta\theta_{sc}$ 均大于0,表现为较深厚的对流不稳定层,此时状态曲线与层结曲线非常靠近,CAPE增大为 $22.6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,说明CAPE存在积聚,实况20—21时郑州附近开始出现雷暴。进一步分析表明,“2·24”过程低层大气层结稳定,不利于自地面的雷暴发生;中高层对流不稳定层结增厚,CAPE增加,其变化有利于高架雷暴发生。

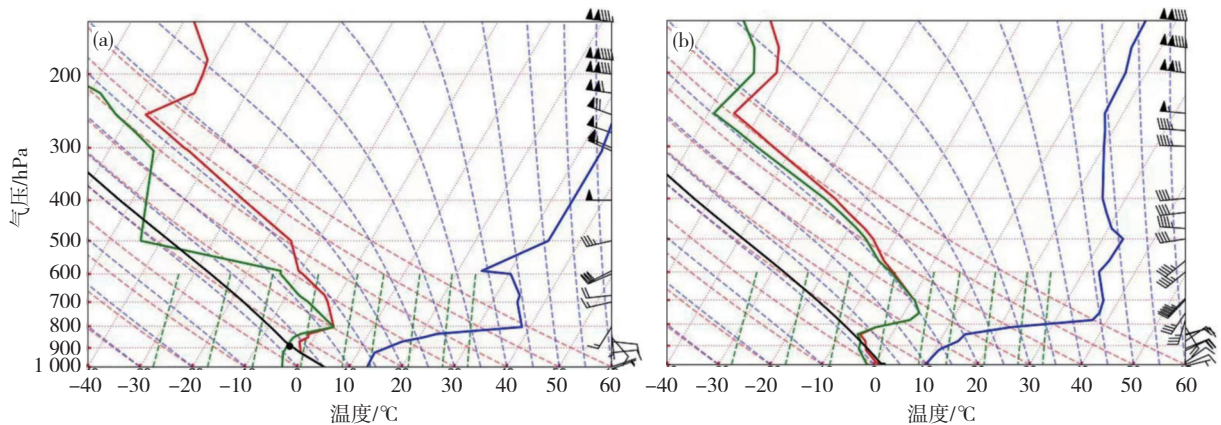


图3 2021年2月24日08时(a)和20时(b)郑州站探空图[其中,右侧红线为假相当位温(θ_{sc} ,单位: $^{\circ}\text{C}$)]

Fig.3 Sounding chart at Zhengzhou station at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT on 24 February 2021. Red line at the right of the chart indicates pseudo-equivalent potential temperature (θ_{sc} , unit: $^{\circ}\text{C}$)

3.1.2 条件性对称不稳定

条件性对称不稳定产生的条件是在大气接近饱和时,绝对角动量面坡度小于等假相当位温面的坡度(胡鹏等,2015)。由前文分析可知,河南沿黄地区上空对流层湿空气处于饱和状态,具备条件性对称不稳定产生的前提条件。为此,过 114°E 作“2·24”过程不同时刻 θ_{sc} 和地转绝对角动量的经向垂直剖面图(图4),以此分析河南中部条件性对称不稳定分布。图4a显示,2月24日08时,900—750 hPa为向北向上倾斜的等 θ_{sc} 线密集带,表明对流层中低层倾斜锋区明显,低层为偏北风,700 hPa以偏南风为主;900—800 hPa绝对角动量面坡度小于等 θ_{sc} 面的坡度,表明存在条件性对称不稳定。24日20时(图4b), 35°N 附近等 θ_{sc} 线密集带向

上伸展到900—700 hPa之间,向北向上倾斜角度增大,高层 θ_{sc} 增大,说明暖湿气流进一步向上输送;800—700 hPa存在条件性对称不稳定(图4b中黑色点线椭圆内),与此同时700 hPa急流由南向北斜升穿过条件性对称不稳定区,导致不稳定能量释放,使得倾斜对流发展。

综上所述可知,“2.24”过程出现的雷暴是较为典型的冷季高架雷暴,它出现在800—700 hPa条件性对称不稳定下;条件性对称不稳定导致的倾斜对流和中高层弱对流不稳定,为雷暴产生提供了不稳定条件。

3.2 水汽条件分析

水汽是强降雪和对流天气发生的重要条件。我国东部高架雷暴过程水汽通道主要位于对流层低层

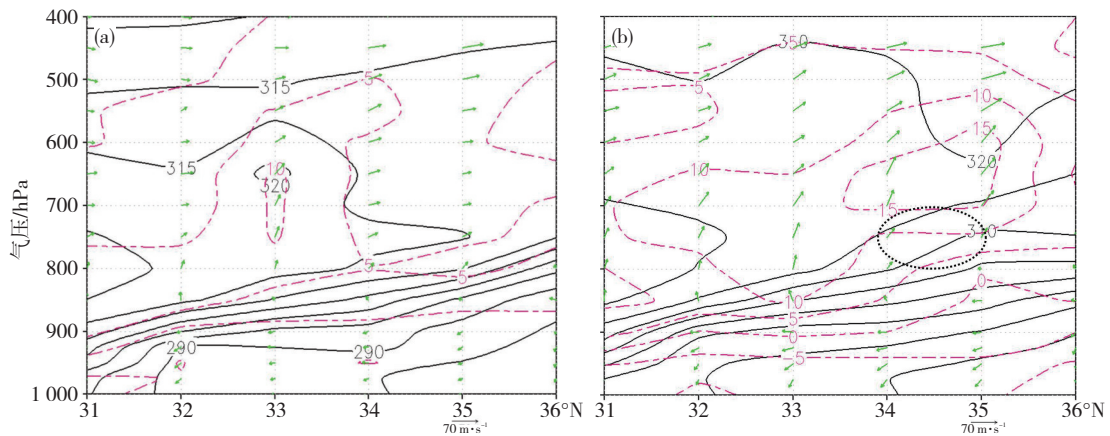


图4 2021年2月24日08时(a)和20时(b)经114°E过雷暴中心的地转绝对角动量(红色虚线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、假相当位温(黑色实线,单位: K)与流场(绿色箭头)的经向剖面图(图b中黑色圆圈为对称不稳定区)

Fig.4 Meridional cross section of absolute geostrophic angular momentum (red dashed line, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), pseudo-equivalent potential temperature (black solid line, unit: K) and flow field (green arrow) along 114°E across thunderstorm center at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 24 February 2021. Black circle in Fig.4b indicates the symmetric instability region

850—700 hPa (孔凡超等, 2015)。分析“2·24”过程水汽输送可知,2月24日08时,700 hPa西南气流大风速轴伸向陕西中部到河南西部,20时西南风增大,风速 $\geq 16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的急流建立并将孟加拉湾的水汽输送至河南沿黄及以北地区,850 hPa暖湿气流在河南中东部辐合。为进一步揭示“2·24”过程的水汽变化,沿114°E作水汽通量经向剖面图(图略),从中看到,24日08时,

