

杨璐瑛,张芹,郭俊建,等.鲁南初冬一次罕见特大暴雪的成因分析[J].海洋气象学报,2018,38(1):100-107.
Yang Luying,Zhang Qin,Guo Junjian,et al.Case study on the historic blizzard in the southern region of Shandong in early winter[J].
Journal of Marine Meteorology,2018,38(1):100-107. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.012.(in Chinese)

鲁南初冬一次罕见特大暴雪的成因分析

杨璐瑛¹,张芹²,郭俊建³,杨可栋²

(1. 山东省气象局,山东 济南 250031; 2. 潍坊市气象局,山东 潍坊 261011; 3. 山东省气象台,山东 济南 250031)

摘要: 利用常规气象观测资料和 NCEP/NCAR 逐 6 h 再分析资料,对 2015 年 11 月 23—24 日山东南部出现的一次罕见特大暴雪天气过程进行诊断分析。结果表明:1) 这是一次典型的回流形势降雪,850 hPa 东南风急流影响的鲁南地区降雪强度较大,而东北风急流影响的区域降雪强度较弱。2) 700 hPa 强西南低空急流、850 hPa 东南低空急流为鲁南地区降雪提供了充沛的水汽,水汽通量的强辐合区域即为大暴雪的发生区域。3) 暴雪区上空散度呈现出弱辐散—强辐合—强辐散的垂直结构;暴雪落区与高空的强辐合中心以及强上升运动中心吻合度较高。4) 暴雪期间,850~925 hPa 之间维持一个逆温层;强冷空气使得 925 hPa 以下边界层温度锐降导致降雨迅速转雪,降雪持续时间长是鲁南地区产生异常强降雪的重要原因。

关键词: 暴雪; 回流; 低空急流; 逆温层

中图分类号: P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)01-0100-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.01.012

Case study on the historic blizzard in the southern region of Shandong in early winter

YANG Luying¹, ZHANG Qin², GUO Junjian³, YANG Kedong²

(1. Shandong Meteorological Bureau, Jinan 250031, China; 2. Weifang Meteorological Bureau, Weifang 261011, China; 3. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, China)

Abstract Using the conventional meteorological observation data and NCEP/NCAR data, a severe blizzard weather event which occurred in the southern part of Shandong on 23–24 November 2015 is analyzed. The results show that this is a typical backflow situation snowfall. The snowfall which is impacted by the northeast wind jet is weaker than the areas by southeast wind jet at 850 hPa. The strong southwest low-level jet at 700 hPa and the southeast low-level jet at 850 hPa provided enough water vapor. The strong convergence area of water vapor flux is the area with the heaviest blizzard. The divergence area over the blizzard area shows a vertical structure with weak divergence-strong convergence-strong divergence. Blizzard area, the high-altitude convergence center and strong ascend movement center coincidence are consistent. During the Blizzard, an inversion layer was maintained between 850 hPa and 925 hPa. The long duration of snowfall is an important reason for the heavy snowfall in the southern part of Shandong.

Key words blizzard; backflow; low-level jet; inversion layer

收稿日期:2016-10-11; 修订日期:2017-12-25

基金项目:山东省气象局科研项目(2014sdqxm22);国家自然科学基金项目(41475038)

作者简介:杨璐瑛,女,主要从事中短期天气预报研究,yly0727@163.com。

通信作者:张芹,女,硕士,高级工程师,主要从事中短期天气预报研究,751202564@qq.com。

引言

2015 年 11 月 23—24 日,山东省出现了一次大范围强降雪天气,尤其是鲁南地区出现特大暴雪,此次降雪具有范围广、持续时间长、降雪强度大和积雪深度厚的特点,是一次比较罕见的初冬大暴雪天气过程。暴雪给当地的交通和生产生活带来严重影响。关于暴雪的成因和灾害研究,近年来国内外很多学者做了大量的工作,并且取得了诸多研究成果^[1-19]。杨成芳等^[1]采用基于构成要素的预报方法对一次切变线暴雪天气进行分析,四个有利构成要素相叠加导致鲁中地区产生暴雪;赵俊荣等^[2]对新疆一次致灾大暴雪的多尺度系统和物理量配置以及发生时间和落区进行了分析,结果表明大暴雪期间中高层辐散大于中低层辐合,上升运动强盛且深厚;黄海波和徐海容^[3]利用诊断分析方法对新疆一次秋季暴雪天气过程进行了研究,表明伊朗副热带高压的东西摆动、南北振荡引起的中亚地区大气环流的剧烈变化是暴雪天气产生的大尺度背景;张芹等^[4]对山东春季一次极端暴雪过程进行诊断分析,认为在这次极端暴雪过程中地形对温度的急剧下降起了重要的作用;周雪松等^[5]对山东两次早春暴雪过程进行对比分析,认为南北对称的垂直速度对是早春暴雪的重要特征;陈雪珍等^[6]对华北暴雪过程中的急流特征进行分析,结果发现高、低空急流耦合所形成的次级环流,增加了上升运动并触发不稳定能量释放,增加了暴雪强度和持续时间;任

