

刘宁微, 齐琳琳, 韩江文. 2009. 北上低涡引发辽宁历史罕见暴雪天气过程的分析 [J]. 大气科学, 33 (2): 275-284. Liu Ningwei, Qi Linlin, Han Jiangwen. 2009. The analyses of an unusual snowstorm caused by the northbound vortex over Liaoning Province in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 275-284.

北上低涡引发辽宁历史罕见暴雪天气过程的分析

刘宁微¹ 齐琳琳² 韩江文³

1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016

2 空军装备研究院航空气象防化研究所, 北京 100085

3 沈阳中心气象台, 沈阳 110016

摘 要 2007 年 3 月 3~5 日, 辽宁大部分地区普降大到暴雪。本文对此次暴雪过程及其成因进行了初步分析, 通过对各种资料, 包括营口多普勒雷达资料的分析, 认为 500 hPa 南北支槽合并带来的强冷暖空气交汇及北上低涡的发展是产生暴雪天气的主要背景; 地面气旋北上带来的南来倒槽是产生暴雪的天气特征; 低空急流输送水汽和低层上升运动是增强降雪强度的有利条件, 这一分析结果对预报暴雪天气具有指示意义。

关键词 暴雪 低涡 槽

文章编号 1006-9895 (2009) 02-0275-10

中图分类号 P426

文献标识码 A

The Analyses of an Unusual Snowstorm Caused by the Northbound Vortex over Liaoning Province in China

LIU Ningwei¹, QI Linlin², and HAN Jiangwen³

1 *Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016*

2 *Institute of Aeronautical Meteorology and Chemical Defence, Equipment Agency of Air Force, Beijing 100085*

3 *Shenyang Central Observatory, Shenyang 110016*

Abstract The satellite, radar and NCEP data are used to analyze an unusual snowstorm over Liaoning Province during 3-5 March 2007. The analysis shows that the combination of south and north troughs at 500 hPa, the northbound vortex at 850 hPa and the cyclone at the surface are very favorable to the occurrence of snowstorm. The intense low level jets and ascending motion at 850 hPa are in favor of the moisture transportation and the intensification of snow. The low level jets and the convergence of wind may be considered as triggering mechanism for the snowstorm.

Key words snowstorm, vortex, trough

1 引言

冬季北方地区的暴雪灾害与夏季暴雨洪涝均为我国主要天气气候事件, 会给国民经济和人民生命财产造成巨大损失。2007 年 3 月 3~5 日东北地区

出现了大范围的降雪, 局部地区出现了暴雪或特大暴雪, 其中, 辽宁大部分地区出现自 1951 年有完整气象记录以来最严重的暴雪和大风天气过程。由此可见, 随着经济的发展、社会的进步、城市化进程的加快, 开展暴雪成因机理和维持机制等研究对

于提高暴雪预报准确率具有重要的科学意义和应用前景。

对于暴雪的研究,国外不仅在触发、加强机制和各尺度天气系统间的相互作用等方面开展了大量工作,同时也对造成暴雪的中尺度系统及其发生发展机理进行了研究。研究表明,欧美的降雪过程大多与温带气旋的形成、发展有关(Bosart et al., 1981; Braham et al., 1983; Sanders, 1986; Ni-nomiya et al., 1991; Marwitz et al., 1993)。中国暴雪的研究始于20世纪70年代末,进入90年代,暴雪研究逐渐采用数值模拟和动力学诊断分析相结合的方法,在发生、发展机理和影响机制等方面取得了明显进展,对于揭示暴雪的演变过程和影响机制起到极大推动作用(朱爱民等, 1994; 王建中等, 1995; 朱福康等, 1998; 王文等, 2000; 徐建芬等, 2000; 张小玲等, 2000; 邓远平等, 2000; 宫德吉等, 2001; 赵思雄等, 2002; 孙继松等, 2003; 孙建华等, 2003)。但我们也应清楚地意识到,我国的暴雪灾害主要发生在东北地区和西北高原山区,而目前针对我国降雪过程的数值模拟和动力学诊断分析主要集中在高原暴雪过程,对东北地区暴雪的研究相对较少。因而,有必要深入、系统地开展东北地区暴雪成因机理的观测分析与数值模拟研究,这既是我国灾害性天气研究的一个重要组成部分,也是提高我国北方地区冬季暴雪灾害天气预报的一个重要环节,不仅具有重要的科学意义,而且对国民经济和社会发展有重要的实用价值。

2 雪情和灾情

2007年3月3日1000 UTC至3月5日0000 UTC,辽宁大部分地区普降大到暴雪。全省61个国家气象观测站中有48个站的降雪量在10 mm以上,超过暴雪量级,其中32个站观测降雪量在25 mm以上,达到大暴雪量级。78 mm的最大降雪量出现在鞍山市区,为特大暴雪(降水量 ≥ 50 mm)。本溪、辽阳和沈阳地区的降雪量也超过或接近50 mm。整个降雪期间的降雪强度以3月4日上午最大,仅沈阳、鞍山3日2100 UTC~4日0500 UTC的累积降雪量就分别达到29.7 mm和43.9 mm。积雪深度普遍超过20 cm,其中沈阳、鞍山、抚顺、本

溪、辽阳和锦州的积雪深度均超过30 cm,清原积雪最深,为44 cm。伴随降雪过程还出现大风降温天气。全省最大降温幅度达 12°C ,偏北大风平均达6~7级,阵风8~9级,其中,旅顺最大瞬时风速达32.9 m/s,为12级,创1951年以来最大值。图1是辽宁3月3日1000 UTC至5日0000 UTC的降水量分布图。

此次暴雪影响范围广、强度大,给通信、交通运输和人们日常生活带来严重影响。沈阳桃仙国际机场从4日0000 UTC起关闭,并进入紧急状态。通往市区的道路积雪严重,旅客疏散十分困难。省内长途班车,以及沈阳至外省的长途班车都已停驶。一些地方积雪可达一人多高,市内“满城尽是抛锚车”,交通几近瘫痪。此外,由于暴雪积压,沈阳市皇姑区明廉农贸大厅3个拱形顶棚全部坍塌,至少造成1人死亡,7人受伤。沈阳中心气象台不仅分别于4日上午和傍晚两次发布雪灾红色预警信号,而且市政府为保证除雪运雪工作进行顺利,决定3月5日当天除特种车辆及除雪运雪车辆外,其他一切车辆禁止出行,全市各大中专院校、中小学停课一天(李大为等, 2007)。依据“辽宁省气象灾害评估办法”^①,此次暴雪天气的评估是一级暴雪灾害,属最严重级别,这次极端天气事件影响之大在社会各界引起了极大的关注。

