氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

华北地区2015年“1106”降雪过程诊断分析

戴玲玲 周玉淑 李国平 邓国 曾勇

Diagnostic Analysis of the “1106” Snowfall Process in North China in 2015

DAI Lingling ZHOU Yushu LI Guoping DENG Guo ZENG Yong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20118

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

年华北地区持续霾事件的特征及其环流分类研究

-

气候与环境研究. 2019, 24(3): 341 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18016

一次华北破纪录暴雪成因的分析研究

Analysis of a Record Heavy Snowfall Event in North China

气候与环境研究. 2017, 22(6): 683 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16121

海南岛附近区域热带气旋低层风场的变化特征

Characteristics of Tropical Cyclone-Induced Low-Level Wind Fields over Hainan

气候与环境研究. 2018, 23(3): 299 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17180

北大西洋风暴轴高低空分布及其能量诊断

Patterns of North Atlantic Strom Track in the Upper and Lower Troposphere and Their Eddy Kinetic Energy Analysis

气候与环境研究. 2017, 22(6): 658 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16098

1957~2015年我国春季短期温度波动规律

Short-Term Temperature Fluctuation in the Spring in China during 1957-2015

气候与环境研究. 2019, 24(1): 125 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.17060

青藏高原一次冰雹强对流天气过程的诊断及雷达回波特征分析

Diagnostic Analysis and Radar Echo Features of a Hailstorm Severe Convective Weather Process over the Tibetan Plateau

气候与环境研究. 2019, 24(5): 611 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18127

关注微信公众号，获得更多资讯信息

戴玲玲, 周玉淑, 李国平, 等. 2021. 华北地区 2015 年“1106”降雪过程诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 519−531. DAI Lingling, ZHOU Yushu, LI Guoping, et al. 2021. Diagnostic Analysis of the “1106” Snowfall Process in North China in 2015 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 519−531. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20118

华北地区 2015 年“1106”降雪过程诊断分析

戴玲玲[1,2] 周玉淑[2,3,4] 李国平[1,5] 邓国[6] 曾勇[4]

1 成都信息工程大学大气科学学院，成都 610225
2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴院重点实验室，北京 100029
3 中国科学院大学，北京 100049
4 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所，乌鲁木齐 830002
5 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心，南京 210044
6 中国气象局国家气象中心，北京 100081

摘 要 利用中国气象局 MICAPS 地面、高空等常规观测资料及欧洲中心 ERA-Interim 的 0.25°（纬度）×0.25°（经度）逐 6 h 再分析资料，对 2015 年 11 月 5 日至 7 日影响北京、河北的一次降雪过程的环流形势和动热力物理量进行了诊断分析，揭示了降雪特征及其形成原因。环流形势分析发现，此次降雪是在高空两槽一脊叠加短波槽活动天气背景下的“回流型”降雪。500 hPa 有西伯利亚脊的发展和内蒙古地区气旋性涡旋及其向南发展出的弱槽，使得偏北冷空气与西南暖气流在河北地区相遇，伴随低层 700 hPa 的低涡发展，造成了此次降雪天气。500 hPa 多小槽波动东移，使得雨雪天气维持较长时间；700 hPa 受偏南暖湿气流影响，850 hPa 为偏东风，地面高压底部偏东风配合倒槽，有较好的上升运动和水汽输送条件；高湿的大气环境条件和低层水汽辐合及抬升为降雪发生提供了充沛的水汽；高低空急流的形成，与散度场、涡度场和垂直速度场的高低空耦合配置，为降雪天气的发生创造了动力条件。

关键词 回流型降雪 多小槽波动 地面高压 高低空急流

文章编号 1006-9585(2021)05-0519-13 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20118

Diagnostic Analysis of the “1106” Snowfall Process in North China in 2015

DAI Lingling[1,2], ZHOU Yushu[2,3,4], LI Guoping[1,5], DENG Guo[6], and ZENG Yong[4]

1 *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225
2 *Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029
3 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049
4 *Urumqi Institute of Desert Meteorology*, *China Meteorological Administration*, *Urumqi* 830002
5 *Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters*, *Nanjing University of*

收稿日期 2020-09-14；**网络预出版日期** 2021-05-07
作者简介 戴玲玲，女，1995 年出生，硕士研究生，主要从事中尺度天气学研究。E-mail: 1098515293@qq.com
通讯作者 周玉淑，E-mail: zys@mail.iap.ac.cn
资助项目 国家重点研发计划 2018YFF0300103，国家自然科学基金项目 41975137、41875074，中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所专项资金项目 IDM2019007，新疆维吾尔自治区引进高层次人才天池计划项目（2019）

Funded by National Key Research and Develop Program of China (Grant 2018YFF0300103), National Natural Science Foundation of China (Grants 41975137 and 41875074), Special Fund Project of Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi (Grant IDM2019007), Uygur Autonomous Region Tianchi Project for Introducing High-Level Talents (2019)

Information Science and Technology, *Nanjing* 210044
6 *National Meteorological Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081

