

杜佳,杨成芳,戴翼,等,2019.北京地区4月一次罕见暴雪的形成机制分析[J].气象,45(10):1363-1374. Du J, Yang C F, Dai Y, et al, 2019. Formation mechanism of an infrequent blizzard in Beijing in April[J]. Meteor Mon, 45(10): 1363-1374 (in Chinese).

北京地区4月一次罕见暴雪的形成机制分析*

杜佳¹ 杨成芳² 戴翼¹ 邢楠¹ 于波¹

¹ 北京市气象台,北京 100089

² 山东省气象台,济南 250031

提 要: 利用雨滴谱仪、多普勒天气雷达、微波辐射计、地面加密自动站、EC再分析资料及气候整编资料等多源观测资料,分析了2018年4月4—5日,北京地区罕见暴雪过程的极端性及形成机制。结果表明:(1)此次过程是北京地区4月首次出现纯雪日,降雪量和积雪深度均突破历史同期记录,1000~850 hPa温度标准化异常SD值均小于-3,日降雪量排在整个冷季的前5%,是一次极端天气过程。(2)低层强冷空气入侵形成冷垫,700 hPa强西南低空急流输送充沛水汽,使北京地区上空800~500 hPa产生条件性对称不稳定,暖空气在锋区以上的强上升运动触发不稳定能量,产生高架对流,局地雷达回波具有夏季对流单体的倾斜结构特征,有利于暴雪增幅。(3)降雪过程先后受到两次冷空气叠加影响,前期强冷空气持续剧烈降温导致低层温度偏低,使得温度达到降雪阈值,是此次极端降雪过程产生的主要原因。(4)微波辐射计监测显示,降雪的起止时间与逆温具有良好的对应关系,降水相态主要取决于1 km以下的温度变化。

关键词: 4月,极端性,强冷空气,高架雷暴

中图分类号: P458, P426

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.003

Formation Mechanism of an Infrequent Blizzard in Beijing in April

DU Jia¹ YANG Chengfang² DAI Yi¹ XING Nan¹ YU Bo¹

¹ Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100089

² Shandong Meteorological Observatory, Shandong 250031

Abstract: During 4–5 April 2018, an infrequent snowstorm struck Beijing. This paper analyzes the extremes and formation mechanism of the blizzard process by using multi-source observation data such as raindrop disdrometer, Doppler weather radar, microwave radiometer, ground encryption automatic station, EC reanalysis data and climate reorganization data. The results showed that (1) the 5th of April 2018 was the first pure snow day in Beijing in April. The snowfall and snow depth both exceeded the historical record and the 1000–850 hPa temperature normalized SD value was less than -3. So, it was an extreme weather process. (2) The invasion of low-level cold air forced the warm and humid air to climb along the cold pad. Conditional symmetric instability from 800 hPa to 500 hPa in Beijing Area was caused by strongly warming and humidification from 700 hPa strong southwest low-level jet and triggered by the strong rising motion of warm air above the front, resulting in elevated convection and radar echo like thunderstorm cells in summer, which enhanced the snowfall. (3) The snowfall process was affected by two cold air superimposition successively. The continuous violent cooling induced by a strong cold air before the snowfall caused the low-level temperature to be extremely low and reached the temperature threshold of snow in

* 北京市自然科学基金(8192019)、国家重点研发计划(2018YFF0300104)和中国气象局预报员专项(CMAYBY2018-002)共同资助

2019年3月21日收稿; 2019年8月9日收修定稿

第一作者:杜佳,主要从事天气预报业务. Email:79964062@qq.com

通信作者:杨成芳,主要从事天气预报业务及降雪研究. Email:cf_yang70@hotmail.com

Beijing, which was the decisive factor for the extreme snowfall. (4) Microwave radiometer monitoring showed that the duration of snowfall had a good correspondence with the temperature inversion, and the precipitation phase mainly depended on the temperature change below 1 km.

Key words: April, extreme, strong cold air, elevated thunderstorm

引 言

暴雪是北京冬季主要的灾害性天气之一,常对交通、城市运行、人民生命财产、工农业生产带来严重危害。随着 2022 年北京冬奥会的临近,人们对冬季降雪天气的关注度不断提高。冬奥组委会为了保证赛事的顺利进行,也对北京地区的精细化预报提出了高标准、高要求。而近年来,在全球变暖的背景下,极端天气事件频发(高荣等,2018;孙劭等,2019;任福民等,2014),2017 年冬季北京地区先是刷新了连续无降水日的历史纪录,接着出现了 2018 年 4 月 4 日罕见暴雪过程。这对北京的防灾减灾和冬奥会的预报服务提出了严峻的考验,因此对此次 4 月暴雪天气过程的极端性分析和形成机制的经验积累是非常有必要的。极端事件出现频率低、个例稀少,具有宝贵的科研价值(沈阳等,2019;田付友等,2018;栗晗等,2018)，“7·21”极端暴雨出现后,各领域学者对其进行了多方位、深层次的分析(孙继松等,2012;孙军等,2012;谌芸等,2012)。其他地区也有很多对于极端降雪过程的分析研究,诊断得出不同地区极端强降雪的流程配置、物理量场的结构等(胡顺起等,2017;尹承美等,2014;郑丽娜和靳军,2012;张芹等,2015)。

过去已有很多学者从不同角度对北京地区的降雪过程进行了研究。张琳娜等(2013)、廖晓农等(2013)分析研究了北京地区降水相态转变的要素指标和转变机制,给出雨雪转换的判定阈值指标;郭锐等(2012)、董林等(2012)着眼于北京地区初雪的预报,何娜等(2014)总结了两次预报失误的经验教训,一致认为边界层偏东风的温湿特性对北京地区降雪非常重要;段丽等(2011)就一次深秋的大雪过程分析发现地形对北京强降雪的产生具有重要作用;翟亮等(2012)对风廓线雷达在两次降雪中的应用做了总结,给出了降雪开始时风场的变化特征。此外,还有很多学者就降雪中锋面、气旋、水汽输送变化特征等进行了研究(吴庆梅等,2014;詹正杰等,2014)。以上研究主要针对北京地区 11 月至次年 2 月的降

雪,得到了对北京降雪产生的天气形势、水汽、动力和热力条件、降水相态等的基本认识。而北京地区春季强降雪因为较为少见,研究尚未涉及到。

2018 年 4 月 4—5 日,华北地区出现了一次大范围强降雪天气过程,北京西部、山西北部 and 内蒙古中部的部分站点积雪深度达到 10 cm 以上。本文利用气候整编资料及 EC(欧洲中心)再分析资料($0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$)着重对北京地区的暴雪过程就发生季节和降雪量的极端性进行分析,并通过气候标准化异常对相态和降水量的季节极端性进行更深入的探讨。为了进一步研究这种极端性产生的原因,利用再分析资料以及地面加密自动站、雨滴谱仪和微波辐射计等多源观测资料,对此次 4 月暴雪过程的形成机制进行分析,以期对北京乃至华北地区春季极端强降雪预报提供有益参考,提高对春季降雪的预报能力。

