

郑丽娜,靳军,万文龙.山东一次罕见“雷打雪”天气形成条件分析[J].暴雨灾害,2011,30(3):247-253

山东一次罕见“雷打雪”天气形成条件分析

郑丽娜,靳军,万文龙

(山东省东营市气象局,东营 257091)

摘要:利用常规观测、地面加密自动站以及卫星云图、多普勒天气雷达资料,对2010年2月28日山东省罕见“雷打雪”天气的发生发展条件进行了分析。结果表明:此次过程是在高空槽、切变线低涡、强低空西南急流及冷锋等天气系统相互作用下产生的;强对流天气发生前,对流层整层出现持续异常增温,为“雷打雪”提供了充足的能量积累;低空急流的建立为强降水区提供了充分的水汽供应;强对流天气发生在大气层结不稳定、冷锋携带冷空气南下的过程中;MCC是造成“雷打雪”过程的直接原因,冰雹、雷暴等天气出现在TBB低值中心及云团移动前沿TBB等值线密集区;雷达基本反射率因子图上出现“人”字形回波及强回波中心,地面形成中小尺度风速风向辐合区,对强对流天气落区预报有一定的指示意义。

关键词:雷打雪;形成条件;低空急流;层结不稳定

中图分类号:458.1+1 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2011)03-0247-07

Analysis of Formation and Development Condition for a Rare “Thunder-snow” Event in Shandong

ZHENG Li-na, JIN Jun, WAN Wenlong

(Dongying Meteorological Office of Shandong Province, Dongying 257091)

Abstract: The paper analyzes the formation and development of an unusual “thunder-snow” event on 28 February 2010 in Shandong province by using the conventional data, intensive observation of automatic weather station, satellite images, Doppler-Radar data etc. The results show that interaction of westerly trough, vortex with shear line, strong southwesterly low-level jet and cold front resulted in the event. Before the severe convective weather, there was unusual sustained increasing of temperature in troposphere, which provided sufficient energy accumulation for the occurrence of “thunder-snow”. The low-level jet supplied sufficient water vapor for the strong precipitation area. The occurrence of severe convective weather attributed to unstable atmospheric stratification and cold front with cold air moving southwards. MCC was the direct cause which leads to “thunder-snow” event, and severe weather such as hail and thunderstorm emerged in the great negative value center and isoline dense areas of TBB in front of moving cloud clusters. The band echo with the shape of “人” and its strong center detected from the PPI screen and the meso- and micro-scale convergence zone of wind speed (direction) in ground layer had a certain significance to forecast distribution of strong convective weather.

Key words: thunder-snow; formation condition; low-level jet; unstable atmospheric stratification

0 引言

对全国各地的强对流天气,过去已有较多研究。王莉萍等^[1]和李姝霞等^[2]分析了强对流天气发生的大尺度环流背景及触发机制;尤红等^[3]分析了低纬高原两次强对流天气的云图及雷达回波特征。也有人侧重强对流中不同种类的灾害性天气研究^[4-6],分析诸如飏

线、雷暴、大风等灾害性天气的触发和维持机制。以上研究都是针对出现在春夏季的强对流天气个例。在山东地区,强对流天气一般始于4月份,通常伴有大风、雷暴、冰雹等灾害性天气。然而,2010年2月28日山东发生一次罕见“雷打雪”天气过程(以下简称“10.2”山东“雷打雪”过程),山东境内先后出现小雨、雷暴、霰、冰雹、冻雨、雪,且降水达到暴雪量级,给山东部分市县造

收稿日期:2011-02-10;定稿日期:2011-08-23

资助项目:山东省气象局重点科研课题“梯度风资料同化在山东省沿海海域风场中的应用”(2010sdqx18)

第一作者:郑丽娜,女,1971年生,高级工程师,主要从事短期天气预报。E-mail: dyzln@yahoo.com.cn

成严重灾害。这种“雷打雪”现象在山东较罕见。

20世纪90年代,国内学者^[7-8]对“雷打雪”现象有过初步分析,认为上干冷、下暖湿是其出现的大尺度背景。近10年来,随着气象探测手段和数值预报模式日益发展,对发生在冬末春初的“雷打雪”强对流天气分析更加深入。如郭荣芬等^[9]对2008年2月28日夜至29日凌晨发生在低纬高原云南的“雷打雪”现象进行了综合分析,指出强对流天气发生在急流与锋面相互作用的湿度锋区内斜压不稳定环境中。与之不同的是,“10.2”山东“雷打雪”过程是“边打雷并伴随冰雹等强对流天气,边下雪”,这种现象在北方非常罕见。因此,本文利用多种探测资料,对山东“雷打雪”过程的发生发展条件进行分析,以期找到若干先兆,为今后预报这类特殊强对流天气提供参考依据。