雨等^[7]对黑龙江省一次温带爆发性气旋引发的大暴雪过程进行了诊断分析,表明高低空急流的耦合加强了气旋中心附近的上升运动,有利于强降雪的持续和加强;李青青等^[8]对北京一次冬季回流暴雪天气过程进行数值模拟,得出数值模式对此次暴雪过程的近地面回流冷空气、中低层低值系统及变化特征、主要降雪时段和降雪量模拟效果较好。这些研究对进一步提高暴雪成因机理认识以及提高暴雪预报准确率,具有较高的参考价值。

2015 年 11 月 23—24 日山东这次强降雪属于一次罕见的回流暴雪天气过程。在山东大范围 and 区域性回流暴雪过程中,鲁西北、鲁西南、鲁中北部和半岛北部地区为回流降雪的易发区,虽然这次暴雪点很集中,但暴雪落区却主要位于山东南部,与以往的统计规律有所不同。因此本文从大尺度环流背景、动力条件、水汽条件以及垂直风场等几个方面,分析此次鲁南回流暴雪天气的形成机理,为暴雪预报提供参考依据。

1 降雪实况

2015 年 11 月 23—24 日山东出现了大范围的雨雪天气过程,降水量呈自南向北逐渐递减的分布特点,其中鲁南出现特大暴雪。11 月 23 日 08 时—24 日 20 时过程累积降水量全省平均 13.3 mm(图 1a),共有 112 个站点出现降水,其中 41 个站降水量大于 10 mm,成武最大,达 46.7 mm。鲁南的济宁、菏泽、枣庄以及临沂等地的积雪深度大都在 20 cm

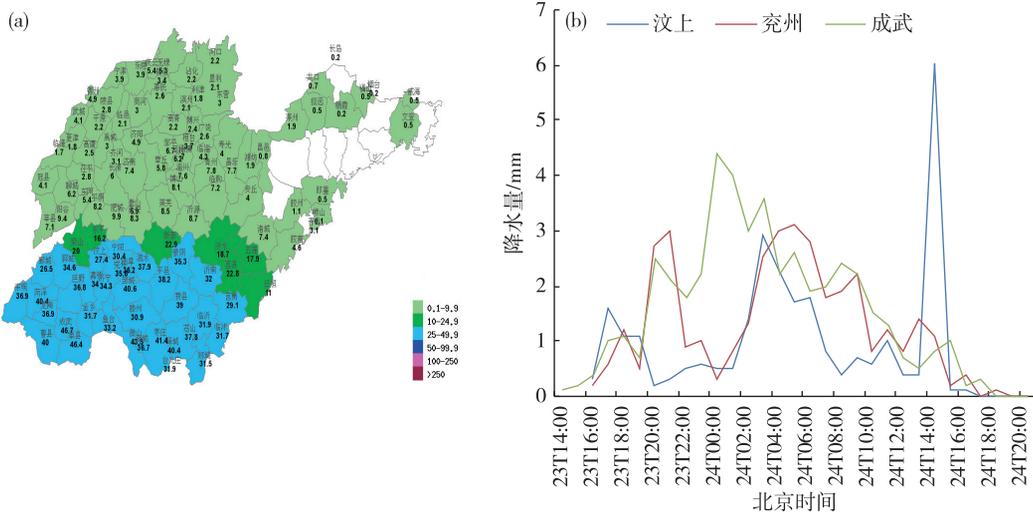


图 1 2015 年 11 月 23 日 08 时—24 日 20 时山东降水量分布(a; 单位:mm)和鲁南地区部分站点逐小时降水量(b; 单位:mm)

Fig.1 Cumulative precipitation (units:mm) of Shandong Province from 08:00 BST 23 to 20:00 BST 24 Nov. 2015 (a) and hourly precipitation (units:mm) in the partial southern region of Shandong province (b)

以上,其中最大积雪深度出现在济宁兖州,达32 cm。由单站逐小时降水量演变(图1b)可以看出,强降雪时段主要集中在23日23时—24日14时,强降雪时段持续时间较长,本次强降雪过程多站出现1 h降水量超过5 mm的强降雪,其中汶上1 h降雪量达6 mm(24日13—14时)。这次暴雪过程的降雪量大、降雪强度之强和积雪深度之厚均为历史罕见,给当地的经济和人民生活财产等带来严重损失。

此次雨雪过程自23日11时从鲁南开始,降水相态为雨,一直持续到23日20时,降水范围向北推进至鲁中地区,降水量均在5 mm以下,此时菏泽和济宁降水相态开始转为雨夹雪,其他地区为雨,23日23时整个降水区域降水相态均转为雪,地面温度均降至0℃以下,同时降雪范围进一步扩大,山东北部也出现降雪。鲁南降雪于24日20时结束。

