

低纬高原罕见“雷打雪”中尺度特征分析

郭荣芬^{1,2} 鲁亚斌² 高安生³ 李磊^{1,2}

(1. 云南大学大气科学系, 昆明 650091; 2. 云南省气象台; 3. 云南省气象局科技减灾处)

提 要: 应用常规高空资料、FY-2C 卫星红外和水汽图像、加密自动站地面观测资料, 结合新一代多普勒雷达探测资料, 综合分析了 2008 年 2 月 28 日夜间至 29 日凌晨发生在云南的“雷打雪”罕见天气现象。结果表明: 南支槽和冷空气、西南低空急流的共同影响, 是其发生的有利天气背景, 其中强对流天气就发生在急流与锋面相互作用的湿度锋湿区内斜压不稳定的环境中。中- γ 尺度对流云团生成并逐渐增强为中- β 尺度对流云团是形成此次复杂对流天气的直接中尺度系统。多普勒雷达回波中, PPI 上有回波强度达 25~33dBz 的“人字形”回波、钩状回波以及阵风锋的出现, 相应 VP-PI 上出现逆风区、低层零线“S”形暖平流及“牛眼”结构是“雷打雪”天气中降雨转为冰雹、阵雪过程中, 中尺度对流系统由弱变强的典型特征。地面逐时温、压、湿、风的迅速演变特征表现为雷暴发生前增温增湿和增压, 温度、气压出现峰值, 且气压曲线显示为圆顶状的中尺度雷暴高压特征; 风的变化则表现为风向呈逆时针旋转, 偏北风增大并出现风速峰值。雷暴过境时, 要素显示为降温增湿, 出现露点锋。

关键词: “雷打雪” 西南急流 中尺度系统 多普勒雷达特征 自动站要素 中尺度特征

Analysis on Mesoscale Characteristic of Rare Thunderstorm Snow Weather in Low Latitude Plateau

Guo Rongfen^{1,2} Lu Yabin² Gao Ansheng³ Li Lei^{1,2}

(1. Atmospheric Science Department of Yunnan University, Kunming 650091; 2. Yunnan Meteorological Observatory; 3. Science and Technology Disaster Reduction Department of Yunnan Meteorological Bureau)

Abstract: Conventional observing data, FY-2C satellite infrared and vapor pictures, auto-station intensive surface observing data and new generation Doppler radar detection data were used to analyze an unusual “thunderstorm snow” weather event which happened from February

基金项目: 本课题由中国气象局 2008 年业务建设项目—灾害天气短时临近预报业务系统建设子项目“冰雹天气诊断识别研究”(编号 2012209)资助

收稿日期: 2008 年 5 月 15 日; 修定稿日期: 2008 年 10 月 15 日

28 night to February 29 morning in 2008. The result indicated that the interaction of southern trough, cold air and south-west lower jet was the beneficial synoptic background. The strong convection weather just happened in the baroclinic instability environment of humidity front with the interaction between jet and cold front. The meso- γ -scale convective cloud grew and gradually strengthened to meso- β -scale convective cloud which was the primary meso-scale synoptic system and triggered this complex convective weather event. From the Doppler radar echo picture we could see that the band echo with the shape of “人” and “hail spike” hook echo with the echo intensity of 25~33dBz, and gust front can also be detected from the PPI screen. And from the VPPI screen, anti-wind area, lower level's zero isotherm “S” warm advection and “bull's eye” structure can also be detected, which were classical features of meso-scale convective system's changing from weakness to strength during the period of rainfall evolving to hail and snow in the “thunderstorm snow” weather. The fast evolving characters of hourly surface temperature, pressure, relative humidity and wind showed the value of temperature, pressure and humidity increased before the thunderstorm happened, and the value of temperature and pressure got to maximum, and the pressure curve appeared to dome-shaped meso-scale thunderstorm high pressure feature. And any other else, the evolving of wind showed the wind rotated anti-clockwise, and the northern wind velocity increased and the peak value appeared. When the thunderstorm passed, the meteorological factors showed the temperature decreasing, and the humidity increasing, and the dew point temperature got to peak value.

