

苏德斌,焦热光,吕达仁. 一次带有雷电现象的冬季雪暴中尺度探测分析[J]. 气象,2012,38(2):204-209.

# 一次带有雷电现象的冬季雪暴中尺度探测分析<sup>\* 1</sup>

苏德斌<sup>1,2,3</sup> 焦热光<sup>3</sup> 吕达仁<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

2 中国科学院研究生院,北京 100049

3 北京市气象局,北京 100089

**提 要:** 对 2009 年 11 月 9 日北京市一次伴随雷电的局地暴雪过程的中小尺度特征进行了分析。采用了风廓线雷达资料、微波辐射计资料、自动气象站资料、多普勒天气雷达资料和卫星资料,对此次降雪的精细时空结构进行了分析,通过天气尺度及中小尺度分析,探讨了冬季对流产生的原因。结果表明:此次过程为华北回流天气过程,西南暖湿空气在低层冷空气之上产生高架对流和雷电天气,对流的触发机制是中空扰动。

**关键词:** 雷电, 暴雪, 回流, 多普勒天气雷达, 风廓线雷达, 微波辐射计

## Mesoscale Observation Analysis of a Winter Snowstorm with Thunder and Lightning in Beijing Area

SU Debin<sup>1,2,3</sup> JIAO Reguang<sup>3</sup> LÜ Daren<sup>1</sup>

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Beijing Meteorological Service, Beijing 100089

**Abstract:** A snowstorm accompanied with thunder and lightning on November 9, 2009 was analyzed from its small-scale feature. Using observation data from wind profiler, microwave radiometer, automatic weather station, Doppler weather radar and satellite, the fine temporal and spatial structures of this snow case and the causes for the convection in winter were discussed. The results showed that this case is a typical return flow process in northern China. The elevated convection and lightning storms were generated with the warm and moist air from southwest above the lower cold air, and the triggering mechanism for the convection was the disturbance in the middle layer. The results of this case study will be instructive for the winter lightning forecast in snowstorm weather.

**Key words:** thunder, snowstorm, return flow, Doppler radar, wind profiler, radiometer

## 引 言

中纬度地区冬季大气的水汽含量少,没有对流或对流很弱,降雪云多为不带电的层云,但在全球变暖的大背景下,我国北方冬季“雷打雪”的现象似乎

也增多了,如 2009 年 11 月 9 日早晨和 11 月 10 日凌晨北京市,2010 年 11 月 26 日夜间辽宁省丹东市,都是在降雪的同时发生明显的雷电现象,且降雪量均为中雪以上,局地甚至出现暴雪。国外的冬季降雪中也可能会出现称为 Thunder Snow(雷暴降雪)现象,也常常和局地暴雪相伴。

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY200706042)、国家自然科学基金项目(40930949)和北京市气象局科技研发专项(2010BMBKYEX02)共同资助

2011 年 2 月 17 日收稿; 2011 年 11 月 1 日收修定稿

第一作者: 苏德斌,主要从事大气物理与大气环境研究. Email:debin.su@mail.iap.ac.cn

国内对北方冬季暴雪的研究表明,华北平原冬季较强降雪主要以回流型降雪为主<sup>[1]</sup>。范永祥等<sup>[2]</sup>研究了一次较强的东路冷空气活动造成华北春季大雪过程。张迎新等<sup>[3]</sup>对冬季河北中南部地区的暴雪天气进行诊断分析和数值实验,认为自渤海回流到华北平原的冷空气比较干燥,水汽主要伴随来自南方的中层西南气流,低层干冷气团在降水中起冷垫作用。赵桂香<sup>[4]</sup>发现暴雪区上空的高不稳定能量具有对流性不稳定特点,同时存在超低空偏东风急流和低空西南急流。周雪松等<sup>[1]</sup>从锋生动力学的角度认为动力锋生机制是华北回流暴雪中超低空急流形成的重要原因,其产生的锋面次级环流是华北回流暴雪的启动机制和主要中尺度系统。对暴雪过程还有人从湿有效能量的积聚和释放、对称不稳定能量释放方面进行研究<sup>[5-6]</sup>,但以上研究未从卫星和雷达资料的观测结果进行分析。