2 环流形势和影响系统

降水开始前,23日08时(图略),500 hPa在50°N附近、80~130°E之间稳定维持一宽广的东西向横槽,其中30°N以北,新疆北部及其以东地区都

处在横槽前西北偏西气流当中,有多个短波槽东移,表现为阶梯槽的形势。23日20时,500 hPa(图略)中支槽位于河套附近,山东受槽前西南气流影响。700 hPa(图略)南支槽经向度加大,槽前西南低空急流加强,急流轴上最大风速达 $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,鲁西南位于急流轴的顶端,这股低空西南暖湿气流为鲁南的强降雪提供了源源不断的水汽条件。850 hPa(图2d)东北风低空急流自东北经渤海回流进入山东,前沿到达河南北部地区,而江苏北部为东南低空急流,这股东南低空急流将东海的水汽输送至鲁南地区,鲁南为东北风与东南风辐合区,为鲁南强降雪的发生提供了有利的动力条件。925 hPa(图略)强盛的东北风超低空急流的前沿到达安徽中南部,地面冷锋已经到达江南,说明山东低层冷垫已经形成,高空西南气流叠加在地面东北风之上,为典型的回流形势,此时山东中南部降水已经开始。24日08时,500 hPa(图2a),河套西侧有西风槽存在,河套以东的中纬度地区环流比较平直,同时南支槽东移加深。700 hPa(图2b)槽前西南低空急流进一步加强,风速最大达 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并向北伸展到

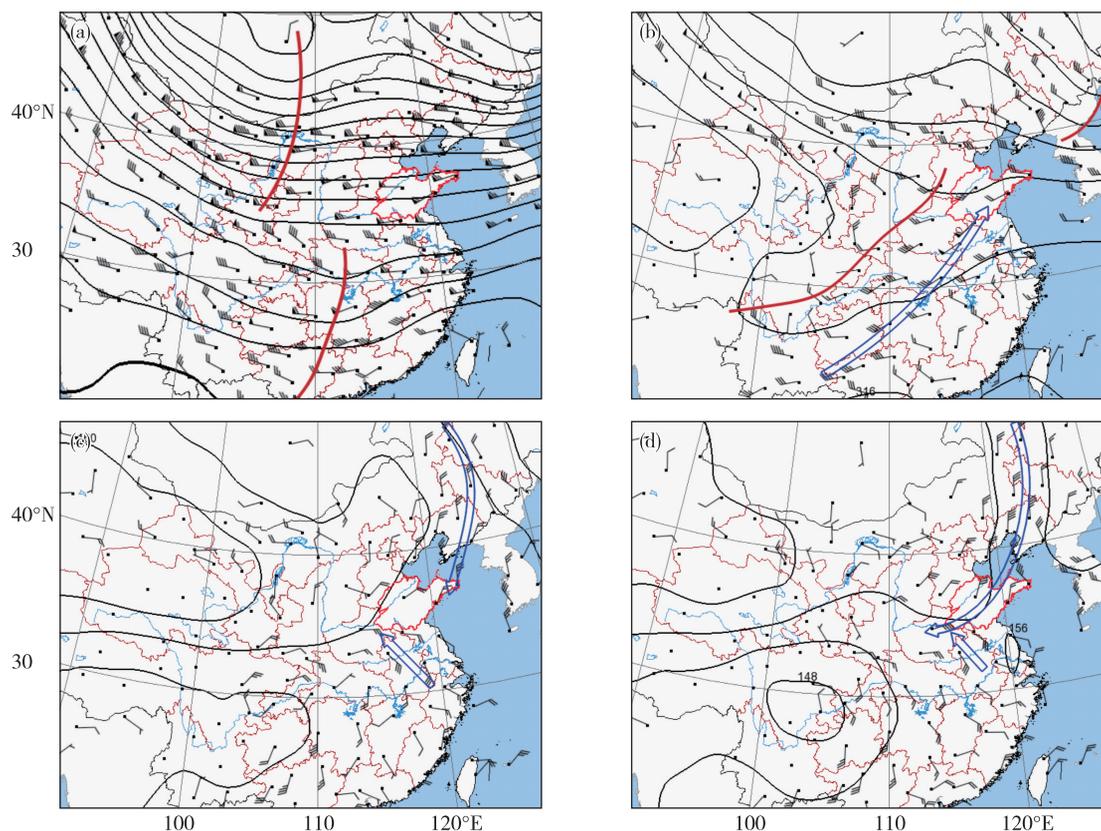


图2 2015年11月24日08时高空形势场(a.500 hPa,b.700 hPa,c.850 hPa)与23日20时850 hPa形势场(d)(蓝色箭头:风速 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的急流轴;棕色实线:槽线)

Fig.2 Synoptic charts at 08:00 BST 24 and 20:00 BST 23 Nov. 2015 (a.500 hPa, b.700 hPa, c.850 hPa at 08:00 BST 24, d. 850 hPa at 20:00 BST 23;The Blue Arrow is low leveljet,and the brown solid line is trough line)