Key Words: “thunderstorm snow” southwest jet meso-scale synoptic system Doppler radar features auto-station meteorological factors meso scale features

引 言

2008年2月28日夜间至29日凌晨,云南中部及东南部普遍出现了强降温和降雪并伴有雷雨冰雹的复杂天气,其中2月28日20时至29日03时(北京时,下同),昆明相继先后出现了小雨→冰粒→阵雨→冰雹雷暴→霰→雪6种天气现象,这种不到8小时内天气现象复杂多变的“雷打雪”天气,为昆明建站50多年以来所罕见。

地处低纬高原的云南,由于特殊的山地地理背景和处于多种中小尺度天气系统的源地,大风、冰雹是常见的气象灾害。对于雷暴、雹暴等强对流天气的研究,已有许多气象工作者进行了探讨。“雷打雪”天气因出现概

率极少,研究相对不多,且以往的研究均以常规观测资料为手段,侧重研究其环流背景和物理机制^[1-4],对其中尺度特征尤其是卫星、多普勒雷达回波及自动站资料的中尺度特征研究尚属空白。受条件限制,云南的多普勒雷达观测主要用于雨季的降水观测,加之云南冬春季降水尤其是降雪较少,因此多普勒雷达对冬春季冰雹及降雪等天气的分析应用相对较少。此次云南“雷打雪”天气出现期间,昆明3830-C多普勒雷达以0.5°仰角对该过程进行了监测,获取了一些回波资料,希望通过此次分析,揭示低纬高原的“雷打雪”天气的中尺度特征,为今后多普勒雷达及自动站加密资料在云南冬春季强对流天气预报的应用积累一些经验,更好地为云南气象的防灾减灾工作服务。

1 资料来源

2008 年 2 月 28 日 08 时至 29 日 08 时云南“雷打雪”过程期间的常规高空资料、FY-2C 卫星红外和水汽图像、昆明 3830-C 多普勒雷达探测资料和加密自动站地面逐时观测资料,并借助 MICAPS3.0 进行资料处理分析。

2 过程概况

2008 年 1 月中旬以来,我国南方大部地区出现历史罕见的持续低温冷冻灾害。2 月份低温冷冻灾害波及到云南中部,此次“雷打雪”天气就是在这样的春季冷环境条件下发生的特殊复杂中尺度对流天气。自 2008 年 2 月 25 日开始,受高空南支槽、低层切变与冷空气的共同影响,云南省自东北向西南出现明显强降温、降雨雪天气,哀牢山以东地区出现大幅降温,滇东北的昭通、曲靖、滇西北的迪庆北部 27 日 20 时至 28 日 20 时出现大到暴雪。2008 年 2 月 28 日夜间滇中及东部地区出现明显的强降温和降雪并伴有雷雨冰雹的复杂天气,其中滇中的昆明大部、玉溪东部、楚雄东部、红河北部出现降雪天气,雪量为小到中雪局部大到暴雪(图 1)。29 日凌晨

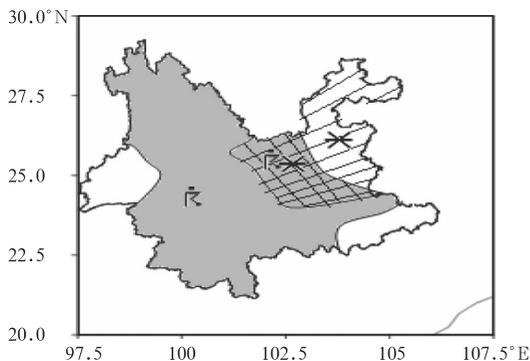


图 1 2008 年 2 月 28 日云南冰雹及雷打雪天气分布图
(阴影部分为 28 日 08—20 时冰雹天气区,
斜线部分为降雪区,网影区为雷打雪天气区)

3 时后,云南全省大部地区突然转为晴空少云。过程中出现的雷雨冰雹和降雪,以及晴空辐射后导致的霜冻,给云南经济和人民生活造成了极大影响。

3 “雷打雪”天气大尺度天气环流背景

2 月 28 日 08 时,500hPa 亚欧中高纬度维持两槽一脊型,南支槽东移到四川至高原东南侧,云南西偏南气流达 $28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上,槽后为 $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的西北气流控制,且槽后冷温度槽与高度槽交角接近 90° ,强冷平流推动 700hPa 切变增强南移,昭通南部至巴塘一带形成低涡切变,低涡中心位于西昌,滇中及以南西南急流维持。20 时,500hPa 南支槽东移到滇中,700hPa 切变南移到滇中昆明至贵州南部,低涡中心南移到滇中附近,西南急流位于滇南一带(图 2)。850hPa 冷高压中心在滇东,地面冷锋西进到哀牢山沿线。低涡切变强烈的辐合上升运动,以及高低层西南急流输送的大量水汽和不稳定能量,导致云南大部地区 28 日白天出现雷雨等强对流天气,夜间滇中及东部地区出现“雷打雪”复杂天气。29 日 08 时,随南支槽、切变