700 hPa水汽通量大值带由南向北伸向陕西南部,其量值为 $9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 。同时,红外卫星云图显示,高空槽前700 hPa西南气流辐合区有大片云系发展,多个对流云团排列成东西向带状,其中云顶亮温(T_{bb}) $< 230 \text{ K}$ 的对流云团集中位于陕西中部到河北南部地区。当日14时,水汽通量为 $10 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大值中心移至河南西部,此时对流云合并成团状(云团A)(图5a),云团

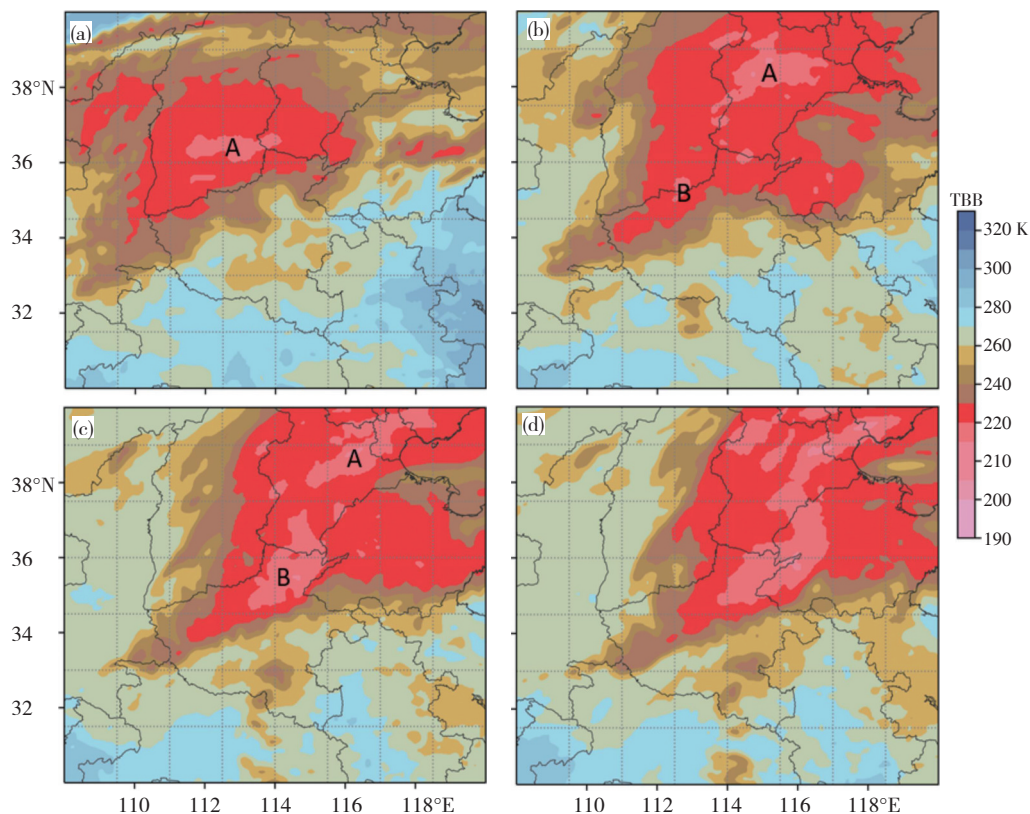


图5 2021年2月24日14时(a)、19时(b)、21时(c)和22时(d) FY-4A卫星红外云图(A、B表示对流云团)

Fig.5 FY-4A satellite infrared cloud images at (a) 14:00 BT, (b) 19:00 BT, (c) 21:00 BT and (d) 22:00 BT 24 February 2021. Symbols A and B denote convective cloud clusters

中心位于山西东南部与河南西北部,河南西北部出现大于10 mm的6 h降雨;之后,云团A主体东移,云团B发展加强(图5b)。20时,850 hPa偏南风向河南中东部输送水汽并辐合,水汽通量大值带北伸(图6a),700 hPa西南急流出口区在河南中部沿黄地区,水汽通量大值中心 $11 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 和水汽辐合中心 $-3 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 均在河南中东部(图6b),且700 hPa上下有厚度约1 km的完全饱和带。21—22时,云团A、

B合并后呈东北—西南向,云团西南部(原云团B处)结构密实,其前沿边界清晰(图5c、d), T_{bb} 梯度值增大,此时雷暴发展增强,闪电频次增加,闪电排列方向与云团前沿边界相吻合,地面实况显示24日23时—25日00时郑州、开封等地出现强降雪,最强降雪时段发生在对流产生产期间。从该过程500—925 hPa各层水汽通量和水汽通量散度的变化看(图略),最强水汽输送主要位于700 hPa。

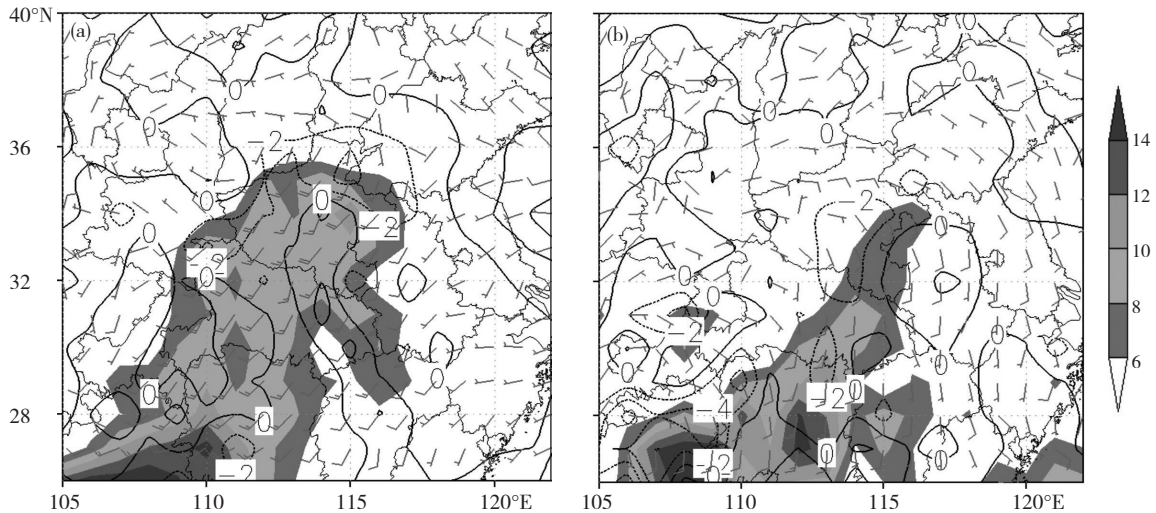


图6 2021年2月24日20时700 hPa (a)和850 hPa (b)的水汽通量(阴影,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
与水汽通量散度(等值线,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.6 Water vapor flux (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor flux divergence (contours, unit: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
at (a) 700 hPa and (b) 850 hPa at 20:00 BT 24 February 2021

