

翟亮,王林,郭金兰,等.北京一次极端雨雪天气异常诊断分析[J].沙漠与绿洲气象,2022,16(4):9-13.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



北京一次极端雨雪天气异常诊断分析

翟亮¹,王林²,郭金兰¹,雷蕾¹,杜佳¹,张迎新¹

(1.北京市气象台,北京 100089;2.中国科学院大气物理研究所,北京 100029)

摘要:2020年2月13—14日北京地区出现一次极端雨雪天气过程,利用EC再分析数据、风廓线雷达、气候资料等,采用诊断分析、风廓线产品反演、气候异常分析等方法,对这次伴有复杂相态转换、对流、累计降水量破历史同期极值的极端雨雪天气过程进行分析和异常诊断,结果表明:(1)大尺度低涡、高/低空急流、锋面等天气系统为降水提供良好的背景条件。(2)河北中部的中尺度涡旋,是这次极端雨雪天气的重要成因之一。(3)对流活动的参与提高了降水效率,致使过程累计降水量进一步增大。(4)850 hPa切变线北侧强盛的偏东气流,在动力抬升、水汽输送及辐合中发挥重要作用。(5)-8~-20℃层云冰含量低,且0℃层高度>700 m是造成北京平原地区相态转换时间延迟的直接原因。(6)边界层回流冷空气由平原东部进入北京,是雨雪相态转换由东向西发生的根本原因。(7)极端的水汽通量辐合异常,是此次天气过程累计雨量突破同期历史极值的重要原因之一。

关键词:极端雨雪;中尺度涡旋;云冰含量;0℃层高度;气候异常

中图分类号:P458.121 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-0799(2022)04-0009-05

在我国雪灾总体呈增长趋势^[1]的背景下,北京作为国际化大都市,灾害性天气对城市运行有着严重影响,尤其与降雪相关的“城市次生灾害”一直备受关注。刘勇洪等^[2]研究构建了冰雪灾害对北京城市交通运行的预警评估指标体系。如何最大限度减少此类灾害的影响,需依赖气象部门的准确预报。从预报业务角度,深入分析大雪以上量级且伴有复杂雨雪相态转换的天气过程,研究其成因和极端性特征,能够为北京地区冬季极端雨雪天气过程的预报积累宝贵经验,提高气象预报和服务水平。

针对北京地区冬季暴雪天气的形成机制已有很多研究^[3-6],这些研究大多基于北京典型暴雪天气进行分析,也有学者从华北区域型暴雪的角度出发,讨

论北京地区暴雪的成因^[7-9],但所用天气个例多为单纯暴雪过程,亦或是发生在季节转换期间的雨雪天气。对2月发生在北京且伴有明显相态转换的暴雪天气少有研究。

2020年2月13日夜北京普降中雨,14日08:00(北京时,下同)北京大部分地区由雨转为雪,14日20:00降水结束。北京市平均累计降水量(雨、雪)为22.5 mm。其中北京市区平均降雪量为7.5 mm,城区平均为10.1 mm,最大降雪为平谷门楼庄的16.4 mm。此次天气过程中,北京20个国家气象观测站中有14个站日降水量突破冬季日降水量历史极值。北京观象台单站降水量达29.5 mm,突破1951年有观测记录以来2月最大日降水量极值。

本次极端雨雪天气具有累计降水量大、持续时间长、相态转换、积雪分布不均等突出特点。本文利用EC再分析资料、风廓线雷达产品、气候资料等,分析本次极端雨雪天气过程的成因和极端性,以期能够进一步认识和了解此类罕见的极端雨雪天气过程,为该类天气更准确的预报预警总结经验。

收稿日期:2020-12-23;修回日期:2021-10-28

基金项目:北京市自然科学基金项目(8214058);中国气象局预报员专项项目(CMAYBY2020-002);北京市气象局科技项目(BMBKJ202001028、BMBKJ202001006)