1 过程概述

2010年2月10—27日,山东未出现过有效降水,温度持续偏高,23日除山东半岛外,大部地区日最高气温在20~22℃之间。受高空槽、低涡切变线及地面

冷锋和气旋共同影响,28日最高气温开始下降,从当日08时(北京时,下同)起,鲁南陆续出现降水;14时,鲁中以南大部地区出现雷暴,降水性质由小雨转为阵雨,临沂、泰安、济南、聊城、淄博、潍坊部分地区出现冰雹和霰,冰雹直径最大达11mm,且聊城冠县、济南临清、夏津与东营河口等地出现雨凇(图1b);17时,随着冷锋南压,鲁中以北雨转雪;20时,除鲁南个别地区外,全省大部地区转为雪,此时地面冷锋携带的冷空气已进入江淮流域倒槽,形成明显的风向辐合中心。3月1日02时,倒槽发展成气旋,随后向东北方向移动,山东境内降水进一步加大。2月28日08时—3月1日08时全省平均降水量14.0mm,其中青州最大达34.0mm(图1a)。积雪深度基本在5cm以上,最大积雪深度(21cm)出现在栖霞。全省自南向北先后出现小雨、雷暴、霰、冰雹、冻雨,后转为雪并达暴雪量级,其中雷暴、冰雹等强对流天气出现在2月28日10—17时,降雪出现在28日17时—3月1日11时。此次突发性强对流和暴雪天气造成潍坊、淄博、滨州、烟台等市直接经济损失约12亿元。

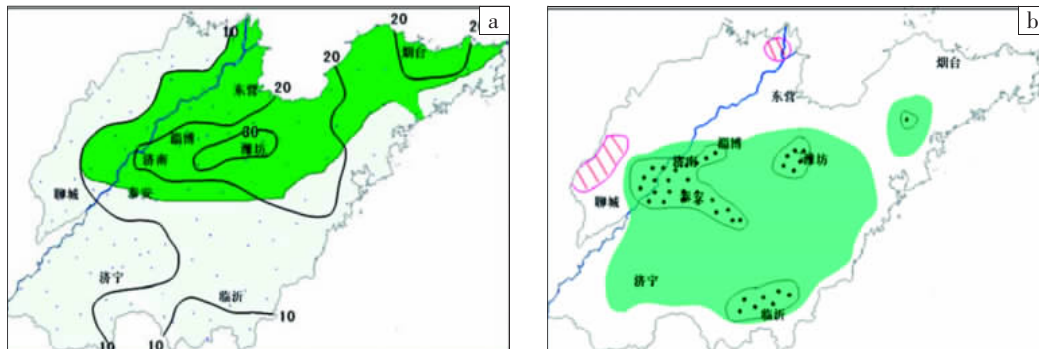


图1 2010年2月28日08时—3月1日08时山东省降水量分布(a,单位:mm)与28日强对流天气分布(b)

图a 阴影区为暴雪区;图b 阴影区为雷暴区,圆点区为冰雹区,斜线区为冻雨区

2 大尺度环流背景

图2是2月28日环流形势图。从中可见,28日08时(图2a),500 hPa中纬度地区为纬向环流,多小波动,南支槽较为活跃,槽前西南气流发展旺盛;850 hPa在四川境内有西南涡生成,涡前有暖切变;另外,在华北南部有一条东北—西南向切变线,切变线东侧低空急流已建立,急流轴上有 $24\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风核,风速在鲁南辐合,大量水汽在此聚集,鲁南开始出现降水;地面图上(图略),冷锋位于黄河口附近,锋后是冷高压,锋前为地面倒槽;随着冷锋逐渐南压,冷暖空气在山东交汇,激发强烈不稳定能量释放,导致强对流天气。20时(图2b),500 hPa西风槽在东移过程中加深;850 hPa低空急流引导孟加拉湾和南海暖湿空气向山东输送,

鲁南出现风速辐合,造成鲁南近地层减压,在切变线上诱生出低涡;地面图上(图略),冷锋继续南压,携带强冷空气从山东进入江淮流域,所经之地近地层温度明显下降,降水性质由雨转雪。

3月1日02时,长江口附近形成地面气旋,随后气旋在高空引导气流的作用下向东北方向移动,鲁中、山东半岛正好处于气旋移动方向左前方的偏东气流中,海上水汽源源不断向山东半岛输送,造成暴雪及海上大风天气;11时后,气旋东移,降雪结束。