由以上分析可知,“2·24”过程最强水汽输送主要位于700 hPa;西南急流不仅为河南上空输送充足水汽,也为中层不稳定层结建立和对流触发提供了热力、动力条件。

3.3 动力抬升条件分析

3.3.1 垂直风切变

我国高架对流的发生发展伴随着较强的环境垂直风切变,而较强的垂直风切变往往有利于对称不稳定的发展(刘洲洋等,2018)。“2·24”过程河南暴雪区各站0—6 km垂直风切变(Δv)较大,如郑州站,2月23日08时, $\Delta v < 11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其垂直风切变强度较弱;24日08时, Δv 增大为 $18.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直风切变明显增大;当日20时, Δv 更是高达 $25.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,垂直风切变显著加大。强的垂直风切变是维持水汽供应和热力不稳定的重要因子,垂直风切变增强将导致对流风暴进一步加强和发展(俞小鼎和郑永光,2019)。20时后,郑州出现强降雪和雷暴,且伴有雷暴的强降雪区向东延伸到封丘、开封等地。到25日08时,700—600 hPa由西南风转为偏北或西北风,风速减小,垂直风切变减弱。

3.3.2 垂直次级环流与上升运动

垂直次级环流既是中尺度对流系统,也是锋前飑线和中尺度雨带的一种启动机制(丁一汇,1991)。“2·24”过程河南多地出现连续锋生,主要分布在沿黄及以北地区,其中心与降水中心分布较为一致(图略)。因受锋生的动力强迫作用,该过程河南多地产生次级环流。为反映该过程暴雪区的垂直环流特征,沿 114°E 作不同时刻的垂直速度经向剖面图(图7)。从中可见,24日08时(图7a),河南从南到北出现两个次级环流圈,次级环流上升支中心位于 $34^\circ\text{—}35^\circ\text{N}$ 附近,其强度为 $-0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当日20时(图7b),上升支气流叠加区北扩,上升运动增强,并贯穿整个对流层,700—400 hPa强上升运动中心强度达到 $-1.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,其对应区域出现暴雪,500 hPa以上强上升运动中心对应最大降雪区,达到30 mm左右,雷暴与小时降雪量 $\geq 10 \text{ mm}$ 的区域与700—500 hPa强上升运动中心吻合。25日02时(图略),次级环流圈仅存1个,并趋于消失,垂直运动减弱。由此可见,低槽前正涡度平流与中低层气流辐合提供了强的辐合抬升条件,垂直次级环流上升支增强了上升运动强度,为暴雪区提供了有利的动力条件。

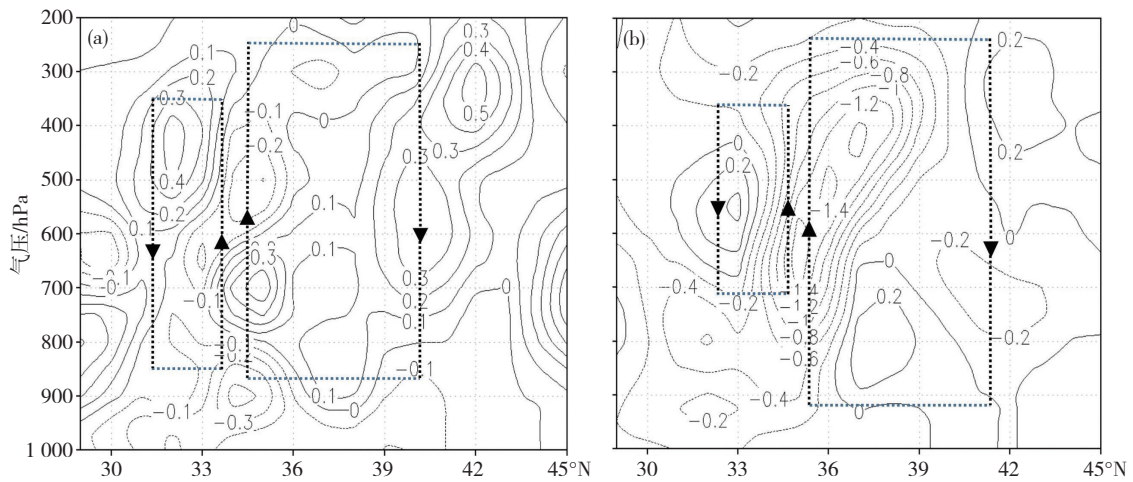


图7 2021年2月24日08时(a)和20时(b)沿114°E的垂直速度(单位: $10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)经向剖面图
(黑色方框为次级环流圈,朝上箭头为其上升支,朝下箭头为其下沉支)

Fig.7 Meridional cross section of vertical velocity (unit: $10^{-1} \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) along 114°E at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT on 24 February 2021.

Black box indicates the secondary circulation circle, where the upward and downward arrows denote its ascending branch and descending branch, respectively

4 高架雷暴的雷达特征分析

郑州雷达监测范围基本覆盖了“2·24”过程河南伴雷暴暴雪区,因此用该雷达基本反射率因子、径向速度、风廓线产品揭示高架雷暴天气系统的演变特征。另外,分析雷暴前后双偏振雷达各参量变化,期望加深预报员对冷季雷暴天气下双偏振雷达产品的认识,从而提高预报员对雷暴伴暴雪天气预报预警能力。

4.1 反射率因子特征

分析“2·24”过程不同时刻郑州雷达基本反射率因子变化可知,2月24日12时,河南西部和山西南部开始有 $\leq 30 \text{ dBz}$ 的回波生成,此时地面已出现降水;随后,回波发展加强、呈片状,并向东北方向移动,济源、

焦作、新乡等地出现强度为 40 dBz 回波(图略)。18—20时,上述回波进一步加强,济源、新乡受 $\geq 45 \text{ dBz}$ 对流回波影响出现零星雷暴;20—22时,强回波中心逐渐发展为东北—西南向带状分布, $\geq 45 \text{ dBz}$ 回波面积增大,其强中心达到 60 dBz ,回波顶高在 10 km 以上,超过 -20°C 层高度。当云顶发展到 -20°C 层高度时,云中就有了足够多的冰晶,易满足起电条件(姚静等,2018)。此时段,河南北部和西部出现雷暴集中区。到22—23时,上述带状回波进一步发展加强,其中心强度高达 66 dBz ,带状回波长轴由安阳伸至郑州西南部。22时42分基本反射率因子图显示(图8a),强度为 55 dBz 的回波扫过郑州站,其最大强度超过 60 dBz 。从沿上述带状回波最强处所作的反射率因子垂直剖面图上看