作者简介:翟亮(1980—),男,高级工程师,主要从事天气预报与分析研究工作。E-mail:liang6302@163.com

1 成因分析

1.1 大尺度环流背景

2020年2月13—14日,华北大部地区出现明显雨雪天气。2月14日08:00北京地区处在200 hPa高空西南急流分流区(图1),内蒙古西部500 hPa存在完整的大尺度低涡环流,700 hPa大湿度区(相对湿度>90%的区域)呈逗点状分布,覆盖京津冀地区。河北中部的中尺度辐合中心涡旋特征明显,并在风场上呈现明显“人”字形切变。位于涡旋东北侧的横切变缓慢北抬,切变线北侧强盛的偏东气流对北京的降水产生重要影响。与此同时,受北京外围山脉阻挡,地面冷高压自北京东部回流至平原地区,与北京西部缓慢越山的冷空气形成华北锢囚锋。此种天气系统配置特征,基本符合华北低涡暴雪天气概念模型,具有清晰的动力结构和特征。

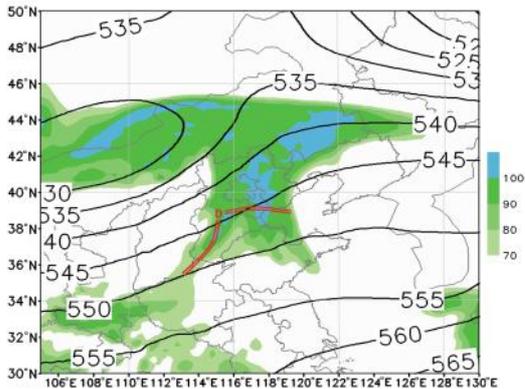


图1 14日08:00 500 hPa位势高度(黑色实线,单位:dagpm)、700 hPa相对湿度(阴影)、850 hPa中尺度低涡中心及切变位置(红色字母D及红色双实线)

1.2 中尺度涡旋分析

尽管蒙古低涡等天气系统为本次极端雨雪天气提供了较好的大尺度环流背景,但暴雪的形成往往需要中小尺度天气系统的参与。张迎新等^[7]研究发现,中尺度低涡系统对华北暴雪有增强作用。中小尺度天气系统的参与能使降雪进一步加强^[10-11]。14日08:00,北京处于500 hPa高空正涡度平流区,850 hPa垂直上升速度达 $-3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在大尺度低涡前部偏南气流中,850 hPa发展形成一个中尺度涡旋(图2),其中心位于河北中部,涡旋东侧横切变强度高,且向北缓慢移动,为本次极端降水提供强大动力抬升作用和水汽辐合条件,是影响北京地区降水的关键因素。该中尺度涡旋系统的发展和稳定维持,是降水过程中重要的动力和水汽来源,其作用与夏季

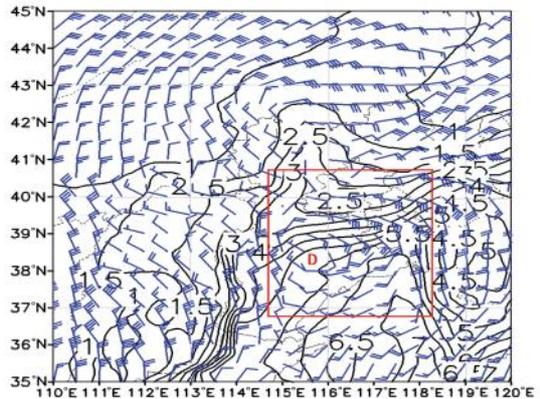


图2 14日08:00 850 hPa比湿(黑色实线,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、850 hPa风场(蓝色风向杆,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)、中尺度低涡中心及范围(D及红色方框)

的中尺度涡旋对暴雨的作用相似^[12]。

为进一步认识该中尺度涡旋的特征,分析其所控区域(图2中红色方框)内平均涡度在垂直方向的分布发现,涡旋区内的平均涡度随高度呈“S”型分布(图3),600 hPa以下为正涡度,600 hPa以上为负涡度,且正、负涡度极值分别稳定在800及400 hPa。在降水过程中,高空负涡度极值点保持在约 $-3\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,而800 hPa正涡度极值点不断加强(图3)。观测显示,14日02:00—07:00雨强增强,最大为 $8.5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,出现时间为14日06:00。雨强与中尺度涡旋低层正涡度增加有密切关系。