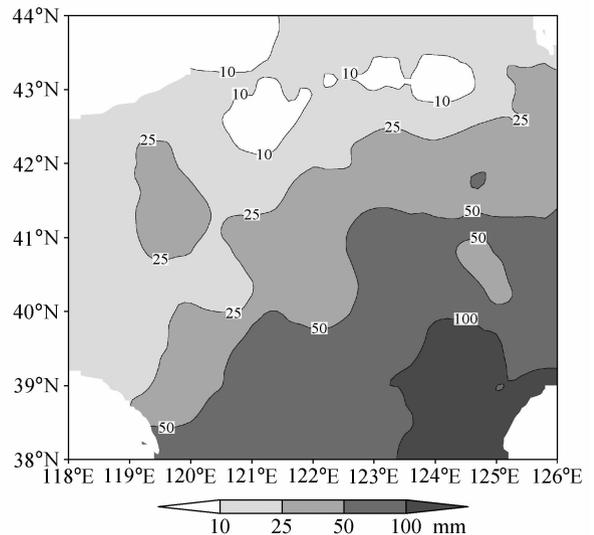


图1 2007年3月3日1000 UTC~5日0000 UTC降水量分布
Fig. 1 The observed precipitation from 1000 UTC 3 Mar to 0000 UTC 5 Mar 2007

① 辽宁省质量技术监督局, 2006. 辽宁省地方标准, DB21/T 1454-2006.

3 暴雪过程的天气形势分析

3月3日0000 UTC, 500 hPa 欧亚中高纬度地区处于“两脊一槽”稳定径向型环流控制中。同时, 河套西南部有一南支低槽形成并东移发展, 槽底可南伸至长江中上游地区, 南北向的两支槽构成阶梯状分布(图 2a)。3日1200 UTC, 北部高空槽南下至贝加尔湖东北部地区, 槽后西北气流引导冷空气主体南落至(60°N, 117°E)附近, 冷涡前部西北气流携带的冷空气抵达东北地区。与此同时, 河套西南部逐渐东移北上的槽携带了大量西南暖湿气

流(图 2b)。4日0000 UTC, 南北支高空槽基本处于同位相, 辽宁处于北支槽后部西北气流与南支槽前部的西南气流交汇处。500 hPa 上南北槽的合并加强使得冷暖空气交汇是造成辽宁暴雪的主要环流形势(图 2c)。5日0000 UTC, 高空槽东移进入吉林省, 冷中心位于(60°N, 129°E)附近, 辽宁降雪过程结束(图 2d)。

3日0000 UTC, 850 hPa 上西南地区东部有一中心位势高度为 1400 gpm 的较强低涡存在, 并伴随着西南暖湿气流迅速向东北方向移动。3日1200 UTC, 低涡中心移至山东西南部, 与其相伴的西南