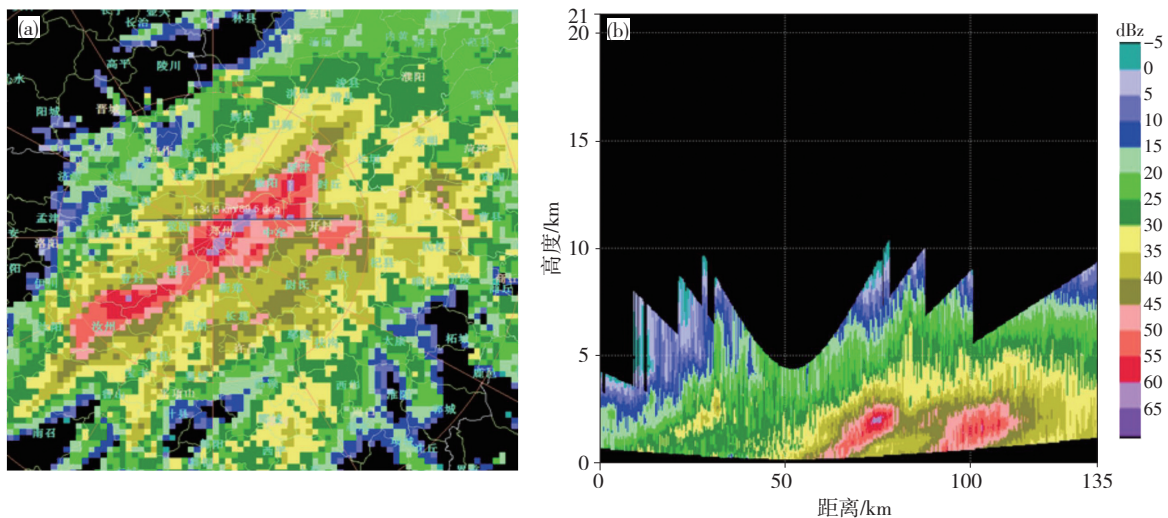


图8 2021年2月24日22:42郑州雷达2.4°仰角反射率因子(a,单位: dBz)以及沿图(a)中蓝线的反射率因子垂直剖面图(b)

Fig.8 (a) Basic reflectivity factor (unit: dBz) at 2.4° elevation angle from Zhengzhou radar at 22:42 BT 24 February 2021 and (b) the vertical cross sections of reflectivity factor along the blue solid line in fig.a

到(图8b), 35 dBz以上强回波主要位于5 km高度以下, > 45 dBz的强回波主要位于2.5 km以下, 并呈倾斜悬垂状。24日23时—25日00时, 当 ≥ 55 dBz的强回波经过开封和新乡东部时, 该地区出现密集闪电以及10 mm以上小时最大降雪量。25日00时后, 降水回波东移, 其强度逐渐减弱, 河南雷暴趋于结束。由此可见, 雷达反射率因子变化与高架雷暴天气演变有较好的对应关系。

4.2 径向速度和风廓线产品特征

分析“2·24”过程不同时刻郑州雷达径向速度变化可知, 该过程开始时的24日14—18时, 2.4° 仰角径向速度图上(图9a、b), 零速线分布较为不连续, 雷达东北部40 km内开始出现负的径向速度, 之后零速线分布变得清晰、光滑、连续, 呈S型分布; 雷达站50 km范

围内有正、负速度大值区, 出现了非对称“牛眼”结构, 低层存在强的东北风, 有较强冷空气南扩, 高空维持偏南气流, 风场表现为典型的“下冷上暖”结构。20—22时(图9c—e), 随着对流发展, 径向速度图上可见非对称双“牛眼”结构, 低层风速加大, 且在新乡附近上空开始出现与之对应的辐合上升区, 该辐合上升区东南伸至开封附近, 维持时间长达2.5 h, 强烈的辐合上升有利于形成对流天气。23时(图9f), 对流发展更加强盛, 风场加强为对称的双“牛眼”结构(黑色圆圈所示), 离雷达站0.5 km处风速达到超低空急流强度($12.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 5 km高度附近西南暖湿气流风速达到 $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 强烈的冷暖气流交汇及抬升有利于对流天气维持。25日00时以后(图9g、h), “牛眼”结构风场逐渐消失, 对流天气趋于减弱。

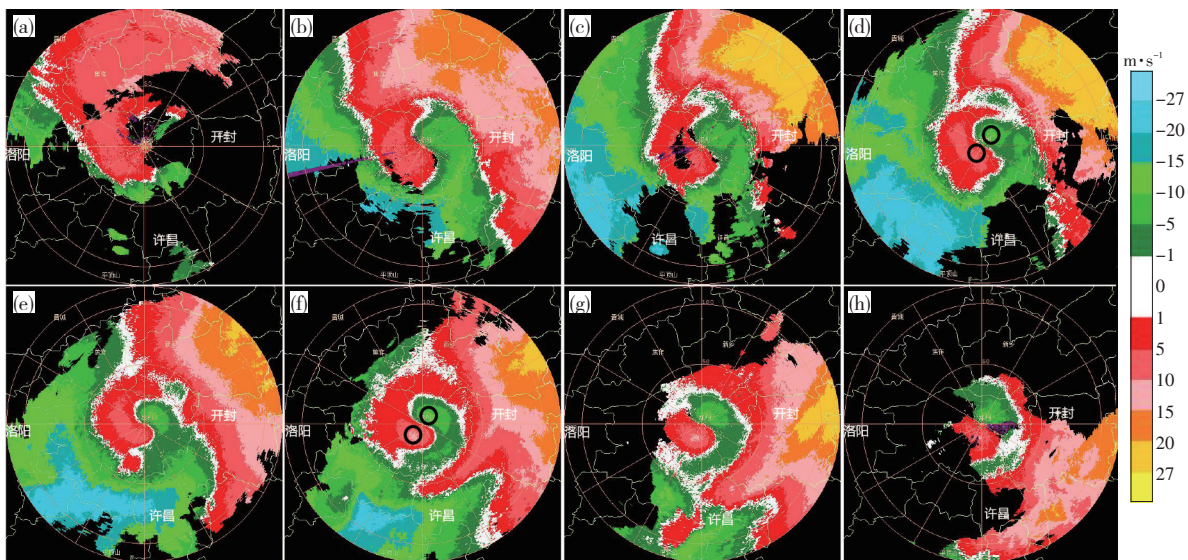


图9 2021年2月24日14:00 (a)、18:00 (b)、20:00 (c)、21:00 (d)、22:00 (e)、23:00 (f)和25日00:00 (g)、01:00 (h)

郑州雷达 2.4° 仰角径向速度图(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 黑色“○”标示“牛眼”结构)

Fig.9 Radial velocities (unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) at 2.4° elevation angle from Zhengzhou radar at (a) 14:00 BT, (b) 18:00 BT, (c) 20:00 BT,

(d) 21:00 BT, (e) 22:00 BT and (f) 23:00 BT on 24 and (g) 00:00 BT and (h) 01:00 BT on

25 February 2021. Symbol yellow circle marks the “bull’s eye” structure

另外, 分析该过程雷达风廓线产品(VWP)可知(图略), 东北风主要在1.2 km高度以下, 2月21—23时, 1.2 km以下有 $\geq 10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的东北风, 到21时36分增大为 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 3.0 km高度以上为 $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 西南急流, 暖湿气流深厚, 0—3 km垂直风切变达到 $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 配合对称不稳定条件和强的抬升作用, 此阶段对流达到最强, 闪电次数最多, 降水量最大。