虽然华北平原的冬季回流天气常常伴有大的降水<sup>[3]</sup>,但北京位于华北平原最北端,冷空气常常直接冲到北京以南,所以北京地区的回流降雪常常是小雪,而“雷打雪”天气就更少了。王崇洲等<sup>[7-10]</sup>研究了长江流域冬季“雷打雪”天气,发现“雷打雪”天气伴随 700 hPa 出现爆发性增温增湿,形成具有潜在不稳定的平流逆温层,且强天气区和 700 hPa 高度附近的强上升运动区有较好的对应关系。在对冬季雷暴云的探测方面,日本的 Maesaka 等<sup>[11]</sup>用双偏振天气雷达研究了本州岛西部海岸的冬季雷暴云中霰的含量和雷电落区的关系,美国的 Trapp 等<sup>[12]</sup>用双偏振雷达和双多普勒雷达对一次暴雪进行多尺度分析,指出“雷打雪”是嵌入在宽广层状云回波之上的高架对流单体所造成的,国内也有采用多普勒天气

雷达进行的相关研究<sup>[13-15]</sup>。2009 年 11 月 9—10 日北京市出现“雷打雪”天气,许多学者对此过程进行了分析研究<sup>[16-20]</sup>,为增强对“雷打雪”天气发生发展的认识,提高该天气条件下的雷电临近预报能力,利用北京市气象局建成的中尺度探测系统及中尺度探测资料分析应用系统,如 VIPS 系统<sup>[21]</sup>、局地分析处理系统(LAPS)、快速更新循环系统(RUC)等对此过程进行进一步的细致分析是很必要的。

## 1 过程概述和对流产生原因

2009 年 11 月 9 日 23 时至 10 日凌晨,北京市普降大到暴雪,10 日 00 时刚过,城区很多人在睡梦中被雷声惊醒,截止到 10 日晨 06 时,全市平均降雪量为 7 mm,中部地区雪量较大,北部山区相对较小,最大降雪出现在海淀,为 18.5 mm,其实 9 日早晨北京市城区的东北方向以及昌平、平谷、顺义、密云、怀柔等地都出现了冬雷现象,并先后出现霰、小冰雹、冰粒、雪几种固态降水,一日之内出现两次雷电活动,而此前北京市最晚的冬雷日是 2003 年 11 月 5 日 20 时。这次过程的预报难度很大,实际上当天预报降雪的量级偏低,没有预报雷电。

异常的天气是和异常的气候背景相联系的,2009 年 11 月 1—8 日华北温度与常年相比一直偏高 3~4℃,且持续有低空偏南气流,水汽累积比较充足。在 11 月 9 日 08 时地面图上,华北地区处于地面倒槽前部,500 hPa 上高空槽比较平浅,贝加尔湖强冷空气以偏东路径南下影响华北,地面“东高”形势逐渐建立,低层有东北风,平流降温明显。11 月 9 日 20 时,54511 站 700 hPa 以上为西西南风,以

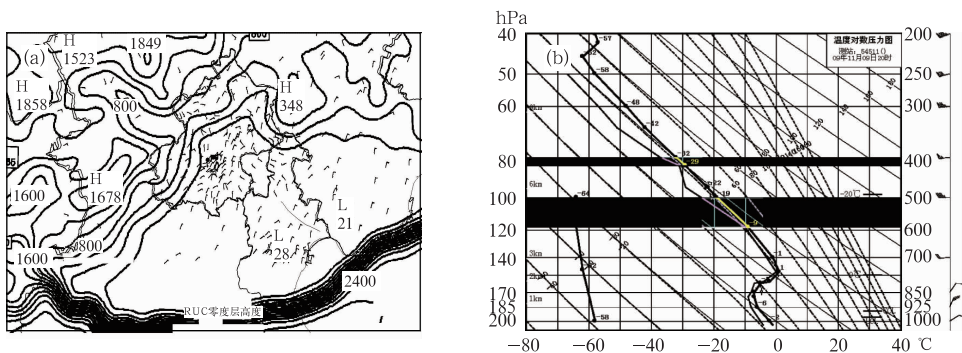


图 1 (a)2009 年 11 月 10 日 00:00 时地面自动气象站风场和北京 RUC 零度层高度, (b) 54511 站 11 月 9 日 20:00 探空(黑色区域为不稳定层)

Fig. 1 (a) Wind field of automatic weather station (AWS) and RUC products of 0°C level height at 00:00 BT 10 November 2009, (b) upper air observation at Beijing Weather Observatory (BWO), 20:00 BT 9 November 2009 (The black area is the unstable layer)