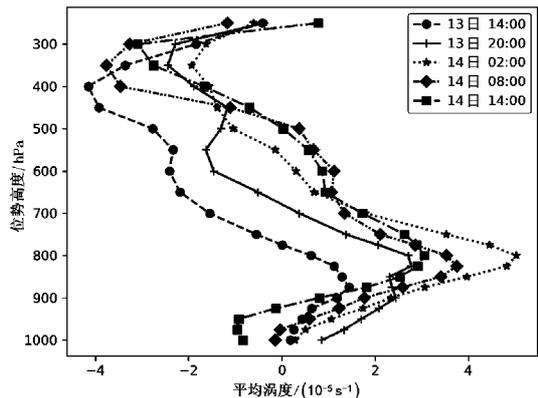


图3 13日14:00—14日14:00 涡旋区平均涡度廓线

1.3 不稳定层结

北京冬季降雪大多伴随底层偏东风回流特征,在北京形成一个“冷垫”^[12-14],造成上暖下冷的稳定层结。而14日04:00—07:00雨强明显增大阶段,卫星云图中有云阶特征,这说明降水可能有对流活动。

对流活动出现,需不稳定层结为基础。通常温度平流能直接引起大气热力结构发生变化,冷、暖平流垂直方向的叠加会使大气层结趋向不稳定。由海淀站风廓线雷达产品(图4)可知,14日02:00前后,大气底层有明显冷平流“楔入”,上层西南暖湿气流形成深厚的暖平流。但在约4000m高度又存在一定厚度的冷平流,因此在500hPa以下存在冷暖平流上下叠加,有利于层结不稳定大气的形成。

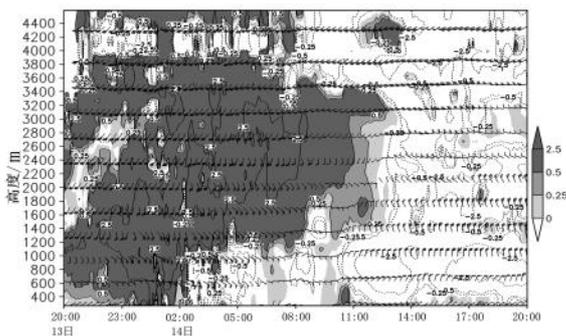


图4 2020年2月13日20:00—14日20:00海淀站风廓线(风向杆,单位: $m \cdot s^{-1}$)和温度平流(阴影,单位: $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot s^{-1}$)

为进一步验证本次过程中存在对流活动,选择13日20:00北京南郊观象台假相当位温廓线和探空曲线进行分析和订正,发现785hPa为逆温层顶,如订正该点为饱和状态,并由此作为抬升凝结高度,那么大气将出现明显的不稳定层结。

这需要满足2个条件:(1)785hPa以下迅速增湿到饱和。(2)785hPa以上的大气温度变化稳定。

实况大气的温湿演变中(图5),785hPa以下随着降水的开始,相对湿度迅速增加,并于14日00:00前后接近100%。同时,高空温度变化基本稳定,满足上述2个基本条件。因此,可以确定降水过程有对流活动,促使降水强度加大,降水效率提高。

