

杨晓霞, 吴炜, 万明波, 等. 山东省两次暴雪天气的对比分析[J]. 气象, 2012, 38(7): 868-876.

山东省两次暴雪天气的对比分析^{*}

杨晓霞¹ 吴 炜¹ 万明波¹ 孙长征² 王文青¹ 刁秀广¹

1 山东省气象台, 济南 250031

2 山东省济南市气象台, 济南 250031

提 要: 应用常规天气图资料、探空资料、加密自动站观测资料、地基 GPS/MET 遥感大气水汽观测资料、卫星云图、多普勒雷达观测资料和 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料, 采用诊断分析和对比分析方法, 对山东省 2009 年 11 月 11—12 日和 2010 年 2 月 28 日两次暴雪天气的水汽、热力、动力条件和中尺度特征进行对比分析。结果表明, (1) 两次暴雪都是受高空槽影响产生的, 700 hPa 附近有较强的偏南气流向暴雪区输送暖湿空气, 整层大气高湿近于饱和, 中低层有逆温, 整层温度 $\leq 0^\circ\text{C}$; 暴雪产生在 700~500 hPa 槽前西南气流前部、850 hPa 东北风与东南风辐合的区域, 近地面层都为东北风。(2) 不同点是, 前次暴雪过程中低层先有冷空气影响, 然后中高层暖湿气流北上, 中低层能量低, 以稳定性降雪为主, 持续时间长; 后次暴雪过程中, 先是中低层暖湿气流北上, 而后强冷空气从低层楔入, 低层形成低涡, 地面形成气旋, 中低层对流不稳定, 对流发展, 降雪强度大, 持续时间短。(3) 暴雪期间 GPS/MET 水汽监测的可降水量在 20 mm 左右, 对降雪量有一定的指示性。加密自动站观测中温度 0°C 线是雨、雪的分界线, 有助于判别降水的形态。

关键词: 暴雪, GPS/MET 水汽监测, 地面温度加密观测, 形成条件, 诊断和对比分析

A Comparative Analysis of Two Snowstorms in Shandong Province

YANG Xiaoxia¹ WU Wei¹ WAN Mingbo¹ SUN Changzheng² WANG Wenqing¹ DIAO Xiuguang¹

1 Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031

2 Jinan Meteorological Observatory of Shandong Province, Jinan 250031

Abstract: By using conventional weather chart data, sounding data, densified automatic weather station (AWS) data, ground-based GPS/MET remote sensing observation data of atmospheric water vapor, satellite cloud images, Doppler radar observations and the NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, the water vapor, thermal and dynamic conditions and the mesoscale characteristics of two snow storms in Shandong Province during 11 to 12 November in 2009 and 28 February in 2010 were comparatively analyzed by using diagnostic methods. The results have shown: (1) The two snowstorms were caused by upper-level trough. There were warm and weter advection transported by stronger southwesterly flow at about 700 hPa. All atmospheric levels were near saturated. There were inversion temperatures in the middle-low level. The all level temperatures were less than 0°C . The snowstorm occurred in the front of southwest airflow in the 700—500 hPa trough and the converged region of the northeasterly and southeasterly at 850 hPa. Northeasterly winds were prevailing in the surface layer. (2) There were different characters in the two snowstorms. In the November 2009 snowstorm, there was the cold air influenced firstly then the warm and wet airflows run into middle-high levels, thus lower energy was stored in low levels, forming a stable heavy snow with longer duration. But in the February 2010 snowstorm, the warm and wet airflows inflowed firstly, then the cold air run into low levels. The vortex formed in low levels and cyclone came into being in the surface. There was convective instability in middle-low levels so that convection developed,

* 山东省科技发展计划项目(2010GSF10805)、山东省气象局重点项目(2010sdqxz10)和山东强对流天气落区预报方法研究(2010sdqx04)共同资助

2011 年 3 月 24 日收稿; 2011 年 10 月 17 日收修定稿

第一作者: 杨晓霞, 主要从事暴雨(雪)、强对流等灾害性天气形成机制的研究. Email: yxxjn@163.com

a snowstorm with great snowfall intensity and short duration occurred. (3) In two snowstorms, the GPS/MET precipitable water vapor were observations all about 20 mm, which can be an indicator for snowfall amount. The 0°C isolines of the temperatures observed by densified AWS were the boundary between rains and snows, which can help distinguish the precipitation forms.

Key words: snowstorms, ground-based GPS/MET water vapor observation, densified AWS temperature, formation condition, diagnosis and comparative analysis

引 言

山东地处中纬度,属于暖温带大陆性季风气候,冬季以降雪为主,暴雪天气严重影响交通和运输及工农业生产,给人民生命财产带来巨大损失。近年来,随着国民经济的发展,暴雪造成的灾害越来越重。随着现代化观测系统的建立和数值预报模式的发展,对暴雪的成因近期已有大量的研究^[1-9],对暴雪天气的认识也不断深入。陈爱玉等^[6]的研究结果表明,春季暴雪均伴强寒潮而产生,暴雪发生在干湿区交界的湿区一侧。盛春岩等^[7]研究表明,暴雪产生在对称不稳定大气中,低空急流促使对流层低层暖湿气流辐合上升,触发对称不稳定能量释放产生暴雪。张迎新等^[8]研究表明,中高层的西南气流与低层偏东气流叠加时,华北回流降雪开始,两者之一消失降水结束;周雪松等^[9]研究表明,在回流暴雪形成与发展的过程中,产生动力锋生,其锋面次级环流是造成暴雪的主要原因。目前,暴雪仍是天气预报中的一大难点,尤其是在初冬和晚冬季节,温度和湿度都较高,地面温度经常在 0°C 左右,对降水形态(雨还是雪)、降雪量和暴雪落区的预报难度较大。本文应用常规天气图、探空、加密自动站、地基 GPS/MET 遥感大气水汽、卫星云图、多普勒雷达等观测资料和

