

段丽,张琳娜,王国荣,等. 2009 年深秋北京大雪过程的成因分析[J]. 气象,2011,37(11):1343-1351.

2009 年深秋北京大雪过程的成因分析^{* 1}

段 丽¹ 张琳娜² 王国荣² 段 炼³

1 中国气象局公共气象服务中心,北京 100081

2 北京市气象台,北京 100089

3 内蒙古巴彦淖尔市气象处,巴彦淖尔 150000

提 要: 北京地区的初雪平均在 11 月 28 日前后。2009 年 10 月 31 日夜间至 11 月 1 日白天北京出现雨转雨夹雪,再转大雪的天气过程。作为初雪,这是北京 22 年来罕见的。分析表明,这次过程降水前 12 和 6 h 华北中东部的黄河下游以北地区对流层中低层受一致的西北气流控制,前期水汽输送和积累不明显。北京地区在 10 月这样一个相对干燥的季节和前期水汽不充沛的环流形势下产生大雪局地暴雪,实不多见。文章利用中国气象局 MICAPS 常规气象资料和北京地区风廓线雷达、微波辐射仪、地面自动站等多种本地加密探测资料,对这次大雪过程进行了动力计算和成因分析。结果显示,由对流层上层贝加尔湖强冷空气向南爆发所引发的动力作用是北京这次初冬大雪形成的主要原因。大雪发生前 500 hPa 正涡度平流区、对流层中上层水平辐散中心、对流层中下层水平辐合中心呈垂直结构控制北京,为北京地区提供了有利的上升运动动力环境。山前和平原地区近地面东南风,边界层偏东风及边界层以上的对流层底层偏西风的风廓线分布在北京西部地形作用下产生动力抬升和局地对流,增强了北京西南部的降雪。这次北京大雪的水汽条件源于近地面偏南风 and 东南风的短时间局地增湿,以及这种增湿在高空强冷气团作用下产生的对流层中低层的局地水汽辐合。

关键词: 大雪成因, 风廓线, 微波辐射, 动力分析, 概念模型

A Dynamic Diagnosis of the 091031 First Snowfall in Beijing with Some New Intensive Soundings

DUAN Li¹ ZHANG Linna² WANG Guorong² DUAN Lian³

1 CMA Public Meteorological Service Centre, Beijing 100081

2 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

3 Bayannur Meteorological Office of Inner Mongolia, Bayannur 150000

Abstract: Usually, the time of the first snowfall in Beijing is about on November 28. During the period of the nighttime of October 31, 2009 to daytime of November 1, 2009, there was a weather process which never occurs over the past 22 years. In this process, the precipitation firstly acted as rain, then converted to sleet and finally in the form of snow. Analysis shows that, over the north region of the Yellow River in middle and east parts of North China, the lower troposphere was controlled by northwest flows for 6 hours even to 12 hours before this snowfall, thus the transport and accumulation of water vapor were not obvious. This snowfall process is infrequent for Beijing in such a dry condition in October. The dynamic calculation and analysis of this snowfall process were conducted with the MICAPS data of CMA, windprofiler, radiometric and surface automatic weather station observations in Beijing. The result shows that, the dynamic action of the southward outbreak of strong cold air from Baikal Lake in upper troposphere was the

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006010)、国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2008BAC37B00 和 2008BAC37B05)及北京市气象局科研基金项目“偏东风对北京地区降雪影响的研究”共同资助

2010 年 11 月 23 日收稿; 2011 年 5 月 13 日收修定稿

第一作者: 段丽,主要从事灾害性天气预报与研究及公共气象服务. Email: dlxinna8@sina.com

main reason for this snowfall process. A 500 hPa positive vorticity advection area, a middle and upper tropospheric divergence center and a middle and lower tropospheric convergence center were vertically distributed over Beijing, which support the favorable environment for vertical motion; the coactions of the warm and humid southeast winds near the ground in piedmonts and plains, the cold and humid east winds in the boundary layer, the west winds in tropospheric bottom, which were seen in windprofiler, and the topographic effect in western Beijing will generate an uplift and local convection to enhance snowfall in southwest Beijing. This paper proposes a conceptual model about how the wind distribution in windprofiler in the piedmonts and plains of Beijing and the topographic effect will generate the uplift motion and local convection. The water vapor condition of this snowfall is from the short-term growth of humidity by near-surface southerly winds and southeast winds, and the local moisture convergence in the lower troposphere.

Key words: snow causes, windprofiler, microwave radiometer, dynamic analysis, conceptual model

引 言

大雪是冬季常出现的灾害天气之一。尤其是 2008 年初,在我国南方发生的大范围冰冻雨雪天气造成了巨大经济损失。近年来愈来愈多的学者关注大雪成因的研究,成果颇丰。例如:施晓晖等^[1]通过对高原上游关键区水汽输送机制的研究,认为 2008 年初灾害发生期间,中国北方中低层大气盛行偏北气流,使偏北冷空气“楔入”中国东南部低层大气,构成低层“冷垫”,同时偏南暖湿气流源源不断地将大量水汽输送到中国东南部,冷暖气流交汇及其垂直切变导致强烈的上升运动,造成了长江流域特大雪灾的发生。曾明剑等^[2]研究了 2008 年初冰冻雨雪灾害形成的温度场结构,认为降雨、冻雨和降雪 3 种类型降水物的自南向北分布特征是由对流层中低层向北后倾的锋区在南北不同区域上的层结特征和地面温度条件决定的。杨贵名等^[3]认为大气环流形势稳定,来自极地的冷气团与来自热带洋面的暖气团长时间在长江中下游地区交汇,四川盆地有正涡度向东传播,水汽充沛,上升运动强烈是 2008 年初冰冻雨雪天气和暴雪形成的主要原因。王伟等^[4]在 2008 年 1 月九江一次雨淞转大到暴雪过程的大气垂直结构分析中认为,高、低空急流辐散、辐合相互垂直引发的较强上升运动是雨雪天气得以维持的重要条件。另外,在华北地区,周雪松等^[5]对 2004 年 11 月华北一次回流暴雪发展机理的个例模拟研究认为,在华北回流暴雪形成与发展过程中,动力锋生机制产生的锋面次级环流是造成暴雪的主要原因。马秀玲等^[6]认为东部高压脊阻挡导致南北低值系统