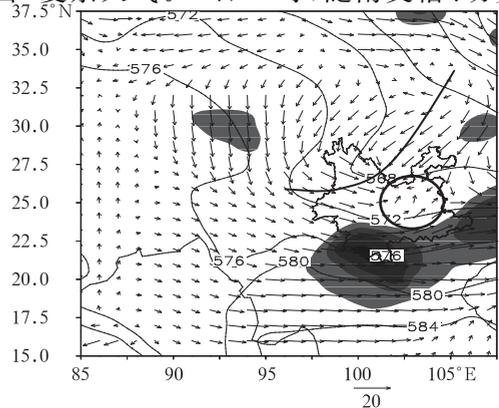


图 2 2008 年 2 月 28 日 20 时 500hPa 形势图
细实线为 500hPa 高度、槽线、箭头表示 700hPa 流场,
阴影区为 700hPa 风速 $\geq 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低空急流区,
椭圆型区为降雪、雷暴区

减弱东移,地面冷锋消失,云南转为西北气流,过程结束。

综上所述,500hPa 亚欧中高纬度稳定维持的两槽一脊型,脊前西北气流不断引导冷平流南下,促使 700hPa 低涡切变南移,低层冷高压推动冷锋西进增强,配合东移增强的南支槽前的西南暖湿水汽形成的西南低空急流,形成中空强烈的上升运动和水汽辐合,是此次复杂天气过程的天气环流背景。

4 “雷打雪”天气产生的物理机制

4.1 水汽及动力特征

分析 700hPa 逐时温度露点差变化发现,这次特殊对流天气的发生发展与潮湿的环境场密切相关。2月28日20时(图3),滇中处于湿度锋区之中,与西移至滇中的地面冷锋对应,地面昆明一带东北风达 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冷空气入侵的作用,一方面冷平流促使滇中气温迅速下降,利于近地层水汽凝结潜热释放冷凝成雪,另一方面促使湿度锋附近对流扰动发展,利于强对流天气产生^[5]。而锋面东侧由于低空急流产生的水汽输送,使云南境内哀牢山以东地区成为高湿区,温度

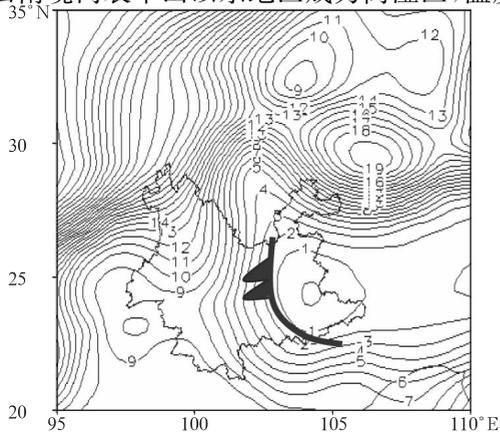


图3 2008年2月28日20时700hPa温度露点差分布
单位:℃,黑色齿状线为地面冷锋

露点差普遍低于 3°C ,气层接近饱和,较好的水汽输送叠置于低层冷空气之上,在锋面动力抬升作用下,为滇中夜间雨雪及冰雹等降水天气的产生创造了条件,此次“雷打雪”天气就发生在湿度锋区带上。

4.2 风场及稳定度特征

强对流是一种与湿过程相关的深对流,其中尺度抬升机制,来源于大气中的各种不稳定及不连续等,或是它们的综合作用。分析 $T-\ln P$ 图昆明 27—29 日风随高度变化的时间演变图(图4)发现,27—28日,昆明自低层到高层均为西南风,风速随高度增大,表明昆明存在深厚的西南暖湿气流,利于风暴过程输送能量和水汽。28日08时和20时的 -20°C 层高度分别为 478.7hPa 和 466.2hPa,一般认为, -20°C 层高度在 400hPa 等压面高度附近或以下有利于成雹^[6]。表明了本场处于强不稳定区内,有产生冰雹对流天气的可能。但相应时次昆明的 E_k 均为负的稳定能量区,大气呈对流性稳定状态,这种对流性稳定层结其实是低层冷空气活动的反映,表明在垂直方向上对流受到抑制。下面考虑倾斜方向大气稳定度情况。