以上分析表明, 无论是径向速度还是风廓线产品, 都能较好地反映高架雷暴天气的演变; 高架雷暴发生时, 雷达回波强度 ≥ 45 dBz、顶高超过 -20°C 层, 而“牛眼”结构和辐合上升区长时间维持则有利于产生雷暴。

4.3 雷达偏振参量特征

雷暴中的电活动与对流活动呈正相关, 雷暴云起电过程对冰相作用有较强的依赖性, 当云顶发展到 -20°C 层高度时, 云中就有了足够多的冰晶, 易满足起电条件(张一平等, 2014)。上文分析结果表明, “2.24”过程雷电活动主要集中在24日20时—25日00时, 闪电密集时段与强降雪时段对应。因此, 对该过程雷电密集时段和强降雪时段的雷达偏振参量特征分析如下。

强降雪开始前, 2月24日18时48分河南三门峡北部(图10中黑色圆圈标注)、新乡市和延津县交界处(蓝色方框标注)出现闪电活动, 0°C 层(融化层)上界在3 km左右, 此时雷达回波顶高为8 km, 远超过 -20°C 层高度

(24日08时探空资料显示 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度为4.8 km),符合发生雷电的条件;此时,三门峡北部反射率因子为30~35 dBz(图10a),对应区域相关系数(CC)大值区中出现了0.9左右的较小值(图10b),差分相移率(K_{DP})与融化层附近的值相当,其大值达 $0.5^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ (图10c),差分反射率因子(Z_{DR})出现2.1 dB大值(图10d,除融化层附近 Z_{DR} 较大而为 $0.5\sim 3.0\text{ dB}$ 外,其他区域均在0 dB左右),说明由于对流回波的发展该区域粒子形态非对称性较强,具有冰水混合相态,而非完全的冰晶、

干雪或湿雪。另外,新乡市和延津县交界处雷电活动区雷达回波和双偏振参量特征表现与三门峡北部雷电活动区类似,只是该雷电活动区反射率因子更强($40\sim 45\text{ dBz}$)、 K_{DP} 更大(最大值为 $1.1^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$)、 Z_{DR} 也更大(3.4 dB),而CC更小(0.7左右),这或许与该处本身处在融化层附近且对流发展更加旺盛、较大水滴粒子快速输送至较高层次有关。此雷电活动区北侧,回波强度达50 dBz以上,回波发展更高,强回波区为形态和性质一致的冰晶粒子,其CC基本接近1。

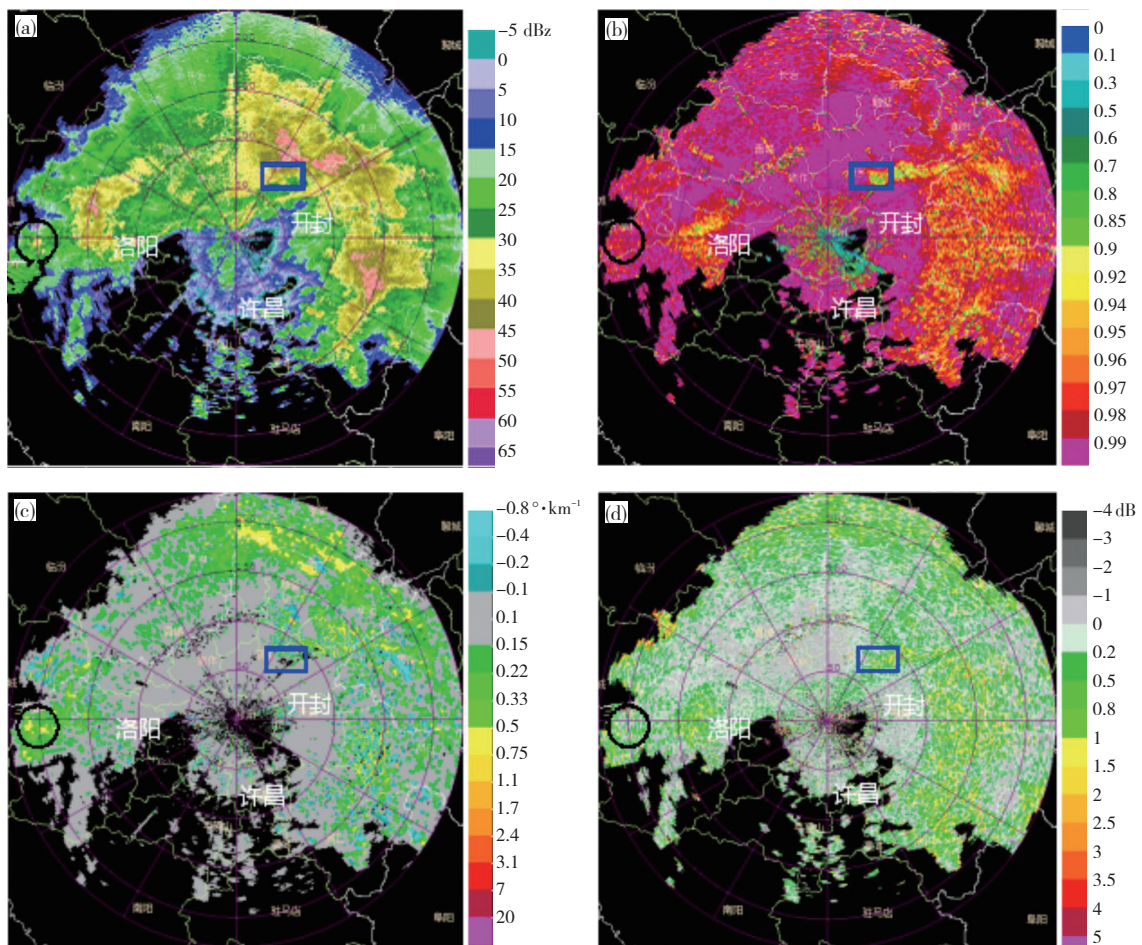


图10 2021年2月24日18:48郑州双偏振雷达 0.5° 仰角反射率因子(a)以及相关系数(b)、差分相移率(c)和差分反射率因子(d) 黑色圆圈(O)和蓝色方框(□)分别标注河南三门峡北部及新乡市与延津县交界处

Fig.10 (a) Reflectivity factor at 0.5° elevation angle, (b) correlation coefficient, (c) specific differential phase and (d) differential reflectivity from the Zhengzhou dual polarization radar at 18:48 BT 24 February 2021. Black circle and blue solid line rectangle mark the north of Sanmenxia and the junction of Xinxiang City and Yanjin County in Henan Province, respectively

“2·24”过程闪电出现最为密集时段在24日22时—25日00时(图11),且该时段也是强降雪时段。图12给出闪电密集和强降雪时段2月24日23时郑州雷达 0.5° 仰角反射率因子、CC、 K_{DP} 、 Z_{DR} 图(其中,白色方框为闪电密集区和强降雪区)。从中看到,闪电分布大致呈东北—西南向,并位于大于45 dBz(图12a)的对流回波附近,且雷电对流回波带不断经过暴雪区上空; K_{DP} 为 $0.5^{\circ}\sim 0.7^{\circ}\cdot\text{km}^{-1}$ (图12c)的较大值区也