合并加强,并移动缓慢,以及低层辐合、低空急流建立并形成的大范围的水汽输送,导致 2007 年春季承德局地暴雪天气的形成。而王迎春等^[7]的研究表明,2002 年 12 月北京地区连续降雪期间华北地区始终处于锋区中,并存在低空辐合、高空辐散的散度场垂直分布结构,同时卫星水汽云图也显示出有水汽通道向河套倒槽云系的水汽输送。

这些工作从不同方面对近年大雪成因进行了很好的研究。如上所述,这些研究主要集中在较大范围降雪的环流形势、水汽条件和动力背景等方面。对于利用本地新型加密探测资料对降雪范围相对较小的局地大雪成因的动力研究很少。文章利用中国气象局 MICAPS 常规气象资料和北京市气象局新近配置安装的风廓线雷达、微波辐射仪、地面自动站等多种本地新型加密探测数据资料,对 2009 年 11 月 1 日北京初冬大雪局地暴雪天气过程进行动力计算和成因分析,揭示北京地区局地暴雪形成的动力机制。

1 降雪实况和主要影响系统

2009 年 10 月 31 日北京地区的降水从夜间 22 时开始,11 月 1 日 02 时前以雨为主,02—06 时雨夹雪,06 时以后逐渐转为降雪。图 1 给出了 2009 年 10 月 31 日 20 时至 11 月 1 日 14 时(北京时,下同)北京地区总降水量和 11 月 1 日 08—14 时北京地区降雪量。图中显示,无论是总降水量还是 11 月 1 日 08 时之后的降雪量,都主要集中在北京的西南部地区,尤其是石景山、门头沟、海淀、昌平及城区一带。其中门头沟总降水量 25 mm;石景山 11 月 1 日 08 时之

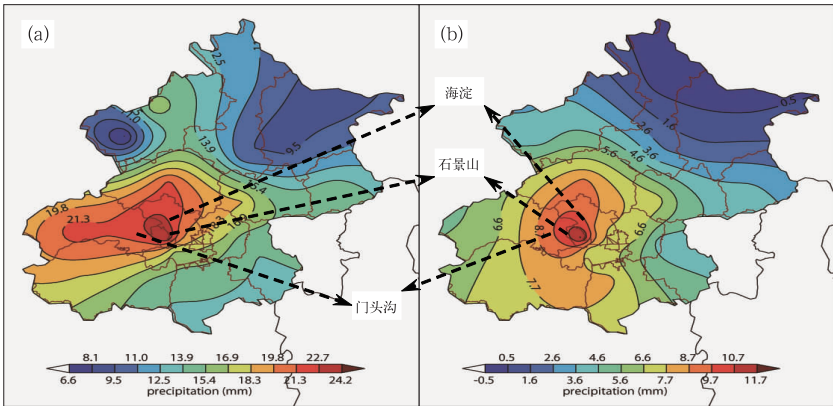


图 1 2009 年 10 月 31 日 20 时至 11 月 1 日 14 时北京地区总降水量(a)和 11 月 1 日 08—14 时北京地区总降雪量(b)(单位:mm)

Fig. 1 Total rainfall amount (a, unit: mm) from 20:00 BT 31 October to 14:00 BT 1 November 2009 and total snowfall amount (b, unit: mm) from 08:00 BT to 14:00 BT 1 November 2009 in Beijing

后降雪量 12 mm(暴雪),门头沟 10 mm(暴雪),海淀和朝阳 8 mm(大到暴雪)。

图 2 给出了 2009 年 10 月 31 日 08 时、11 月 1 日 08 时 500 hPa 高空形势及所对应的卫星云图。图中可见,31 日 08 时与黄河下游西南气流对应的

云带位于北京地区以东(图 2c),之后快速东移减弱。河套西部的槽在西北气流中(图 2a),是干槽,几乎没有云区与之对应(图 2c)。50°N 附近贝加尔湖地区 10 月 31 日 08 时有一股强冷空气,与之对应的横槽和冷云位于贝加尔湖南部地区(图 2a和 2c)。