3 “雷打雪”天气的形成条件

3.1 热力条件与水汽条件

2010年2月11—27日,山东境内温度持续偏高。其中23日,除山东半岛外,大部地区日最高气温20~22℃,

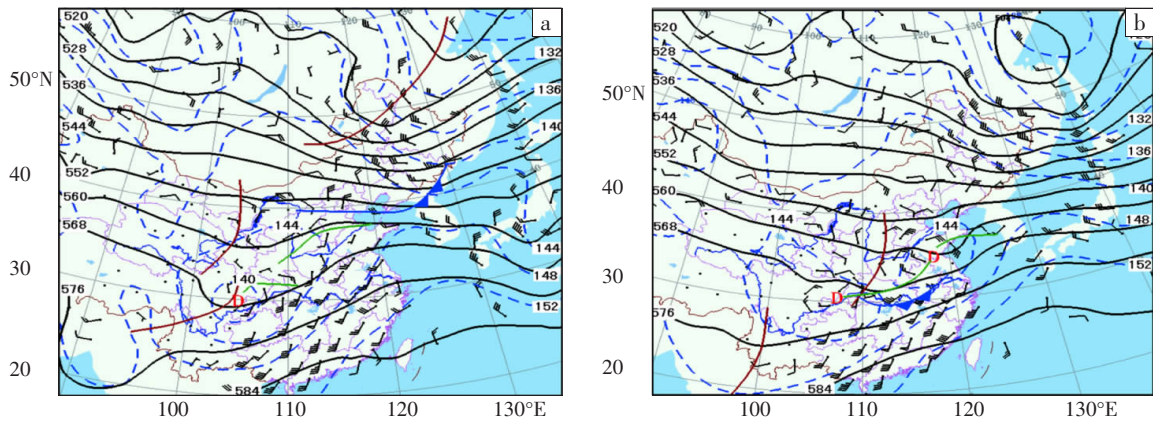


图 2 2010 年 2 月 28 日 08 时(a)、20 时(b)天气系统综合配置图(单位:dagpm)

点实线为 500 hPa 高度场;蓝虚线为 850 hPa 高度场;棕色线为 500 hPa 槽线;

绿线为 850 hPa 切变线;风矢为 850 hPa 风场

特别是东营站 (37.43°N, 118.67°E), 2 月中下旬常年 (1971—2010 年)日最高气温平均仅 5~7 °C, 而 2010 年同期日最高气温平均达 9 °C, 23 日最高气温达 21.7 °C。2 月 22 日以来, 对流层逐渐升温, 总体上低层增温幅度高于高层, 南部高于北部。说明此次“雷打雪”过程前山东地区已有大量不稳定能量积累。28 日, 随着冷空气自低层侵入山东, 气温大幅下降, 强迫暖湿空气沿着锋面抬升, 能量迅速释放, 激发雷暴、冰雹等强对流天气。由此可见, 前期低层异常增温对这一季节强对流天气的产生提供了有利的热力条件。

结合 T639 数值模式提供的 K 指数场的分析可知 (图略), 28 日 08 时, 沿着低空西南急流自西南向东北方向有一个狭窄 K 指数高能舌一直伸向鲁中地区, 从

鲁中到鲁南 K 指数在 8~20 °C 之间; 当日 11 时, K 指数高能舌近似呈南北向, 其轴线穿过临沂、潍坊等地, 该地区 K 指数也增至 12~24 °C, 强对流天气出现在 K 指数高能舌轴附近及其左侧 K 指数等值线密集带。

要产生强降水, 需有充分的水汽供应; 强降水过程一般都伴有低空急流, 即 850 hPa 或 700 hPa 等压面上存在 $\geq 12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的极大西南风速带^[10]。此次“雷打雪”过程强降水发生前的 28 日 08 时 (图 2a), 850 hPa 已建立最大风速达 $24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低空急流。为分析强降水发生前山东地区水汽垂直分布, 图 3 给出采用 T639 数值模式提供的有关物理量资料所作的沿 118°E 经最大降水中心青州(36.7°N、118.4°E)附近的相对湿度经向剖面。