NCEP/NCAR 1°×1°再分析资料等,对山东省 2009 年 11 月 11—12 日和 2010 年 2 月 28 日两次雨雪天气的水汽、热力、动力条件中尺度特征进行对比分析,着重分析大气温度对降水形态的影响,以加深对山东暴雪天气的认识,提高暴雪预报准确率。

1 降雪实况对比分析

2009 年的初冬 11 月 11 日 05 时至 12 日 20 时,鲁西北、鲁西南和鲁中的西部地区出现持续性降雪,过程降雪量 9.9~32.6 mm(冠县),积雪深度 7.0~27.5 cm(冠县),强降雪主要集中在 11 日夜间到 12 日白天,持续时间长达 39 个小时,降雪量大,突破了同期历史纪录。11 日 06 时至 12 日 06 时德州、聊城、菏泽、济南等市的大部分地区降大到暴雪,日降雪量 4.0~17.6 mm(冠县);降水区逐渐向北向东扩大,12 日 06 时至 13 日 06 时,鲁西北、鲁西南和鲁中西部的大部分地区降大到暴雪,日降雪量 5.0~25.7 mm(邹平),其他地区降中雨,局部大雨,降雨量 10~45.7 mm(荣成)。山东西部降雪、东部降雨,过程降水量全省在 10.0~45.7 mm,有 4 个降水中心,其中两个降雪中心分别在鲁西南的聊城、菏泽和鲁中西部的济南、淄博,两个降雨中心分别在鲁南的枣庄、临沂和半岛东部地区。积雪阻塞交通,压塌蔬菜大棚,使输电

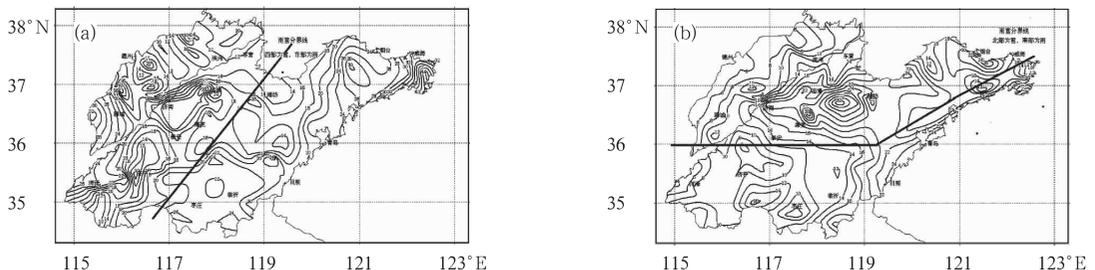


图 1 过程降水量分布

(a) 2009 年 11 月 11 日 06 时至 13 日 06 时(单位:mm,等值线间隔 2,粗实线为雨雪分界线,西部为雪),
 (b) 2010 年 2 月 28 日 06 时至 3 月 1 日 06 时(粗实线为雨雪分界线,北部为雪)

Fig. 1 The process precipitation distribution

(a) from 06:00 BT 11 to 06:00 BT 13 November 2009

(unit: mm, interval 2, thick solid line; the borderline of rain and snow, snow in west),

(b) from 06:00 BT 28 February to 06:00 BT 1 March 2010

(unit: mm, interval 2, thick solid line; the borderline of rain and snow, snow in north)

线路中断,造成直接经济损失约 3.5 亿元。

在晚冬 2010 年 2 月 28 日下午到夜间(正月十五元宵节),鲁西北东部、鲁中北部和半岛北部降大到暴雪,降雪量 5.0~34.0 mm(青州),积雪深度在 5.0~21.0 cm(栖霞);其他地区降小到中雨或小到中雪,鲁东南和半岛南部局部大雨。另外,28 日下午鲁南和鲁中的部分地区出现了雷暴,局部地区出现冰粒或冰雹。山东北部降雪南部降雨,暴雪造成直接经济损失约 12 亿元。

2 环流特征和影响系统

造成 2009 年 11 月 11—12 日暴雪的天气系统为 500 hPa 西风槽、700 hPa 槽前暖式切变线和 850 hPa 切变线(图 2a 和 2b);2010 年 2 月 28 日暴

雪的影响系统为 500 hPa 西风槽,700~850 hPa 低涡(图 2c 和 2d),地面冷锋和江南气旋北部倒槽。两次过程的相似之处,都是受 700~500 hPa 高空槽影响,有南支槽配合,槽前西南暖湿气流增强,低层形成西南风急流,向暴雪区输送水汽和能量;在 700 hPa 槽前渤海湾的西部 38°N 附近形成低涡或横向切变线,西南暖湿气流在切变线的南侧产生辐合;850 hPa 为东北风与东南风之间的辐合,有明显的锋区,大气斜压性强。不同之处是,11 月 11—12 日暴雪期间,850 hPa 锋区呈东北—西南向,东暖西冷,山东东部及华东沿海由东北风逐渐转为东到东南风,11 日 20 时在黄河下游生成东北风与东东南风之间的切变线;先有冷空气南下,之后中高层暖湿气流加强北上和东移,在冷气垫上爬升,850 hPa 济南附近暴雪区的温度呈先降后升再降的变化。暴雪