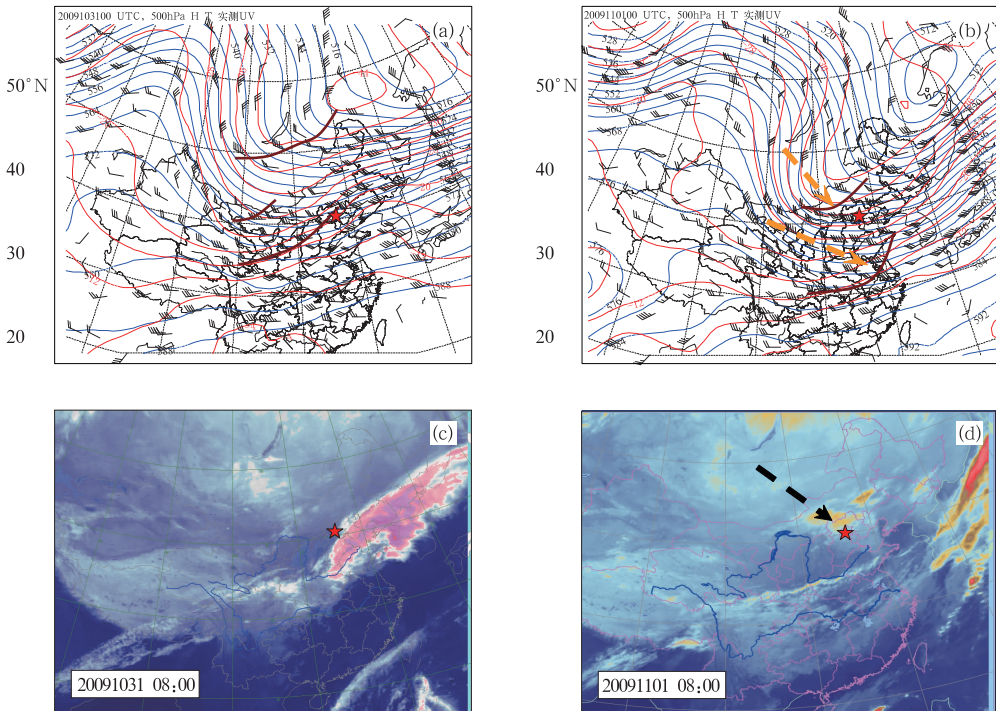


图 2 2009 年 10 月 31 日 08 时(a、c)、11 月 1 日 08 时(b、d) 500 hPa 高空形势场(a、b,单位:dagpm)和卫星云图(c、d)

Fig. 2 The 500 hPa height fields (unit: dagpm) at 08:00 BT 31 October 2009 (a) and 08:00 BT 1 November 2009 (b), and the satellite images at corresponding time (c,d)

11 月 1 日 08 时这股强冷空气迅速向南爆发至华北北部(图 2b),冷云也同时进入北京上空(图 2d),并在北京上空加强,造成强降雪天气。北京地区这次强降雪的主要天气系统,就是这支来自于贝加尔湖地区夹带着强冷空气的横槽。

2 诊断研究

2.1 动力诊断分析

图 3 是 2009 年 11 月 1 日 08 时动力诊断图。图中显示,1 日 08 时伴随着裹带贝加尔湖强冷空气的横槽南压至华北北部(图 3b),北京地区上游内蒙古

中北部呈现强的正涡度中心,中心强度 $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图 3a)。北京地区处于偏西北气流影响下的强的正涡度平流区。图 3b 同时刻涡度平流场的分布显示,沿着 40°N 强度达 $20 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ 的正涡度平流中心位于北京以西河北西部、山西东北部上空,北京西部在其中心范围区内。图 3c~3f 是 1 日 08 时对流层各层(400,500,850 和 925 hPa)水平散度场分布图。图中显示,对流层中下层辐合中心和对流层中上层辐散中心都位于北京地区上空,几乎呈垂直分布。北京上空 400 和 500 hPa 辐散中心强度分别为 $+6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 和 $+4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (图 3c 和 3d),低层 850 和 925 hPa 辐合中心强度 $-4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 和 $-6 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (图 3e 和 3f)。这种对流层低层质量辐