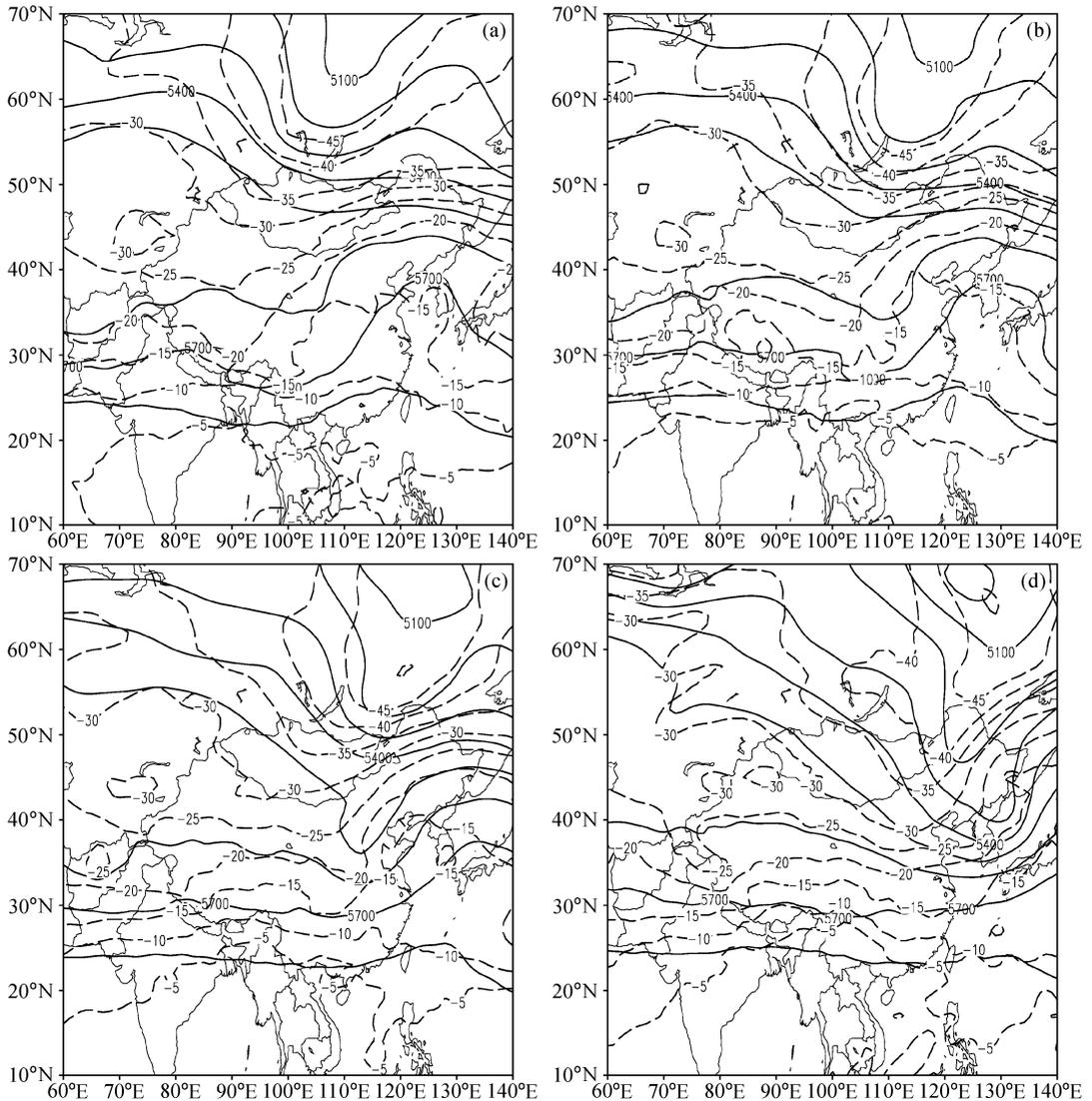


图 2 2007 年 3 月 3~5 日 500 hPa 位势高度(实线, 单位: gpm)与温度场(虚线, 单位: °C)分布: (a) 0000 UTC 3 Mar 2007; (b) 1200 UTC 3 Mar 2007; (c) 0000 UTC 4 Mar 2007; (d) 0000 UTC 5 Mar 2007

Fig. 2 The geopotential height (solid line, units: gpm) and temperature (dashed line, units: °C) at 500 hPa: (a) 0000 UTC 3 Mar 2007, (b) 1200 UTC 3 Mar 2007; (c) 0000 UTC 4 Mar 2007; (d) 0000 UTC 5 Mar 2007

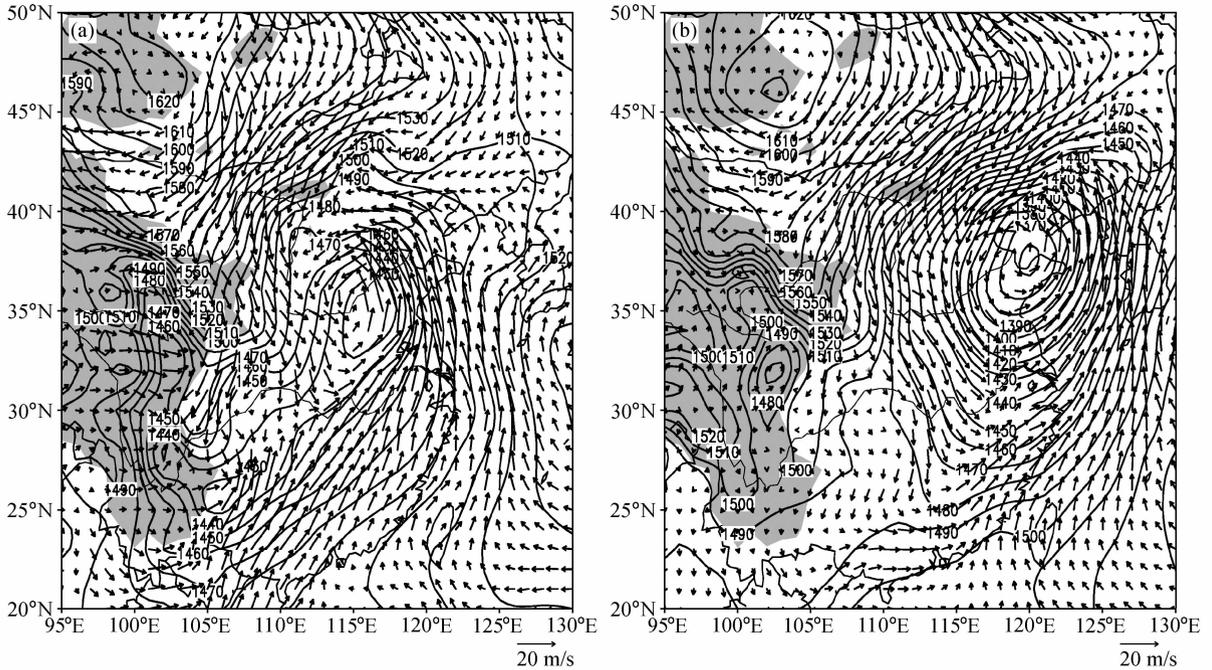


图3 2007年3月3~4日850 hPa位势高度(单位:gpm)与风场分布:(a)3日1200 UTC

Fig. 3 The geopotential height (gpm) and wind field at 850 hPa; (a) 1200 UTC 3 Mar 2007; (b) 0000 UTC 4 Mar 2007

暖湿气流在江苏北部沿海地区与来自西太平洋的偏南暖湿气流汇合(图3a)。之后,沿着海上高压边缘,低涡继续北上且发展加强,4日0000 UTC,低涡中心位于山东半岛北部渤海上,位势高度降低6 gpm(图3b)。相应时段的地面图上,随着江淮地区闭合气旋的北上,与其相伴随的南来倒槽在3日1800 UTC就已开始影响辽宁(图略)。由此可以认为,地面北上气旋和气旋前部的倒槽是产生暴雪的主要天气特征,对流层低层相对浅薄的低涡系统具有随500 hPa高空气流移动的特征。

综上所述,500 hPa南北支槽合并带来的强冷暖空气交汇和北上低涡的发展,以及地面气旋北上带来的南来倒槽共同造成了这次雪灾。相比而言,辽宁此次降雪过程与欧美经典降雪过程及以往辽宁暴雪过程有很大相似之处,即降雪过程往往是低压、气旋、倒槽等天气系统所引发,例如,墨西哥湾气旋东北上引发美国东部降雪(Marwitz, 1993);地面倒槽发展引发的位于倒槽顶部高空锋区的辽宁暴雪。