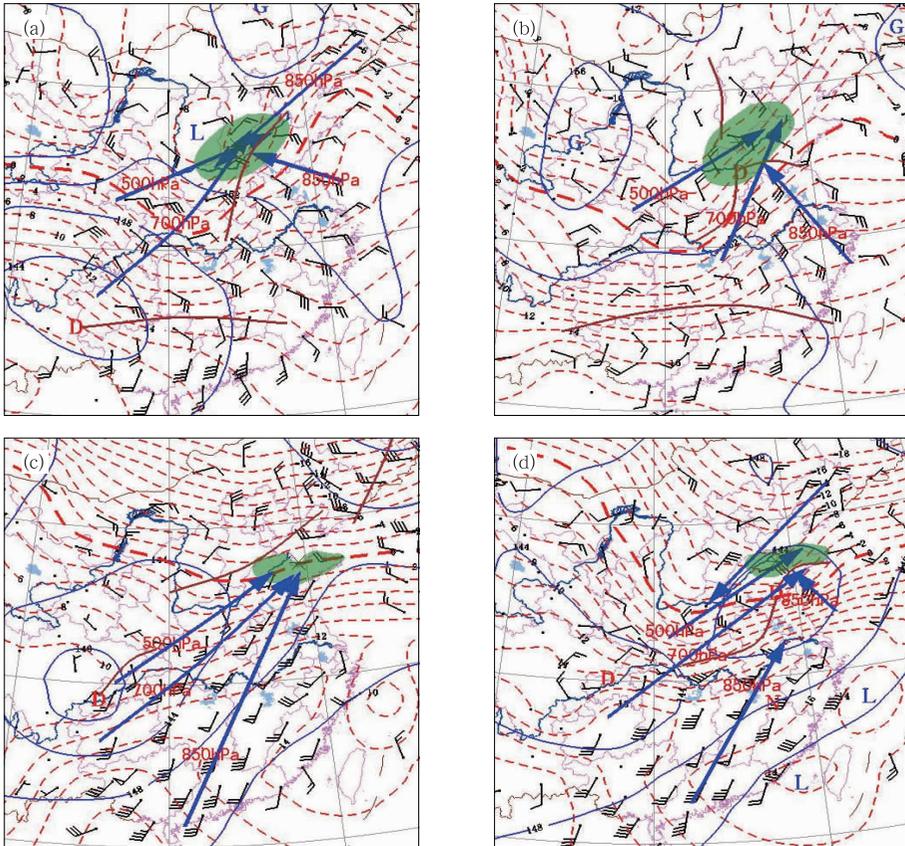


图 2 850 hPa 风场、等高线(实线,间隔 4 dagpm)和等温线(虚线,间隔 2°C)分布及 500、700 和 850 hPa 急流位置(带箭头的粗实线)、地面暴雪区(阴影)

(a)2009 年 11 月 11 日 20 时,(b)2009 年 11 月 12 日 08 时,

(c)2010 年 2 月 28 日 08 时,(d)2010 年 2 月 28 日 20 时

Fig. 2 The 850 hPa wind field and contours (solid line, interval 4 dagpm) and isotherm (dashed, interval 2°C) distributions and 500 hPa, 700 hPa and 850 hPa jets (the thick lines with arrows), surface snowstorm zone (shadow)

(a) at 20:00 BT 11 November 2009, (b) at 08:00 BT 12 November 2009,

(c) 08:00 BT 28 February 2010, and (d) 20:00 BT 28 February 2010

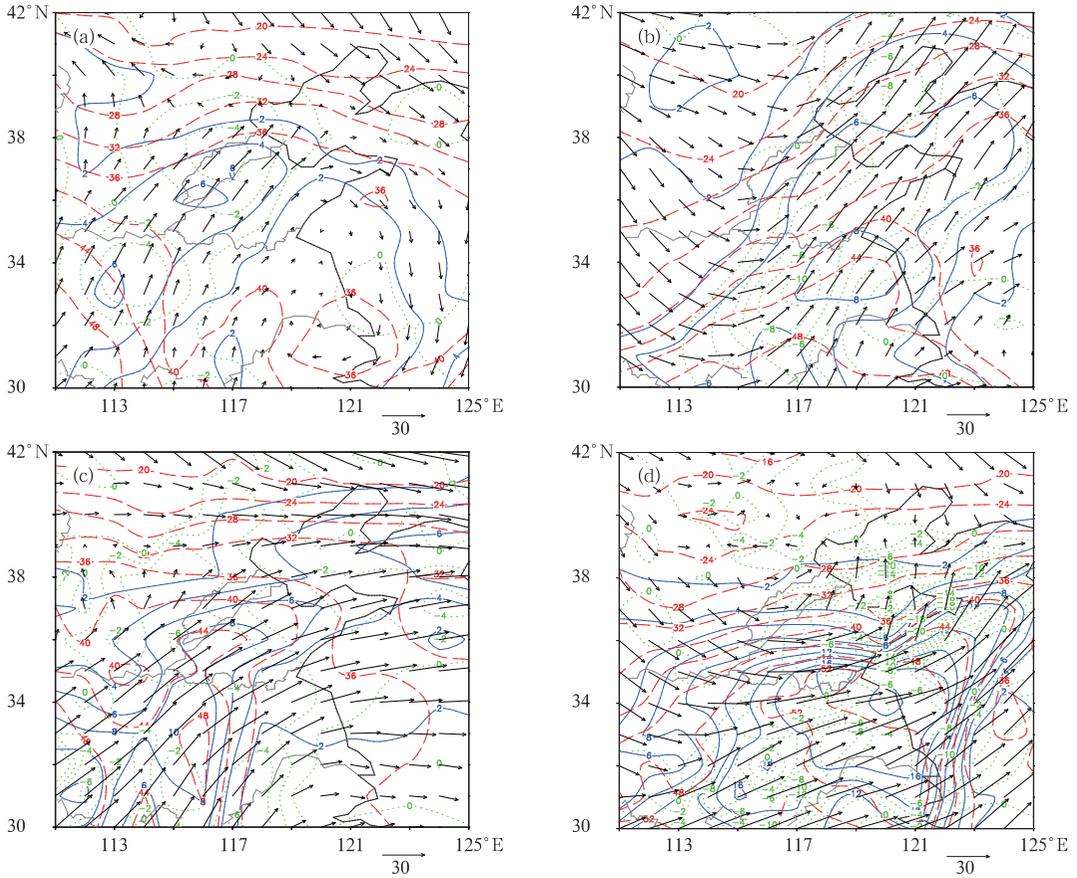


图 3 风场、水汽通量[实线,单位: $g \cdot (cm \cdot hPa \cdot s)^{-1}$, 等值线间隔 2]、 θ_{se} (红虚线,单位: $^{\circ}C$, 等值线间隔 4)和上升运动(绿虚线,单位: $10^{-4} hPa \cdot s^{-1}$, 等值线间隔 2)的分布图, (a)2009 年 11 月 11 日 08 时 700 hPa, (b)2009 年 11 月 12 日 14 时 700 hPa, (c)2010 年 2 月 28 日 08 时 700 hPa, (d)2010 年 2 月 28 日 20 时 700 hPa