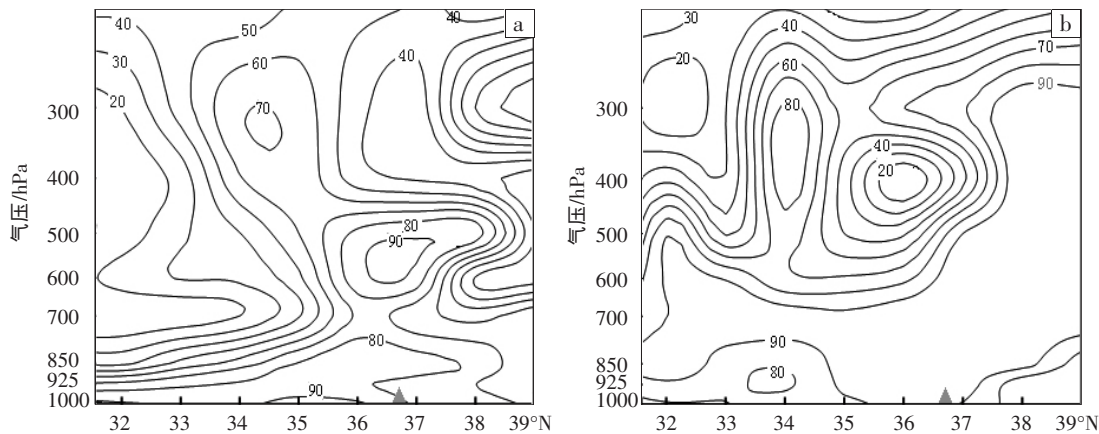


图 3 2010 年 2 月 28 日 08 时(a)、20 时(b)沿 118°E 经最大降水中心

青州(▲所示)附近的相对湿度(单位:%)经向剖面

从图 3 中可见, 强对流天气发生前的 28 日 08 时 (图 3a), 在 35°—38°N, 从地面到 400 hPa 有两个高湿中心, 一个位于 900 hPa 附近, 一个位于 550 hPa 附近, 相对湿度均在 90% 以上, 低层湿中心范围小于高层; 780—620 hPa 层, 南北两侧各有一干舌, 相对湿度仅为 30%, 呈南北夹击之势嵌入湿层中间, 在垂直结

构上气层呈现下湿、中干、上湿特征。这种低层暖湿空气与中层干空气同时输送到同一地区的气柱中, 则是形成强烈位势不稳定层结、酿成强对流天气的重要原因^[11]。到 20 时 (图 3b), 相对湿度高值区不再呈垂直分布, 而呈从南向北倾斜分布。山东境内高湿区基本在 650 hPa 以下, 650 hPa 以上则是整层的强干区, 干区

中心在 400 hPa 附近,相对湿度仅 20%,这种层结不再是气柱内干湿空气的对比,而是天气尺度系统占主导地位,其结构更有利于产生较大范围的雨雪天气。

3.2 层结稳定度分析

假相当位温(θ_{se})是在大气的干、湿绝热过程中均守恒的一个重要特征参数,其垂直分布可反映大气的对流性不稳定^[12]。本文利用 T639 数值模式提供的物理量场资料,选取山东境内从北到南三个站点东营、济南、济宁(位置见图 1)计算 θ_{se} 垂直差。考虑到 850 hPa 与 500 hPa 假相当位温差特征不明显,本文改为计算 2 月 28 日各时次三站 500 hPa 与 700 hPa 的 θ_{se} 之差 ($\Delta\theta_{se}=\theta_{se500}-\theta_{se700}$),其结果见表 1。

表 1 2010 年 2 月 28 日各时次部分站点 700 hPa 与 500 hPa 的 θ_{se} 之差($\Delta\theta_{se}$)

站名	$\Delta\theta_{se}/^{\circ}\text{C}$				
	08 时	11 时	14 时	17 时	20 时
东营	3	1	1	3	12
济南	0	-1	-1	7	11
济宁	-4	-5	-3	4	2

从表 1 中可见,28 日 08—20 时,东营站 $\Delta\theta_{se}$ 均大于 0 $^{\circ}\text{C}$,说明该站大气层结稳定。济南站 08 时 $\Delta\theta_{se}$ 等于 0 $^{\circ}\text{C}$,表明此时该站上空大气为中性层结;11—14 时, $\Delta\theta_{se}$ 等于 -1 $^{\circ}\text{C}$,其层结变为不稳定,该站强对流天气就出现在该时段;17—20 时, $\Delta\theta_{se}$ 转为正值,且正值随时间推移越来越大,说明层结变得越来越稳定。济宁站从 08—14 时 $\Delta\theta_{se}$ 均为负值,说明其层结在此

阶段一直处于不稳定状态,与该地强对流天气出现时段吻合;17 时以后, $\Delta\theta_{se}$ 转为正值。上述 3 站可近似代表山东省北部、中部和南部。从其 $\Delta\theta_{se}$ 变化中可看到,强对流之所以出现在鲁中以南,是因为这些地区大气层结不稳定,且鲁南不稳定强度大于鲁中,强对流天气集中出现在 11—14 时;17 时后,山东境内层结趋于稳定,强对流天气结束,转为稳定性降水。

另外,从济南 2 月 28 日不同时次温度对数压力图可见,08 时(图 4a),627—500 hPa 之间假相当位温从 47 $^{\circ}\text{C}$ 降至 41 $^{\circ}\text{C}$,出现对流不稳定,-20 $^{\circ}\text{C}$ 层高度在 480 hPa,这与郭荣芬^[9]分析的云南“雷打雪”过程时得出的冰雹出现时 -20 $^{\circ}\text{C}$ 层高度在 460—480 hPa 的结论类似;此时,0 $^{\circ}\text{C}$ 层高度在 1675 m,与文献[10]中总结的“春末夏初出现冰雹时 0 $^{\circ}\text{C}$ 层在 4 km 上下”的结论有差异,这可能与地域、季节、强天气的强度有关。20 时(图 4b),对流不稳定层出现在 550—451 hPa 之间,该层次假相当位温从 48 $^{\circ}\text{C}$ 降至 43 $^{\circ}\text{C}$, -20 $^{\circ}\text{C}$ 层高度在 460 hPa 附近。从垂直层结上看,08 时,800 hPa 温度为 -1 $^{\circ}\text{C}$,780 hPa 为 3 $^{\circ}\text{C}$,500 hPa 为 -18 $^{\circ}\text{C}$,初步形成高层为冰晶层,中间为融化层,低层为过冷却水层的层结结构,这种层结与出现雨淞时的层结特殊要求^[10]一致。到 20 时,500 hPa 温度达 -16 $^{\circ}\text{C}$ (为冰晶层),700 hPa 附近是相对暖层,850 hPa 以下是过冷却水层,虽其垂直层结与 08 时的相似,但由于冷空气入侵,700 hPa 到地面层温度普遍降至 0 $^{\circ}\text{C}$ 以下,已不具备雨淞形成条件。因此,20 时之后降水表现为纯雪。