下为东北风,且 925 hPa 东北风速较大( $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),呈现出华北回流降雪形势。从北京市气象局快速更新循环系统(RUC)输出的 11 月 10 日 00 时零度层高度和自动站风场(图 1a)可见,北京以南石家庄附近为零度层高度梯度最大区域,近地层北冷南暖,冷舌西界的分布和地形走向一致,渤海和华北平原吹东北风,从东北南下的冷空气在地形的作用下堆积在太行山东麓,中空西南暖湿气流在低层冷空气上爬升形成降雪。

10 日凌晨北京城区出现雷电的原因是低层冷空气之上暖湿空气的对流,是一次高架雷暴。9 日 08 时 850 hPa 温度为  $-5^{\circ}\text{C}$ ,700 hPa 温度反而为  $0^{\circ}\text{C}$ ,逆温层顶高度 3 km,20 时 850 hPa 温度为  $-7^{\circ}\text{C}$ ,700 hPa 温度为  $-1^{\circ}\text{C}$ ,758 hPa 温度为  $1^{\circ}\text{C}$ ,逆温层顶高度为 2.4 km,500 hPa 与 700 hPa 位温之差为  $-0.9^{\circ}\text{C}$ ,在  $T-\ln p$  图上有大于 1 km 厚的位势不稳定层(图 1b),适当的抬升触发机制可以使这种不稳定能量释放出来。北京市气象局的 LAPS 系统 10 日 00 时 30 分进行的分析表明,在北京城区有一个正的 CAPE 值中心,大小为  $35 \sim 40 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而预报中需要关注的则是引发对流的触发启动因子是什么。

## 2 对流启动因子的探测资料分析

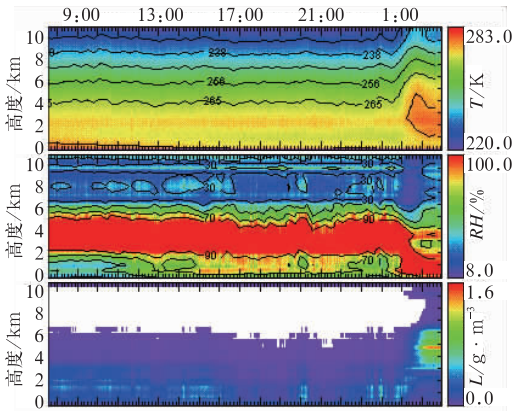
地基多通道微波辐射计是通过接收大气、云雨微弱的微波辐射来反演大气温度、湿度和液态水垂直剖面的技术,属被动遥感设备,配合使用 90 GHz 通道的亮温数据也能用来反演大气中的冰晶浓度<sup>[22-23]</sup>。北京南郊观象台安装的微波辐射计包括两个频率段的子系统,温度使用的是 51~59 GHz 之间的 7 个频率通道,水汽用的是 22~30 GHz 之间的 5 个频率,它们分别主要位于氧和水汽分子的吸收带内。为避免解复杂的辐射传输方程,满足实时应用的需要,采用数字神经网络方法反演观象台上空温度、湿度和液态水垂直剖面资料,在业务应用之前已经用大量探空样本进行了神经网络训练,由于缺少 90 GHz 的微波辐射数据以及冰晶对微波散射效应处理上的复杂性,该微波辐射计没有配置反演冰相降水的算法<sup>[22-23]</sup>。从 2009 年 11 月 9 日南郊观象台微波辐射计资料的时间序列可以看出这次降雪的水汽来源(图 2a),由图可见,南郊 2 km 高度以下相对湿度很小,而 2~4 km 高度则近乎饱和,空中