Fig. 3 The winds, vapor flux [solid, unit: $g \cdot (cm \cdot hPa \cdot s)^{-1}$, interval 2], θ_{se} (red dashed line, unit: $^{\circ}C$, interval 4) and ascending speeds (green dashed line, unit: $10^{-4} hPa \cdot s^{-1}$, interval 4) (a) at 08:00 BT 11 November 2009 on 700 hPa, (b) at 14:00 BT 12 November 2009 on 700 hPa, (c) at 08:00 BT 28 February 2010 on 700 hPa, and (d) at 20:00 28 February 2010 on 700 hPa

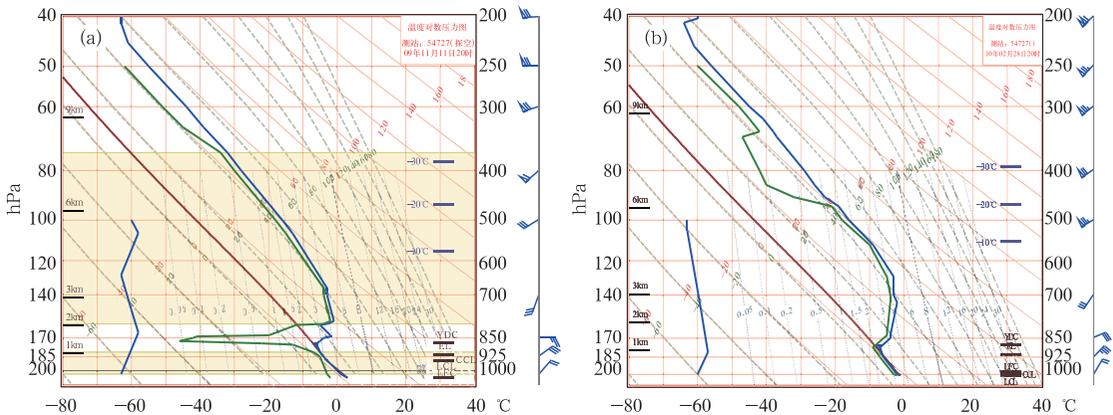


图 4 暴雪期间济南探空站上空 T - $\log p$ 图和风的特征 (a)2009 年 11 月 11 日 20 时, (b)2010 年 2 月 28 日 20 时

Fig. 4 The T - $\log p$ diagram and wind over Jinan Sounding Station during the snowstorms (a) at 20:00 BT 11 November 2009, (b) at 20:00 BT 28 February 2010

产生在低层从东北回流南下的冷空气影响之后,700~500 hPa 中支槽前暖湿气流影响的区域。由于高层沿海高压脊较强,低层又有偏东气流阻挡,西风槽东移较慢,降雪持续时间长。而在 2010 年 2 月 28 日暴雪期间,先有暖湿气流北上,之后冷空气在低层南下,把暖湿气流抬升,850 hPa 上在西南风急流的左前方鲁东南地区形成低涡,向东移动,锋区接近东—西向,南暖北冷,地面上冷锋从北向南移过山东,降水产生在冷锋后部的东北气流中。在长江口附近形成气旋,气旋中心北部的倒槽北伸到鲁中和半岛,使降水加剧。气旋形成后快速东移,诱发北部的冷空气快速南下,使降雪很快结束。

3 水汽条件的对比分析

3.1 中低层水汽的输送

分析暴雪前 12 小时和暴雪期间 1000~300 hPa 的风场、水汽通量和 θ_{se} 的水平分布可见,2009 年 11 月 11—12 日暴雪的水汽来自于西南风和东南风气流共同输送。暴雪期间,山东及华东沿海低层受东北气流控制,在 850 hPa 附近,华东由东北风逐渐转为东南风(图 2a 和 2b),一股东南风气流从华东沿海向内陆输送暖湿空气,水汽通量高值舌与

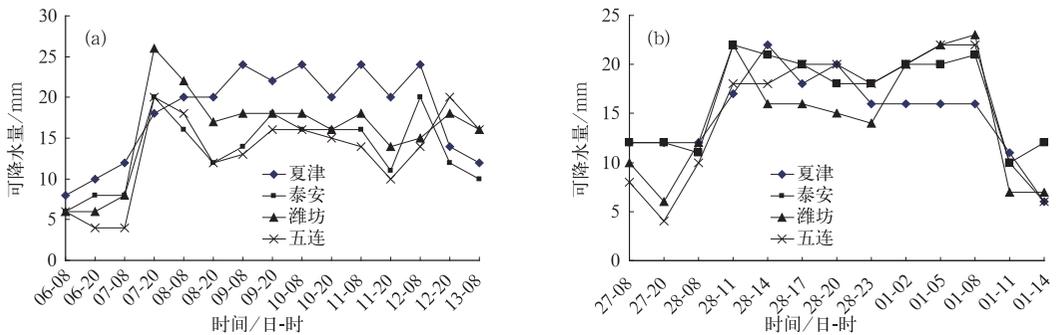


图 5 地基 GPS/MET 遥感大气水汽观测中的大气可降水量(单位:mm)

(a)2009 年 11 月 6 日 08 时至 13 日 08 时,(b)2010 年 2 月 27 日 08 时至 3 月 1 日 14 时

Fig. 5 The precipitable water vapor in the atmosphere observed by using GPS/MET on ground (unit:mm)