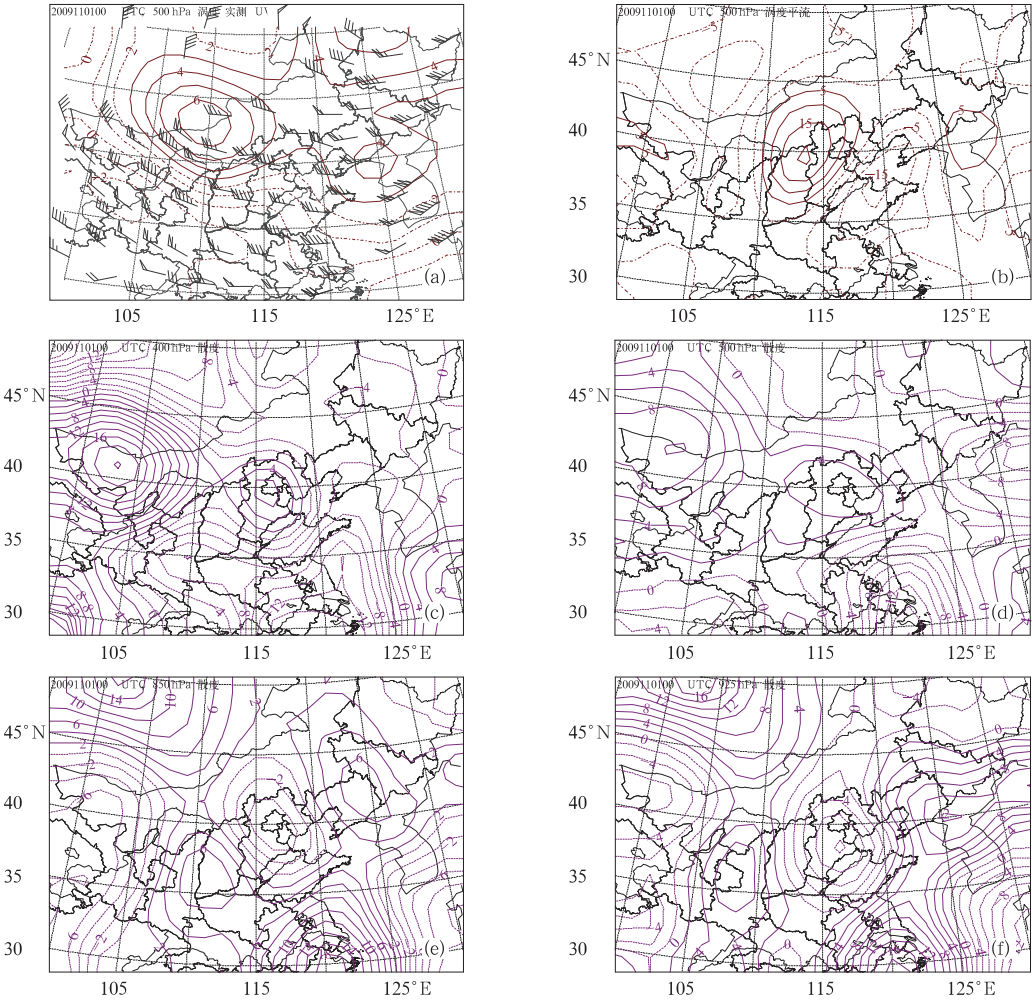


图 3 2009 年 11 月 1 日 08 时 500 hPa 涡度(a)及涡度平流(b)分布及 400 hPa(c)、500 hPa(d)、850 hPa(e)和 925 hPa(f)水平散度分布图

Fig. 3 The 500 hPa vorticity (a) and vorticity advection (b) at 08:00 BT 1 November 2009, and the horizontal divergence of 400 hPa (c), 500 hPa (d), 850 hPa (e) and 925 hPa (f) at 08:00 BT 1 November 2009

合、中高层质量辐散,500 hPa 强正涡度平流输送的动力垂直结构,对北京地区大气的扰动和垂直对流的发展非常有利。事实上,1 日 08 时之后的大雪范围基本都出现在 1 日 08 时低层的辐合中心和高层的辐散中心区附近。以上所述表明,大雪前北京上空强的正涡度平流及低层辐合、高层辐散的垂直动力结构,为北京地区大气的垂直运动提供了十分有利的动力环境,是北京地区这次大雪形成的重要条件。

2.2 水汽条件分析

图 4 是 2009 年 10 月 31 日北京地区 10 min 间隔的地面自动站加密探测资料、北京海淀 12 min 间隔风廓线雷达探测资料及其反演产品温度平流和微波辐射探测相对湿度资料的实况分析图。其中图 4a~4c 分别为 2009 年 10 月 31 日 11:30、16:30 和 22:30 降水开始时北京地区地面实况风矢图;