鲁中。850 hPa(图 2c)继续维持东南和东北两支低空急流,925 hPa(图略)一直到地面仍然维持一个强东北风形成的冷垫,地面图(图略)上,地面冷锋持续向南推进,到达华南地区,700 hPa 西南低空暖湿气流沿着冷垫爬升,造成了山东 24 日的大范围降雪,属于一次比较典型的回流形势降雪。24 日 20 时(图略),随着 700 hPa 高空槽的移出,山东转为西北气流影响,降雪也随之结束。

由以上分析可以看出,这是一次典型的回流形势下的强降雪,关键系统主要有 500 hPa 高空槽、700 hPa 低槽和西南低空急流、850 hPa 东南低空急流以及 925 hPa 以下的强盛东北风形成的冷垫。在此次强降雪过程中,700 hPa 强西南低空急流和 850 hPa 东南低空急流是造成鲁南特大暴雪的重要原因。暴雪落区位于 850 hPa 东南风与东北风辐合线的东南风急流一侧。

3 动力条件分析

3.1 散度场与垂直速度场

图 3a 为 2015 年 11 月 24 日 02 时强降雪期间散度沿暴雪中心成武站(115.9°E,34.9°N)的经向垂直剖面图。由图可以看出,强降雪期间,暴雪区(34~36°N)上空,散度分布呈现出弱辐散—强辐

合—强辐散的垂直结构。近地面层 950 hPa 以下是弱的辐散区,与近地面层为回流冷空气形成的冷垫相对应;950 hPa 以上至 500 hPa 高度为强的辐合区,辐合中心位于 700 hPa 附近,中心值为 $-12 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,500 hPa 以上是强辐散区,中心位于 250 hPa 附近,中心值 $18 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,这种低层强辐合、高层强辐散的空间配置,非常有利于中低层暖湿空气的聚集上升。暴雪中心与 700 hPa 的强辐合中心相吻合,由 700 hPa 散度的水平分布(图略)可以看出,强辐合中心位于鲁南地区,这也成为造成鲁南地区降雪强度最大的原因。

图 3b 给出了 24 日 02 时垂直速度沿成武站的经向—高度剖面图。由图可以看出,强降雪时,整个暴雪区(34~36°N)上空为整层强上升运动区,38°N 以北为弱的下沉区,强上升运动中心位于 600 hPa 附近,中心值 $-40 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$,此中心位置正好位于暴雪中心成武站上空,说明暴雪中心与高空的强上升运动中心吻合度较高。由 600 hPa 垂直速度的水平分布(图 3c)可以看出,除半岛地区是下沉区外,山东其他地区都处于上升运动中,其中鲁西南是强上升运动中心,因而强降雪中心位于鲁南地区。

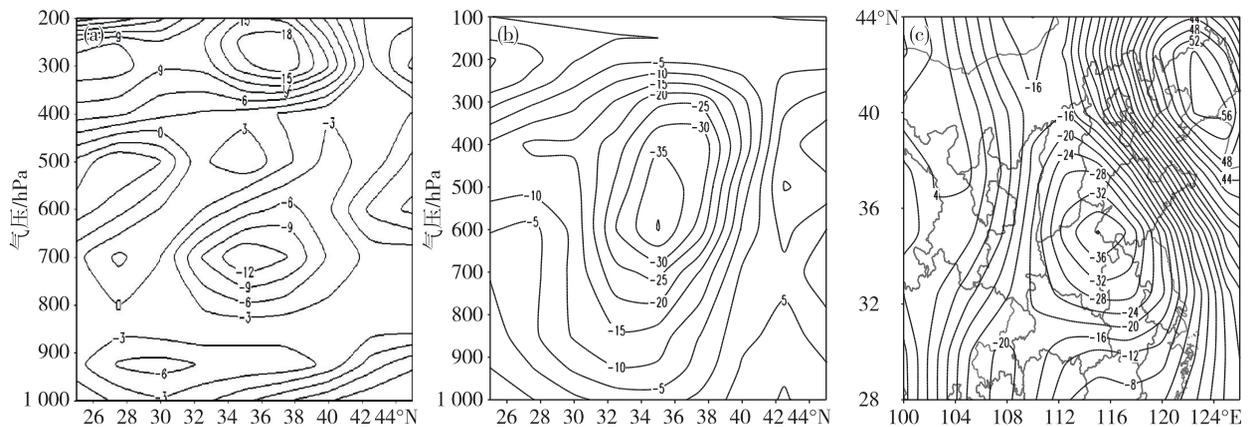


图 3 2015 年 11 月 24 日 02 时强降雪期间散度(a;单位: 10^{-6} s^{-1})和垂直速度(b;单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 115.9°E 的经向剖面分布以及 600 hPa 垂直速度分布(c;单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.3 The vertical profile along 115.9°E of the divergence (a, units: 10^{-6} s^{-1}) and vertical velocity (b, along 115.9°E; c, 600 hPa; units: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$) at 02:00 BST 24 Nov. 2015