(a) from 08:00 BT 6 to 08:00 BT 13 November 2009, and

(b) from 08:00 BT 27 February to 14:00 BT 1 March 2010

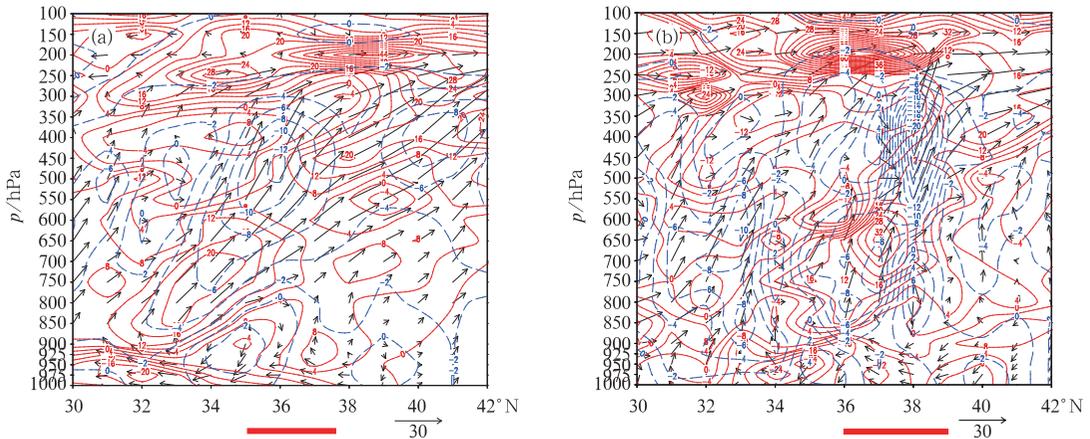


图 6 穿过暴雪区的温度平流(实线,单位: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,等值线间隔 4)、垂直速度(虚线,单位: $10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,等值线间隔 2)和 $(v, -10\omega)$ 剖面图

(a)2009 年 11 月 12 日 08 时沿 116°E , (b)2010 年 2 月 28 日 20 时沿 118°E

(图下短横线为暴雪区)

Fig. 6 The profile of the temperature advection (solid, unit: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, interval 4),

vertical speed (dashed, unit: $10^{-4} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, interval 2) and $(v, -10\omega)$ through the snow zone

(a) at 08:00 BT 12 November 2009 along 116°E , and (b) at 20:00 BT 28 February 2010 along 118°E

(The short transverse line under figure for the snowstorm area)

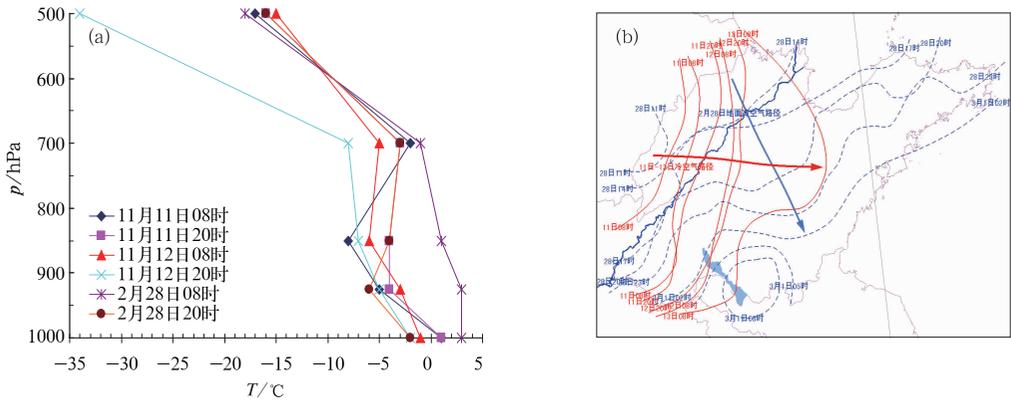


图 7 (a)两次暴雪期间济南探空站的温度随气压变化曲线
(b)两次暴雪过程中地面、0℃等温线的动态图

实线为 2009 年 11 月 11 日 08 时至 13 日 08 时(间隔 12 小时),虚线为 2010 年 2 月 28 日 14 时—3 月 1 日 08 时(间隔 3 小时),两个粗线箭头分别为两次过程中 0℃等值线移动方向

Fig. 7 (a) The curves of temperature versus pressure at Jinan in two snowstorms,
(b) The dynamic of 0°C isolines on the ground in two snowstorms

(The real lines are from 08:00 BT 11 to 08:00 BT 13 November 2009 (interval: 12 h), dashed is from 14:00 BT 28 February to 08:00 BT 1 March 2010 (interval: 3 h), the two broad-brush arrowhead are respectively the moving direction of 0°C isolines in snowstorms)

东南风气流相配合从华东沿海伸到山东南部,水汽从华东沿海沿东南风气流向暴雪区输送。在 700 hPa 附近,水汽来自于槽前西南气流的输送。11 日 08 时,西风槽前一股西南风急流伴随着水汽通量的高值区和 θ_{se} 的高值舌从西南伸向山东西部暴雪区上空,一直维持到 12 日 14 时才东移到鲁中(图 3a 和 3b)。2010 年 2 月 28 日暴雪的水汽主要来源于 700 hPa 及以下西南风急流的输送。暴雪前,2 月 28 日 08 时 850~700 hPa 一股西南风急流向暴雪区输送水汽和能量,700 hPa 大于 $6 \text{ g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$ 的水汽通量高值舌和大于 36°C 的 θ_{se} 的高值舌随西南风急流伸展到鲁北(图 3c)。850 hPa 西南风急流的前沿在鲁东南地区,相应的水汽通量高值舌和 θ_{se} 的高值舌伸到鲁南。暴雪期间,28 日 20 时,700 hPa 的西南风急流轴、水汽通量高值舌和 θ_{se} 的高值舌加强东移到山东半岛的东部海区(图 3d)。850 hPa 上在鲁南生成低涡环流中心,在低涡环流的东部,西南风气旋性旋转为东南风,把高湿和高能的大气向暴雪区输送,且在暴雪区与东北气流辐合。由此可见,在两次暴雪过程中,都是在 700 hPa 附近有较弱的西南风急流向暴雪区输送水汽(图 3),不同的是在 850 hPa 附近,前次暴雪的水汽来源于东部沿海东南气流的输送(图 2a 和 2b),后次暴雪的水汽来源于华南沿海偏南气流旋转为东南气流的输送(图 2c 和 2d)。