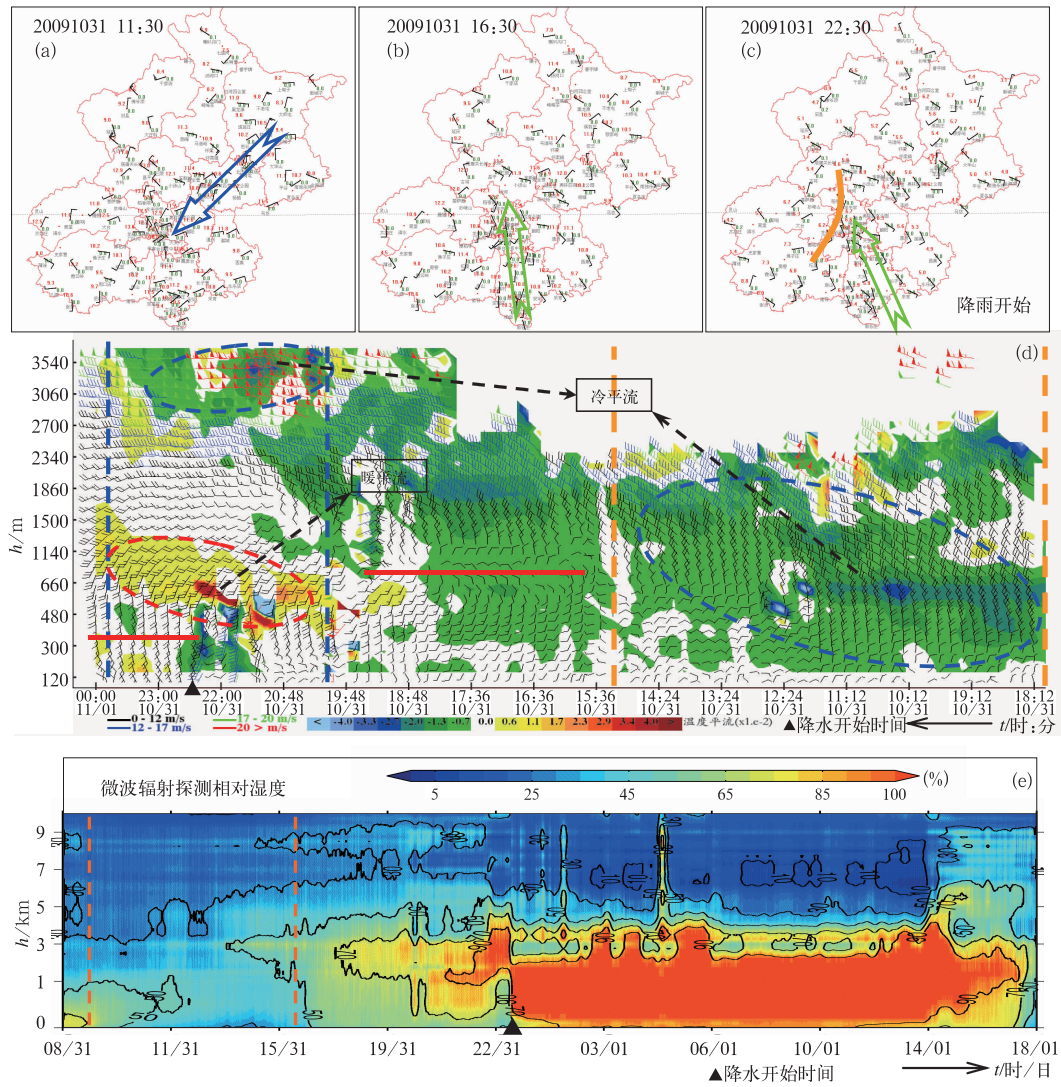


图 4 2009 年 10 月 31 日 11:30(a)、16:30(b)、22:30(c)北京地区地面自动站探测图, 10 月 31 日 08:00—24:00 北京海淀 12 min 间隔风廓线雷达探测(风矢)及其反演产品温度平流(阴影)图(d)及 10 月 31 日 08:00 至 11 月 1 日 18:00 北京微波辐射探测相对湿度垂直分布图(e)

Fig. 4 Surface automatic weather station observations in Beijng at 11:30 BT (a),16:30 BT (b) and 22:30 BT (c) on 31 October 2009; the 12-min interval wind detection and the derivedd temperature advection (shaded) by Haidian windprofiler from 08:00 BT to 24:00 BT on 31 October 2009 (d); and the vertical distribution of relative humidity by radiometer in Beijing from 08:00 BT 31 October to 18:00 BT 1 November 2009 (e)

图 4d 为 31 日 08—24 时北京海淀 12 min 间隔风廓线雷达探测实况风矢垂直分布及反演产品温度平流(阴影)垂直分布;图 4e 为 31 日 08 时至 1 日 08 时北京微波辐射探测相对湿度实况垂直分布变化图。综合分析显示,北京地区 31 日 15 时之前地面(图 4a)至对流层中部(图 4d 垂直橘黄色虚线范围所示)一直受偏北风(图 4a 和 4d 风矢)和低层冷平流(图 4d 大蓝虚线椭圆圈蓝绿阴影所示)控制,整层大气干燥,相对湿度在 50% 以下(图 4e 橘黄色垂直虚线范围)。这一点与常规资料的分析结果相同,2009 年 10 月 31 日 08 时各层高空形势(图略)显示,华北中东部的黄河下游以北地区对流层中下层 925、850 和 700 hPa 受一致的西北气流控制,各层风速都在 $10\sim 12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。

31 日下午 16 时 30 分左右平原地区地面(图 4b)和 900 m 以下近地面(图 4d)开始转受偏南风影响,1500 m 左右的南风在 20 时以后建立(图 4d)。中低层的水汽条件在 20 时以后开始有所

改善,相对湿度增至 70% 以上(图 4e)。22 时 30 分左右北京地区降水开始,地面(图 4c)和近地面(图 4d 黑三角之后)转受东南风控制(图 4d),2000 m 以下相对湿度接近 100% (图 4e 黑三角之后)。此时距 850 hPa 转南风开始增湿仅 3 小时左右。这表明,北京地区这次降水,前期对流层中低层水汽的系统性输送和积累不明显。

图 5 是 2009 年 11 月 1 日 08:00 时 700 和 850 hPa 水汽通量散度图。图中显示,范围 500 km 左右的水汽通量辐合中心区位于北京上空,北京地区主要降水区和大雪区正位于这个小范围的水汽通量辐合区内,即 31 日夜间降水开始之后和 1 日白天大雪发生之前北京地区主要降水区对流层中低层一直维持着小范围的水汽辐合,这对于 1 日白天大雪的发生十分有利。此外,北京地区 10 月下旬气温持续偏高,29 日最高气温 23.3°C 。这个温度下,即使相对湿度较低,空气柱中仍存在一定的净水汽含量。

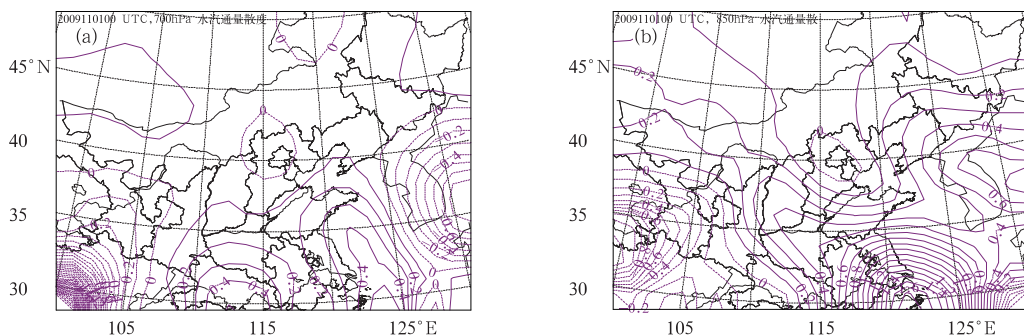


图 5 2009 年 11 月 1 日 08:00 时 700 hPa(a)和 850 hPa(b)水汽通量散度(单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)分布图