根据文献[7],当上、下层风的切变 ϵ 与平均气流 $U = (u_1 + u_2)/2$ 之比大于 1.414 时,出现绝对斜压不稳定,用 $ABI = \epsilon - 1.414U$ 表示大气的斜压不稳定度。当 $ABI > 0$, 大气为绝对斜压不稳定,反之为绝对斜压稳定。分别取 u_1, u_2 为 500hPa、850hPa 纬向风速进行 ABI 沿 102°E 的时间演变计算(图5)。结果发现,自25日08时至29日08时, $23 \sim 27.5^\circ\text{N}$ 滇中区域一直处于 $ABI > 0$ 的斜压不稳定区,且 ABI 值逐渐增大,表明不稳定能量在增强。28日20时,滇中以北 28°N 附近处于 ABI 正负交界面,表明冷空气自北向南侵入,且等值线较密集, ABI 数值达到 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 不稳定能量达最强。根

据 ABI 定义,绝对斜压不稳定表示大气层具有足够强的垂直风切变,利于倾斜对流的发展,从而使低空上升运动加强,不断输送水汽和不稳定能量。正是锋面与急流的相互作用,促使产生强斜压不稳定,导致“雷打雪”天气发生。

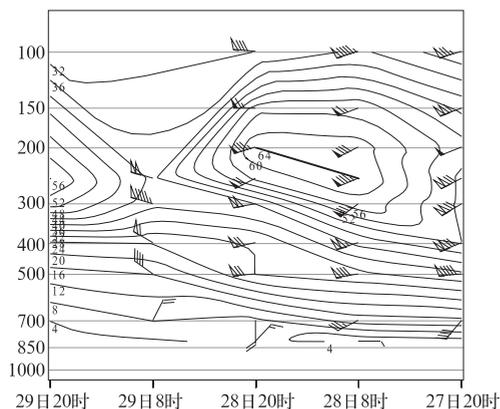


图4 2008年2月27—29日昆明探空风剖面图
单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

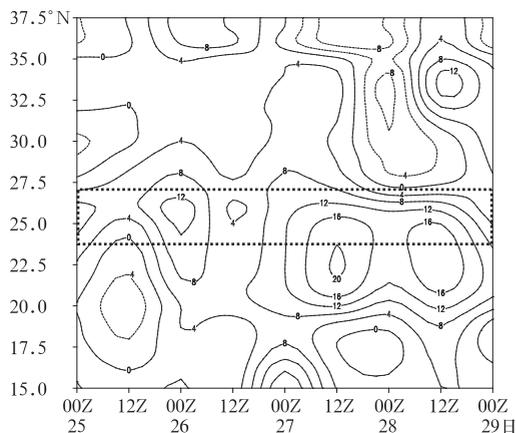


图5 ABI沿 102°E 的时间演变图
单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,矩形虚线区为雷打雪发生区

5 卫星云图中尺度特征

卫星云图和卫星探测资料能直观地反映出各种天气尺度系统的发生、发展和消亡过程。分析 FY-2C 红外云图和水汽图像发现,过程前高原东南侧有南支槽云系东移,2月28日20时起,东北西南向带状南支槽云

系东移至四川盆地,另在云南中部以南有明显的东北西南向宽广的低空急流水汽输送带向北伸展,输送大量不稳定能量和水汽。在低层切变低涡的激发下,南支槽云系分裂对流云团南下,红外云图和水汽图像均显示滇中有分散的点状中- γ 尺度对流云团生成,22时后逐渐聚拢增强,白亮云团更加密实,范围变宽。29日00—01时达到最强,滇中形成中- β 尺度对流云团(图6)。研究表明,在红外云图和水汽图像上都白亮的区域表明水汽深厚,对流强盛^[8]。可见,由于干冷空气入侵、西南暖湿不稳定气流辐合抬升的共同作用,触发滇中产生中- β 尺度对流云团,是这次过程的直接中尺度系统。