1 过程实况及预报难点

1.1 降水量和积雪深度

2018 年 4 月 4 日 13 时(北京时,下同)至 5 日 06 时,北京地区出现全市性雨雪、降温过程。降雪从北京的西南地区开始,逐渐向东北影响全市。此次过程降水量大、积雪深度深(图 1a)。全市平均降水量达 10.6 mm,共有 103 个站达到暴雪,占观测站点总数的 50.7%,暴雪主要分布在北京西北部及城区,最大降水出现在延庆区西大庄科,为 16.9 mm;延庆地区路面积雪达到 12 cm,其他部分站点积雪达到 2~8 cm,城区及东南地区由于降水前期为雨夹雪,加上降水初期地表温度较高,降雪部分融化,积雪深度较小。从北京观象台、平谷和延庆站的逐时降水量(图 1b)来看,虽然各站降水开始及持续时间不同,但主要降雪时段均集中在 17—23 时,在这一阶段降水强度大,共有 8 站次降水强度达到 $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,最大降水强度出现在朝阳区循环经济产业园站,为 $4.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.2 降水相态

此次过程降水相态复杂,分为混合降水和纯雪两个阶段,大部地区以纯雪为主。从全市分布来看,4 日 13—20 时为混合降水阶段,随着降水 13 时从西南部开始至 18 时影响全市,各地降水开始时相态有所不同,至 20 时大部分地区已转为降雪。从逐

3 h 间隔的地面天气图上(图略)可以看出,14 和 17 时北京西部和北部地区的降水相态为雪。

雨滴谱仪利用激光系统测量降水粒子的下落速度和直径,雪花的下落速度明显小于雨滴,并且雪花由于聚并、淞附作用直径可以增长得很大(Ishizaka et al,2013;Yuter et al,2006)。利用雨滴谱仪资料对降水相态进行更精细化的分析,结果显示(图 2a)

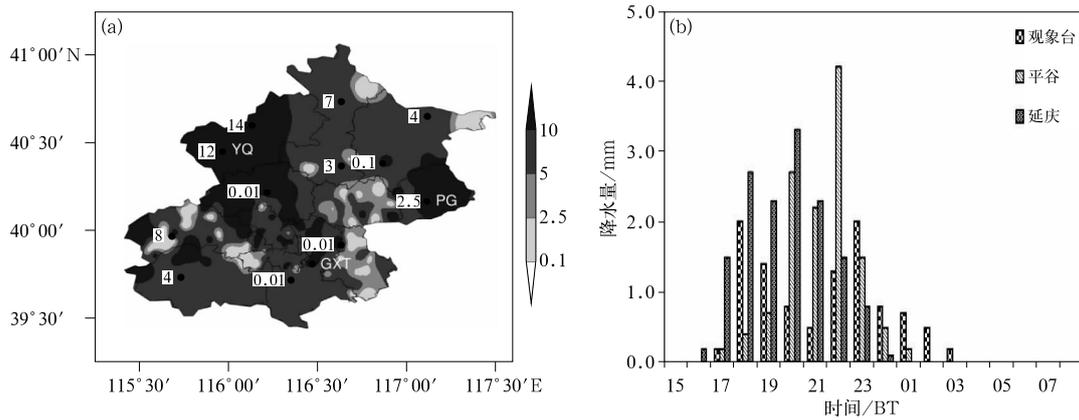


图 1 2018 年 4 月 4 日 13 时至 5 日 06 时北京地区降水量分布(a)(数值为积雪深度,“YQ”,“PG”和“GXT”左侧点分别代表延庆、平谷、观象台站的位置)和 4 日 15 时至 5 日 07 时北京观象台、平谷、延庆站逐时降水量(b)

Fig. 1 Distribution of precipitation in Beijing from 13:00 BT 4 to 06:00 BT 5 April 2018 (a, The value is snow depth, and the dots on the left side of “YQ”, “PG” and “GXT” represent Yanqing, Pinggu, and Guanxiangtai respectively) and hourly precipitation of Guanxiangtai, Pinggu and Yanqing in Beijing from 15:00 BT 4 to 07:00 BT 5 April 2018 (b)

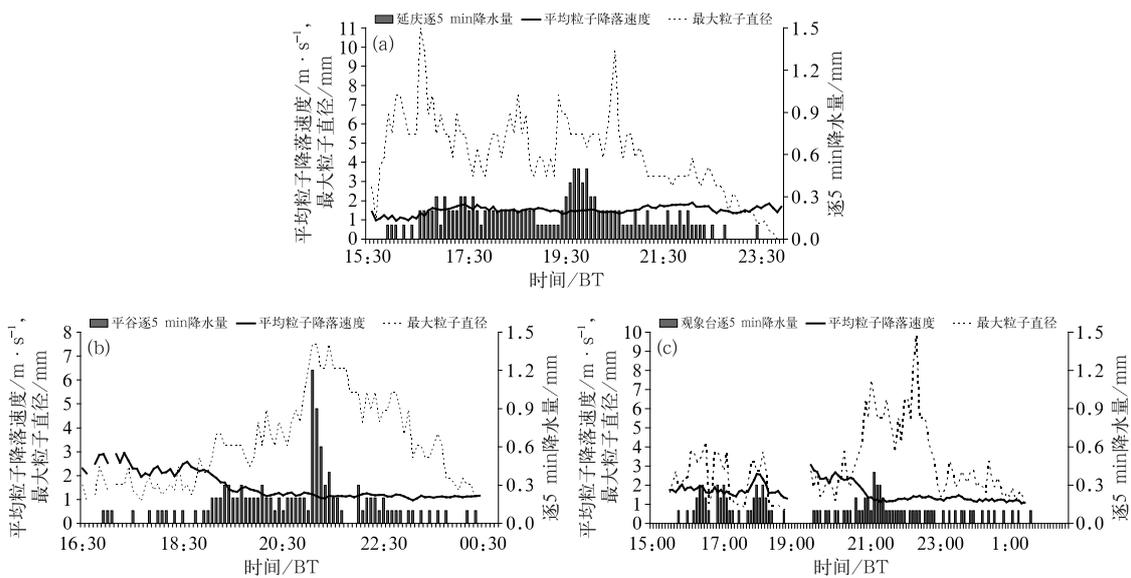


图 2 2018 年 4 月 4 日延庆(a)、平谷(b)和观象台(c)雨滴谱仪平均粒子降落速度、最大粒子直径和自动站逐 5 min 降水量(图中数据缺失的部分代表雨滴谱仪未观测到降水粒子)

Fig. 2 Average particle drop velocity, maximum particle diameter from raindrop disdrometer and 5 min precipitation at Yanqing (a), Pinggu (b) and Guanxiangtai (c) on 4 April 2018 (The missing part indicates that no precipitation particles were observed by the raindrop disdrometer)

延庆站降水时段为4日16—23时,在降水过程中雨滴谱仪观测到的平均粒子降落速度平稳不变且下落速度较小,同时最大粒子直径较大,由此可判断延庆的降水相态始终为雪。北京中南部地区降水开始时相态为雨夹雪,而东北地区降水由雨开始。如图2b所示,平谷降水大约自4日17时开始至24时结束,降水开始时,平均粒子降落速度达到了 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大粒子直径仅 $1\sim 2\text{ mm}$,为降雨阶段;17:30—18:30,虽然最大粒子直径没有明显变化,但平均粒子下落速度由 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右降至 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,由人工监测验证,这正是雨夹雪的时段;19时前后平谷站平均粒子降落速度再次降低,最大粒子直径明显增大,降水相态才彻底转为雪。4日20时至5日06时除南部个别站点外全市均已转为雪。在相态为雪时,平均粒子降落速度较小,降雪强度与最大粒子直径有较好的对应关系。例如平谷站21:00—21:30最大粒子直径达到最大,对应的降水强度也达到顶峰,为 $1.2\text{ mm}\cdot(5\text{ min})^{-1}$ 。21:30以后平均粒子下落速度维持在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,降水相态维持为降雪,但随着最大粒子直径的减小,降雪强度逐渐减小。周黎明等(2014)在一次暴雪过程的粒子谱特征分析中也有类似的发现。