Fig. 5 The divergence of water vapor flux at 700 hPa level (a) and 850 hPa level (b) at 08:00 BT 1 November 2009 (unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)

综上所述,北京地区这次大雪天气的水汽条件主要源于近地面偏南风 and 东南风的短时间局地增湿,以及这种增湿在高空强冷气团作用下产生的对流层中低层的局地水汽辐合。上述分析同时揭示了一个事实:北京地区在前期受北风影响,在水汽输送和水汽积累不明显的背景下,如果受到高空强冷气团及其作用下产生的对流层中低层的辐合影响,近地面短时间偏南风 and 东南风的局地增湿仍有可能在北京地区产生较明显降水。

2.3 层结分析

图 6a 是 2009 年 10 月 30 日 08 时至 11 月 1 日

20 时北京南郊观象台 500 和 850 hPa、地面温度和风实况时间序列图。图中显示,10 月 30 日 20 时至 11 月 1 日 20 时北京上空 500 hPa 的温度持续下降,1 日 20 时达到 -37°C 以下,48 小时下降 21°C ;而低层 850 hPa 和地面的温度在此期间下降并不明显,850 hPa 48 小时气温下降 14°C ,地面气温下降仅 7°C 。图 6b、6c 和图 6d、6e 分别是 10 月 31 日 20 时、11 月 1 日 08 时 500 hPa 温度水平分布图和地面自动站风分布图。图中显示 10 月 31 日 20 时 500 hPa 温度冷槽接近北京,北京 500 hPa 温度 24 小时下降 10°C ,接近 -25°C ;而对应的地面气温 7.9°C ,没有下降反而略升。11 月 1 日 08 时 500 hPa 温度

冷槽控制北京,北京 500 hPa 温度降至 -30°C ,此时地面气温 0.4°C ,仍在 0°C 以上。与此同时,31 日 20 时和 1 日 08 时北京 850 hPa(图略)及地面平原和东南部地区仍然受西南风和偏东风影响(图 6d 和 6e),即当 10 月 31 日 20 时 500 hPa 温度冷槽已经接近北京和 11 月 1 日 08 时 500 hPa 温度冷槽完全控制北京时,地面平原及其东南部地区仍然处在相对暖湿的东南气流中。这一点在风廓线雷达探测反演产品温度平流的垂直分布中反映得很清楚。图 4d 阴影图为海淀风廓线雷达探测实况反演产品温度平流时间序列垂直分布。图中 31 日北京地区开

始降雨前后 20:00—24:00 时(蓝色垂直虚线范围所示)3000~3500 m 伴随着西北风加大,较强冷平流中心形成(图 4d 小蓝虚线椭圆圈蓝绿阴影所示),而低层 500~1200 m 则受暖平流和偏南风影响(图 4d 小红虚线椭圆圈黄橘阴影所示)。这表明随着高空横槽的南压,对流层中高层强冷气团控制北京上空,中层 700 hPa 已经受冷平流影响,而对流层底层仍在相对的暖湿气团中,形成了由于高空冷平流先期到达,降温速度急剧,而低层仍保持原气团,降温不明显的相对不稳定层结。这种不稳定层结对降雪强度的加强和维持,是十分必要的。

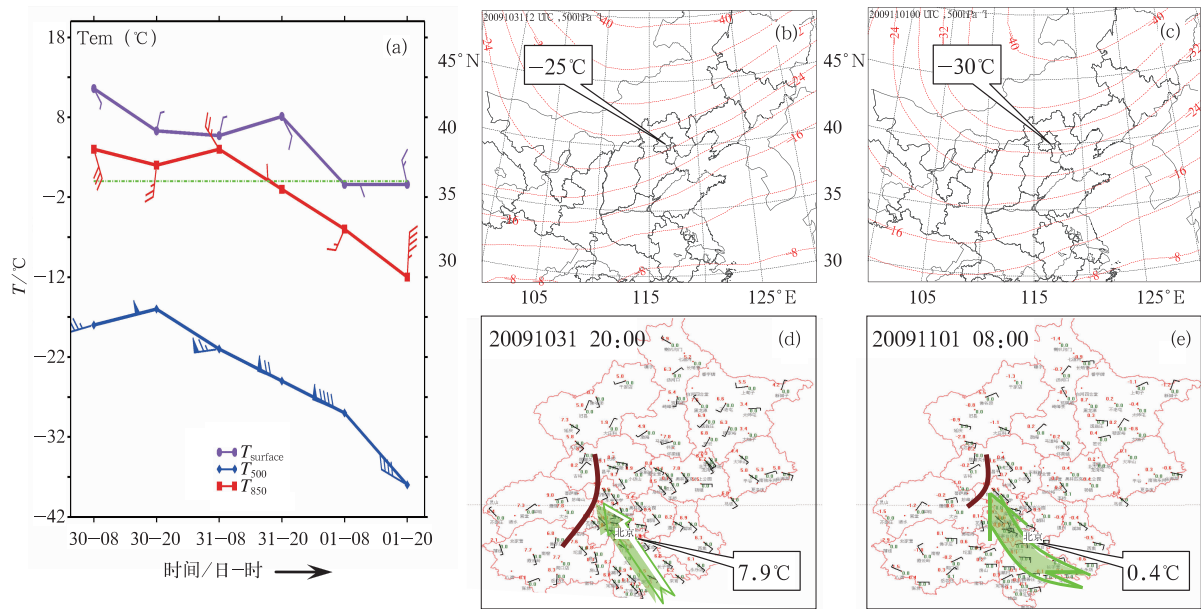


图 6 2009 年 10 月 30 日 08 时至 11 月 1 日 20 时北京南郊观象台 500 hPa(蓝实线)、850 hPa(红实线)和地面(紫实线)温度和风实况时间序列图(a)及 2009 年 10 月 31 日 20 时(b、d)、11 月 1 日 08 时(c、e) 500 hPa 温度分布图(b、c)和地面自动站探测实况(d、e)