存在一条明显的持续的高湿度带。对比观象台 20 时探空,逆温层顶高度在 2.4 km,逆温层顶是风向发生突变的边界。

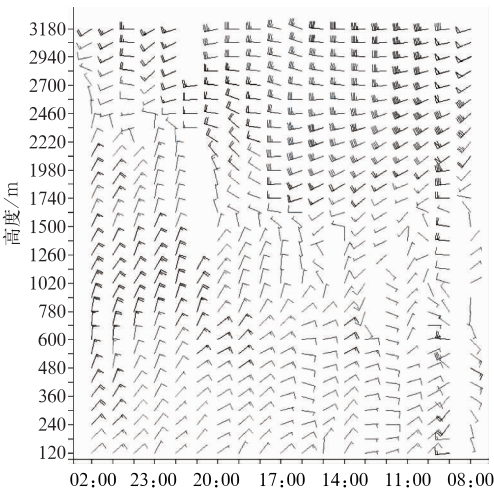
从微波辐射计图像上还可以看到 9 日白天地面温度一直走低,这是由于低层东北风持续的平流降温。在 10 日 01 时前,空中液态水含量近乎为零,说明不具备降雪的可能,10 日 01 时后,逆温层之上的温度、湿度、液态水含量出现了突变,液态水含量达到  $1.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,逆温层之上出现热塔,这是典型的对流潜热释放的表现,同时地面湿度突增至饱和,说明地面已开始出现降雪。9 日早晨 08 时也有零星的霰和雪天气,但微波辐射计的温度廓线上没有反映,说明早晨的对流很弱,只是冷锋过境造成的一些弱降水。

风廓线雷达通过向空中发射电磁波束,利用大气湍流涡团对电磁波的散射跟踪涡团的运动,进而反演大气垂直风廓线,属主动遥感。在此次暴雪中心,北京市海淀气象站架设一台 UHF 边界层风廓线雷达(探测高度约 3 km),从风廓线雷达资料的时间序列看,此次过程资料较为完整,降雪对风廓线资料的污染较小(图 2b)。从图上可以看出,9 日上午 09 时海淀站上空以西南风为主,近地面 540 m 高度西南风速达  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,10 时后近地面高度 1 km 以下转为东北风,且风向随高度增加逆转,即边界层内有冷平流,这段时间正逢冷空气前锋过境,过境时的天气现象是市区和北部地区多站闻雷,并先后出现零星霰、小冰雹、冰粒、雪几种固态降水,在上午 08 时卫星云图上北京上空出现一条窄的对流云带,但是微波辐射计图像上没有什么变化,弱降水天气很快结束。风廓线图还显示海淀站 16 时到 17 时在 1740~3000 m 高度有浅槽过境,海淀自动气象站显示 18 时以后湿度突降至 67%(图 2c),又一股冷空气前锋到达测站;20 时以后,近地面东北风的层次升高到 2300 m(也是逆温层顶的高度)左右,其中 1000 m 左右高度东北风速加大到  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,但此时仍没有激发出对流。一直到 9 日 23 时至 10 日 00 时,风廓线图上可见 2500 m 高度之上又有小波动过境,这也是降雪开始和出现冬雷的时间,00—01 时海淀站 1 小时降水量 2 mm,然后降雪很快增强,01—02 时降水量 8 mm,至 04 时降雪停止,总降水量 18.5 mm。

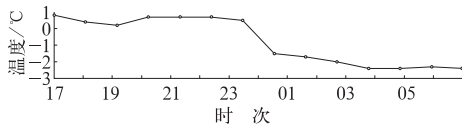
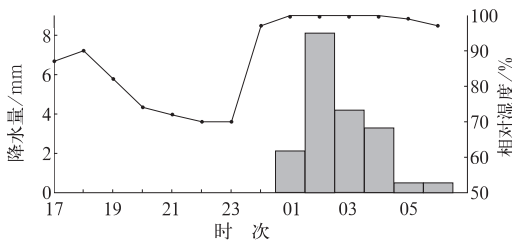
风廓线雷达观测的风场变化的机制可以用已有的研究成果来解释<sup>[1]</sup>。从动力学锋生观点看,温度



(a)



(b)



(c)

图 2 (a) 北京观象台微波辐射计 2009 年 11 月 9 日 08:00 至 11 月 10 日 03:00 图像, 从上至下的剖面依次为温度、相对湿度和液态水含量;

(b) 海淀风廓线雷达 2009 年 11 月 9 日 08:00 至 11 月 10 日 02:00 图像; (c) 海淀自动气象站 2009 年 11 月 9 日 17:00 至 11 月 10 日 06:00 要素变化曲线和降水量直方图

Fig. 2 (a) Microwave radiometer observation at Beijing Weather Observatory (BWO) from 08:00 BT 9 to 03:00 BT 10 November 2009. From top to bottom: temperature, relative humidity and liquid water. (b) Wind profiler observation at Haidian Station, from 08:00 BT 9 to 02:00 BT 10 November 2009. (c) Variation of meteorological elements of AWS observation at Haidian Station where the histogram is the precipitation from 17:00 BT 9 to 06:00 BT 10 November 2009