随强对流回波不断经过雷电密集区上空,并出现强降雪,其原因可能是较强对流回波将数密度较大的 K_{DP} 大粒子输送到高空,并通过淞附效应快速产生冰晶或雪花,从而使得降雪量增大;此时段闪电密集区相关系数基本接近1, Z_{DR} 也较小,其绝对值在 $0\sim 0.5\text{ dB}$ 之间;雷达东到东南象限也存在较小的CC值(图12b)和较大 Z_{DR} (图12d),表明该区域降水粒子为混合相态。25日01时之后,影响该过程闪电密集和强降雪

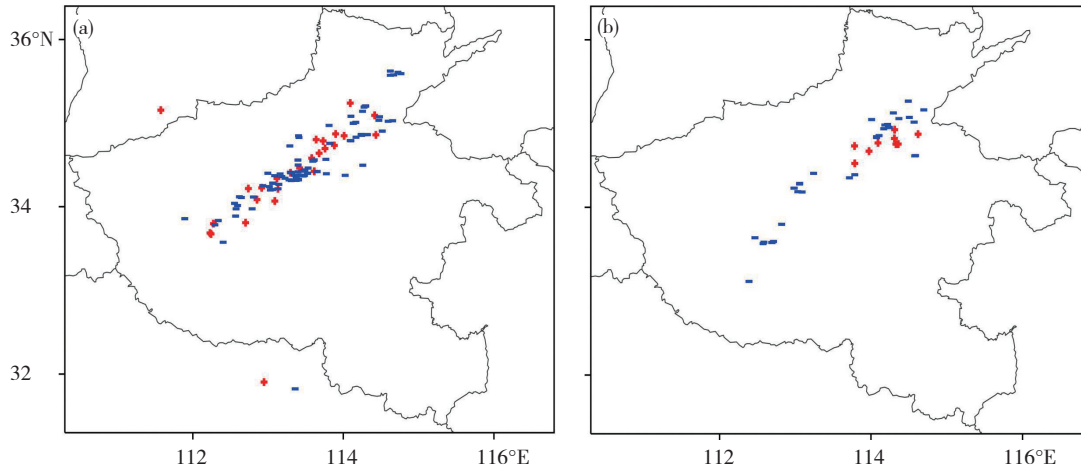


图 11 2021 年 2 月 24 日 22—23 时(a)、24 日 23 时—25 日 00 时(b)小时地闪分布(红色“+”为正地闪,蓝色“-”为负地闪)
 Fig.11 Distribution of hourly cloud-to-ground lightning from (a) 22:00 BT to 23:00 BT on 24 and (b) 23:00 BT 24 to 00:00 BT 25 February 2021.
 Symbols red “+” and blue “-” mark positive and negative cloud-to-ground lightning, respectively

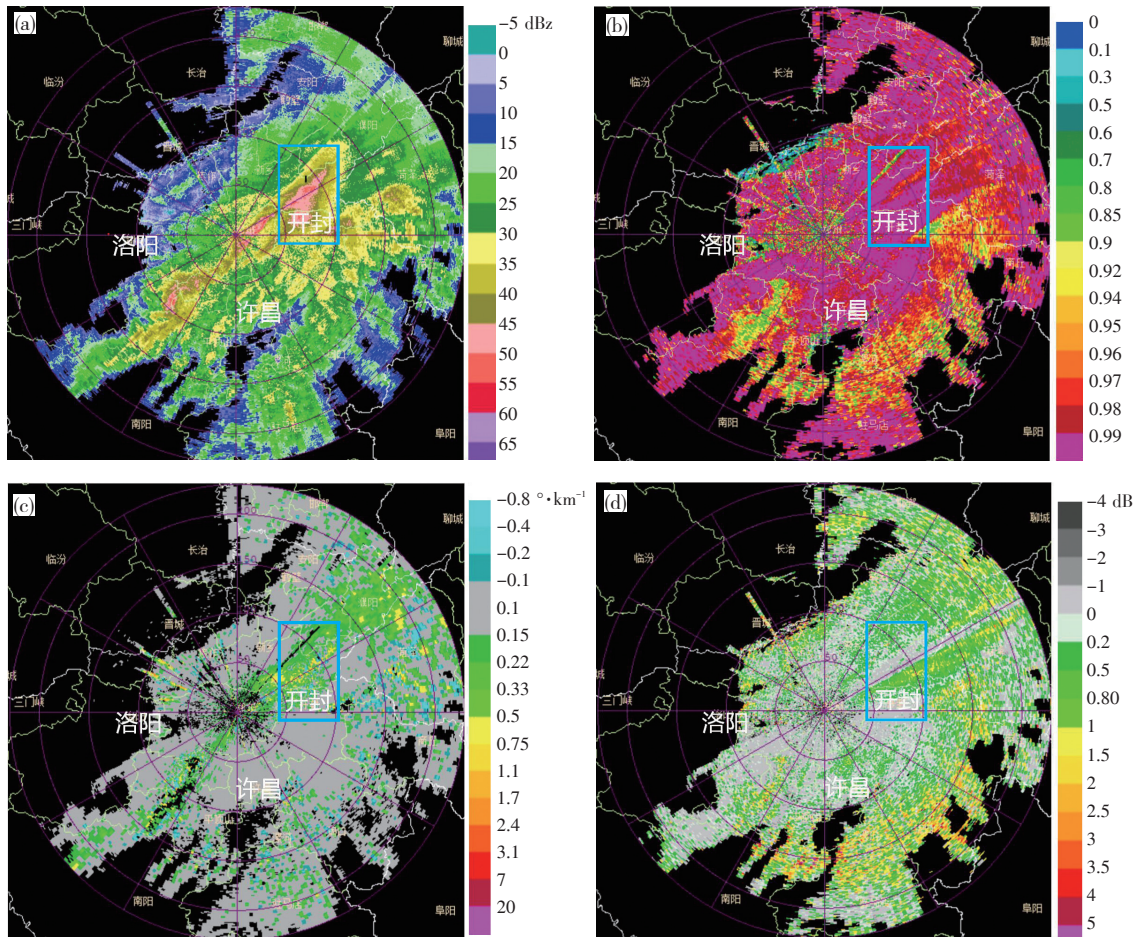


图 12 2021 年 2 月 24 日 23:00 郑州双偏振雷达 0.5°仰角反射率因子(a)以及相关系数(b)、差分相移率(c) 和差分反射率因子(d)
 蓝色方框(□)标注闪电密集区和强降雪区
 Fig.12 (a) Reflectivity factor at 0.5° elevation angle, (b) correlation coefficient, (c) specific differential phase and (d) differential reflectivity factor from the Zhengzhou dual polarization radar at 23:00 BT 24 February 2021. Blue solid line rectangles mark the concentrated areas of lightning and the severe snow areas