3.2 水汽的垂直分布

分析两次暴雪区上空济南站探空资料可见,

2009 年 11 月 11 日 08 时至 12 日 08 时暴雪期间,在 842~821 hPa 有一较薄的干层(图 4a),温度露点差在 $10\sim 24^\circ\text{C}$ 之间,500 hPa 以下其他各层近于饱和,温度露点差在 $1\sim 5^\circ\text{C}$,比湿在 $1.4\sim 4.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。在 2010 年 2 月 28 日暴雪过程中,500hPa 以下,温度露点差都在 $1\sim 5^\circ\text{C}$,比湿在 $1.5\sim 5.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中 781~645 hPa 层湿度最大,400 hPa 附近出现干层。

3.3 大气中的可降水量变化

分析暴雪区地基 GPS/MET 遥感大气水汽监测资料的大气可降水量的变化可见,在暴雪前大气中的可降水量都有明显增大的过程,降雪临近结束时明显减小。2009 年 11 月 11—12 日暴雪前,大气中的可降水量较大,在 8 日 20 时鲁西北暴雪中心附近的可降水量增大到 20 mm 以上(图 5a 中的夏津站),之后一直维持在 20~25 mm,直到 12 日 20 时降雪逐渐结束才减小到 15 mm 以下;而在鲁中地区的大气可降水量虽然也明显增大(泰安、潍坊和五莲站),但比暴雪中心附近的量级明显偏小,可降水量在 15 mm 左右。而在 2010 年 2 月 28 日暴雪前,大气中的可降水量较小,在 10 mm 左右。28 日 08 时以后迅速增大(图 5b),到 28 日 11 时增大到 20 mm 左右,下午鲁中产生降雪,28 日 23 时可降水量稍有降低,但很快又增大(图 5b),在 3 月 1 日 02—08 时鲁中暴雪期间,泰安、潍坊和五莲观测站的大气可降水量维持在 20~23 mm。降雪结束后(13 日 08 时以后)迅速降低。在两次暴雪过程中,暴雪区的日降

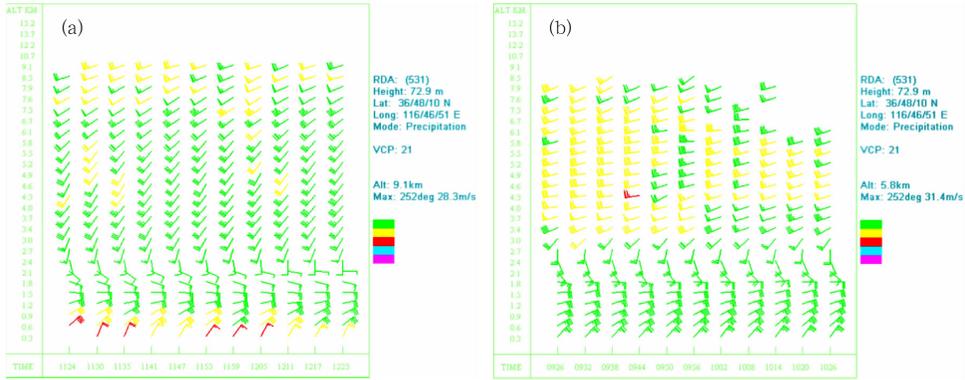


图 8 暴雪期间济南雷达站风廓线

(a)2009 年 11 月 11 日 19:24—20:23,(b)2010 年 2 月 28 日 17:26—18:26

Fig. 8 The wind profile at Jinan Radar Station during the snowstorm

(a) 19:24—20:23 BT 11 November 2009, and (b) 17:26—18:26 BT 28 February 2010

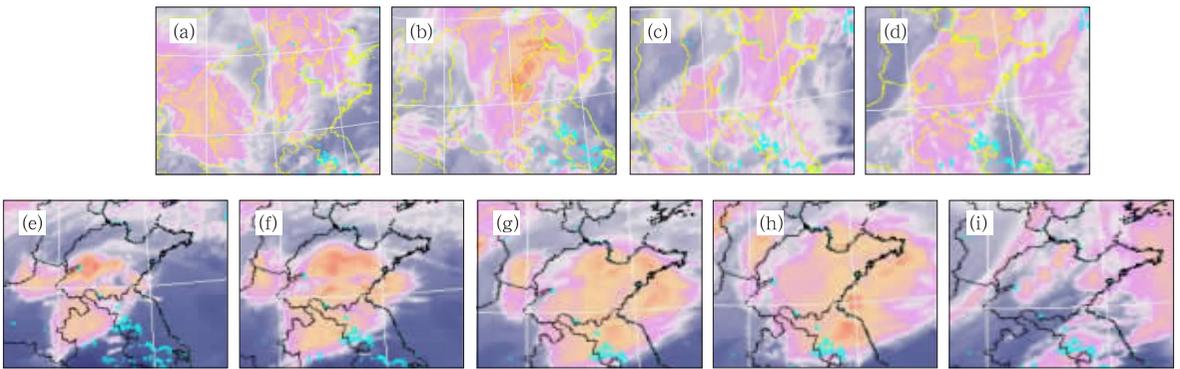


图 9 两次降水过程的 FY-2D 红外卫星云图

(a)11 月 11 日 19:30 时,(b)11 月 12 日 5:31 时,(c)11 月 12 日 11:01 时,

(d)11 月 12 日 14:31 时,(e)2 月 28 日 13:00 时,(f)2 月 28 日 14:00 时,

(g)2 月 28 日 15:00 时,(h)2 月 28 日 16:00 时,(i)2 月 28 日 22:00 时

Fig. 9 FY-2D infrared satellite images

(a) at 19:30 BT 11 November, (b) at 05:31 BT 12 November, (c) at 11:01 BT 12 November,

(d) at 14:31 BT 12 November 2009, (e) at 13:00 BT 28 February, (f) at 14:00 BT 28 February,

(g) at 15:00 BT 28 February, (h) at 16:00 BT 28 February, (i) at 22:00 BT 28 February 2010

雪量在 10~25 mm,局部 25~34 mm,暴雪中心的最大降雪量比监测的大气可降水量偏大,但暴雪区的大部分降雪量接近于监测到的大气可降水量。由此可见,地基 GPS/MET 遥感大气可降水量对降雪量级的预报有一定的参考价值。