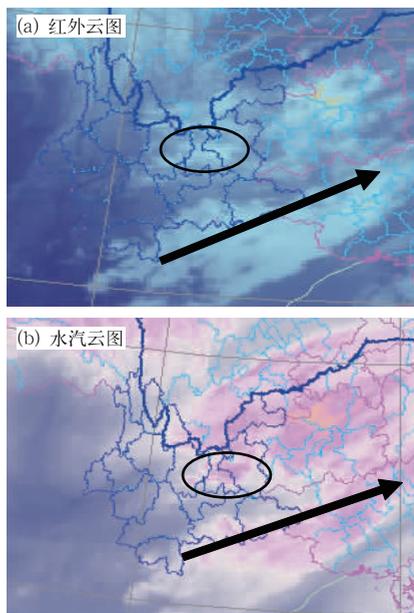


图6 2008年2月29日00时
FY-2C卫星云图

圆圈所示为雷打雪发生地的中尺度对流云团,黑色箭头表示低空急流区

6 “雷打雪”天气多普勒雷达中尺度特征

多普勒天气雷达能详尽地反映出降水区中小尺度天气系统发生、发展和演变的过程^[9]。我们对28日20时至29日03时昆明

CINRAD-CC 雷达回波资料进行分析,以寻求“雷打雪”天气发生的雷达回波中小尺度特征。

6.1 降雨回波特征

2月28日20:00—20:40, PPI上昆明西北侧有块絮状对流回波生成,随后增强弥合形成“人字形”带状回波,缓慢东移到昆明北侧。VPPI对应逆风区,表明低空有明显的辐合上升区,远离测站的高层为大面积正值下沉气流区,20:59昆明开始出现降雨。

21:09—21:14(图7a,见彩页),主体“人字形”带状回波东移南伸,范围变宽,南侧多块对流单体回波逐渐相连为块絮状;VPPI回波群自北向南为正—负—正—负交错排列,表明回波内对流辐合明显,其中昆明附近为3个圆形连成的团状负值上升区回波,中心强度达20~35dBz,表明该区域有中- γ 的MCS活动,且零线在近地层为“S”暖平流形式,高层零线为反“S”冷平流形式,高冷低暖的不稳定层结配置,使昆明降雨的同时,出现冰粒。

综上所述,滇中出现降雨期间, PPI“人字形”带状回波及块絮状回波, VPPI上逆风区、与中- γ 尺度MCS对应的团状回波形成,回波群正—负—正—负交错的多辐合排列,低层零线“S”形,高层为反“S”形,表明高冷低暖的不稳定层结配置,多个中小尺度对流辐合体回波系统产生滇中降雨。

6.2 雷暴及降雪回波特征

22:04,测站西侧NE—SW向带状回波发展,VPPI昆明附近出现逆风区。23:04絮状回波逐渐南移与昆明附近回波合并,逆风区范围加大向高层伸展,表明高层冷平流向低层渗透,并有强辐合运动,相应22:51—23:01出现冰雹,随后转为霰。23:10,VPPI近地层零速度线再次出现“S”型,并有“牛眼”结构(图7c,见彩页),表明低层暖平流加

强,暖湿水汽输送加大,同时地面最低温度下降为0.2℃,利于降雪云的发展,昆明出现阵性降雪。

23:39至29日00:00,昆明回波呈东西向排列为块絮混合结构,其南北两侧延伸出两个钩状回波结构(图7b,见彩页),VPPI显示测站附近逆风区的西南端60~150km处出现辐辏状负值区回波,VPPI上表现为一组与冰雹云下沉气流区方向相反的密集等风速线(图7d,见彩页)即有阵风锋^[10]。实况23:40至29日00:31,昆明北侧、西侧的测站出现雷暴,并伴有冰雹和雪,昆明本站降雪持续。1:12—1:28,VPPI低层再次出现“S”形零线暖平流,表明低层暖湿输送再度加强,1:25昆明由阵雪转为连续性小到中雪。

可见,滇中雷暴、冰雹天气发生时, PPI上有钩状回波和阵风锋出现,VPPI逆风区增强,范围向高层扩展。当降雪出现并加强时,近地层气温降至0℃附近, PPI上为强度20~25dBz的块絮混合的条状或片状回波,低层再次出现“S”形零线暖平流,为降雪提供了充足的水汽输送。

7 自动站要素的中尺度演变特征

由于边界层的环境条件受地形、日变化、风暴自身发展的影响,在时空上呈现明显的中尺度特征,使移经的雷暴强对流回波发生变化^[11]。另研究发现^[12],要素场能够反映中小尺度天气系统的生消变化,而且往往早于强对流回波的变化,对强对流回波的演变有一段超前时间。为此,我们分析昆明“雷打雪”期间自动站逐时气温(热量条件)、露点温度(湿度条件)、风场和气压要素的中尺度演变特征。