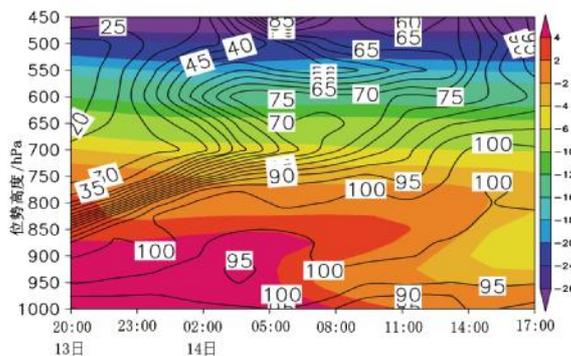


图5 2月13日20:00—14日17:00温度(阴影,单位: $^\circ\text{C}$)、相对湿度(等值线,单位:%)时空廓线

2 异常特征分析

本次过程发生在北京2月,其突出的异常特征是降雨量的极端性和相态转换异常。

2.1 相态转换异常

北京地区年极端最低气温一般出现在1月或2月上、中旬,个别年份也有出现在2月下旬。2月气候平均气温在 $-2 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右。北京2月强降水极少伴有雨雪转换,而本次过程不但存在复杂相态转换,且转换时间较预期延迟2~3h,雨转雪(除山区外)空间方向为自东向西,同时北京东部积雪明显,而西部(除山区外)则基本无积雪,这与普通的雨雪天气过程恰恰相反。

本文选取2月14日08:00(北京大部分雨雪转换时间发生在08:00前后),沿 40°N 做温度、云水含量、云冰含量的时间垂直剖面(图6)。回流造成的 $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 层高度西高东低的分布特征,造成东部先出现相态转换,而北京中西部相态转换时间晚2~3h。

雪花形成首先需要大量冰晶,而冰晶形成概率会随温度降低而增加,当温度 $<-8 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,云中的冰晶出现概率接近70%;当温度 $<-20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 时,云中基本为冰晶^[16]。另有研究表明^[17], $-13 \sim -17 \text{ } ^\circ\text{C}$ 冰晶碰并勾连效率最高,生长率最快。因此, $-8 \sim -20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 层为雪花生长的“关键层”。14日08:00之前,北京大部降水均为雨或雨夹雪(图6a), $-8 \sim -20 \text{ } ^\circ\text{C}$ 层的云冰含量仅为 $0.015 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,造成空中雪花生长受到影响。同时,

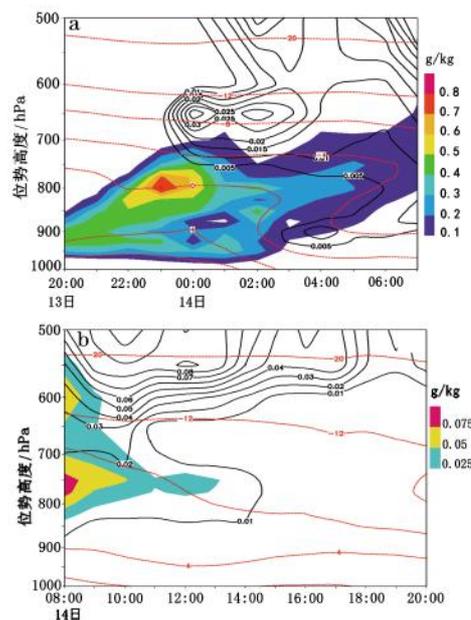


图6 2月13日20:00—14日07:00(a)和14日08:00—20:00(b)云冰含量(黑色实线,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、云水含量(色斑图,单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、温度(红色虚线,单位: $^\circ\text{C}$)剖面

0℃层高度维持在950 hPa附近(约700 m),即使高空形成雪花,但在落地之前也会被700 m高的暖层融化,无法实现相态转换^[18]。14日08:00之后,-8~-20℃层的云冰含量迅速增大到0.03 g·kg⁻¹以上,0℃层高度也降至近地面(图6b),满足了雪花能够降落地面的环境要求,完成相态转换。

在冬季相态转换预报中,除了要关注高空系统变化和大气低层湿度状态外,底层温湿变化同样重要^[19]。应通过从雪花形成到降落地所经历的大气综合温湿状态来判断降水相态。本次过程中-8~-20℃层云冰含量少,0℃层高度持续偏高是造成雨转雪推迟的根本原因。

2.2 水汽辐合异常分析

无论是降雨还是降雪,都是水汽在动力抬升作用下冷却凝结,并最终降落地面的天气过程。有研究表明水汽含量与降水量存在密切关系^[20],在极端降水过程发生前(2月12—13日,图7a),京津冀地区仅有弱的水汽通量辐合异常,而在降水过程中(13—14日,图7b),京津冀一带有明显的水汽通量辐合异常,这种极端的水汽通量辐合异常为降水提供了充沛的水汽。