4 热力条件的对比分析

4.1 温度平流

分析两次暴雪过程中冷暖平流的变化可见,在 2009 年 11 月 11—12 日暴雪期间,850 hPa 以下的低层虽然为东北风,但是在渤海海峡以东和山东东部为暖温度脊,东北风向暴雪区输送暖平流,山东西部的暴雪区上空,除近地面层为冷平流外,其他层次

都为较强的暖平流(图 6a),在 700 hPa 附近为西南风输送的暖平流。根据 ω 方程,暖平流有利于上升运动发展,在暖平流中心附近上升运动增强,有利于产生降水。2010 年 2 月 28 日暴雪前,700 hPa 以下 36°N 以南为较强的暖平流,39°N 以北为较强的冷平流,冷、暖空气相向而行,28 日 14 时,鲁中降雪开始前后,冷暖空气在山东汇合,冷空气从低层楔入,冷平流从北部抵达 34°N 附近,暖空气被抬升,暖平流向北向上发展。到 28 日 20 时,在暴雪区上空 700 hPa 附近形成大于 $24 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的暖平流中心(图 6b)。暴雪产生在低层冷平流、高层暖平流相叠置的区域。在暴雪区,不仅有暖平流产生的上升运动,还有冷空气的抬升及冷暖空气汇合产生的辐合上升运动,因此上升运动强(图 6b),降雪强度大,持续时间短。

4.2 温度和能量的空间分布特征

在这两场暴雪的预报中,降水性质(雨还是雪)的预报是难点。因为在降水前近地面层的温度都在 0°C 以上;中高层都有较强的暖湿气流输送,大气整层近于饱和,预示着降水量较大。降水产生在低层锋区中,温度梯度大,大气的斜压性强,降水形态是预报的难点。中低层温度是决定雨、雪的关键因素。在前次降水过程中,山东境内低层锋区走向为东北—西南向(图2a和2b),降水形态的分界线与锋区走向一致(图1a);在后次降水过程中,山东境内低层锋区的走向为东—西向(图2c和2d),降水形态的分界线也为东—西向(图1b)。都是位于锋区暖侧的地区降雨,冷侧的地区降雪。

分析暴雪区和降雨区探空站资料可见,在暴雪区济南探空站上空(图4),两次暴雪过程中,整层温度都 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ (图7),中低层都有逆温层,700 hPa的温度高于850 hPa的温度,但逆温层顶的温度都在 0°C 以下,500 hPa的温度较低($\leq -15^{\circ}\text{C}$)。前次降水过程中,降雨区青岛站上空850 hPa以下的温度在 $1\sim 6^{\circ}\text{C}$;后次降水过程中,降雨区徐州站上空700 hPa以下的温度在 $3\sim 7^{\circ}\text{C}$ 。降雪区上空的温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$,降雨区850 hPa以下的温度都 $> 1^{\circ}\text{C}$ 。

在前次暴雪过程中,前期近地面层温度接近 0°C , 0°C 层高度在343.3~384.0 m,暴雪过程中温度下降,但降幅不大,700 hPa以下温度降幅在 5°C 以内(图7),随着弱冷空气自西向东移动,近地面层气温降到 0°C 以下;中低层能量较低,850 hPa以下 $\theta_{\text{se}} \leq 10^{\circ}\text{C}$,虽然有对流不稳定,但能量低,不利于产生对流。在后次暴雪过程中,暴雪前850 hPa以下温度在 0°C 以上, 0°C 层较高在1675 m左右,远高于前次,暴雪期间温度大幅度下降,925 hPa的温度降低了 9°C ,整层温度降到 0°C 以下(图7);中低层能量较高,且在627~500 hPa出现对流不稳定, θ_{se} 从 46.8°C 降低到 41.2°C ,有利于产生对流,降雪期间有雷暴产生。

4.3 雨、雪区地面温度的分布

分析1小时一次的地面加密自动站资料可见,前次暴雪过程中,地面东北风逐渐减弱,由 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 减弱到 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;气温自西向东逐渐降低,降雪区逐渐向东推进,鲁西北、鲁西南和鲁中西部暴雪区的气温降至 $-2\sim 0^{\circ}\text{C}$ (图7b)。东部降雨区的温度一直在 0°C 以上,到降水结束时,半岛和鲁东南的温度还在 $1\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。后次暴雪期间,地面东北

风逐渐增强,鲁西北地区由 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增大到 $6\sim 10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其他地区增强到 $4\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。地面气温从黄河口附近开始自北向南降低,而降雪则是先从鲁中开始向北推进,后是从西向东发展,鲁西北、鲁中和半岛北部的温度降到 $-4\sim 0^{\circ}\text{C}$,而鲁南的温度维持在 $3\sim 7^{\circ}\text{C}$,直到降水结束,鲁南北部的温度才降到 0°C 以下(图7b)。两次过程中冷空气都受到鲁中山区的阻挡,雨、雪都是以鲁中山区为分界(图1)。

5 动力条件的对比分析

2009年11月11—12日暴雪产生在700~500 hPa槽前西南气流的前部,850 hPa东南风与东北风的辐合区,有较强的正涡度和上升运动。从穿过暴雪区 116°E 经向剖面图中(图6a)可以看到,低层偏北气流直达 30°N 以南,中高层偏南气流在低层偏北气流之上倾斜上升,850 hPa以下为下沉运动,中高层为上升气流,在500 hPa附近上升运动最强,中心值为 $-12\times 10^{-4}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2010年2月28日的暴雪同样产生在700~500 hPa槽前西南气流的前部,而850 hPa则是在低涡中心北部的东北风与东南风的辐合区,东北风远比前次暴雪中强。冷空气从底层侵入,一方面把暖湿气流抬升,另一方面,冷、暖空气汇合增强了辐合上升运动,触发对流不稳定能量释放,产生对流。从穿过暴雪区 118°E 经向剖面图中(图6b)看出,有两个上升运动中心,一是在低层850 hPa附近,主要由冷暖空气辐合而产生,强度较弱;二是在500 hPa附近高空槽前的偏南气流中,强度较强,中心值达到 $-20\times 10^{-4}\text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