4 暴雪过程的中尺度特征及演变

4.1 降雪期间中尺度云团变化特征

尽管辽宁各地区3月3~5日的天气形势一致,

但各地的降水强度却不尽相同。为弄清降水过程中局地天气系统的特征及演变,我们对暴雪期间的云系演变进行了分析。可以看到,3日1000 UTC之后,低涡云系开始影响辽宁西部,云团强度不大,强中心则位于渤海湾附近。此后,随着系统的东移北上,云系明显东移并加强,覆盖辽宁大部分地区云团的云顶亮温低于 -50°C ,且云团中存在3个尺度相对小的强中心,分别位于华北偏东北地区、渤海湾以及辽宁中部地区(图4a)。随着云团向东北方向的移动,位于辽宁中部的云团强度基本维持,但尺度逐渐减小。与此同时,华北偏东北和渤海湾地区的云团合并发展。3日2200 UTC~4日0000 UTC期间,云系主体覆盖了辽宁大部分地区, α 中尺度云团的云顶亮温在 -60°C 以下,且4日0000 UTC辽宁西部地区有一中心云顶亮温在 -70°C 以下的 β 中尺度云团(图4b),但该云团从形成到消亡仅持续了3个小时左右。之后,控制辽宁地区的 α 中尺度云团逐渐向东北方向移动,并不断减弱直至消亡。由此可见,云系发展和移动与降雪有较好的对应关系,暴雪出现在云系内部局地增强阶段。即3日2200 UTC~4日0000 UTC控制辽宁大部分地区的云系主体发展达到最强,且内部有 β 中尺度云团从渤海湾地区向东北方向移动,云团在云系内部

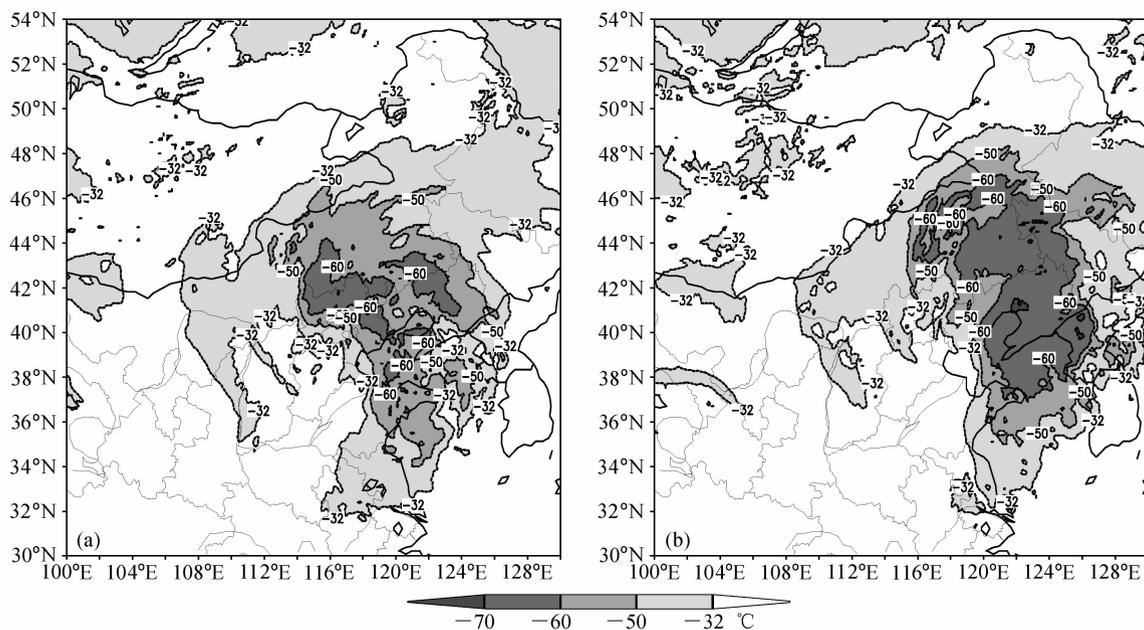


图4 2007年3月3~4日卫星云顶亮温分布:(a)3日2000 UTC;(b)4日0000 UTC

Fig. 4 The Black Body Temperature (TBB) at (a) 2000 UTC 3 Mar 2007 and (b) 0000 UTC 4 Mar 2007

维持时间短、尺度小,但强度较强,辽宁中部地区暴雪的发生与云团加强和移动密切相关。

4.2 降雪期间雷达回波变化特征

尽管卫星资料较好地揭示出暴雪期间云系的演变特征,但个别时段资料有所缺失,因此下面将利用对营口 0.5° 仰角多普勒雷达回波的分析来完善云系内部局地增强特征方面的描述。从雷达回波分析可以看到,3日1059 UTC回波从西南方进入辽宁境内(图5a),之后在辽宁境内逐渐向东北方向扩展并加强(图5b)。3日2229 UTC,回波覆盖了整个辽宁地区,但西部和北部地区的回波强度始终在30dBZ左右,而中南部地区的回波强度则有明显增强。南部强暖空气的逼近使得辽东湾至鞍山一带出现强度在40dBZ的回波带,其上的最强回波区位于辽东湾附近。与此同时,相对强回波的最北端到达鞍山,鞍山南北部的雷达回波强度梯度较大(图5c)。之后,随着回波带的逐渐向东北方向移动,4日0147 UTC,营口、鞍山、辽阳及以东地区均处在强度为40dBZ的回波区内,中心强度为53dBZ的强回波位于鞍山南部岫岩到本溪南部草河口一带(图5d)。随着回波逐渐减弱东移,降雪过程也随之结束。整个过程回波强度演变与降水量分布基本相当,中部及东南地区强,西北地区弱,且局地回波演变表现出发展增强特性。由此可知,

此次降雪局地回波演变具有一定的短时强对流特征,但维持时间短,强对流特征相对弱。而较大范围降雪所对应的雷达回波特征为范围大、分布相对均匀连续、边缘模糊、丝缕状结构清晰、强度梯度小等。

5 造成暴雪的物理机制分析

5.1 高低空急流的有效配合

300 hPa南支副热带西南急流在3日1200 UTC移至 30°N 以北,最大风速中心达60 m/s以上。副热带急流的明显北跳说明暖湿空气活动异常活跃。4日0000 UTC,北支极锋急流已由淮东西向转为东北-西南向,急流南端南压至河套西南部,与南支急流汇合,而东北端位于黑龙江北部。两支高空急流在东部沿海地区呈喇叭口状,辽宁正处于北支急流出口区右侧强辐散区中。