区的回波逐渐减弱并移出河南,上述高架雷暴天气也趋于结束。

综上可知,雷达双偏振物理量 CC 较小(0.7~0.9)、

K_{DP} 较大($0.5^{\circ} \sim 0.7^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$)和 $Z_{DR} > 2 \text{ dB}$ 是高架雷暴发生时的主要特征,回波强度 $> 55 \text{ dBz}$ 并伴有较大 K_{DP} ($0.5^{\circ} \sim 0.7^{\circ} \cdot \text{km}^{-1}$)与地闪频发和强降雪时段相对应,对

此次高架雷暴天气有一定的指示意义。

5 结论与讨论

本文利用常规气象观测资料、双偏振雷达资料和NCEP再分析资料等,重点分析了2021年河南一次暴雪过程中高架雷暴的环境条件及双偏振雷达雷达参量特征,主要得到如下几点结论:

(1) 中纬度高空槽东移加深、700 hPa西南急流发展北上与地面冷高压(携带冷空气持续南下)等天气尺度系统相互作用,触发对流系统,造成暴雪和高架雷暴天气。

(2) 700 hPa来自孟加拉湾的水汽输送及其强的辐合,使得对流层湿层增厚,为该过程暴雪发生发展提供了充足水汽,同时也为中层不稳定层结的建立和对流天气的产生提供了热力、动力条件;850 hPa偏东风与偏南风的气旋性辐合,加强了辐合上升作用。

(3) 低槽前部次级环流圈上升支为强降雪增强维持提供了强的上升运动;0—6 km较强垂直风切变有利对称不稳定发展;700 hPa偏南风急流辐合作用配合高空槽大尺度强迫触发对流,使中高层对流不稳定能量和对称不稳定能量释放,是造成此次强降雪过程发生高架雷暴的主要原因。

(4) 雷达资料分析表明,高架雷暴发生时,雷达回波强度 ≥ 45 dBz、顶高超过 -20 °C层,“牛眼”结构和辐合上升区长时间维持有利雷暴产生;雷达双偏振物理量相关系数(CC)较小(0.7~0.9)、差分相移率(K_{DP})较大($0.5^\circ \sim 0.7^\circ \cdot \text{km}^{-1}$)和差分反射率(Z_{DR}) > 2 dB是高架雷暴发生时的主要特征,回波强度 > 55 dBz并伴有较大 K_{DP} ($0.5^\circ \sim 0.7^\circ \cdot \text{km}^{-1}$)与雷电频发和强降雪时段相对应。这些特征对强降雪过程高架雷暴临近预警有一定指示意义。

“2·24”河南大范围暴雪雷暴天气过程,由于强对流特征明显,EC等多家数值模式和各级气象台站对此次过程的对流性特征估计不足,预报降水量级偏小,漏报雷暴。可见,对冬季降水不稳定条件的分析仍然非常必要,预报员面对数值模式产品的降水结论,还要充分利用多源资料分析影响系统和物理量的变化,并结合雷达产品特征等进行综合判断,尤其是在对冬季可能发生的强对流天气进行预报预警时应避免过度依赖数值模式产品结论。本文重点对“2·24”河南暴雪过程中高架雷暴特征及其成因进行了分析,其相关结论还有待于今后通过冬季发生在河南省中东部更多的强对流个例来检验和完善,并找出主参量预报阈值,建立预报模型,为冬季强对流预报预警提供技术支持。

参考文献(References):

- 鲍媛媛,康志明,李伦,等.2015.2009年早春南方地区一次高架雷暴天气过程的机理分析[J].高原气象,34(2):515-525. Bao Y Y, Kang Z M, Li L, et al. 2015. Mechanisms of an elevated thunderstorm process over southern china in the early spring of 2009 [J]. Plateau Meteorology, 34(2):515-525 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00187
- 曹舒娅,张静,施丹平,等.2018.江苏近10 a高架雷暴特征分析[J].气象科学,38(5):681-691. Cao S Y, Zhang J, Shi D P, et al. 2018. Analysis on the elevated thunderstorms in the past decade in Jiangsu Journal of the Meteorological Sciences,38(5):681-691 (in Chinese). doi:10.3969/2018jms.0027
- 陈淑琴,章雨娜,曹宗元,等.2019.华东地区冷季两次高架对流个例分析[J].气象与环境科学,42(4):63-73. Chen S Q, Zhang L N, Cao Z Y, et al. 2019. Analysis on two elevated convection processes in Eastern China in cold season [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 42(4):63-73 (in Chinese). doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2019.04.010
- 崔慧慧,苏爱芳.2019.2018年初豫南特大暴雪过程的特征与成因分析[J].暴雨灾害,38(2):169-176. Cui H H, Su A F. 2019. Analysis on characteristics and causes of a heavy snowstorm event in southern Henan in the beginning of January 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters,38(2):169-176 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.02.009
- 丁一汇.1991.高等天气学[M].北京:气象出版社. Ding Y H. 1991. Advanced Weather Science [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 丁栋生,李树林.1994.一次“雷打雪”天气过程的初步分析[J].气象,19(10):51-53. Ding D S, Li S L. 1994. Preliminary analysis of a "thundersnow" weather process [J]. Meteorological Monthly,19(10):51-53 (in Chinese).
- 冯丽莎,宋攀,郑飞,等.2020.2016年初冬河南区域暴雪过程诊断分析[J].大气科学,44(1):13-26. Feng L S, Song P, Zheng F, et al. 2020. Diagnostic analysis of a severe regional snowstorm event in the early winter of 2016 in Henan Province, China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,44(1):13-26 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1909.18170
- 顾佳佳,武威.2015.2014年2月4—7日河南暴雪过程的环流特征及其持续原因[J].暴雨灾害,34(2):117-125. Gu J J, Wu W. 2015. The circulation features and sustaining mechanism of a snowstorm event occurred in Henan from February 4 to 7 in 2014 [J]. Torrential Rain and Disasters,34(2):117-125 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.02.003
- 郭大梅,章雨娜,王秀明,等.2018.2016年初冬陕西一次高架雷暴天气过程分析[J].气象,44(11):1404-1413. Guo D M, Zhang L N, Wang X M, et al. 2018. Analysis on elevated thunderstorm in Shaanxi in early winter of 2016 [J]. Meteorological Monthly,44(11):1404-1413 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.11.003
- 郭兰.2014.三门峡市回流形势下“雷打雪”天气的物理成因[J].气象与环境科学,37(2):58-63. Guo L. 2014. Physical causes of snowstorm with lightning caused by reflux in Sammenxia [J]. Meteorological and Environmental Sciences,37(2):58-63 (in Chinese). doi: 10.16765/j.cnki.1673-7148.2014.02.003
- 胡鹏,蔡哲,张永靖,等.2015.一次伴有雷暴的暴雪天气成因机理分析[J].