场和流场之间存在相互作用,9 日 09 时冷空气开始过境,为了维持热成风平衡,垂直风切变必然要增大,由此造成地转偏差与加速度不协调,结果是在高层强迫出非地转的南风分量,低层强迫出非地转的北风分量,垂直于锋则出现暖区上升、冷区下沉的次级环流,次级环流出现后又对锋生发生作用。20 时后 1000 m 左右高度的东北风速再次增大仍然是由于新的冷空气从东北南下造成的。

低空强的风速切变可以在稳定层结中激发出重力波,重力波的传播可以触发对流或增强降水,根据获得的探测资料未发现此次过程有重力波活动。由于位势不稳定层结较高,直到 9 日 23 时后 700 hPa 高度附近有小波动过境,才使得位势不稳定能量释放,形成对流。由于底部缺少暖湿空气的补充,大气很快达到层结稳定状态,所以对流持续时间不长。10 日 08 时 54511 站的探空图显示,逆温层未被破坏,且逆温层内东北风增强,所以夜间的对流是一次短暂的高架对流。

### 3 卫星和多普勒天气雷达资料分析

卫星云图显示,随着 2009 年 11 月 9 日冷空气南下,在华北上空有两次中尺度锋生现象,激发出的云带呈准东西向。第一次是 9 日 05—08 时(图 3a)

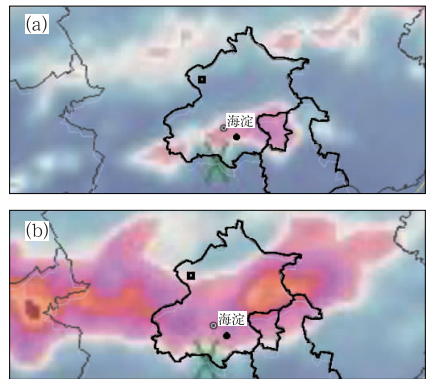


图 3 风云卫星红外云图

(a) 2009 年 11 月 9 日 08:00,

(b) 2009 年 11 月 10 日 00:00

(图中圆形实心点为微波辐射计位置,方形点为延庆风廓线位置,空心点为海淀站)

Fig. 3 Fengyun satellite infrared images

(a) 08:00 BT 9 November 2009 and

(b) 00:00 BT 10 November 2009

(The solid point is the radiometer, solid square is the wind profiler at Yanqing Station, hollow point is wind profiler at Haidian Station)



在北京北部有一条东西向的窄云带快速生成,移动方向也是自西向东,该云带在地面产生霰、小冰雹、冰粒、雪几种固态降水,并有闪电活动,天气预报室闻雷,9 时后云带东移出北京区域,降水停止。第二次是 9 日 15 时后在北京西面又开始出现窄的云线,移动方向仍然是自西向东并不断发展,至 23 时已发展成一条东西向的波状云带,南北宽 115 km,东西长 657 km,云带中镶嵌有云顶温度很低的对流云团(图 3b),这些对流云团使得 10 日 00 时北京城区再次闻雷,会商室闻雷四至五次,并在海淀站出现局地暴雪。

北京多普勒天气雷达位于南郊观象台,多普勒天气雷达的径向速度图可以推断 3 km 之上的风场情况(海淀风廓线雷达探测高度 3 km 以下)。9 日白天径向速度图显示测站上维持高空西南风,低空东北风的流型,在降雪开始前高低空风速明显加强,10 日 00 时出现“牛眼”结构(图 4c),低层东北风最大风速达  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而高空西南风速更大,这和已有的研究一致,表明锋区次级环流发展加强最后导致了降雪。

雷达回波动画显示回波移动方向自西向东略有

北抬。由于冰晶对电磁波的散射比水滴要弱得多,而 10 日 00 时雷达回波最大强度达 35 dBz,大部分为 20 dBz 左右(图 4a),较强回波区在北京城区,这预示着强回波区可能是冰相和液相的混合体,这有利于雷暴云的起电,由于 20 时探空显示 758 hPa 温度为零上  $1^\circ\text{C}$ ,空中是可能存在液相粒子的。强度剖面图显示回波高度达 10 km(图 4b),强中心高度 5 km,回波主要分布在 1.5 km 以上,可以推断降雪是由于逆温层之上西南气流的抬升运动产生,而局地更有不稳定能量的释放。图 4d 为 10 日 00:06—00:12 之间闪电定位数据与雷达资料叠加显示,其中几次闪电主要出现在黄色区域(35 dBz)。闪电的密度比夏季小很多,由于是高架雷暴,虽然雷声很大,但无地闪现象。