对比观象台的人工观测和雨滴谱资料(图2c)发现,4日17和20时人工观测降水相态为雪,对应平均粒子降落速度接近或小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大粒子直径也是相对的高值,但21时后雨滴谱监测才呈现典型的降雪粒子特征,平均粒子降落速度进一步下降,而最大粒子直径明显增大。

1.3 预报难点

针对此次过程,北京市气象台自3月31日开始预报4月4日有小雨,4月2日将预报更新为雨夹雪,4月4日06时更新为小雨转雨夹雪或雪,直到降雪开始后才调整为:大部分地区中到大雪,西部和北部的部分地区暴雪。与实况对比来看,对过程降水量的预报与实况基本一致,预报难点在于对降水相态的把握。

从EC对此次过程的预报来看,4月1日20时起报就已经预报北京大部分地区为雨夹雪,西北部地区为雪,850 hPa温度降至 $-7\sim -6\text{ }^{\circ}\text{C}$;随着预报时效临近,850 hPa以下温度也继续向下调整,至4

月2日20时起报的各层温度均已达到北京地区降雪的温度指标(张琳娜等,2013)。但4月出现降雪极为罕见,预报员思想上容易麻痹,在预报初期对降水相态的预报过于保守。那么,此次降雪天气的极端性究竟如何,又是怎样的温度变化导致了4月降雪的出现,又是什么机制导致了这样的温度变化呢?

2 环流背景

从环流形势来看,此次降雪过程是由东路强冷空气先行南下,在北京地区形成冷垫后,随着高空槽东移,槽前暖湿气流沿冷垫爬升造成的。

4月1—2日,500 hPa欧亚大陆北部受极涡控制,极涡分裂出的低槽发展东移形成东北冷涡。2日20时(图3a),极涡附近冷中心强度达到 $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$,锋区南压至 40°N 附近,我国中纬度地区受纬向环流控制,高空槽引导强冷空气东移南下,850 hPa风向与等温线走向几乎垂直,强冷平流造成近地面层温度大幅度下降,在北京地区形成冷垫。至3日20时,北京观象台站及延庆站的气温分别下降至3和 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。4日08时,500 hPa欧亚大陆为两槽一脊形势,原本位于新疆西部的温度槽落后于高度槽,低槽发展东移,4日20时位于 $100^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$,与此同时,南支槽发展,南北两支锋区叠加,北京地区处在槽前西南气流中(图3b)。与之配合,700 hPa低槽加深,槽前建立强西南低空急流,4日20时急流中心强度达到 $28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,北京观象台的风速达到了 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,急流引导暖湿空气东移北上,北京位于急流轴左前方,且风向与等温线几乎正交,产生强暖平流,利于大量水汽在北京上空形成辐合。850 hPa上,华北处在低涡前部的东南风气流中。同时,1000 hPa上,北京地区为东北风。由此,对流层中高层暖湿空气沿近地面层冷垫爬升,形成降水,全市除个别站点外都已经出现降雪。

上述分析表明,此次暴雪的影响系统有:500 hPa低槽,提供大尺度上升运动条件;700 hPa西南低空急流为关键系统,配合低涡、切变线提供充足的水汽,产生强辐合上升运动;850 hPa以下为强大的冷垫,这是北京地区典型的暴雪形势。而冷垫的形成又与前期的强冷空气活动密切相关。

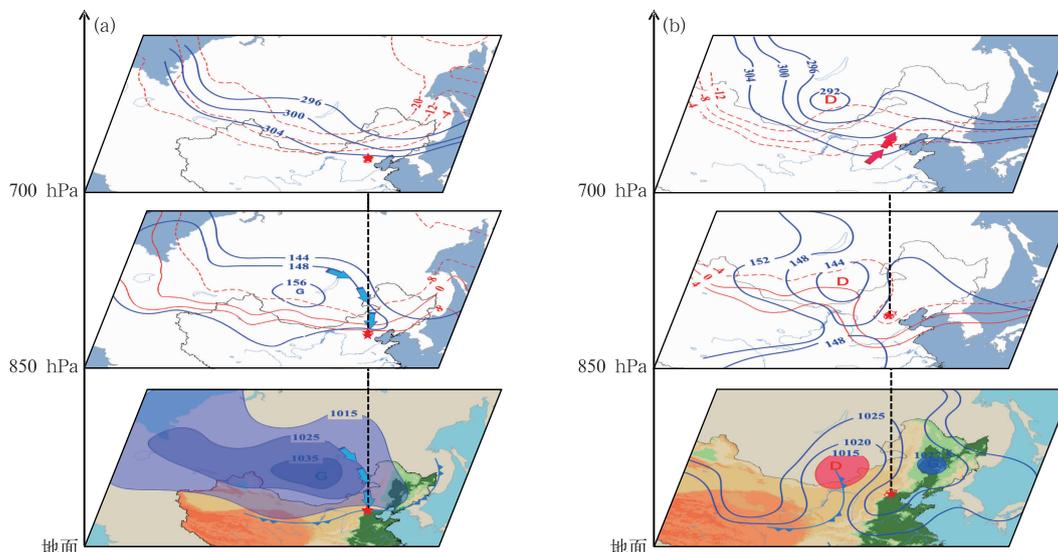


图 3 2018 年 4 月 2 日(a)与 4 日(b)20 时概念模型
 (图中红色五角星代表北京位置,蓝色线示意等位势高度线,红色线示意等温线,
 蓝色和红色箭头分别示意影响北京地区的冷、暖空气流场)
 Fig. 3 Conceptual model diagram at 20:00 BT 2 (a) and 4 (b) April 2018
 (Red star represent Beijing, blue line indicates isopotential height line, red line indicates
 isotherm, blue and red arrows indicate the upstream flows to Beijing)

3 极端性分析

3.1 季节极端性与降雪量极端性

根据气候整编资料,前一日 20 时至当日 20 时为一日,出现降水就算作一个降水日,一天内同时出现液态和固态降水为一个雨雪日,只出现固态降水为一个纯雪日,分别从 4 月同期的季节极端性和整个冷季的日降雪量极端性两个方面进行分析。

季节极端性又分为相态的季节极端性和降水量的季节极端性两个方面。从降雪出现季节来看,北京观象台自 1951 年建站以来至 2018 年,4 月出现的总降水日数为 511 d,其中出现雨夹雪或雪的日数为 12 d,仅占总降水日的 2.3%,也就是说北京地区 4 月出现降雪本身就是极端事件;而所有降水日中纯降雪日仅为 1 d,即此次过程中的 2018 年 4 月 5 日;且 4 月出现降雪在近 30 年是第一次。而 2018 年 4 月 4 和 5 日的日降水量在 4 月历史同期分别排第 87 和 83 位,对于 4 月来说,此次降雪过程的日降水量并不足为奇。从日降雪量来看,自建站以来北京观象台在整个冷季(10 月至次年 4 月)共出现过 758 个纯雪日,2018 年 4 月 5 日降雪量在历史上排

第 26 位,排在整个冷季的前 5%。

从积雪深度来看,此次降雪过程延庆站的积雪深度最大,达到了 12 cm(图 1a)。分析发现,延庆站自建站以来 4 月仅有 12 d 出现积雪,且此次过程之前最大的积雪深度记录仅为 4 cm。另外,大兴站在 4 月 4 日 16 时闻雷,出现了北京地区罕见的“雷打雪”现象。