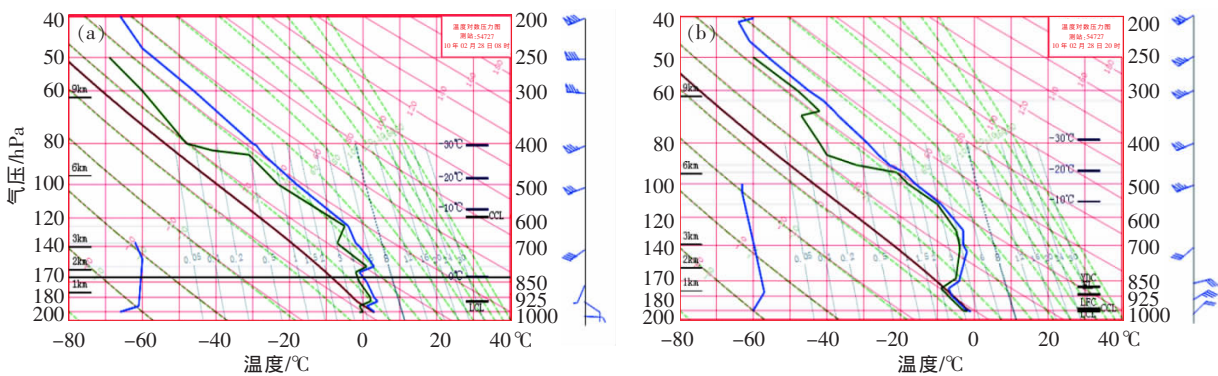


图 4 济南站 2010 年 2 月 28 日 08 时(a)、20 时(b)温度对数压力图

在具备层结不稳定条件后,还需要有适当的触发机制,强对流天气才能发生。利用 T639 提供的数值预报产品,分析 28 日不同时次低层 850 hPa 垂直速度场(图略)表明,08 时山东省均处在上升运动区,济南附近有一 $-12 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的上升运动中心;到 11 时,鲁中以南地区上升运动明显增强,垂直速度在 $-24 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,实况对应鲁南开始出现阵雨;11—17 时,鲁南上升运动强烈发展,并在济南到济宁之间形成上

升运动中心,其中心值达 $-72 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实况表明,此次过程强雷暴发生在 850 hPa 垂直速度场 $-36 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 等值线包围区域,冰雹则发生在 850 hPa 垂直速度场 $-48 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 等值线包围区域。

4 卫星云图与雷达回波特征

卫星云图能直观反映各种天气尺度系统的发生、发展和消亡过程。分析 2 月 28 日不同时刻韩国

STMAT-CCT 卫星云图发现,降水开始前,配合低层切变线,河南有云系向东北伸展,28 日 08 时(图略),呈东北—西南向的长条状切变线云系在低空西南急流的引导下进入鲁南,造成鲁南弱降水。随着南方暖湿气流不断输送并在鲁南产生辐合,切变线上有对流云团发展。12 时 30 分(图略),位于切变线上的河南及附近地区出现三个发展比较旺盛的中尺度云团,并呈聚拢之势,其中心云顶亮温 TBB 达 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,初步形成一中尺度对流云团。随后,该系统在高空引导气流的作用下,一边向东北方向移动,一边逐渐合并增强。14 时 30 分(图 5a),随着黄河口冷锋携带冷空气南下,与南方暖湿气流在山东交汇,中尺度对流云团进一步发展增强,云区边界 TBB 线密集,其中心 TBB 降至 $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$,且冷云中心类似“T”形,说明云顶高低错落,云内对流

活动非常旺盛。雷暴、冰雹和霰等天气现象就发生在云团移动方向的 TBB 线密集区及强冷区中心云团范围内。Maddox 定义的 MCC 标准为^[13]: $TBB \leq -32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的连续云罩面积 $>10^5\text{ km}^2$, 且 $TBB \leq -52\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的连续云罩面积 $>5 \times 10^4\text{ km}^2$ 。按照上述标准,此时,覆盖山东的云系已发展成 MCC。随着强对流天气爆发,能量快速释放,17 时(图 5b), $TBB \leq -55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷云区偏于云团东南侧,而在云团西侧和北侧, TBB 趋于均匀,说明此处云团控制区域降水性质由对流性降水转为稳定性降水,实况是鲁中以北已转为降雪。20 时(图 5c),云团控制鲁中以东地区,云顶亮温在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,云顶变得非常均匀,实况对应该地降雪正盛。可见,北方南下的冷空气与低空急流输送的暖湿空气共同作用形成影响山东的 MCC 是这次“雷打雪”过程产生的直接原因。