Fig. 6 Temperature and wind series (a) of Nanjiao Observatory at 500 hPa (blue solid) and 850 hPa (red solid) level from 08:00 BT 31 October to 20:00 BT 1 November 2009; the 500 hPa temperatures at 20:00 BT 31 October (b) and 08:00 BT 1 November 2009 (c); and surface automatic weather station observations at 20:00 BT 31 Oct Nov (d) and 08:00 BT 1 November 2009 (e)

3 边界层风廓线分布在地形作用下产生局地辐合抬升作用

图 7a 是北京地区地形图。西部、北部为山区,城区和东南部是平原。西部山区平均高度 800~1000 m,海淀站位于西部山前。图 7b 是 2009 年 11 月 1 日 07:00—14:24 时北京海淀 6 min 间隔的风廓线图。图中可见,1 日大雪形成阶段 08—12 时北

京地区西部山前(海淀)边界层的水平风垂直分布很稳定,基本上分为 3 个层次。近地面至 700 m 东南风,700~1300 m 偏东风,1300~1800 m 偏西风。在北京地区冬季,近地面和边界层的东南风相对暖湿,偏东风常常湿冷。31 日 700 m 以下的东南风和 700~1300 m 左右的偏东风都将受到北京西部、北部山体的阻挡,在山前形成质量堆积和辐合。堆积和辐合使得气体产生局地抬升,沿着山体上升,在山顶以上受到偏西风的作用产生向后的卷扬,最终形

成并增强了山前的局地对流。北京上空边界层的层结稳定变化一定程度上反映了这一点。图 7c 和 7d 是 2009 年 10 月 31 日 20 时、11 月 1 日 08 时北京南郊观象台温度对数压力图。图中可见,10 月 31 日 20 时北京地区降水前 1000 m 以下是稳定层结(图 7c),而 11 月 1 日 08 时北京地区降水已经近 10 小时后,1000 m 以下转为不稳定层结(图 7d)。正是从这个时间开始,北京地区的降水强度陡增,6 小时降雪 10 mm 以上,达到暴雪量级(图 1)。这一点与北京夏季山前局地暴雨形成过程中地形作用的贡献是类似

的^[8-10]。图 7f 的概念模型图是对这个过程所做的完整刻画。这个概念模型下产生的局地对流,加强了北京西南部对流层上下冷暖空气的交汇和扰动。

图 7e 是 11 月 1 日上午 09:00—12:00 北京地区降雪量图,图中显示北京西南半部的主要降雪量都是在这 3 小时形成的。尤其在北京西部山前海淀、石景山、门头沟地区,3 小时降雪量 6~8 mm。事实上,这次降水过程华北地区的降水范围很有限,大雪主要发生在北京及北京西南的河北中部部分地区。由此可见,山前和平原地区边界层风廓线分布