由此可见,与历史同期的降雪出现时间、降雪量和积雪深度以及与整个冷季的日降雪量相比,此次北京地区的暴雪过程属于一次极端降雪事件。

3.2 标准化异常

由以上分析可知,对于 4 月来说,此次降雪过程的季节极端性是由降水相态决定的。而雪的出现是由于低层温度低,达到了北京地区降雪的温度阈值。利用要素偏离气候平均值的程度 SD(标准化异常)来判断此次过程变量场的异常性:

$$SD = (F - M) / \sigma$$

式中, F 为 4 月 4 日 20 时的某一变量值, M 为变量场 1981 年至 2010 年 4 月 4 日 20 时 30 年的气候平均值, σ 为变量场 4 月 4 日 20 时 30 年的气候标准差。 $|SD| > 2.5$ 往往意味着小概率的极端事件(Grumm, 2012)。分别计算低层比湿和温度的标准

化异常。从比湿来看,北京地区 850 hPa 的 SD 值小于 1,700 hPa 的 SD 值约为 2(图 4a),水汽含量明显高于气候平均值,但并不极端,说明水汽较气候常态充沛。而从气温来看,1000~850 hPa 气温偏离气候平均明显, SD 值均小于 -3(图 4b),同时 700 hPa 气温 SD 值接近于 0。说明低层气温较常年明显偏低,是产生此次极端天气的决定性因素。另一方面,从北京观象台自建站以来 4 月降水日的高低温历史排位来看,2018 年 4 月 5 日(气候日)的高低温均排在最低的前十位,即为 4 月降水日中的极端低温日。

4 形成机制分析

从前文日降雪量的极端性分析得知,对 4 月来说相对充沛的水汽就造成了相对整个冷季来说极端的降雪量,那么究竟是什么样的条件形成了这样的极端性降雪过程?

4.1 水汽条件

4 日 08 时,在 700 hPa 上,北京上游水汽通量矢量由西南指向东北,辐合中心位于河北西部,此时北京地区也已经开始出现水汽通量辐合,但比湿仍为 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其上游地区的比湿最大达到了 $6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 5a)。随着 700 hPa 低槽的东移加强,槽前西南急流增强,范围增大,能够将低纬的西南暖湿气流向北输送,并且辐合中心向东北推移,逐渐影响北京,比湿不断增大。至 4 日 20 时(图 5c),北京南部地区水汽通量辐合中心为 $-3 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,

比湿增大至 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,已经达到北京地区暴雪的比湿阈值,为暴雪的出现提供了充足的水汽,此时正处于降雪最强的时段。而与 700 hPa 不同的是,850 hPa 4 日 08—14 时一直为北风,没有水汽输送,至 20 时转为东南风后才在北京出现弱的水汽通量辐合,但数值较 700 hPa 小(图 5d)。

从北京观象台的水汽通量散度和相对湿度时空演变图中可以看出(图 5d),水汽通量散度辐合从 700~500 hPa 开始,随时间逐渐向下影响到约 900 hPa 以上的层次,其最强时段为 4 日 14—20 时,辐合中心位于 700~600 hPa,使这一层次比湿达到 $3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。从湿层厚度也能看出增湿始于中高层,至 20 时前后整层相对湿度达到 80% 以上,其中高于 90% 的相对湿度集中在 700 hPa 以上。考虑到北京观象台自 15 时以后出现降水,水凝物粒子的蒸发也会对低层相对湿度的增加有一定作用。

以上分析表明,此次暴雪的水汽主要来自于 700 hPa 附近的西南低空急流输送。

4.2 不稳定机制分析

图 6a、6b 给出 2018 年 4 月 4 日 08—20 时北京观象台探空曲线的变化。可见 4 日 08 时从地面至 850 hPa 为东到东北风,形成较深厚的冷垫;20 时 850 hPa 以下温度继续下降,降至 $-8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,冷垫增强。在 700 hPa 面上,由 08 时的偏西气流至 20 时转为强西南低空急流,露点温度由 08 时的 $-34 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 升为 $-7 \text{ }^{\circ}\text{C}$,升温幅度达到 $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$,接近于温度 $-6 \text{ }^{\circ}\text{C}$,空气达到饱和状态。由此导致 850~700 hPa 出现了明

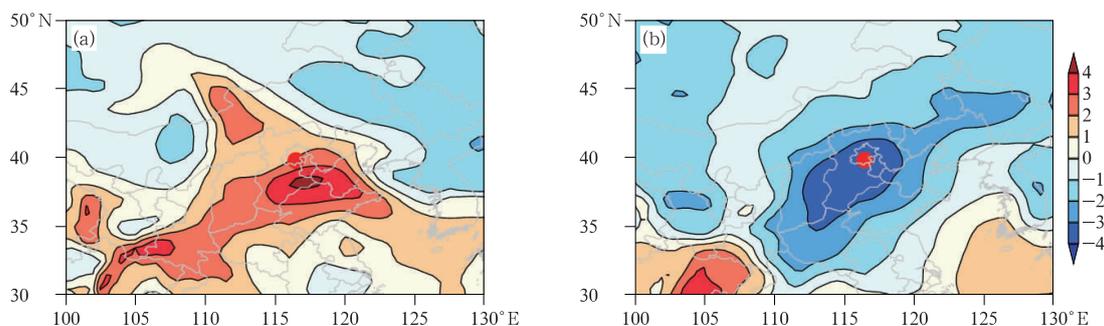


图 4 2018 年 4 月 4 日 20 时 700 hPa 比湿(a)和 925 hPa 温度(b)标准化异常

(红色圆点代表北京观象台位置)

Fig. 4 Standardized abnormality of 700 hPa specific humidity (a) and 925 hPa temperature at 20:00 BT 4 April 2018
(Red dot represents Guanxiangtai Station in Beijing)