7.1 压、温、湿、风演变特征

“雷打雪”天气发生前,12—20时,昆明

由东南偏东风逆转为东北风,偏北风分量逐渐加大,表明冷平流增强补充,21时东北风风速增强达当日最大 $10.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相应温度和露点温度自20时开始增大,21时分别出现两个峰值,此次的增温增湿现象,是由于强烈的补偿下沉气流绝热增温而引起的。因相对湿度维持在77%左右,昆明出现降雨和冰粒。21时至29日03时,昆明为 $2 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东北偏北风,温度呈下滑趋势,00时降至 0°C 附近。露点温度于21时后下降,22—23时冰雹期间再次上升,23时出现露点锋。随着降雪的发生,露点温度降至 -0.5°C 左右,相对湿度上升达95%并维持。

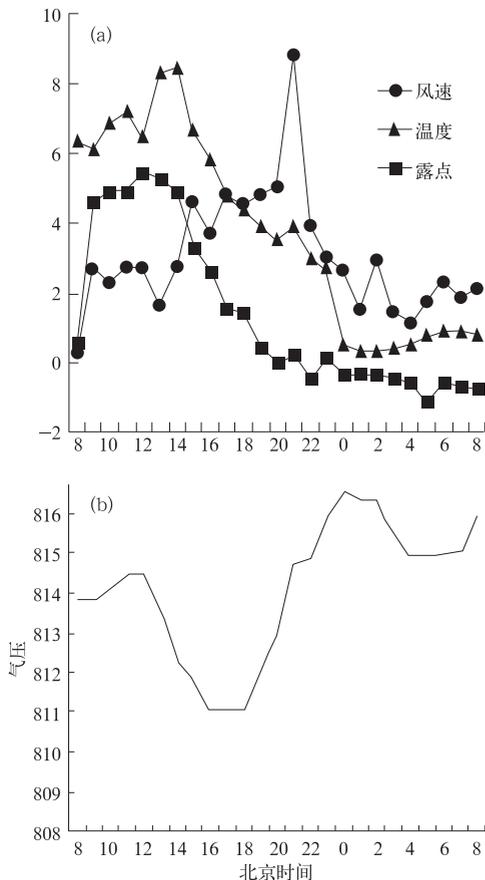


图8 2008年2月28日08时至29日08时昆明自动站要素变化

a. 风速、温度、露点,其中风速单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 温度、露点单位: $^\circ\text{C}$; b. 气压,单位: hPa

29日03—05时,昆明由东北风顺转为偏南、东南风,同时因降雪潜热释放,昆明温度维持在 0.5°C 左右,露点温度则稳定在 -0.5°C 左右。实况03时后昆明雷打雪天气停止,天空转晴(图8a)。

7.2 气压演变特征

雷暴高压属于中尺度高压的一种,常在成熟阶段雷暴的下方出现,是由微弱而浅薄的冷空气堆积而成的冷性高压。依据雷暴高压定义,雷暴过境时,气压自记曲线上出现圆顶或高峰,即为雷暴高压。分析昆明28日逐时气压变化(图8b),两次雷暴前气压值上升,雷暴过后气压下降,雷暴发生期间,即28日10—13时、22时至29日03时气压变化曲线分别出现圆顶或高峰值。

由上分析可见,雷暴发生前几小时,单站地面自动站要素增温增湿和增压,雷暴临近前1小时内,温度、气压出现峰值,且气压曲线显示为圆顶状的中尺度雷暴高压特征;风的变化则表现为风向呈逆时针旋转,偏北风增大并出现风速峰值。雷暴过境时,要素显示为降温增湿,出现露点锋。当雷暴减弱移过测站后,为缓慢增温减湿降压。

8 结论

(1) 500hPa 亚欧中高纬度两槽一脊型、700hPa 川滇低涡切变,配合东移增强的南支槽前的西南暖湿水汽形成的西南低空急流,是此次“雷打雪”天气的环流背景。

(2) 中- γ 尺度对流云团生成并逐渐增强为中- β 尺度对流云团是形成此次复杂对流天气的中尺度系统。

(3) 多普勒雷达回波显示出在早春冷环境条件下对流降水回波强度在 $20 \sim 33 \text{ dBz}$, PPI“人字形”回波、V型缺口冰雹云回波、阵风锋,VPPI的“S”型及“牛眼”结构的低空暖