850 hPa偏南急流和西南急流在3日1200 UTC迅速加强,急流前端伸展至山东半岛,中心强度约为22 m/s,有利于水汽源源不断地向北输送。与此同时,位于内蒙古境内的东北急流向东南扩展,风速达16 m/s。4日0000 UTC,西南急流、偏南风急流和东北急流均继续加强,三支急流的最大风速中心分别可达30 m/s、30 m/s和24 m/s,辽宁正处于三支低空急流出口区的左侧。此外,贝加

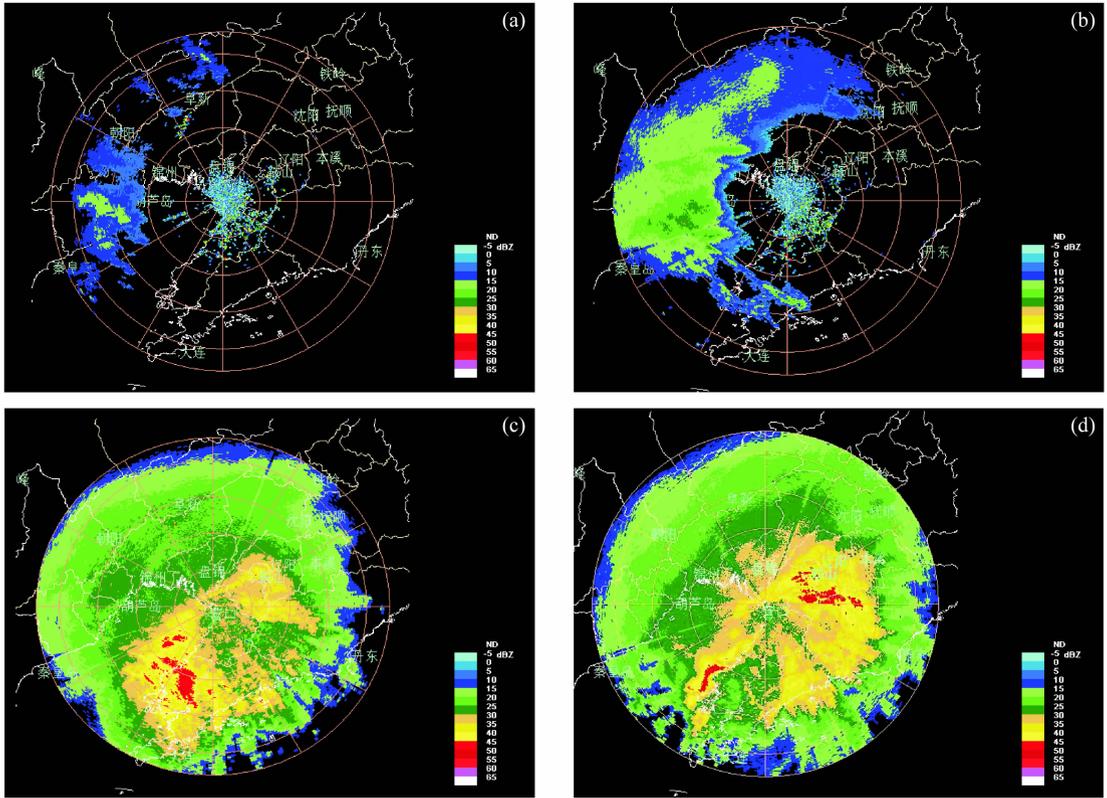


图5 2007年3月3~4日雷达回波分布图: (a) 3日 1059 UTC; (b) 3日 1505 UTC; (c) 3日 2229 UTC; (d) 4日 0147 UTC

Fig. 5 The radar echo images; (a) 1059 UTC 3 Mar 2007; (b) 1505 UTC 3 Mar 2007; (c) 2229 UTC 3 Mar 2007; (d) 0147 UTC 4 Mar 2007

尔湖南下的冷空气在东北急流回流作用下,正好在渤海湾附近与暖湿空气交汇,从而加强了山东半岛至辽宁地区的气旋性辐合环流。由此可知,辽宁大部分地区处于北支高空急流出口区右侧的辐散区和多支低空急流出口左侧的辐合区(图6),高低空急流的配合加速了该地区低层辐合上升运动。低空急流对水汽的不断输送和低层上升运动加强为降雪强度的增强提供了有利机制。这与以前的暴雪研究中指出东北暴雪产生在高空偏西急流右侧、低空西南风急流左前侧相类似(胡中明等,2005)。所不同的是,此次降雪中高空急流呈东北-西南向分布,而低空急流强且多,是暴雪的主要触发机制之一。

5.2 暖湿气流的输送与聚集

0.5°仰角的营口多普勒雷达径向速度分布显示,降雪前期,清晰、连续的零速度线呈“S”型,曲率较大(图7a),这说明风随高度强烈顺时针旋转,雷达站上空暖平流强,暖湿气流输送强。而图7a上正、负速度大值区(30~50 km处)表明,低层存在东北急流,有较强冷空气向南扩展,而高空

仍维持偏南气流。4日0000 UTC后,零速度线曲率开始变化,雷达站南侧曲率加大,而北侧曲率变小,风场特征由纯粹的暖平流风场转变为暖平流与大尺度辐合风场叠加的复合风场(图7b)。此时,雷达站上空不仅有强的暖湿气流输送,而且还存在一定程度的风向辐合,有利于暖湿气流的聚集。由此可以说,不仅低空急流,而且风向辐合也是此次暴雪的触发机制之一。

对于降雪期间雷达站上空存在强暖湿气流输送这一特征,2007年3月3日1757 UTC~1900 UTC的雷达速度方位显示风廓线产品(VWP)也有很好的反映(图8)。可以看到,离地面0.3 km高度上为东北风,风向随高度强烈地顺转,1.2 km高度上风转为东南风,2.7 km高度上风转为西南风,向上均为深厚西南气流。2 km高度内风向旋转接近180°,说明雷达站中高空不仅存在强烈的暖平流,有强的暖湿输送,同时低空还存在强烈的风向切变,能为降雪加强提供能量。另外,风向变化的同时,风速也表现出从低层到高层先减后增的变化趋