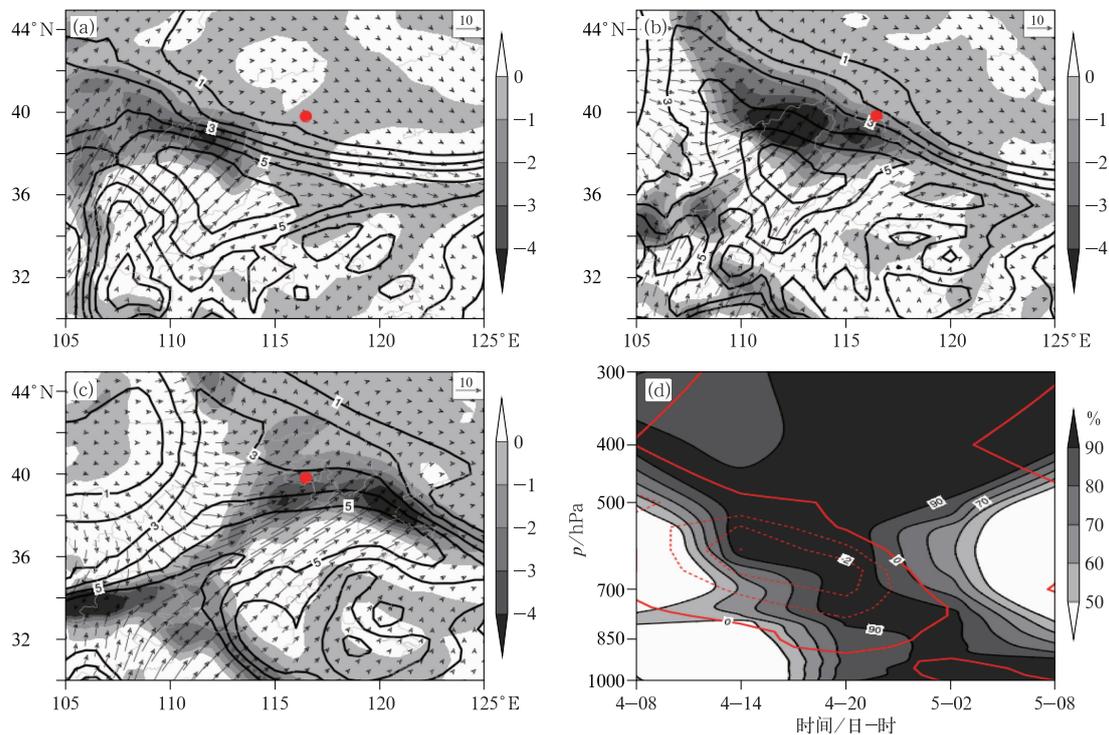


图 5 2018 年 4 月 4 日 08 时(a)、14 时(b)、20 时(c)700 hPa 比湿(实线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、水汽
 通量(箭头,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
 和 4 日 08 时至 5 日 08 时(d)北京观象台的水汽通量散度(等值线,单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、
 相对湿度(阴影)时空演变
 (红色圆点代表北京观象台位置)

Fig. 5 Specific humidity (solid line, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), water vapor flux (arrow, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
 and water vapor flux divergence (shadow, unit: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
 at 08:00 BT (a), 14:00 BT (b), 20:00 BT (c) 4 April 2018 and (d) the water vapor flux divergence
 (contour, unit: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), relative humidity (shadow, unit: %)
 of Guanxiangtai Station in Beijing from 08:00 BT 4 to 08:00 BT 5 April 2018
 (Red dot represents Guanxiangtai station in Beijing)

显逆温,也表明此次过程的水汽主要来源于700 hPa附近的西南暖湿气流。冷空气垫以上达到饱和,相当位温随高度几乎不变(图略),呈现湿中性层结特征。500 hPa 风速增强至 $36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,地面风速减小,0~6 km 的风矢量差达 $38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,方向为西南偏西,表明存在强垂直风切变,意味着有很强的热成风和斜压性。

根据 Bennetts and Hoskins(1979)的研究,对流层深层大气几乎饱和时,条件对称不稳定的判据为在垂直于热成风方向的横截面内饱和相当位温的坡度大于地转绝对动量的坡度。利用欧洲中心 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 再分析资料,过北京观象台做垂直速度、相当位温及地转绝对动量的纬度-垂直剖面(图 6c),剖面方向基本垂直于热成风方向。由于锋

区以上空气饱和,相当位温与饱和相当位温几乎相等。北京地区上空约 800~500 hPa(图 6c 中红色阴影区域),相当位温坡度大于地转绝对动量坡度,表明此区域存在条件性对称不稳定。

倾斜对流形成的三要素为条件对称不稳定、水汽和抬升条件(俞小鼎等,2016)。倾斜对流的触发通常比较容易,很小的抬升就能够被触发,其中最常见的触发机制为暖平流和锋生过程导致的热力直接环流上升支(Schultz and Schumacher,1999)。从图 6c 可以得到 $35^\circ \sim 42^\circ \text{N}$ 高空都存在明显的能量锋区,随高度向北倾斜。北京地区上空,锋区大致位于 850~700 hPa 高度,锋区以上为相当位温高值区,锋区以下为相当位温低值区,表明暖湿空气在干冷空气垫上爬升。而在环流形势的分析中已知

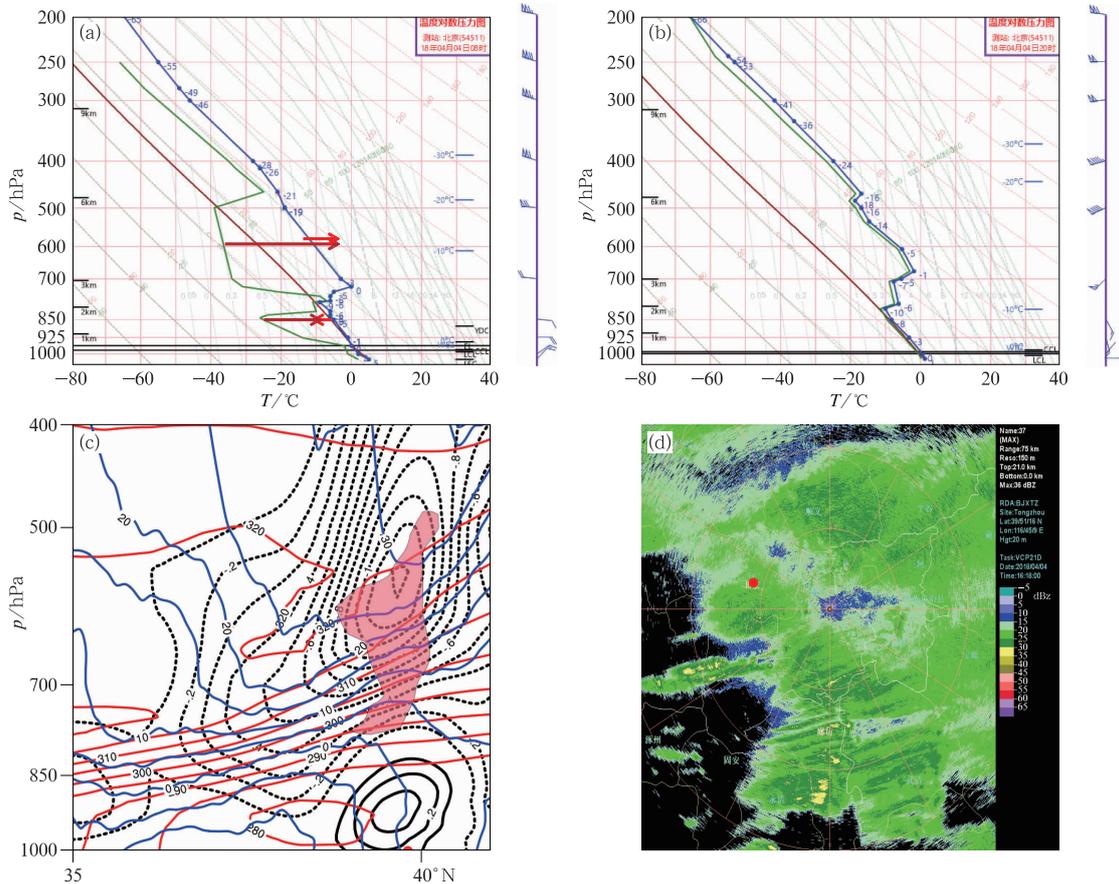


图 6 2018 年 4 月 4 日 08 时(a)、20 时(b)北京观象台探空曲线,沿 116.47°E(过北京观象台站)的垂直速度(c,黑线,虚线代表负值,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)、相当位温(红线,单位: K)、地转绝对动量(蓝线,单位: $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)及 16:18 通州 X 波段雷达组合反射率(d) (红色圆点代表北京观象台位置)

Fig. 6 Sounding curves for Guanxiangtai Station in Beijing at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 4 April 2018, and (c) the vertical velocity (black line, dotted line: negative value, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), equivalent potential temperature (red line, unit: K), geostrophic absolute momentum (blue line, unit: $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along 116.47°E (crossing Guanxiangtai Station in Beijing) and (d) the maximum reflectivity of Tongzhou X-band radar at 16:18 BT 4 April 2018 (Red dot represents of Guanxiangtai station in Beijing)