平流、逆风区,揭示出不同短时天气现象交错发生时的中小尺度对流系统特征。

(4) 单站地面自动逐时要素演变特征能在一定程度上反映中尺度对流系统的影响和演变特征,对中尺度对流系统的跟踪监测具有一定的辅助作用。

参考文献

- [1] 王仁乔,宋清翠. “雷打雪”现象发生机制初探[J]. 气象,1980,16(3):45-48.
- [2] 王崇洲,贝敬芬. 一次暴雪、雨淞、冰雹天气过程的综合分析[J]. 气象,1982,18(4)48-50.
- [3] 丁栋生,李树林. 一次“雷打雪”天气的初步分析[J]. 气象,1983,(4):52-53.
- [4] 李新芳,李锡怀,方立清. 洛阳“雷打雪”现象发生机制分析[J]. 河南气象,1999,(1):23.
- [5] 李英,段旭. 冰雹天气下昆明准静止锋结构分析[J]. 云南气象,1998,18(4):36-39.
- [6] 刘贵萍. 两次强对流天气过程的对比分析[J]. 四川气象,2001,7(8):12.
- [7] 段旭,李英,周毅. 1997年春季滇南大风冰雹天气环境场分析[J]. 气象,1998,24(6):39-42.
- [8] 熊廷南. 长江三峡地区枯水期强降水过程的水汽图像[J]. 气象,1998,24(6):44-47.
- [9] 张培昌,杜秉玉,等. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社,2001:390.
- [10] 陆汉城. 中尺度天气学原理和预报[M]. 北京:气象出版社,2000:153.
- [11] 国家气象局天气预报警报管理司. 首次全国短时天气预报经验交流会议文集[M]. 北京:气象出版社,1991:35-36.
- [12] 王晓明,谢静芳,王侠飞. 强对流天气的分析及短时预报[M]. 北京:气象出版社,1992:171.

郭荣芬等：低纬高原罕见“雷打雪”中尺度特征分析

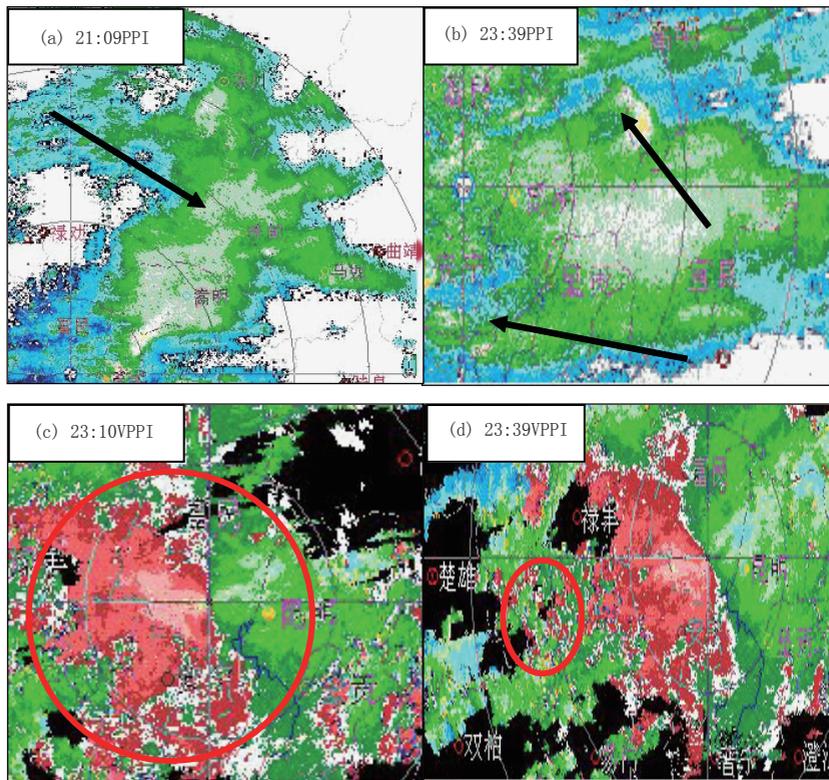


图 7 2008年2月28日“雷打雪”期间多普勒雷达回波特征
图a箭头所指为“人字型”回波，图b箭头所指为钩状回波，图c圆圈内为逆风区和低层零线“S”型，图d圆圈显示为阵风锋