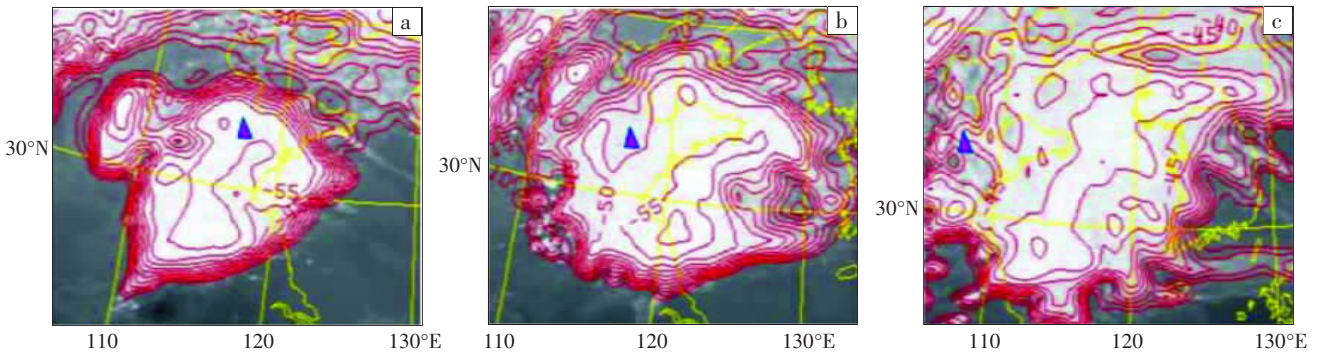


图 5 2010 年 2 月 28 日 14:30 (a)、17:00 (b)、20:00 (c)韩国 STMAT-CCT 卫星云图(▲ 为强天气中心)。单位: $^{\circ}\text{C}$

多普勒天气雷达能详尽反映出中小尺度天气系统的发生、发展和演变过程。本文使用济南多普勒天气雷达回波资料,分别对 2 月 28 日济南降水时段(10:20—13:30),霰并伴有雷暴时段(13:38—14:16)、所辖区域出现冰雹时段(14:35—14:40)及降雪时段(14:16 后)的雷达回波特征进行分析。图 6 给出 2010 年 2 月 28 日不同时刻济南和临沂多普勒雷达图像。

降水时段(10:20—13:30),10:20(图略),济南上空有稳定性层状云降水回波移入,强度在 10 dBz 左右,实况济南出现较均匀的弱降水;此时 850 hPa 总温度平流场上(图略),山东为暖平流,以合肥为中心其强度达 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的暖平流一直向北伸展到山东境内,受其影响,山东南部出现暖区弱降水。12:54(图 6a),济南上空层状云降水回波特征没有改变,但在其南侧 80 km 外有混合型层状云降水回波北移,其回波中心强度达 40 dBz,该回波在高空引导气流作用下向偏北方向移动,逐渐靠近济南站,此时该站近地层开始有弱的冷平流侵入,其上空云层由层状云转为积状云。从 13:38(图略)开始,有冷空气随冷平流自近地层不断向济南输入,使其上空暖空气被抬升,造成该站大气层结非常

不稳定,促发雷暴和霰等强对流天气。14:35(图 6b),强回波已移到济南东南方 40 km 的区域,强回波近似“人”字形,在“人”字形中间部位回波强度最强,达 53 dBz,比云南出现“雷打雪”前强对流阶段的回波强度(45 dBz)^[9]还要强,回波单体发展如此旺盛在初春季节实属罕见。由于初春济南雷达站无体扫资料,选取同样出现强对流天气的临沂站体扫资料分析回波顶高。15:42(图 6d),该站 35 dBz 强回波高度接近 4 km,此时该站 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 层高度在 1.5 km 左右,说明对流体存在强上升气流;整个强回波呈柱状,40 dBz 以上的回波高度在 2 km 附近,对流体中冰雹等固体降水物已开始下降,随后该地出现冰雹、雷暴等强对流天气。随着强回波 15:34 逐渐移出观测范围(图 6c),该站强对流天气结束,雷达图上呈现大片 25 dBz 左右层状云降水回波,济南降水转入稳定性层状云降雪阶段。

以上分析表明,济南“雷打雪”天气发生时,对流云团由南侧向北移,这与低层暖湿空气向北推进有关;云系在移动过程中,前沿边界清晰,发展旺盛,在济南附近出现“人”字形回波结构,中心强度达 53 dBz,与该地冰雹、雷暴等强对流天气相对应;强对流天气结