3.2 高低空急流

由 200 hPa 高空急流的演变可以看出,23 日 20 时(图略),中高纬度基本为西南偏西风急流,在蒙古中东部和河北北部有一个急流中心,中心值为 $55 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,山东位于此急流中心的南侧,此处有正

的涡度平流,对应高空辐散。高空辐散将低层的暖湿空气抽吸到高层,低层气压降低,使得低空气压梯度加大,进而使得低空西南气流加强,导致 700 hPa 低空急流形成与维持。强降雪时段,24 日 02 时(图 4),200 hPa 高空急流中心进一步东移,最东端

到了朝鲜半岛,山东位于急流中心的南侧,同时 700 hPa 西南风低空急流进一步发展,急流轴顶端位于鲁西南地区。由以上分析可以看出,高空急流在本次强降雪过程中起到了重要作用,暴雪落区主要位于高空急流中心的南侧,低空西南急流轴的北侧。

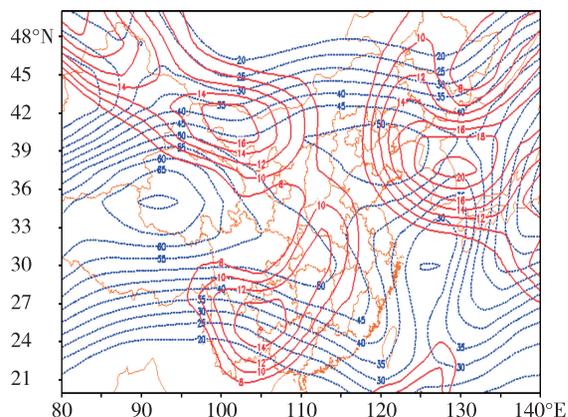


图4 2015年11月24日02时高空风速分布(实线为700 hPa,虚线为200 hPa;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.4 The distribution of the high level wind speed at 02:00 BST 24 Nov. 2015 (Solid line for 700 hPa; Dotted line for 200 hPa, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

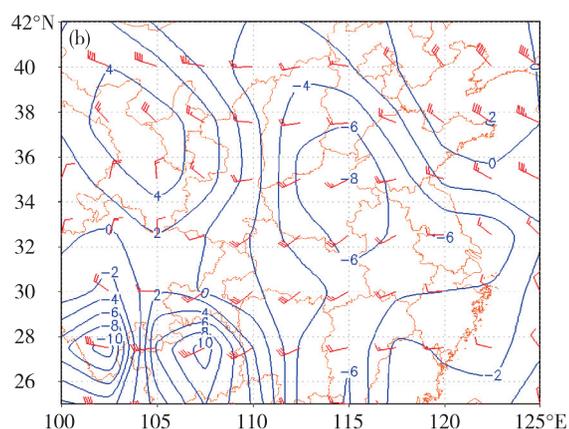
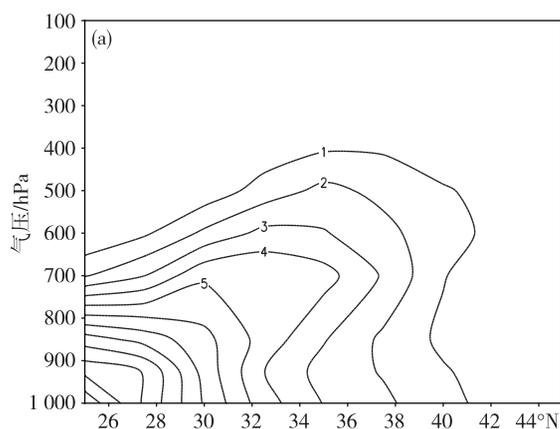


图5 2015年11月24日02时物理量分布(a.比湿沿115.9°E的经向剖面,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$;b.700 hPa水汽通量散度,单位: $10^{-6} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.5 The distribution of the physical elements at 02:00 BST 24 Nov. 2015 (a. specific humidity along 115.9°E, units: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; b. moisture flux divergence at 700 hPa, units: $10^{-6} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

1)垂直风场。强降雪开始时,23日20时,徐州和章丘两站,850 hPa以下均为强盛的东北风,500 hPa以上是西北风;不同的是,暴雪区850 hPa为强盛的东南风,700 hPa是强盛的西南风,这两股气流为强降雪的产生提供了充足的水汽条件。而暴雪区北侧的章丘站,850 hPa仍然维持强盛东北风,700 hPa为偏西风,说明暴雪区北侧低层的冷垫比暴雪区要厚,而且700 hPa的暖湿气流还未伸展

4 水汽条件和垂直风场分析

4.1 比湿和水汽通量散度

暴雪的发生发展需要充足的水汽供应。图5a是2015年11月24日02时比湿沿暴雪中心成武站(115.9°E,34.9°N)作的经向垂直剖面图。由其垂直分布可以看出,强降雪时段24日02时,暴雪区(34~36°N)上空,600 hPa以下比湿在 $3 \sim 4 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,700 hPa附近有一条自南向北伸展的湿舌,比湿在 $4 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,这与该层的西南暖湿气流相对应,结合700 hPa水汽通量散度分布(图5b)可见,除半岛地区外,山东上空均为水汽通量散度的辐合区,中心位于鲁西南,中心值 $-8 \times 10^{-6} \text{g} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,强降雪中心与水汽通量散度的强辐合中心有很好的对应关系,因而鲁南为此次强降雪的中心。