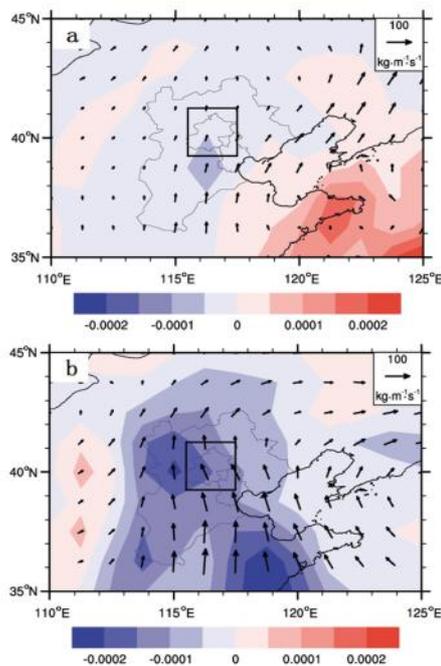


图7 2月12—14日整层水汽通量异常(矢量,单位:kg·m⁻¹·s⁻¹)及水汽通量散度异常(阴影,单位:kg·m⁻²·s⁻¹)
(异常指物理量与1981—2010年气候平均值之差)

为进一步分析这种水汽辐合的极端程度,选取北京地区(图7中方框区域:39.25°~41.25°N,

115.5°~117.5°E)进行区域平均,并与该区域历史同期的水汽通量异常极值进行对比(图8),2月13—14日的水汽通量辐合异常程度处于历史同期峰值,这种极端的水汽通量辐合异常,成为本次降水量极端性的重要原因。

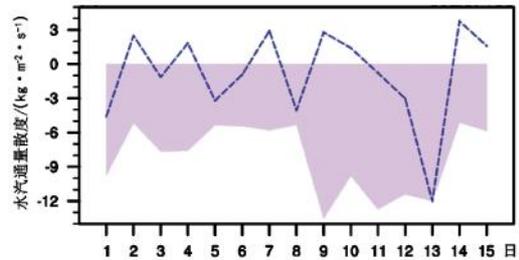


图8 2月1—15日区域平均的整层水汽通量散度异常值(等值线,单位:kg·m⁻²·s⁻¹)和历史同期极大值(阴影)

3 结论和讨论

本文利用实况高空观测资料、EC再分析数据、风廓线雷达等多种探测资料对北京2月一次极端雨雪天气进行深入分析和异常特征讨论,主要结论如下:

- (1)大尺度低涡、高/低空急流、锋面等天气系统,为降水提供了良好的天气背景条件。
- (2)河北中部形成和发展的中尺度涡旋,是本次极端雨雪天气形成的重要原因。
- (3)中高空的冷、暖温度平流叠加以及温湿状态演变,致使降水过程初期出现对流活动,这提高了降水效率,导致过程累计降水量进一步加大。
- (4)850 hPa切变线北侧强盛的偏东气流,在本次天气过程的动力抬升和水汽输送及辐合中发挥重要作用。
- (5)-8~-20℃层云冰含量低,同时0℃层高度>700 m的大气状态是造成相态转换节点延迟的直接原因。
- (6)回流冷空气自北京东部向西侵入,导致0℃层高度下降,进而为相态转换提供条件。
- (7)通过气候异常诊断,发现本次极端降水过程中,北京地区存在明显的水汽通量辐合异常,且异常程度处于历史同期峰值,这是本次天气过程极端性的重要原因。

本文对2020年2月一次极端雨雪天气过程进行了成因分析和异常诊断,下一步将深入研究本次过程中尺度涡旋系统的发展机制,探寻其对华北冬季极端雨雪天气的作用。

参考文献:

- [1] 郝璐,王静爱,满苏尔,等.中国雪灾时空变化及畜牧业脆弱性分析[J].自然灾害学报,2002,11(4):42-48.
- [2] 刘勇洪,房小怡,扈海波,等.冰雪灾害对北京城市交通影响的预警评估方法[J].应用气象学报,2013,24(3):373-379.
- [3] 叶晨,王建捷,张文龙.北京2009年“1101”暴雪的形成机制[J].应用气象学报,2011,22(4):398-410.
- [4] 杜佳,杨成芳,戴翼,等.北京地区4月一次罕见暴雪的形成机制分析[J].气象,2019(10):1363-1374.
- [5] 吴庆梅,杨波,王国荣.北京地区一次回流暴雪过程的锋区特征分析[J].高原气象,2014,33(2):539-547.
- [6] 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(11):1380-1388.
- [7] 张迎新,张守保,裴玉杰,等.2009年11月华北暴雪过程的诊断分析[J].高原气象,2011,30(5):1204-1212.
- [8] 杨晓亮,王咏青,杨敏,等.一次暴雨与特大暴雪并存的华北强降水过程分析[J].气象,2014(12):1446-1454.
- [9] 段宇辉,王文,田志广,等.华北北部相似形势下的两次雨转暴雪过程对比[J].干旱气象,2013,31(4):784-789.
- [10] 陶林科.宁夏中北部一次暴雪天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2012,6(4):7-12.
- [11] 张俊兰,杨霞,李建刚,等.2015年12月新疆极端暴雪天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2018,12(5):1-9.
- [12] 袁美英.2011年“7·31”东北冷涡外围中尺度涡旋暴雨分析[J].自然灾害学报,2014,23(2):181-189.
- [13] 郭锐,张琳娜,李靖,等.2010年冬季北京初雪预报难点分析[J].气象,2012,38(7):858-867.
- [14] 翟亮,王令,刘文军.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,2012,40(5):783-788.
- [15] 张南,裴宇杰,刘亮,等.一次晚春降水相态变化特征及成因[J].干旱气象,2014,(2):116-121.
- [16] WENDISCH M, H R PRUPPACHER, J D KLETT. Microphysics of Clouds and Precipitation [J].Journal of Atmospheric Chemistry,1999,32(3):420-422.
- [17] 黄庚,苏正军,关立友,等.冰雪晶碰并勾连增长的实验与观测分析[J].应用气象学报,2007,18(4):561-567.
- [18] 翟亮,郭淳薇,马新成,等.北京2016年“11·20”初雪预报偏差分析[J].气象,2018,44(1):151-158.
- [19] 张俊兰,彭军.北疆春季降水相态转换判识和成因分析[J].高原气象,2017,36(4):939-949.
- [20] 张秉祥,韩军彩,陈静,等.华北地区空中水汽含量与降水量的关系[J].干旱气象,2012,30(2):207-214.

Abnormal Diagnosis and Analysis of an Extreme Rain and Snow Weather in Beijing

ZHAI Liang¹, WANG Lin², GUO Jinlan¹, LEI Lei¹, DU Jia¹, ZHANG Yingxin¹

(1. Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100089, China;

2. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract Based on EC reanalysis data, an extreme rain and snow weather in Beijing on 13-14 February, 2020 was analyzed. The results show that: (1) Large scale vortex, front, etc provided good background conditions for precipitation. (2) The mesoscale vortex in the central part of Hebei province was an important cause of extreme weather. (3) Convection improved precipitation efficiency, which led to further increase of accumulated precipitation. (4) The strong easterly flow on the north side of 850 hPa shear played an important role in dynamic uplift, water vapor transport and convergence. (5) The low content of cloud ice in -8~-20 °C layer and the height of 0 °C layer over 700 m were the direct reasons for the delay of phase transition in Beijing plain. (6) The boundary layer backflow was the fundamental cause of the phase transition from east to west. (7) The convergence anomaly of water vapor flux directly led to rainfall extremes.

Key words extreme rain and snow; mesoscale vortex; cloud ice content; the height of 0 °C layer; climatic anomalies