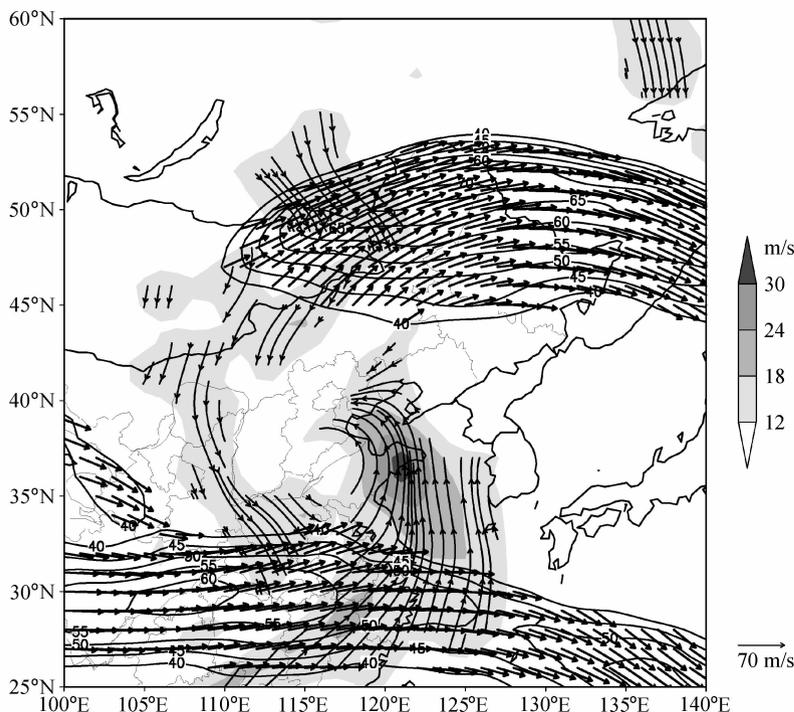


图 6 2007 年 3 月 4 日 0000 UTC 300 hPa (实线和风矢量, ≥ 40 m/s) 和 850 hPa (阴影和流线, ≥ 12 m/s) 风场分布组合图

Fig. 6 The wind field (m/s) at 300 hPa (solid line and wind vector, ≥ 40 m/s) and 850 hPa (shaded and streamline, ≥ 12 m/s) at 0000 UTC 4 Mar 2007

势。位于 2.4 km 以上的大于 12 m/s 的东南急流在 3 日 1800 UTC 左右开始下传, 3 日 1900 UTC 左右到达 1.2 km 高度, 之后就稳定维持在此高度附近, 与之对应的回波强度也有一加强过程。风廓线演变特征的分析不仅很好地揭示出此次暴雪过程中低空急流的变化, 而且对于反映暖湿气流的输送也有较为直观的指示意义。

暖湿气流的输送对于暴雪的发生和持续固然重要, 但暖湿气流的局地聚集对于强暴雪的发生更有意义。尽管之前雷达径向速度分布已显示, 雷达站上空不仅有强的暖湿气流输送, 而且还存在一定程度的风向辐合, 有利于暖湿气流的聚集。但水汽通量及其散度的分析可以对水汽聚集区域及能力有更明确的说明。分析表明, 3 日 1200 UTC, 850 hPa 上来自南海的西南暖湿气流与来自西太平洋的偏南暖湿气流在江苏北部沿海地区汇合, 强水汽输送中心为 $15 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}$, 水汽辐合强度小于 $-4 \times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}$ (图 9a)。而 4 日 0000 UTC, 随着西南、偏南低空急流的北上, 两股暖湿气流在辽东半岛汇合, 强水汽输送和辐合中心的强度分别达到 $25 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}$ 和 $-8 \times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}$ (图 9b)。由此可以确认, 南海和西太平洋是此次

降雪的能量和水汽源地, 低空西南急流和偏南急流的输送使得暖湿气流被源源不断地输送到辽宁, 并得以聚集, 从而为降雪强度的增强提供了有利条件。

5.3 发展低涡内上升运动的维持增强

3 月 4 日 0000 UTC 沿 122.5°E 的涡度、散度、垂直速度分布 (图 10) 表明, 850 hPa 上中心强度为 $24 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 正涡度区与近地层中心强度为 $-16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的强辐合区基本对应, 且辐合区上层为辐散区。上升运动位于正涡度区内, 叠加在低层正涡度中心之上, 强度约为 $-2.4 \times 10^{-3} \text{ hPa/s}$ 的上升气流中心位于 700 hPa 附近, 对于低涡内低层暖湿气流聚集后的向上输送具有重要意义, 上升运动加强阶段对应着低涡发展及降水强度增强阶段。此外还须指出的是, 上升气流区始终位于高空急流和低空急流重叠区域内, 这说明高低空急流的有利配合有助于低层上升运动加强, 从而为降雪强度的增强提供有利条件。

6 结论与讨论

本文利用多种资料对 2007 年 3 月 3~5 日辽宁暴雪过程进行了初步研究, 分析得出:

(1) 此次辽宁降雪过程与欧美经典降雪过程及

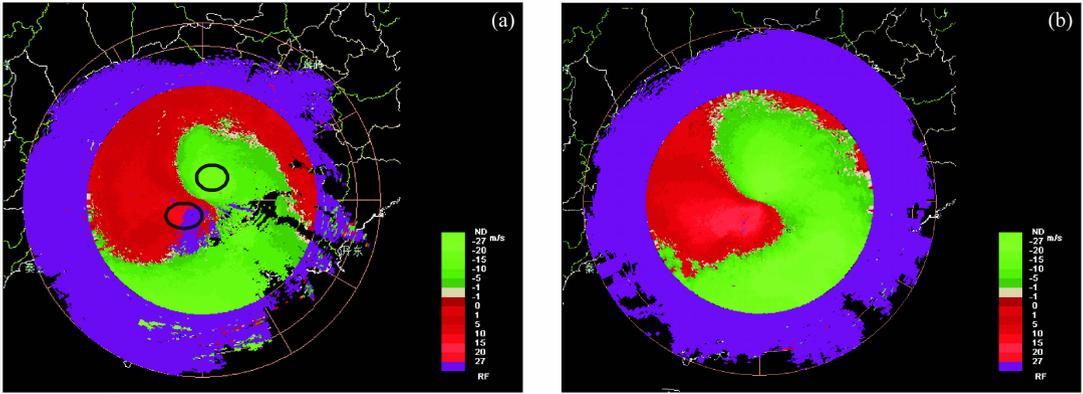


图7 2007年3月3~4日雷达速度图: (a) 3日 1853 UTC; (b) 4日 0134 UTC

Fig. 7 The radar velocity images at (a) 1853 UTC 3 Mar 2007 and (b) 0134 UTC 4 Mar 2007