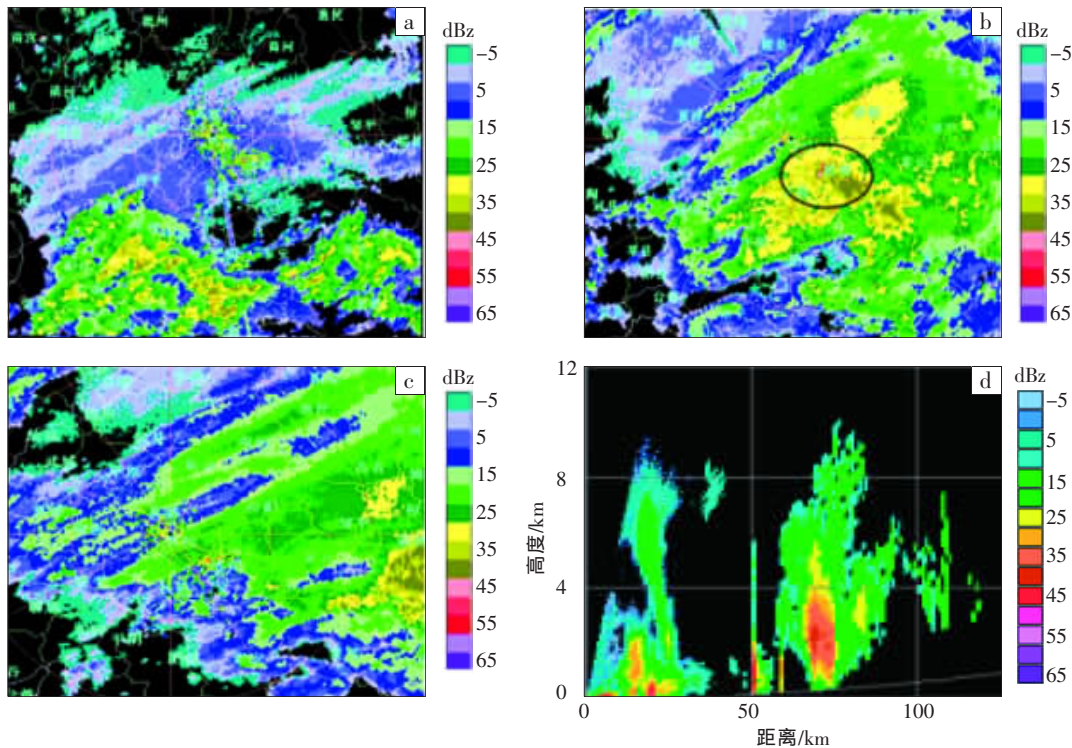


图 6 2010 年 2 月 28 日 12:54 (a)、14:35 (b, 黑圈所示强回波中心)、15:34 (c)

济南多普勒雷达图像与 15:42 (d) 临沂多普勒雷达图像

济南站: 平面扫描, 扫描半径 50 km, 仰角 0.5°; 天线位置: 116°46'51"E, 36°48'10"N; 海拔高度: 72.9 m

临沂站: 体积扫描, 扫描方位 200.4°, 量程 250 km; 天线位置: 118°20'52"E, 35°3'3"N; 海拔高度: 184.2 m

束后, 雷达回波逐渐转为稳定性层状云降水回波。

5 自动站要素中尺度特征

为了揭示自动站要素场对中小尺度天气系统生消变化的反映, 分析济南“雷打雪”期间自动站逐时气温(热量条件)、露点温度(湿度条件)和气压要素的中尺度演变特征(图 7)。济南站气压从 27 日 20 时开始略有上升, 到强对流天气影响该站前的 28 日 08—11 时气压呈直线上升, 同时气温下降, 露点温度略有上升, 说明雷暴高压正在逼近该站; 当日 11—14 时强对流天气影响济南期间, 该站气压陡然下降, 气温、露点随之明显下降, 风向由 11 时前的西北风突然转为东风; 14—17 时, 该站强对流天气已结束, 转入稳定性降雪时段, 该时段气压维持较低, 温度、露点低于 0℃。

图 8 给出 2010 年 2 月 28 日不同时次山东省地面加密自动站风场变化。从中可见, 28 日 12 时(图 8a), 近地层冷空气取东北路径侵入山东, 山东境内大部地区吹东北风, 以黄河为界, 河西东北风风速明显大于河东。鲁中以南平均风速为 2~4 m·s⁻¹, 并在济宁以东形成一风速风向辐合区, 预示对流天气将从鲁南开始。随着冷锋逼近, 14 时(图 8b), 山东北部东北风风速达 6 m·s⁻¹ 以上, 明显大于鲁中及以南地区, 且在济南附近又形成一风向风速辐合区, 该辐合区风