700 hPa 低槽东移过程中槽前有强暖平流,在垂直方向上产生强上升运动中心(图 6c),中心值可达 $1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,足以触发条件对称不稳定。从雷达回波(图 6d)来看,具有明显的平行带状回波特征,雨带沿热成风方向排列,随环境气流移动,相对于环境气流没有传播,具有条件性对称不稳定雨带的特点(Markowski and Richardson, 2010)。

因此,底层是具有逆温层的稳定层结,锋区以上的暖平流产生的强上升运动触发条件对称不稳定能量,产生高架对流,形成中尺度强降雪带,是产生此次暴雪天气的直接原因。值得注意的是,从雷达回

波特征来看,此次过程中倾斜对流的触发在 16 时之前,一直维持到 20:30 左右。综合以上分析可知在前期有能量释放的前提下,20 时北京上空仍存在条件对称不稳定,进一步表明此次过程的不稳定能量条件较好。

根据闪电定位和人工观测显示,在北京以南产生了对流单体,伴随雷电现象。根据当时的雷达回波分析发现,该对流单体具有夏季对流单体的特征:反射率因子图上强回波中心随高度具有倾斜结构(图 7),径向速度图上具有低层辐合高层辐散的特征,而且从反射率因子立体结构图上看云底高度较

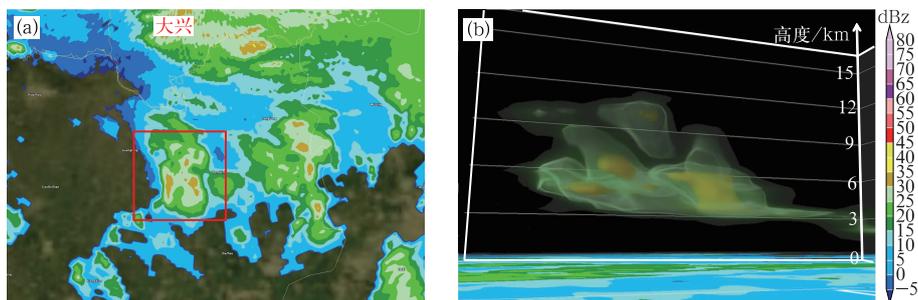


图 7 2018 年 4 月 4 日 16 时观象台 S 波段雷达 3.4°仰角反射率因子(a) 及图 7a 红框内反射率因子立体结构(b)

Fig. 7 Basic reflectivity of Guanxiangtai S-band radar at 3.4° elevation angle at 16:00 BT (a) and the 3-D structure of the echo in the red frame region of Fig. 7a (b) on 4 April 2018

高(图 7b)。结合雷达回波特征和能量条件分析可知,暖平流产生的上升运动触发条件对称不稳定产生的高架对流在局地形成的对流单体造成了北京罕见的“雷打雪”现象。

5 降水相态分析

由气候整编资料和标准化异常分析得到,此次过程的季节极端性主要体现在极端低温造成降雪,那么温度究竟是如何变化的?

5.1 气温演变

以积雪最大的延庆和平原地区的北京观象台为代表站点分析气温的演变。由上文分析可知,4月初先后有两次冷空气影响北京。降雪过程前期,2日20时开始,第一股强冷空气(东路)开始影响北京地区,气温剧烈下降(图 8)。在强冷空气到来之前,延庆2日14时气温为 28℃,观象台为 22℃,至4日08时延庆和观象台的气温分别降至 2 和 5℃。第一

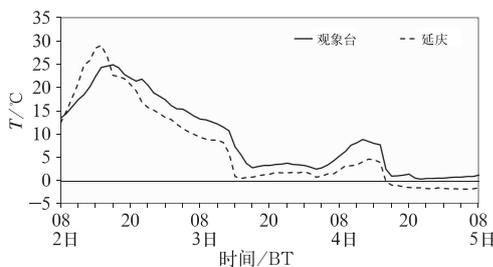


图 8 2018 年 4 月 2 日 08 时至 5 日 08 时延庆和北京观象台自动站逐时温度演变

Fig. 8 Temperature evolution of Yanqing and Guanxiangtai Stations in Beijing from 08:00 BT 2 to 08:00 BT 5 April 2018

股强冷空气造成基础温度较低,接近于降雪阈值,是此次暴雪过程产生的有利条件。4日白天,北京地区短时转为南风,气温略有回升,14时延庆气温回升至 5℃,观象台气温回升至 8℃。随着高空槽东移,第二股冷空气(西路)活动开始,17时北京地面再次转北风,气温骤降,延庆气温降至-0.8℃,观象台气温降至 1℃,降雪开始。气温再次下降,底层冷垫加强,是此次降雪产生的直接原因。从4日14—20时地面天气图上看,自南向北大部分地区降水开始时即为降雪。

5.2 温度层结与相态变化

图 9 给出 2 日 08 时至 5 日 08 时观象台上空温度平流和层结曲线的演变。从图 9a 中可以看出,2日20时至3日20时,850 hPa 以下为冷平流,以上为暖平流,说明自 2 日 20 时对流层低层开始持续受冷平流影响,冷空气首先从底层入侵。850 和 925 hPa 2 日 20 时温度分别为 17 和 18℃(图 9b),前期的冷平流中心强度达到了 $-26 \times 10^{-7} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,强冷平流导致大幅降温(图 9b),4日08时850 hPa 降为-5℃,925 hPa 降为-1℃,在北京地区形成强大的冷垫。4日08时以后,低层再次转为冷平流控制,但强度较前一次明显减弱,导致低层温度进一步下降(图 9b),850 hPa 20 时下降到-8℃,925 hPa 降至-3℃,均降到了雨雪转换临界值以下。同时,850 hPa 以上转为强暖平流,4日14时前后 700~500 hPa 的暖平流中心强度达 $24 \times 10^{-7} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,形成了下冷上暖的强逆温层结。4日14时,随着底层冷平流和 700 hPa 暖平流的加强降雪开始,5日02时暖平流厚度明显减小,降雪趋于结束。

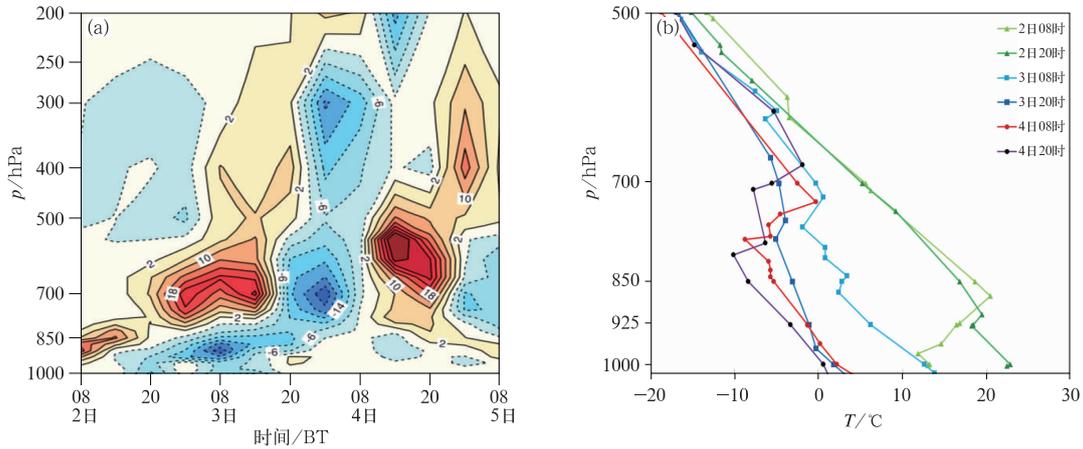


图 9 2018 年 4 月 2 日 08 时至 5 日 08 时过北京观象台的温度平流随高度的时间演变(a, 单位: $10^{-7} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)及 2 日 08 时至 4 日 20 时层结曲线(b)