Abstract In this paper, the ambient circulation and thermal dynamics of a snowfall affecting Beijing and Hebei from 5 to 7 November 2015, were analyzed using the observed data of MICAPS (Meteorological Information Combine Analysis and Process System) and the reanalysis data, 0.25°×0.25° every 6 h, from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts. The characteristics and causes of the snowfall were revealed. According to the analysis of the existing circulation, the snowfall was a "return-flow" snowfall under the superposition of two long wave troughs, one long wave ridge, and a series of short wave troughs. The development of a Siberian ridge at 500 hPa and a cyclonic vortex over Inner Mongolia and its weak trough forced the northerly cold air to meet the southwesterly warm air in Hebei. A low-pressure vortex developed at 700 hPa, which was the direct cause of the snowfall. At 500 hPa, several short wave troughs moved eastward, which made the rain and snow persist for an extended period. North China was affected by southerly warm and humid air flow at 700 hPa, easterly flow at 850 hPa, and the easterly wind at the bottom of ground high pressure combined with an inverted trough, which provided favorable conditions for vertical lift and water vapor transport. Upper and low-level jets formed, coupled with upper divergence and positive vorticity and vertical velocity fields, creating the dynamic conditions for snowfall. A moist environment and the convergence of water vapor in the lower layer provided abundant water vapor for snowfall.

Keywords Return-flow snowfall, Small troughs, Ground high pressure, Upper-level and low-level jet

1 引言

华北地区西高东低，以太行山为界，西部为黄土高原，东部主要为华北平原，另外，以燕山—阴山为界，黄土高原、华北平原北临蒙古高原，北京西北部为喇叭口地形。受地形迎风坡抬升作用和喇叭口地形加强的辐合上升气流影响，常有利于对流的形成和发展。一直以来，华北地区暴雨研究是气象学者关心的重要领域，并且成果较为显著。张文龙等（2012）总结了近 50 年华北暴雨的主要研究进展，内容涵盖大尺度环流形势及其分型、中低纬度系统相互作用、水汽输送、高低空急流、直接造成暴雨的中尺度系统、复杂地形以及海陆下垫面等。与暴雨研究相比，对降雪问题的关注度、研究和认识的深入程度相对薄弱。

国外学者对暴雪形成的大尺度成因、冬季云降雪和降雪气候学等方面进行了研究。温带气旋的形成与发展是欧美中纬度地区降雪的主要原因，日本地区降雪也多与低压系统的发生发展有关（Ninomiya, 1991; Huo et al., 1995; Ulbrich et al., 2001）。Grant and Kahan（1974）和 Elliott（1986）对冬季山区降雪的形成机制进行了细致研究。Koning et al.（2014）对密歇根湖周围的 47 个观测站进行了地理信息系统（GIS）分析，探讨平均降雪量、可测量降雪的天数、地面降雪的天数以及降雪与温度之间的相关性。国内气象学者通过对华北地区降雪的诊断分析，从大尺度、动热力条件等方面探讨了暴雪触发机制和发展机理。华北地区常见的降雪类型为“回流型”降雪，华北回流天气是指冷空气从东北平原南下，经过渤海以偏东路径侵入华北平原，实际上，回流也是一种冷锋，在华北平原经常出现（河北省气象局, 1987; 张守保等, 2008; 许敏等, 2014）。华北平原冬半年，特别是春、秋、冬季的回流天气比较多，回流造成的天气变化复杂，常常伴有大降水，比如冬季暴雪、春秋季较大降水或连续阴雨，还往往造成渤海和东部平原偏东大风。张迎新和张守保（2006）、张迎新等（2007）和张守保等（2008）指出回流是华北地区降雪的主要影响系统，回流降水的起止时间与高低层风向有关，中高层的西南气流与低层偏东气流叠加时降水开始，两者之一消失时降水结束；回流降水的水汽伴随中层的西南气流来自南方地区。马秀玲等（2008）和李津等（2017）对华北地区的大暴雪过程，从大尺度背景、水汽及动力条件方面进行了诊断分析，通过锋生函数、能量收支、水汽输送等物理量计算得出，华北回流天气有利于水汽输送和水平辐合加强，冷高压南侧低层“倒槽”和辐合线上中尺度云团反复发展对暴雪形成有重要作用，明显的锋面及逆温区存在利于不稳定能量积累。王迎春等（2004）对北京出现的 1841 年以来历史上最长的连续 6 天降雪天气进行了诊断分析，结果表明，连续降雪发生