利用卫星和雷达资料分析降雪的演变可知,2009 年 11 月 9 日早晚各有两次强度不同的降水过程。注意到多普勒天气雷达径向速度图像的风场配置在白天维持不变,只是风速出现了脉动,说明白天天气系统的变化不大,降水是由于分批南下的冷空气造成的两次中尺度锋生而产生的,第二次还发生了明显的对流现象。

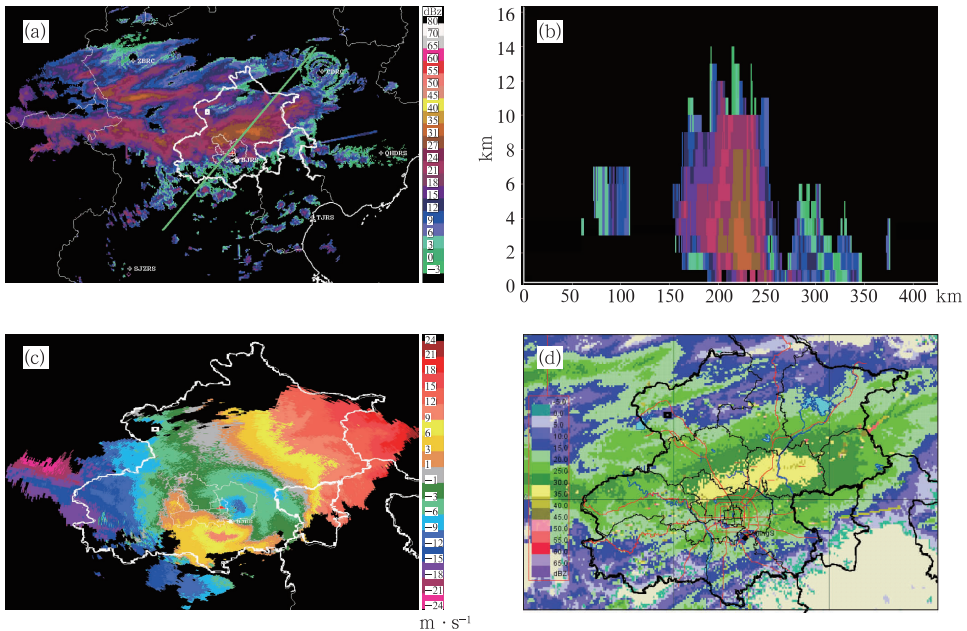


图 4 (a) 2009 年 11 月 10 日 00:00 3.5 km 高度雷达强度拼图和剖面位置, (b) 11 月 10 日 00:00 雷达垂直剖面, (c) 11 月 10 日 00:00 北京 SA 雷达  $3.3^\circ$  仰角速度图, (d) 11 月 10 日 00:06—00:12 闪电定位数据与雷达资料叠加显示 (图中圆形实心点为微波辐射计位置, 方形点为延庆风廓线位置)

Fig. 4 (a) Reflectivity of radar mosaic of 3.5 km at 00:00 BT 10 November 2009, the green line is the position for cross section; (b) Reflectivity cross section at 00:00 BT 10 November; (c) Velocity image of Beijing SA radar at  $3.3^\circ$  elevation; (d) Lightning detection data overlapped with radar mosaic at 00:06—00:12 BT 10 November 2009 (The solid point is the radiometer, square is the wind profiler at Yanqing Station)

## 4 结 语

此次降雪过程前期偏高的温度和西南气流使得水汽充足,当回流天气出现时,北京出现下冷上暖深厚的平流逆温层,由于“北京湾”地形加大了低层冷空气堆积,形成冷垫,更利于西南暖湿气流沿冷垫爬升,云图显示有两次中尺度锋生过程,第二次强于第一次,而且在锋区局部有高架雷暴活动,对流能量来自逆温层之上的位势不稳定层,对流的启动因子是高空短波提供的上升运动,对流活动增强了水汽辐合,使降雪量明显增大。

冬季和暖季发生的对流活动有很大不同,首先是维持对流的重要条件——水汽含量,冬季比夏季要少很多,对流也要弱得多,持续时间也不长。其次暖季对流活动如果有低空急流则常常伴随暴雨<sup>[24]</sup>,如果伴随冷锋将非常剧烈,常常是飚线天气,而冬季对流只偶尔发生在锋面云带的局部区域。