从暴雪期间济南雷达站上空风廓线图(图8)中可以看出,在两次暴雪过程中,高空风变化非常相似,都有较强的风垂直切变,在暴雪前期低层1.2 km以下为较强的东北风,中低层2.1 km附近为东南风,高层2.4 km以上为较强的西南风。暴雪中后期,中低层的东南风逐渐转为东北风或西北风,当中低层转为北或西北风时,降雪逐渐结束。不同的是,前次暴雪期间中低层的东南风较弱,且高度较低,在1.8~2.1 km;而后次暴雪期间东南风较强,高度较高,在2.1~2.4 km。

6 中尺度特征的对比分析

6.1 卫星云图特征

分析卫星云图的演变可见,两次暴雪过程都是

由从西南向东北移动的中尺度云团和云带影响造成的,2009年11月11—12日暴雪是由3个中尺度云带和云团连续影响(图9),一是河套地区的南—北向云带发展向东北移,其南端影响鲁西北地区,造成降雪;第2个云团在青海东部生成,东移发展,当移到河套东部时发展成近于圆形的云团,从西南向东北影响山东省西部,在云团中有强中心发展,且向东北方向移动,影响鲁西北和鲁中西部地区,在鲁中东部减弱,造成鲁西南、鲁西北和鲁中西部的暴雪。第3个云团在陕西南部生成、发展且向东北移动,从鲁西南和鲁西北进入山东省,在山东的中东部发展并缓慢东移,从山东半岛移出,主要造成山东东部的降雨。三个降水云团都是在700 hPa槽前西南风急流的左侧和暖式切变线的南侧生成发展,高层500 hPa为槽前较强的西南风,低层850 hPa为东到东南风与西北气流的辐合区。随西风槽东移发展,沿途造成暴雪。

2010年2月28日的降水主要由对流云团和西风槽前的带状云系产生(图9),在河南西部生成对流云团,发展向东北方向移动,从鲁西南进入山东省,在鲁西南的北部强烈发展,北移到鲁中上空时产生强降雪,东移影响半岛,造成鲁中北部和半岛地区强降雪。28日傍晚19:00在河北西部又有狭窄的带状云系东移,自西向东影响山东,造成北部降雪、南部降雨。

6.2 雷达回波特征

分析济南雷达站的回波演变可见,2009年11月11—12日暴雪期间,综合回波图(CR)上,鲁西北、鲁西南和鲁中西部大片的片状回波从西南向东北方向移动,回波强度在15~30 dBz。回波顶高3~8 km。在2010年2月28日的暴雪中,28日12:00时前后开始,综合回波图(CR)中在鲁西南地区生成大片的片状回波,向东北方向移动(图略),回波主体的强度30~40 dBz,最强回波强度50 dBz,回波顶高3~8 km。比11月11—12日的回波强度偏强,但是回波顶高相接近。2月28日14时前后在济南附近形成团状回波,在济南东部发展并向东北方向快速移动。这些回波中夹杂着小尺度的对流单体,持续2个半小时左右,所经之地造成强降雪。16:30前后在鲁西北的南部又有片状的云团生成,向东北方向移动,影响鲁中、鲁东南和半岛地区。

7 小 结

(1) 两次暴雪的共同点是,暴雪都产生在500~700 hPa槽前西南气流的前部,850 hPa东北风与东南风的辐合区,低层有较强的暖湿气流和冷空气汇合,850 hPa附近有较强的锋区,大气斜压性强。700 hPa附近有较强西南气流向暴雪区输送暖、湿空气,整层大气高湿近于饱和,中低层有逆温,整层温度 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 。地面温度 0°C 是雨雪的分界线。暴雪都是由多个中尺度云团连续影响产生的,云团呈片状或团状。

(2) 不同点是,在前次暴雪过程中,低层先有冷空气影响,后有中低层西南暖湿气流北上,850 hPa附近的水汽来自于东南沿海,中低层的能量低,以稳定性降雪为主,西风槽东移慢,降雪持续时间长;在后次暴雪过程中,先是中低层暖湿气流北上,而后强冷空气从低层侵入,在850 hPa形成低涡,地面上生成江南气旋,850 hPa附近的水汽来自于华南沿海,中低层对流不稳定,有对流发展。降雪强度大,持续时间短。

(3) 地基GPS/MET遥感大气水汽监测中的大气可降水量在暴雪前明显增大,暴雪期间可降水量在20 mm左右,对降雪量有一定的指示性。加密自动站观测中温度 0°C 线是雨、雪的分界线,有助于判别降水的形态。

参 考 文 献

- [1] 蒋年冲,胡雯,邵洋,等. 安徽大别山一次强雨雪天气过程降水粒子特征分析[J]. 气象,2010,36(6):79-84.
- [2] 郑婧,许爱华,刘波,等. 江西大雪天气的时空变化及其影响系统分析[J]. 气象,2010,36(4):30-36.
- [3] 张广周,沈桐立,李戈,等. 一次暴雪天气的数值模拟及诊断分析[J]. 气象,2008,34(9):65-72.
- [4] 赵桂香. 一次回流与倒槽共同作用产生的暴雪天气分析[J]. 气象,2008,33(11):41-48.
- [5] 迟竹萍,龚佃利. 山东一次连续性降雪过程参数数值模拟研究[J]. 气象,2006,32(7):25-32.
- [6] 陈爱玉,李存龙,陈新春. 春、冬季暴雪成因对比分析[J]. 气象,2005,31(11):37-39.
- [7] 盛春岩,杨晓霞. 一次罕见的山东暴雪天气的对称不稳定分析[J]. 气象,2002,28(3):33-37.
- [8] 张迎新,侯瑞钦,张守保. 回流暴雪过程的诊断分析和数值试验[J]. 气象,2007,33(9):25-32.
- [9] 周雪松,谈哲敏. 华北回流暴雪发展机理个例研究[J]. 气象,2008,34(1):18-26.