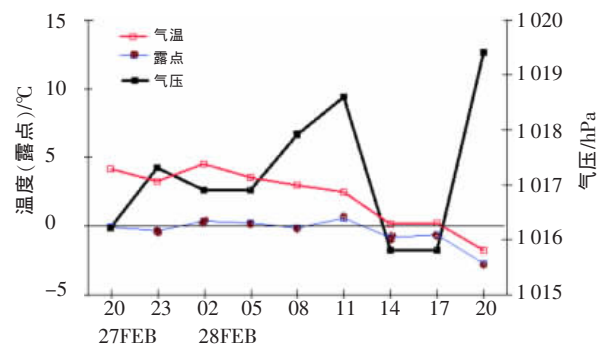


图 7 2010 年 2 月 27—28 日济南站气温、露点、气压变化

速大都在 4~6 m·s⁻¹, 明显大于 12 时鲁南辐合区的风速(2~4 m·s⁻¹), 这说明随近地层辐合增强, 上升运动也将增强, 对流活动将趋剧烈。实况是在辐合区南部与东南部出现强对流天气。随后, 该辐合区缓慢向东南方向移动。17 时(图略), 辐合区到达泰安和莱芜附近, 范围略有缩小, 但风速由 14 时的 4 m·s⁻¹ 增大为 6 m·s⁻¹。此后, 该辐合中心减弱消失。辐合中心所经之处先后出现雷暴、冰雹等强对流天气。20 时(图 8c), 在东北气流里, 潍坊青州附近形成一 6 m·s⁻¹ 的风速辐合中心, 再加上此地处于鲁中山区北坡, 受地形抬升以及辐合中心的作用, 导致这一地区产生强于其他地区的上升运动, 且辐合中心在此维持 4 h, 造成 34 mm 暴雪。



图8 2010年2月28日12时(a)、14时(b)、20时(c)山东省地面加密自动站风场
箭头线所示为冷空气路径;圆圈所示为中尺度辐合区

6 小结

(1) 500 hPa 高空槽东移,850 hPa 切变线诱发低涡,配合强盛西南暖湿气流,地面冷锋和风辐合触发不稳定能量释放,是这次“雷打雪”过程有利的大尺度环流背景。

(2) 前期异常增温为“雷打雪”过程提供了充足的能量积累;低空急流的建立为强降水提供了充沛的水汽供应,层结不稳定使强对流天气发生成为可能。

(3) MCC 是造成山东“雷打雪”过程的直接原因,冰雹、雷暴等强对流天气发生在 *TBB* 低值中心及云团移动前沿 *TBB* 等值线密集区,最强天气出现在 MCC 成熟期。

(4) “雷打雪”天气发生时,对流回波整体向东北方向移动,出现“人”字形回波,这对冰雹、大风等强对流天气发生具有一定的指示意义;同时,回波强度达 53 dBz,这在冬末春初非常罕见。

(5) 随冷锋逼近,近地面先后形成3个风速风向辐合区,辐合区维持和移动造成所经之地先后出现雷暴、冰雹、暴雪等灾害性天气。

参考文献:

[1] 王莉萍,张湃,崔晓东,等.一次后倾槽型冰雹天气过程演变的诊断分

析[J].暴雨灾害,2010,29(3):239-244.

[2] 李妹霞,张宇星,张怡,等.豫东地区一次强飏线天气过程的综合分析[J].暴雨灾害,2011,30(1):57-63.

[3] 尤红,肖子牛,王刚平等.低纬高原两次特殊灾害性强对流天气过程分析和比较[J].暴雨灾害,2010,29(3):216-213.

[4] 陈业国,农孟松,黄海洪,等.一次华南强飏线过程的数值模拟分析[J].气象,2009,35(9):29-32.

[5] 廖晓农,于波,卢丽华.北京雷暴大风气候特征及短时临近预报方法[J].气象,2009,35(9):18-24.

[6] 胡玲,郭卫东,王振宇,等.青海高原雷暴气候特征及其变化分析[J].气象,2009,35(11):64-68.

[7] 王仁乔,宋清翠.“雷打雪”现象发生机制初探[J].气象,1999,16(3):43-45.

[8] 丁栋生,李树林.一次“雷打雪”天气过程的初步分析[J].气象,1994,19(10):51-53.

[9] 郭荣芬,鲁亚斌,高安生,等.低纬高原罕见“雷打雪”中尺度特征分析[J].气象,2009,35(2):49-56.

[10] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法[M].北京:气象出版社,2007.

[11] 曹钢锋,张善军,朱官忠,等.山东天气分析与预报[M].北京:气象出版社,1988.

[12] 赵世发,周军元,王俊,等.一次罕见的特大暴雨物理量场的特征分析[J].南京气象学院学报,2002,25(2):271-276.

[13] 马鹤年.省地气象台短期预报岗位培训教材[M].北京:气象出版社,1998:146-148.