Fig. 9 Temperature advection of Guanxiangtai in Beijing from 08:00 BT 2 to 08:00 BT 5 April 2018 (a, unit: $10^{-7} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) and its stratification curve from 08:00 BT 2 to 20:00 BT 4 April 2018

从探空曲线上可以看到(图 9b),4 月 2 日 20 时至 3 日 20 时 850hPa 以下均产生剧烈降温。但从微波辐射计(图 10a)的监测来看,3 日 17 时前后 1 km 以上出现明显逆温,2~3 km 高度的温度达 5~7°C,0.3 km 的温度在 3°C 左右,温度较高,导致期间出现降雨。在 4 日的降水过程中,探空曲线上仅能监测到 700 hPa 附近逆温的增强和 850 hPa 以

下温度的降低,而从微波辐射计(图 10a)可以看出 4 日 15 时以后,1.5 km 以上温度剧升,0.6 km 以下温度剧降,形成明显逆温,对应观象台第一阶段降水开始。17 时人工观测降水相态为雪,此时 1 km 以下出现温度低于 0°C 的层次。在这一阶段 0~1 km 温度在 0°C 上下波动,每一次降温对应着最大粒子直径的增大和 5 min 降雪量的增加(图 2c),温度回升时,降雪粒子融化,最大粒子直径减小,这也是观象台积雪深度较小的原因。随着 1 km 以上温度明显下降,逆温层被破坏,第一阶段降水结束。当 0.6 km 以下温度再次下降、1 km 以上温度再次回升时,观象台迎来了第二阶段的降水。20 时前后相态为雪,1 km 以下存在低于 0°C 的层次,21 时以后 0.3~0.6 km 温度大幅降低,最低达到 -4°C,雨滴谱监测开始呈现明显的降雪特征。最终 1 km 以上温度迅速下降,整层冷空气南下,逆温层被破坏,降水结束。

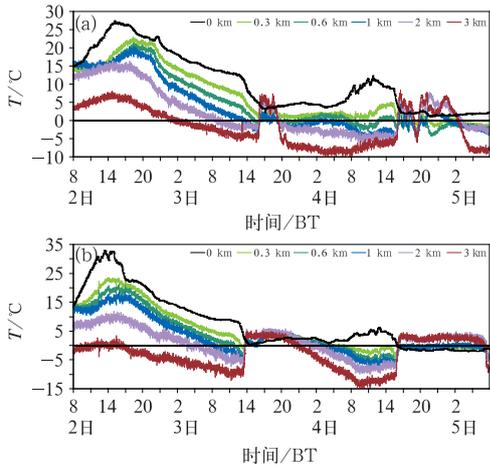


图 10 2018 年 4 月 2 日 08 时至 5 日 08 时北京观象台(a)和延庆(b)微波辐射计 0~3 km 温度演变

Fig. 10 Temperature evolution of observatory microwave radiometer from 0 to 3 km at Guanxiangtai (a) and Yanqing (b) Stations in Beijing from 08:00 BT 2 to 08:00 BT 5 April 2018

延庆站(图 10b)微波辐射计监测到的温度变化与观象台不同,降水随着逆温层的形成开始,1 km 以下温度均维持在 0°C 以下,对应雨滴谱监测始终维持明显的降雪特征,这也是延庆站积雪深度深的重要原因。

以上分析表明低层的极端低温是造成此次极端暴雪的关键因素,对流层低层连续两次冷空气活动造成了极端低温。尤其在第一股强冷空气影响下,持续剧烈降温导致基础温度低,是低层极端低温出

现的主要原因。微波辐射计的精细化温度层结监测发现,降雪起止时间与逆温具有良好的对应关系,降水相态与 1 km 以下温度变化有着密切的联系。

6 结论与讨论

2018 年 4 月 4—5 日,北京地区出现了罕见暴雪过程。本文利用雨滴谱仪、多普勒天气雷达、微波辐射计、地面加密自动站、EC 再分析资料及气候整编资料等多源观测资料,分析了此次暴雪过程的极端性及形成机制,得到以下主要结论:

(1) 此次过程的季节极端性体现在极端低温造成降水相态为雪,北京观象台出现了建站以来第一个 4 月的纯雪日,降雪量和积雪深度均突破历史同期纪录,1000~850 hPa 温度标准化异常 SD 值均小于-3,达到了极端天气阈值,这可以作为 4 月初出现降雪指标。就 4 月的日降水量来说,此次过程便属寻常,但对 4 月来说相对充沛的水汽配合极端低温造就了对整个冷季来说极端的降雪量,日降雪量排在前 5%。除此之外,还出现了罕见的“雷打雪”现象。

(2) 低层强冷空气入侵形成冷垫,700 hPa 强西南低空急流输送充沛水汽,使北京地区上空 800~500 hPa 产生条件性对称不稳定,暖空气在锋区以上的强上升运动触发不稳定能量,产生高架对流,局地雷达回波具有夏季对流单体的倾斜结构特征,促使暴雪增幅。

(3) 降雪过程先后受到两次冷空气叠加影响,前期强冷空气持续剧烈降温导致低层温度极端偏低,是此次极端降雪过程产生的主要原因,预报中需要特别关注降水前期的冷空气降温影响。

(4) 微波辐射计监测显示,观象台两个阶段的降水均有低层冷平流的参与,降雪的起止时间与逆温具有良好的对应关系,降水相态主要取决于 1 km 以下的温度变化。

参考文献

湛芸,孙军,徐珺,等,2012.北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(一)观测分析及思考[J].气象,38(10):1255-1266. Chen Y, Sun J, Xu J, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part I: observation and thinking[J]. Meteor Mon, 38(10):1255-1266(in Chinese).

董林,符娇兰,宗志平,2012.2011 年隆冬北京初雪成因分析[J].气象,38(8):913-920. Dong L, Fu J L, Zong Z P, 2012. An analysis

of dynamic characteristics of the first snow in winter 2011 in Beijing[J]. Meteor Mon, 38(8):913-920(in Chinese).

段丽,张琳娜,王国荣,等,2011.2009 年深秋北京大雪过程的成因分析[J].气象,37(11):1343-1351. Duan L, Zhang L N, Wang G R, et al, 2011. A dynamic diagnosis of the 091031 first snowfall in Beijing with some new intensive soundings[J]. Meteor Mon, 37(11):1343-1351(in Chinese).

高荣,宋连春,钟海玲,2018.2016 年汛期中国降水极端特征及与 1998 年对比[J].气象,44(5):699-703. Gao R, Song L C, Zhong H L, 2018. Characteristics of extreme precipitation in China during the 2016 flood season and comparison with the 1998 situation[J]. Meteor Mon, 44(5):699-703(in Chinese).

郭锐,张琳娜,李靖,等,2012.2010 年冬季北京初雪预报难点分析[J].气象,38(7):858-867. Guo R, Zhang L N, Li J, et al, 2012. Analysis of forecast difficulties for the first snow of Beijing Area in 2010 winter[J]. Meteor Mon, 38(7):858-867(in Chinese).