4.2 垂直风场

选取离暴雪中心最近点的徐州站(图6a、c)和暴雪中心北侧的章丘站(图6b、d),由两个站的探空图演变可以发现:

到暴雪区北侧。强降雪时段,24日08时,由徐州探空站资料可知,暴雪区上空850 hPa以下东北风明显增强,说明回流下来的冷空气增强,同时700 hPa的西南风也增强至 $22 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,说明该层的西南暖湿气流也得到明显发展,即冷暖空气在此叠加,造成该地强降雪的产生。暴雪区北侧的章丘站,850 hPa及其以下风场变化不大,但700 hPa风向由偏西风转为西南风,说明西南暖湿气流已经向北发展。由

以上分析可以看出,850 hPa 东南气流和 700 hPa 西南气流对暴雪的形成起到了至关重要的作用。

2)湿层。由整个降雪过程的探空曲线可见,暴雪区上空,500 hPa 以下大气接近饱和,说明大气湿层深厚,有利于强降水的产生。

3)逆温层。暴雪区降水开始前,23 日 08 时(图略),850~925 hPa 已经开始出现逆温,由于低层是冷空气形成的冷垫,而 850 hPa 是东南气流,700 hPa 为西南气流,均为暖湿空气,从而形成逆温层。逆温层的存在进一步说明了此次降雪的形成机制,即高层的暖湿气流在低层冷垫上爬升,造成

降雪。强降雪时段 24 日 08 时,逆温更强烈,850 hPa 温度变化不大,维持在 0 °C 附近,而 925 hPa 温度由 1 °C 锐降为-6 °C,低层气温的锐降对雨雪相态的转换起到重要作用。

通过以上分析可以发现,850 hPa 东南气流和 700 hPa 西南气流对暴雪的形成起到了至关重要的作用;鲁南地区大气湿层深厚,有利于强降水的产生;回流暴雪期间,850~925 hPa 之间持续维持一个逆温层,同时低层气温的锐降对雨雪相态的转换起到决定性作用。