- 气象科学,35(2):210-215. Hu P, Cai Z, Zhang Y J, et al. 2015. Cause analysis on a snowstorm accompanied with thunderstorm [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 35(2):210-215 (in Chinese). doi:10.3969/2014jms.0073
- 孔凡超,李江波,张迎新,等.2015.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*,41(7):833-841. Kong F C, Li J B, Zhang Y X, et al. 2015. Diagnostic analysis of one widespread thunderstorm coexisting with snowstorm in North China in March 2013 [J]. *Meteorological Monthly*,41(7):833-841 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.005
- 李典南,许东蓓,苟尚,等.2019.甘肃中部一次冷锋后高架雷暴天气过程综合诊断[J].*干旱气象*,37(5):809-816. Li D N, Xu D B, Gou S, et al. 2019. Comprehensive analysis of an elevated thunderstorm process behind cold front in the central of Gansu Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*,37(5):809-816 (in Chinese). doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2019)-05-0809
- 刘洲洋,俞小鼎,王秀明,等.2018.中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J].*气象*,44(2):258-267. Liu Z Y, Yu X D, Wang X M, et al. 2018. Climatology of cold season elevated convection in Northern China [J]. *Meteorological Monthly*,44(2):258-267 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.02.005
- 李兆慧,王东海,王建捷,等.2011.一次暴雪过程的锋生函数和急流-锋面次级环流分析[J].*高原气象*,30(6):1505-1515. Li Z H, Wang D H, Wang J J, et al. 2011. Analysis on frontogenesis function and jet-front secondary circulation in a snowstorm process [J]. *Plateau Meteorology*,30(6):1505-1515 (in Chinese)
- 农孟松,赖珍权,梁俊聪,等.2013.2012年早春广西高架雷暴冰雹天气过程分析[J].*气象*,39(7):874-882. Nong M S, Lai Z Q, Liang J C, et al. 2013. Analysis on elevated thunderstorm hail in Guangxi in early spring of 2012 [J]. *Meteorological Monthly*,39(7):874-882 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.008
- 苏德斌,焦热光,吕达仁.2012.一次带有雷电现象的冬季雪暴中尺度探测分析[J].*气象*,38(2):204-209. Su D B, Jiao R G, Lü D R. 2012. Mesoscale observation analysis of a winter snowstorm with thunder and lightning in Beijing Area [J]. *Meteorological Monthly*,38(2):204-209 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.02.009
- 宋清芝,孙景兰,吕晓娜.2011.河南省一次暴雪伴雷电天气的形成机理[J].*气象*,37(5):583-589. Song Q Z, Sun J L, Lü X N. 2011. Formation mechanism of a case of snowstorm with lightning in Henan [J]. *Meteorological Monthly*,37(5):583-589 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.5.010
- 吴乃庚,林良勋,冯业荣,等.2013.2012年初春华南“高架雷暴”天气过程成因分析[J].*气象*,39(4):410-417. Wu N G, Lin L S, Feng Y R, et al. 2013. Analysis of the causes of elevated thunderstorm weather processes in South China in early spring 2012 [J]. *Meteorological Monthly*,39(4):410-417 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2013.04.002
- 王仁乔,宋清翠.1999.“雷打雪”现象发生机制初探[J].*气象*,16(3):43-45. Wang R Q, Song Q C. 1990. A preliminary study on the occurrence mechanism of "thunderbolt snow" [J]. *Meteorological Monthly*,16(3):45-47 (in Chinese)
- 姚晨,杨祖祥,朱月佳,等.2018.2018年初安徽省两次罕见大暴雪过程的对比分析[J].*暴雨灾害*,37(5):401-409. Yao C, Yang Z X, Zhu Y J, et al. 2018. Comparative analysis of two rare heavy snowstorm events in Anhui during January 2018 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,37(5):401-409 (in Chinese) doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.05.002
- 姚静,井宇,刘勇,等.2018.2016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*,34(6):24-32. Yao J, Jing Y, Liu Y, et al. 2018. Mechanistic analysis of the process of the first regional snowstorm accompanied by "elevated thunderstorms" in Shaanxi in 2016 [J]. *Journal of Meteorology and Environment*,34(6):24-32 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1673-503x.2018.06.003
- 俞小鼎,郑永光.2020.中国当代强对流天气研究与业务进展[J].*气象学报*,78(3):391-418. Yu X D, Zheng Y G. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,78(3):391-418 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2020.035
- 俞小鼎,周小刚,王秀明.2012.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].*气象学报*,70(3):311-337. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2012. The advances in the nowcasting techniques on thunderstorms and severe convection. *Acta Meteorologica Sinica*,70(3):311-337 (in Chinese). doi:10.557-6619/2012/70(3)-0311-37
- 俞小鼎,周小刚,王秀明.2016.中国冷季高架对流个例初步分析[J].*气象学报*,74(6):902-918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M. 2016. A preliminary case study of elevated convection in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*,74(6):902-918 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2016.075
- 杨祖祥,谢亦峰,项阳,等.2019.2018年1月初安徽特大暴雪的双偏振雷达观测分析[J].*暴雨灾害*,38(1):31-40. Yang Z X, Xie Y F, Xiang Y, et al. 2019. Analysis on dual polarization radar observations of a heavy snowstorm event in Anhui in the beginning of January 2018 [J]. *Torrential Rain and Disasters*,38(1):31-40 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.01.004
- 翟亮,郭淳薇,马新成,等.2018.北京2016年“11·20”初雪预报偏差分析[J].*气象*,44(1):151-158. Zhai L, Guo C W, Ma X C, et al. 2018. Forecast deviation analysis of the first snow in Beijing on 20 November 2016 [J]. *Meteorological Monthly*,44(1):151-158 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.01.013
- 郑丽娜,张子涵,夏金鼎.2019.山东省“雷打雪”事件分型及其成因分析[J].*气象*,45(8):1075-1084. Zheng L N, Zhang Z H, Xia J D. 2019. Classification and cause analysis of "thundersnow" event in Shandong [J]. *Meteorological Monthly*,45(8):1075-1084 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.08.004
- 周雪松,谈哲敏.2008.华北回流暴雪发展机理个例研究[J].*气象*,34(1):18-26. Zhou X S, Tan Z M. 2008. Case study on development mechanism of a snowstorm over North China [J]. *Meteorological Monthly*,34(1):18-26 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.01.003
- 张一平,俞小鼎,孙景兰,等.2014.2012年早春河南一次高架雷暴天气成因分析[J].*气象*,40(1):48-58. Zhang Y P, Yu X D, Sun J L, et al. 2014. Analysis on weather causes of an elevated thunderstorm in Henan in early spring 2012 [J]. *Meteorological Monthly*,40(1):48-58 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.006
- Colman B R. 1990a. Thunderstorms above frontal surface in environments without positive CAPE. Part I: A climatology [J]. *Monthly Weather Review*,118(5):1103-1121
- Colman B R. 1990b. Thunderstorms above frontal surface in environments without positive CAPE. Part II: Organization and instability mechanisms [J]. *Monthly Weather Review*,118(5):1123-1144