何娜,孙继松,王国荣,等,2014.北京地区预报失误的两次降雪过程分析[J].气象科技,42(3):488-495. He N, Sun J S, Wang G R, et al, 2014. Analysis of unsuccessful forecasting for two snowfall processes in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 42(3):488-495(in Chinese).

胡顺起,曹张驰,陈滔,2017.山东省南部一次极端特大暴雪过程诊断分析[J].高原气象,36(4):984-992. Hu S Q, Cao Z C, Chen T, 2017. Diagnostic analysis of a historical extreme snow process in south of Shandong Province[J]. Plateau Meteor, 36(4):984-992(in Chinese).

栗晗,王新敏,张霞,等,2018.河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,44(9):1136-1147. Li H, Wang X M, Zhang X, et al, 2018. Analysis on extremity and characteristics of the 19 July 2016 severe torrential rain in the North of Henan Province[J]. Meteor Mon, 44(9):1136-1147(in Chinese).

廖晓农,张琳娜,何娜,等,2013.2012 年 3 月 17 日北京降水相态转变的机制讨论[J].气象,39(1):28-38. Liao X N, Zhang L N, He N, et al, 2013. Analysis on the mechanism of the 17 March 2012 precipitation type variety in Beijing[J]. Meteor Mon, 39(1):28-38(in Chinese).

任福民,高辉,刘绿柳,等,2014.极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述[J].气象,40(7):860-874. Ren F M, Gao H, Liu L L, et al, 2014. Research progresses on extreme weather and climate events and their operational applications in climate monitoring and prediction[J]. Meteor Mon, 40(7):860-874(in Chinese).

沈阳,孙燕,蔡凝昊,等,2019.一次引发极端降水事件的江淮气旋发生发展分析[J].气象,45(2):166-179. Shen Y, Sun Y, Cai N H, et al, 2019. Analysis on the generation and evolution of a Jianghuai cyclone responsible for extreme precipitation event[J]. Meteor Mon, 45(2):166-179(in Chinese).

孙继松,何娜,王国荣,等,2012.“7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探[J].暴雨灾害,31(3):218-225. Sun J S, He N, Wang G R, et al, 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolution and mechanism of a torrential rain occurring

- in Beijing on 21 July 2012[J]. *Torr Rain Dis*, 31(3):218-225(in Chinese).
- 孙军, 谌芸, 杨舒楠, 等, 2012. 北京 721 特大暴雨极端性分析及思考(二)极端性降水成因初探及思考[J]. *气象*, 38(10):1267-1277.
- Sun J, Chen Y, Yang S N, et al, 2012. Analysis and thinking on the extremes of the 21 July 2012 torrential rain in Beijing Part II: preliminary causation analysis and thinking [J]. *Meteor Mon*, 38(10):1267-1277(in Chinese).
- 孙劭, 李多, 王遵娅, 等, 2019. 2018 年全球重大天气气候事件及其成因[J]. *气象*, 45(4):533-542. Sun S, Li D, Wang Z Y, et al, 2019. Global major weather and climate events in 2018 and the possible causes[J]. *Meteor Mon*, 45(4):533-542(in Chinese).
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等, 2018. 2017 年 5 月 7 日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J]. *气象*, 44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. *Meteor Mon*, 44(4):469-484(in Chinese).
- 吴庆梅, 杨波, 王国荣, 2014. 北京地区一次回流暴雪过程的锋区特征分析[J]. *高原气象*, 33(2):539-547. Wu Q M, Yang B, Wang G R, 2014. Analysis of the frontal characteristics of the backflow snowstorm process in Beijing Area[J]. *Plateau Meteor*, 33(2):539-547(in Chinese).
- 尹承美, 于丽娟, 高帆, 2014. 济南春季一次罕见降雪过程成因分析[J]. *山东气象*, 34(4):32-36. Yin C M, Yu L J, Gao F, 2014. Analysis of a rare snowfall process in Jinan in Spring[J]. *J Shandong Meteor*, 34(4):32-36(in Chinese).
- 俞小鼎, 周小刚, 王秀明, 2016. 中国冷季高架对流个例初步分析[J]. *气象学报*, 74(6):902-918. Yu X D, Zhou X G, Wang X M, 2016. A preliminary case study of elevated convection in China [J]. *Acta Meteor Sin*, 74(6):902-918(in Chinese).
- 翟亮, 王令, 刘文军, 2012. 两次降雪天气过程预报中边界层风廓线雷达资料的应用[J]. *气象科技*, 40(5):783-788. Zhai L, Wang L, Liu W J, 2012. Application of boundary layer wind-profiler radar data to forecasting of two snowy weather events[J]. *Meteor Sci Technol*, 40(5):783-788(in Chinese).
- 詹正杰, 尹仔锋, 乔林, 等, 2014. 一次华北气旋造成的北京特大暴雪天气过程分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 8(5):10-15. Zhan Z J, Yin Z F, Qiao L, et al, 2014. Analysis of Beijing snowstorm weather process resulted from a North China cyclone[J]. *Desert Oasis Meteor*, 8(5):10-15(in Chinese).
- 张琳娜, 郭锐, 曾剑, 等, 2013. 北京地区冬季降水相态的识别判据研究[J]. *高原气象*, 32(6):1780-1786. Zhang L N, Guo R, Zeng J, et al, 2013. Research on discrimination criterion of precipitation types in Beijing in winter[J]. *Plateau Meteor*, 32(6):1780-1786(in Chinese).
- 张芹, 丁治英, 杨成芳, 等, 2015. 山东一次历史极端降雪过程的诊断分析[J]. *高原气象*, 34(4):1131-1138. Zhang Q, Ding Z Y, Yang C F, et al, 2015. Diagnostic analysis of a historical extreme snow process in Shandong[J]. *Plateau Meteor*, 34(4):1131-1138(in Chinese).
- 郑丽娜, 靳军, 2012. “2. 28”山东罕见“雷打雪”现象形成机制分析[J]. *高原气象*, 31(4):1151-1157. Zheng L N, Jin J, 2012. Analysis on formation mechanism of rare ‘Thundersnow’ phenomenon in Shandong on 28 February 2010[J]. *Plateau Meteor*, 31(4):1151-1157(in Chinese).
- 周黎明, 王俊, 龚佃利, 等, 2014. 2009 年初冬山东一次暴雪过程粒子谱特征分析[J]. *气象*, 40(1):59-65. Zhou L M, Wang J, Gong D L, et al, 2014. Characteristics of particle spectrum during the snowstorm process in early winter 2009 in Shandong Province [J]. *Meteor Mon*, 40(1):59-65(in Chinese).
- Bennetts D A, Hoskins B J, 1979. Conditional symmetric instability—a possible explanation for frontal rainbands [J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 105(446):945-962.
- Grumm R H, 2012. Beijing flood of 21 July 2012-Draft [R]. NWS State College Case Example.
- Ishizaka M, Motoyoshi H, Nakai S, et al, 2013. A new method for identifying the main type of solid hydrometeors contributing to snowfall from measured size-fall speed relationship[J]. *J Meteor Soc Japan*, 91(6):747-762.
- Markowski P M, Richardson Y, 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*[M]. New York:John Wiley & Sons Inc.
- Schultz D M, Schumacher P N, 1999. The use and misuse of conditional symmetric instability[J]. *Mon Wea Rev*, 127(12):2709-2732.
- Yuter S E, Kingsmill D E, Nance L B, et al, 2006. Observations of precipitation size and fall speed characteristics within coexisting rain and wet snow[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 45(10):1450-1464.