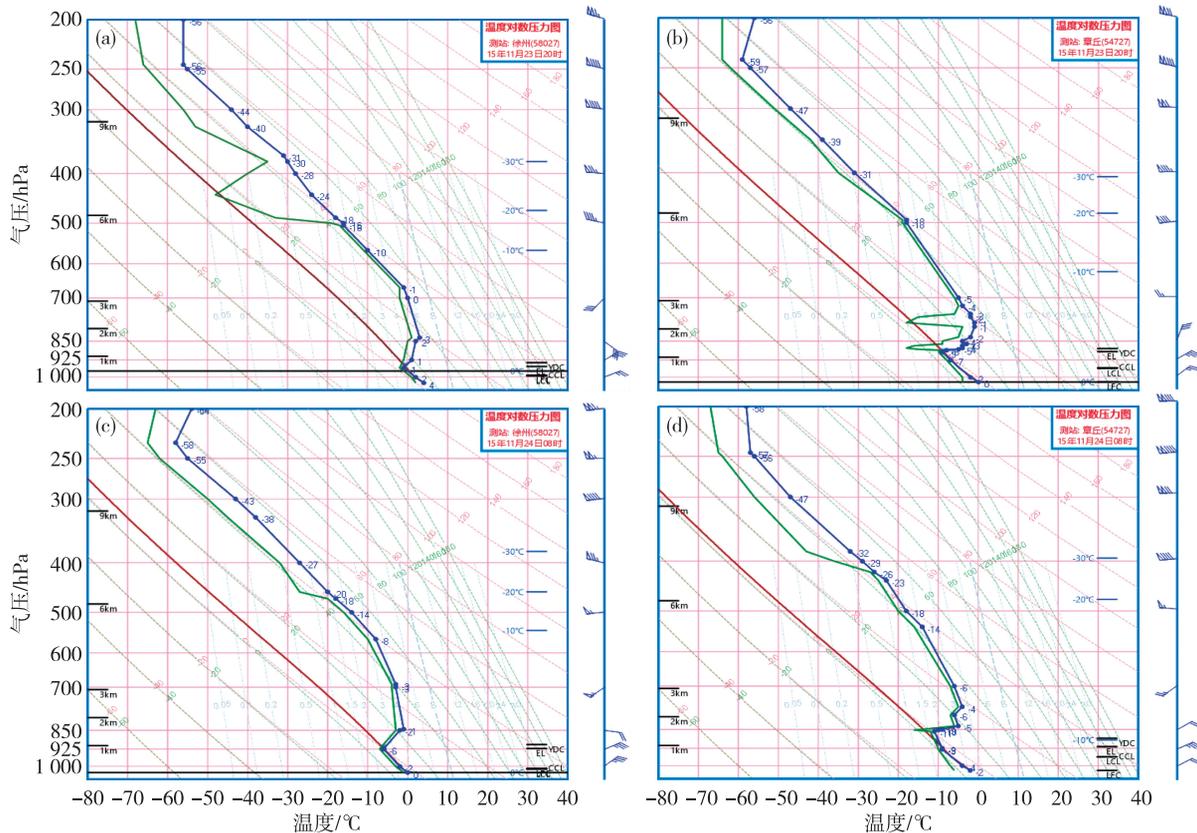


图 6 2015 年 11 月 23 日 20 时徐州(a)、章丘(b)和 24 日 08 时徐州(c)、章丘(d)探空图
Fig.6 Sounding diagram of Xuzhou (a), Zhangqiu (b) at 20:00 BST 23, and Xuzhou (c), Zhangqiu (d) at 08:00 BST 24 Nov. 2015

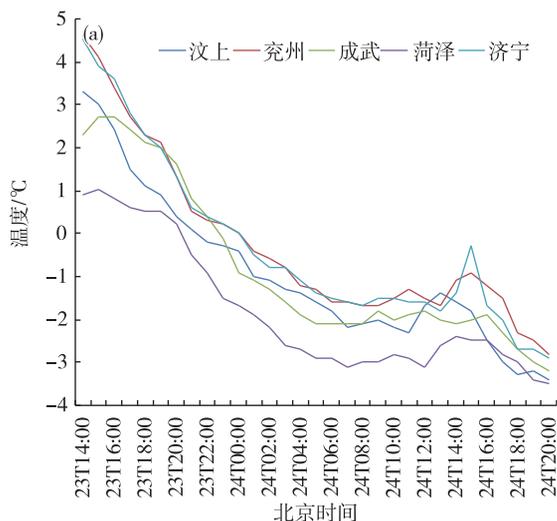
5 降水相态的演变

23 日白天开始,随着强冷空气的入侵,鲁南地区上空的温度不断下降。23 日 20 时,925 hPa -4 °C 线及 1 000 hPa 0 °C 线已南压至鲁西南地区(图略)。由汶上、兖州、成武、济宁、菏泽气温的逐时演变(图 7a)来看,23 日 14 时之后气温持续下降,23 日 20 时,气温下降到 2 °C 以下,此时菏泽和济宁开始转为雨夹雪,山东其他地区为雨,鲁南各站温

度降至 2 °C 以下,其中位于偏北位置的汶上站,气温下降到 1 °C 左右,降水相态已经转为雪,位于南部的成武站温度在 2 °C 左右,降水相态是雨。23 日 22 时,各站气温均下降到 0 °C 左右,降水区域内的降水相态均转为雪,同时山东降雪范围也进一步扩大,山东北部出现降雪。随着冷空气的继续入侵,气温持续走低,24 日白天的最高温度均在 0 °C 以下,24 日 20 时,随着影响系统的移出,降雪结束。

由成武站温度平流场时间垂直剖面(图 7b)可

以看出,降雪开始前的36 h内,850 hPa以下的近地面层一直维持负温度平流,说明冷空气已经提前从近地面层回流而下,此时的地面温度持续走低,形成冷垫。强降雪开始前500~850 hPa之间维持弱的暖平流。降雪时段内,即23日20时—24日16时,850 hPa以下全部为冷平流,且冷平流强度有所增强,500~850 hPa之间暖平流强,中心值高达 $15 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,出现在600~700 hPa之间,与此时



700 hPa明显增强的西南暖湿气流相对应。24日16时以后,对流层中低层的暖平流消失,转为冷平流,此时成武站降雪结束。

通过以上分析可以看出,由于冷空气从底层开始向南入侵,850 hPa以下冷平流明显,使得低层气温持续下降,转雪时间比较早,再加上降雪持续时间较长,造成了此次鲁南特大暴雪。

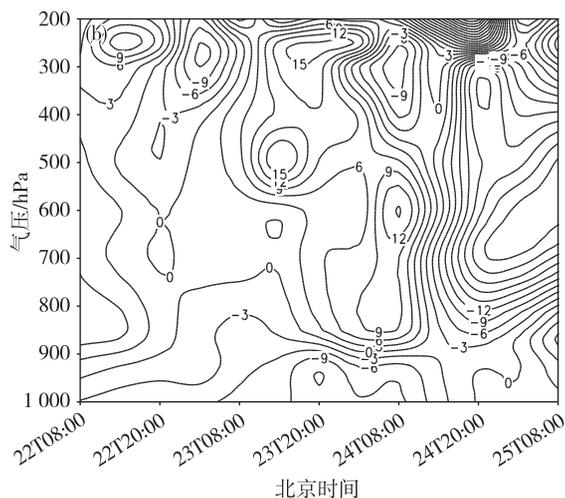


图7 2015年11月23日14时—24日20时气温逐小时分布(a;单位:°C)与11月22—25日成武站温度平流时间垂直剖面图(b;单位: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.7 Distribution of hourly temperature from 14:00 BST 23 to 20:00 BST 24 Nov. 2015 (a;units:°C) and temperature advection at Chengwu from 22 to 25 Nov. 2015 (b;units: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