冬季中、高纬度地区发生“雷打雪”天气更难,首先要具备充足的水汽条件,例如海岸附近或者大湖周围冬季出现雷暴的几率就要比内陆大。另外从雷暴云起电物理过程的要求上看,雷暴云的内部必须存在几种不同性质的粒子和有组织的上升下沉气流。根据研究<sup>[25]</sup>,云中水成物相态分布与温度有密切关系,由于冬季地表温度常在零度以下,冬季雷暴天气应伴随着强逆温层,最好有一个 0℃ 以上的湿层存在。中尺度探测系统是冬季短时临近预报报警的重要手段,综合运用多种探测设备,特别是双偏振雷达等新型探测工具以了解云内微物理过程及其结构特征具有很好的应用潜力,应加强开发利用。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 范永祥,张芬芬,赵同进. 华北春季大雪和黄渤海强东风[J]. 气象, 1979, 5(9): 9-10.
- [3] 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.
- [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, 2007, 33(11): 41-48.
- [5] 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.
- [6] 饶流芜. 大一暴雪前后湿有效能量积聚和释过程的个例分

- 析[J]. 气象, 1988, 14(3): 41-43.
- [7] 王崇洲,贝敬芬. 一次暴雪、雨淞、冰雹天气过程的综合分析[J]. 气象, 1992, 18(4): 48-51.
- [8] 王仁乔,宋清翠. “雷打雪”现象发生机制初探[J]. 气象, 1990, 16(3): 45-48.
- [9] 刘鹏,李书文. 气旋爆发性发展产生的北方冬季雷暴天气分析[J]. 气象, 1998, 24(5): 47-51.
- [10] 李新芳,李锡怀. 洛阳“雷打雪”现象发生机制分析[J]. 四川气象, 1999, 25(1): 41-42, 35.
- [11] Takeshi Maesaka, Hiroshi Uyeda, Taro Shinoda, et al. Detection of Graupel in Winter Thunderclouds Using a Dual Polarization Radar in Hokuriku, Japan[R]. 31st International Conference on Radar Meteorology. 2003.
- [12] Trapp R Jeffrey, David M Schultz, Alexander V Ryzhkov, et al. Multiscale structure and evolution of an Oklahoma winter precipitation event[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(3): 486-501.
- [13] 郭荣芬,鲁亚斌,高安生. 低纬高原罕见“雷打雪”中尺度特征分析[J]. 气象, 2009, 35(2): 49-56, 130.
- [14] 蒋义芳,吴海英,王卫芳,等. 暴雪过程中多普勒雷达速度产品分析[J]. 气象科学, 2010, 30(4): 542-547.
- [15] 刁秀广,孙殿光,符长静,等. 山东半岛冷流暴雪雷达回波特征[J]. 气象, 2011, 37(6): 677-686.
- [16] 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.
- [17] 侯瑞钦,张迎新,范俊红,等. 2009年深秋河北省特大暴雨天气成因分析[J]. 气象, 2011, 37(11): 1352-1359.
- [18] 李青春,程丛兰,高华,等. 北京一次冬季回流暴雪天气过程的数值分析[J]. 气象, 2011, 37(11): 1380-1388.
- [19] 吴伟,邓莲堂,王式功. “0911”华北暴雪的数值模拟及云微物理特征分析[J]. 气象, 2011, 37(8): 991-998.
- [20] 张迎新,姚学祥,侯瑞钦,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.
- [21] 苏德斌,孙成云,余东昌,等. 短临交互预报系统 VIPS 设计开发与应用[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(5): 571-578.
- [22] Li L, Vivekanandan J, Chan C H, et al. Microwave Radiometric Technique to Retrieve Vapor, Liquid and Ice, Part I - Development of a Neural Network-Based Inversion Method [J]. IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, 1997, 35(2): 224-236.
- [23] Vivekanandan J, Li L, Tsang L, et al. Microwave radiometric technique to retrieve vapor, liquid and ice: Part II - Joint studies of radiometer and radar in winter clouds [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(2): 237-247.
- [24] 孙继松. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究[J]. 大气科学, 2005, 29(3): 445-452.
- [25] 孙晶,王鹏云,李想,等. 北方两次不同类型降雪过程的微物理模拟研究[J]. 气象学报, 2007(1): 29-44.