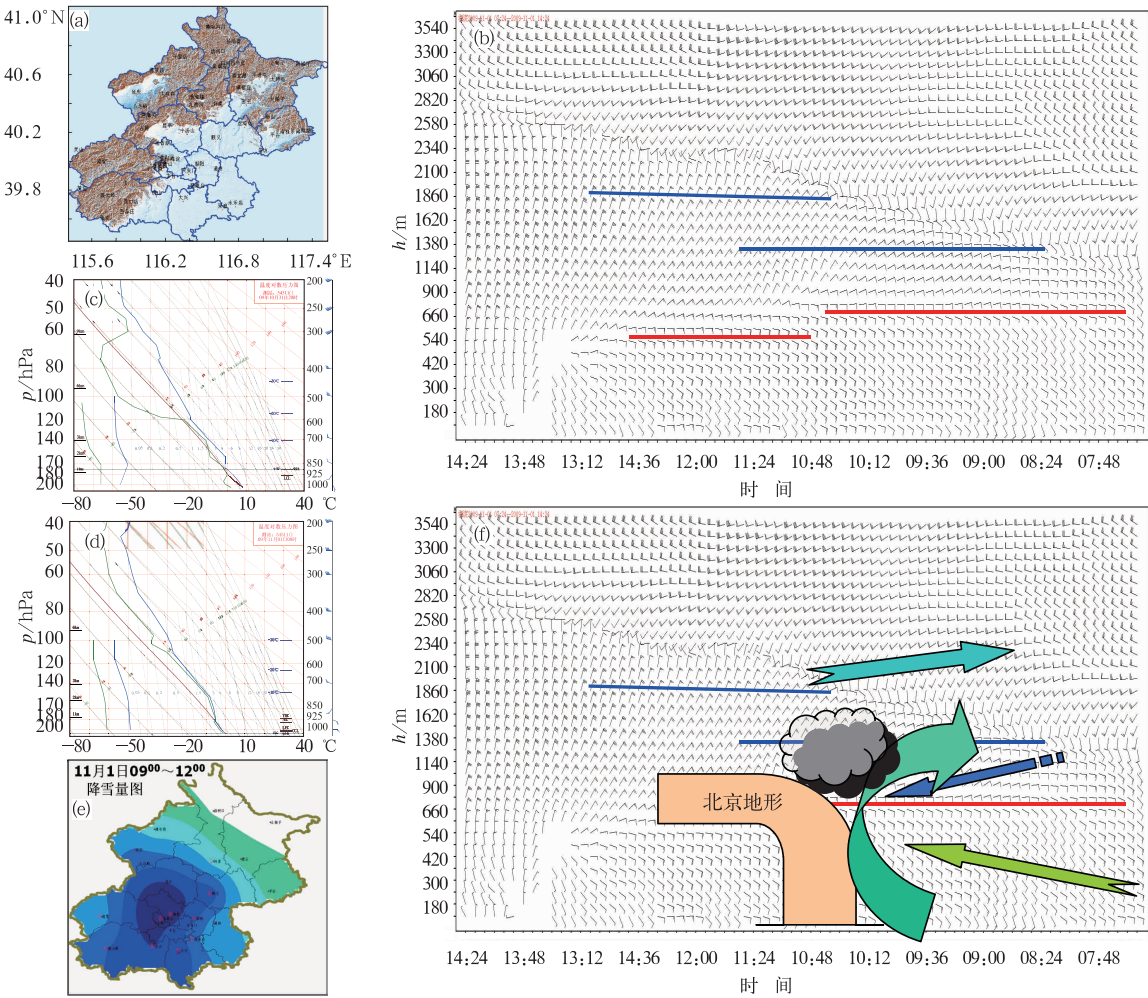


图 7 北京地形图(a),2009 年 11 月 1 日 07:00—14:24 北京海淀风廓线分布图(b),10 月 31 日 20:00(c), 11 月 1 日 08:00(d)北京南郊观象台温度压力对数图,11 月 1 日 09:00—12:00 北京地区降雪量图(e,单位:mm) 及北京西部山前(海淀)边界层风廓线分布在地形作用下产生局地辐合抬升作用概念模型图(f)

Fig. 7 (a) Topographic map of Beijing, (b) wind profile at Haidian Staion from 07:00 BT to 14:24 BT 1 November 2009, (c) T-log p chart at Guanxiangtai Station at 20:00 BT 31 October 2009, (d) T-log p chart at Guanxiangtai Station at 08:00 BT 1 November 2009, (e) snowfall (unit: mm) in Beijing during the period of 09:00 BT to 12:00 BT 1 November 2009, and (f) a conceptual model for local convergence and lifting by the interaction of boundary layer wind and terrain

在北京地形作用下产生的局地辐合抬升作用在很大程度上增强了北京西南部的降雪。

4 结 语

(1) 2009 年 10 月 31 日至 11 月 1 日北京地区发生的初冬大雪局地暴雪,近 22 年罕见。其主要影响系统是直接来自于贝加尔湖地区夹带着强冷空气的横槽向南爆发。

(2) 有利的动力条件是这次大雪过程成因的重要因素。北京上空强正涡度平流及低层辐合、高层辐散的动力垂直结构对北京地区降水和大雪的产生十分有利。

(3) 这次降水天气过程是在北京地区前期水汽输送和水汽积累不明显的“较干”背景下产生的。大雪的水汽条件主要源于近地面偏南风 and 东南风的短时间局地增湿,以及这种增湿在高空强冷气团作用下产生的对流层中低层的局地水汽辐合。

(4) 这次降水天气过程的主要层结特征是对流层中高层先行受到横槽前部强冷平流的影响和冷温度槽的控制,降温急剧,而低层暖湿气团始终降温缓慢。

(5) 山前和平原地区近地面东南风,边界层偏东风和边界层以上的对流层底层偏西风的风廓线分

布在北京西部地形作用下产生质量堆积和辐合抬升作用,形成局地对流加强,在很大程度上增强了北京西南部的降雪。

参考文献

- [1] 施晓晖,徐祥德,程兴宏. 2008 年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制[J]. 气象学报,2009,67(3):478-487.
- [2] 曾明剑,陆维松,梁信忠,等. 2008 年初中国南方持续性冰冻雨雪灾害[J]. 气象学报,2008,66(6):1043-1052.
- [3] 杨贵名,孔期,毛冬艳,等. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析[J]. 气象学报,2008,66(5):836-849.
- [4] 王伟,朱星球,李眠云,等. 2008 年 1 月末九江雨淰转大雪天气过程成因分析[J]. 气象与减灾研究,2008,31(4):65-68.
- [5] 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.
- [6] 马秀玲,彭九慧,杨雷斌,等. 华北地区一次局地暴雪天气过程的诊断分析[J]. 干旱气象,2008,26(1):64-68.
- [7] 王迎春,钱婷婷,郑永光. 北京连续降雪过程分析[J]. 应用气象学报,2004,15(1):58-65.
- [8] 郭虎,段丽,杨波,等. 0679 香山局地大暴雨的中小尺度分析[J]. 应用气象学报,2008,19(3):265-275.
- [9] 郭虎,段丽,卞素芬,等. 利用加密探测产品对 06731 北京奥体中心局地暴雨结构特征的精细分析[J]. 热带气象学报,2008,24(3):221-227.
- [10] 段丽,卞素芬,俞小鼎,等. 利用 SA 雷达产品对京西三次局地暴雨落区形成过程的精细分析[J]. 气象,2009,35(3):21-29.