6 结论

通过对2015年11月23—24日罕见的鲁南初冬特大暴雪过程的诊断分析,主要得出以下结论:

1)降雪前,850 hPa以下强劲东北风形成冷垫;降雪时,700 hPa上强西南暖湿气流沿此冷垫爬升,水汽凝结形成降雪,属于一次典型的回流形势降雪。850 hPa存在东南风和东北风两支低空急流,暴雪落区位于受东南风急流影响的鲁南地区,而受东北风急流影响的山东其他地区降雪明显偏弱。

2)强降雪期间,暴雪区上空散度分布呈现出弱辐散—强辐合—强辐散的垂直结构,这种低层强辐合,高层强辐散的空间配置,非常有利于中低层暖湿空气的聚集上升,其中高空急流是高层强辐散形成和维持的关键。由暴雪的落区来看,700 hPa的强辐合中心以及强上升运动中心均位于鲁南地区,因而鲁南为这次强降雪中心。

3)暴雪区上空600 hPa以下比湿在 $3 \sim 4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,700 hPa附近有一条自南向北伸展的

湿舌,而暴雪中心与水汽通量散度的强辐合区分布一致。

4)回流暴雪期间,850~925 hPa之间维持一个逆温层,925 hPa以下边界层气温的锐降对雨雪转换起到至关重要的作用。925 hPa温度降至 $-4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、1000 hPa温度降至 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、地面气温降至 $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,降水相态转为雪。此次过程冷空气势力强,降雪持续时间比较长,是造成鲁南特大暴雪的重要原因。500~850 hPa之间正温度平流迅速增强和减弱,与降雪的开始和结束时间相对应。

参考文献:

- [1] 杨成芳,周雪松,李静,等.基于构成要素的一次切变线暴雪天气分析[J].高原气象,2015,34(5):1402-1413.
- [2] 赵俊荣,杨雪,蔺喜禄,等.一次致灾大暴雪的多尺度系统配置及落区分析[J].高原气象,2013,32(1):201-210.
- [3] 黄海波,徐海容.新疆一次秋季暴雪天气的诊断分析[J].高原气象,2007,26(3):624-629.

- [4] 张芹,丁治英,杨成芳,等.山东一次历史极端降雪过程的诊断分析[J].高原气象,2015,34(4):1131-1138.
- [5] 周雪松,杨成芳,孙兴池.两次早春暴雪过程的对比分析[J].高原气象,2013,32(2):446-455.
- [6] 陈雪珍,慕建利,赵桂香,等.华北暴雪过程中的急流特征分析[J].高原气象,2014,33(4):1069-1075.
- [7] 任丽,杨娃娃,唐熠,等.一次温带爆发性气旋引发的大暴雪过程诊断分析[J].气象与环境学报,2015,31(5):45-52.
- [8] 李青青,程从兰,高华,等.北京一次冬季回流暴雪天气过程的数值模拟分析[J].气象,2011,37(11):1380-1388.
- [9] 董啸,周顺武,胡中明,等.近50年来东北地区暴雪时空分布特征[J].气象,2010,36(12):74-79.
- [10] 张宁,张萍萍,龙利民,等.2010年1月鄂东一次暴雪过程的中尺度分析[J].暴雨灾害,2013,32(1):46-52.
- [11] 杨成芳,姜鹏,张少林,等.山东冬半年降水相态的温度特征统计分析[J].气象,2013,39(3):355-361.
- [12] 张勇,寿绍文,王咏青,等.山东半岛一次强降雪过程的中尺度特征[J].南京气象学院学报,2008,31(1):51-60.
- [13] 杨淑华,梁进秋,张晓东,等.大同市一次暴雪天气过程多普勒雷达速度特征[J].气象与环境学报,2011,27(3):56-60.
- [14] 宋晓辉,田利庆,田秀霞,等.河北省一次回流暴雪的数值模拟[J].气象与环境学报,2013,29(3):8-14.
- [15] 孙建华,赵思雄.华北地区“12.7”降雪过程的数值模拟研究[J].气候与环境研究,2003,8(4):387-401.
- [16] 张迎新,张守保,裴玉杰,等.2009年秋季冀中南暴雪过程的地形作用分析[J].气象,2011,37(7):857-862.
- [17] 郑丽娜,靳军.“2.28”山东罕见“雷打雪”现象形成机制分析[J].高原气象,2012,31(1):1151-1157.
- [18] 张芹,秦增良,张秀珍,等.山东春季两次强降雪过程对比分析[J].气象科技,2016,44(1):78-88.
- [19] 杨成芳,刘畅,郭俊建,等.山东相态逆转降雪天气的特征与预报[J].海洋气象学报,2017,37(1):73-83.