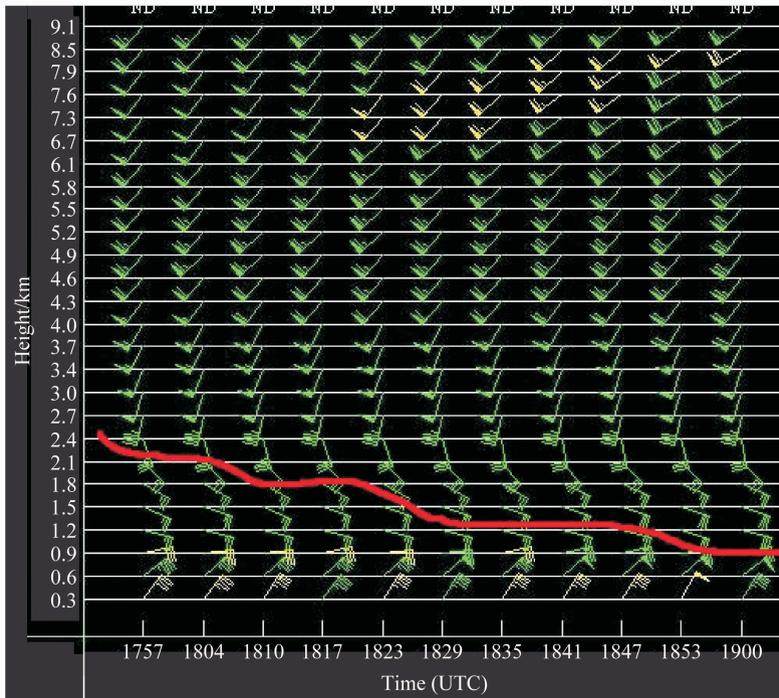


图8 2007年3月3日 1757 UTC~1900 UTC 雷达速度方位显示风廓线产品分布 (单位: m/s)

Fig. 8 The radar wind velocity profile from 1757 UTC to 1900 UTC 3 Mar 2007 (units: m/s)

以往辽宁暴雪过程有很大相似之处,即降雪过程由地面气旋北上带来的南来倒槽所引发。500 hPa 南北支槽合并带来的强冷暖空气交汇及北上低涡的发展是产生辽宁暴雪天气的主要背景。

(2) 云系发展和移动与降雪有较好的对应关系。降雪过程的雷达回波及速度场特征揭示出此次暴雪过程是混合性降水。

(3) 高低空急流的有利配合有利于发展低涡内上升运动的加强,上升气流区始终位于高空急流和

低空急流重叠区域内。低空急流及风向的辐合是此次暴雪的主要触发机制。

作为今后此类暴雪工作的参考,以下是值得我们在预报这类暴雪中注意的:

(1) 充分利用卫星、雷达资料,由卫星资料首先了解暴雪云区的演变和移动,再由更高时空分辨率雷达资料了解云中降雪云团的特征及分布。特别是多普勒雷达径向速度场与回波强度场的结合,能够较准确地预报较大降雪区的位置及变化。

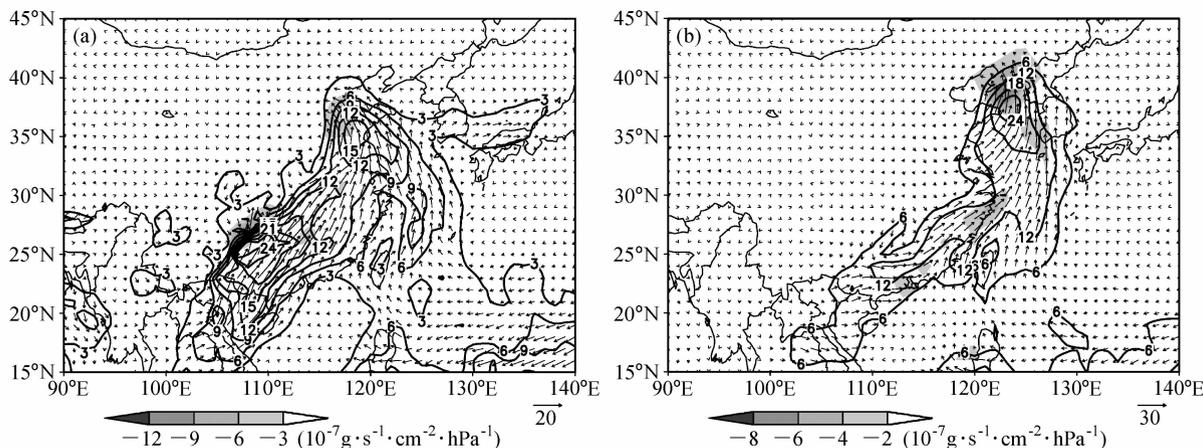


图 9 2007 年 3 月 3~4 日 850 hPa 水汽通量 (箭头和等值线, 单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$) 及其散度 (阴影) 分布: (a) 3 日 1200 UTC; (b) 4 日 0000 UTC

Fig. 9 The moisture fluxes (arrows and isolines, units: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$) and the divergences of moisture fluxes (shaded) from 3 to 4 Mar 2007: (a) 1200 UTC 3 Mar 2007; (b) 0000 UTC 4 Mar 2007

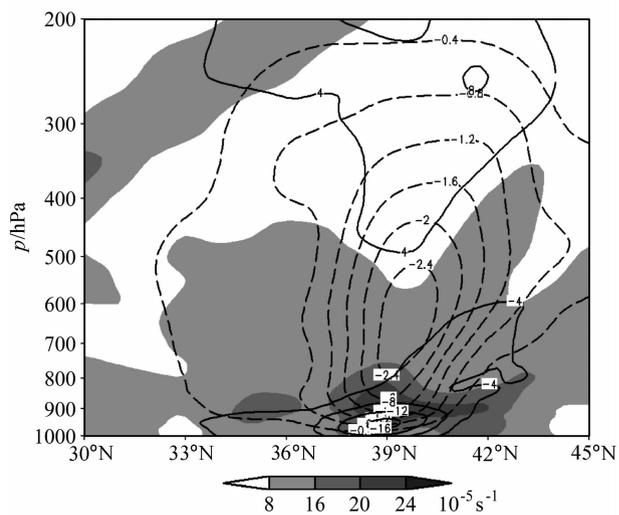


图 10 2007 年 3 月 4 日 0000 UTC 涡度 (阴影)、散度 (实线, 单位: 10^{-5}s^{-1})、垂直速度 (虚线, 单位: 10^{-3}hPa/s) 沿 122.5°E 的垂直分布图

Fig. 10 The vertical cross sections of vorticity (shaded), divergence (solid line, units: 10^{-5}s^{-1}) and vertical velocity (dashed line, units: 10^{-3}hPa/s) along 122.5°E at 0000 UTC 4 Mar 2007

(2) 降雪之前有冷空气经贝加尔湖侵入东北地区, 且高空槽前偏南气流加强, 东北地区处于干冷和暖湿空气的交汇带, 依据斜压性 (温度平流) 是中高纬度天气系统发展的基本原因, 由此用以判定是否有利于较大降雪的出现。

参考文献 (References)

Bosart L F. 1981. The Presidents' Day snowstorm of 18 - 19 Febru-

ary 1979: A subsynoptic-scale event [J]. Mon. Wea. Rev., 109 (7): 1542 - 1566.
 Braham R R, Jr. 1983. The Midwest snow storm of 8 - 11 December 1977 [J]. Mon. Wea. Rev., 111 (2): 253 - 272.
 邓远平, 程麟生, 张小玲. 2000. 三相云显式降水方案和“96.1”暴雪成因的中尺度数值模拟 [J]. 高原气象, 19 (4): 401 - 414.
 Deng Yuanping, Cheng Linsheng, Zhang Xiaoling. 2000. Three-phase cloud explicit precipitation scheme and mesoscale numerical simulation for generated cause of the “96.1” snowstorm [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (4): 401 - 414.
 宫德吉, 李彰俊. 2001. 内蒙古暴雪灾害的成因与减灾对策 [J]. 气候与环境研究, 6 (1): 132 - 138. Gong Deji, Li Zhangjun. 2001. The cause of heavy snow disaster formation and countermeasure of decreasing disaster in the Inner Mongolia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (1): 132 - 138.
 胡中明, 周伟灿. 2005. 我国东北地区暴雪形成机理的个例研究 [J]. 南京气象学院学报, 28 (5): 679 - 684. Hu Zhongming, Zhou Weican. 2005. Case study on the genesis of a snowstorm over the northeast region in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (5): 679 - 684.
 李大为, 路爽, 张子峰. 2007. 沈阳百年最大降雪过程分析 [C]. 全国雪灾监测预报预警评估技术研讨会论文集. Li Dawei, Lu Shuang, Zhang Zifeng. 2007. The analysis of the most snowfall during a century in Shenyang [C]. Conference Proceeding on the Evaluation Technology of Observing, Forecasting and Forwarding for Snow Disaster in China (in Chinese).
 Marwitz J D, Toth J. 1993. A case study of heavy snowfall in Oklahoma [J]. Mon. Wea. Rev., 121 (3): 648 - 661.
 Ninomiya K. 1991. Polar low development over the east coast of Asian continent on 9 - 11 December 1985 [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 69 (6): 669 - 685.

- Sanders F. 1986. Frontogenesis and symmetric stability in a major New England snowstorm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 114 (10): 1847-1862.
- 孙继松, 梁丰, 陈敏, 等. 2003. 北京地区一次小雪天气过程造成路面交通严重受阻的成因分析 [J]. *大气科学*, 27 (6): 1057-1066. Sun Jisong, Liang Feng, Chen Min, et al. 2003. An analysis on serious city traffic trouble caused by light snow [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (6): 1057-1066.
- 孙建华, 赵思雄. 2003. 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*, 8 (4): 387-401. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2003. A numerical simulation of snowfall in North China on 7 December 2001 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 8 (4): 387-401.
- 王建中, 丁一汇. 1995. 一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究 [J]. *气象学报*, 53 (4): 451-459. Wang Jianzhong, Ding Yihui. 1995. Research of moist symmetric instability in a strong snowfall in North China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 53 (4): 451-459.
- 王文, 程麟生. 2000. “96. 1”高原暴雪过程湿对称不稳定的数值研究 [J]. *高原气象*, 19 (2): 129-140. Wang Wen, Cheng Linsheng. 2000. Numerical study of conditional symmetric instability of “96. 1” snowstorm [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19 (2): 129-140.
- 徐建芬, 陶健红, 夏建平. 2000. 青藏高原切变线暴雪中尺度分析及其涡源研究 [J]. *高原气象*, 19 (2): 187-197. Xu Jianfen, Tao Jianhong, Xia Jianping. 2000. A meso-scale analysis of Qinghai-Xizang Plateau snow storm and its vortex source study [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19 (2): 187-197.
- 张小玲, 程麟生. 2000. “96. 1”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断 I: 涡度和涡度变率诊断 [J]. *高原气象*, 19 (3): 286-294. Zhang Xiaoling, Cheng Linsheng. 2000. Dynamic diagnoses of the genesis and development for the mesoscale shear line during “96. 1” snowstorm. I: Diagnoses of vorticity and vorticity variability [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19 (3): 286-294.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 2002. 北京“12. 7”降雪过程的分析研究 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 7-21. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. 2002. A study on snowfall in Beijing on 7 December 2001 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (1): 7-21.
- 朱爱民, 寿绍文. 1994. 一次冬季暴雪过程锋生次级环流的诊断分析 [J]. *南京气象学院学报*, 17 (2): 183-187. Zhu Aimin, Shou Shaowen. 1994. Diagnosis of frontogenetical secondary circulation in a winter snowstorm event [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 17 (2): 183-187.
- 朱福康, 郑新江, 罗敬宁, 等. 1998. 藏南暴雪过程的水汽图像 [J]. *科学通报*, 43 (20): 2232-2235. Zhu Fukang, Zheng Xinjiang, Luo Jingning, et al. 1998. Moisture imagery of a snowstorm in South Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 43 (20): 2232-2235.