的东亚稳定环流形势主要是：降雪期间华北地区处于锋区中，并伴有气流低空辐合高空辐散的垂直结构；华北回流型降雪天气近地面层有浅薄的冷空气垫，暖湿空气回流时沿冷空气垫爬升。叶晨等（2011）分析了 60 年来降雪量最大的初雪过程并探讨了暴雪形成机制，指出雪前降雨在近地面蒸发冷却降温，近地面气温下降较快接近冰点造成雨转雪，低层东路冷空气的平流是降雪期间近地面气温维持较低的主要原因。赵思雄等（2002）分析研究了 2001 年北京降雪，认为该过程也是常见的回流型降雪，并指出降雪预报存在许多难点。首先，预报对象难以捕捉，比如爆发性气旋等猛烈发展的系统，小槽所伴随的小雪过程这类信息较弱的系统。其次，暴雪预报中雨转雪、雪伴雷电、降雪强度的变化等，其成因的相关研究还非常有限。最后还有一些客观因素，如：现有观测网所提供的初始信息还不够完全，对于一些比较浅薄的系统，某些重要的信息可能被遗漏；特殊加密资料（尤其是边界层资料）的获取，各种非常规资料的同化及数值模式的进一步改进；云物理过程的描述不够准确等，都限制了降雪机理研究和预报水平的进一步提升。

冬季降雪有利于空气中污染物的沉降，起到净化空气的作用，但更多的是给人民生活带来恶劣影响，比如交通运输、工农业生产、重大活动安排等。2015 年 7 月，我国成功申请 2022 年第 24 届冬季奥林匹克运动会，并将在北京和张家口市举办。崇礼县处在张家口坝上、坝下中间地带，独特的地理位置形成了良好的小气候，崇礼降雪期早至 9 月下旬，降雪丰沛，且存雪厚度可达 1 m 左右，存雪期可达 150 天。延庆处于高海拔地区，因其降雪日数多、降雪量比较大，被称为北京“雪乡”。所以，着眼于张家口市崇礼地区、北京市延庆地区的华北降雪研究非常紧迫。2015 年 11 月 6 日的降雪是冬奥会申办成功后北京市迎来的首场降雪，冬奥会高山滑雪和雪橇、雪车赛区—延庆小海坨山，是降雪量最大地区，张家口市也都出现降雪，为研究奥运赛区降雪天气过程特征提供了极好的个例。

本文基于 MICAPS 各层高空和地面等常规观测资料以及欧洲中心 ERA-Interim 的 0.25°（纬度）×0.25°（经度）逐 6 h 再分析资料，对 2015 年 11 月 5～7 日华北地区降雪过程进行诊断分析，旨在加深对华北降雪环流形势和水汽动力条件的理解和认识，加强华北降雪过程天气形势演变及动热力物理量的诊断分析，为后续降雪研究提供参考。

2 天气过程实况描述

2015 年 11 月 5～7 日，北京、河北发生的范围较大、时间较长的雨雪天气中，6～7 日的降雪达到初雪标准，此次降雪在北京比常年初雪时间提前了 20 多天。5 日 17:00（北京时间，下同），河北开始出现零星降雪；19:00，佛爷顶、密云上甸子、怀柔汤河口以及延庆本站也先后飘起雪花，但北京市区没有出现降雪。6 日 02:00，北京开始出现大面积降雪，截止 6 日 08:00，北京全市平均降水量达到 8.9 mm，城区 8.6 mm，北京除了南郊观象台、丰台、通州及平谷外，大部分地区的积雪深度达 0.2～8.1 cm，最大积雪深度出现在佛爷顶，为 8.1 cm，城区由于地面潮湿且降雪时间短，未见积雪。截至 6 日中午，小海坨山雪量达到 23 mm，雪深达 12～18 cm。5 日 08:00 至 6 日 08:00 雨雪混合累积降水量显示（图 1a），河北西部和北部、北京等地降雪、雨或雨夹雪 5～20 mm，其中河北西部地区、北京西北部地区降水比较大，最大降水出现在张家口市，降水量超过 20 mm；6 日 08:00 至 7 日 08:00 北京和河北都处在降雪时段（图 1b），降水较大的区域主要集中在河北东部地区、北京北部，24 h 累积降水量在 10～20 mm。

在河北及北京地区，11 月一般雨夹雪天气较多，雨雪相态变化较复杂。此次京津冀降水过程自 11 月 5 日 08:00 开始，8 日凌晨结束。中国气象局 MICAPS（Meteorological Information Combine Analysis and Process System）提供的地面资料分析显示，以 7 日 17:00 为中间点，一共出现两次降雪时段：第一次是 5 日 17:00 至 7 日 17:00，其特点是降雪范围大、强度大；第二次为 7 日 19:00 至 8 日 04:00，河北承德小雪转晴，北京大部地区有零星小雨，山区雨夹雪，降水量较小。由于第二次过程降雪量小，本文重点分析第一次过程。所以研究的降雪时段为 5 日 17:00 至 7 日 17:00，这个过程中存在雨夹雪和雪的相态变换。地面温度在 0°C 上下，降水性质将从雨向雨夹雪或雪转变（李江波等, 2009; 张琳娜等, 2013），西北部多山区，河北、北京山区温度较低，雪花到地面不易融化，再加上 0°C 线位于京津冀中部，呈西南—东北走向，所以使得雨雪分界在河北省的中部，雨雪线呈现东北—

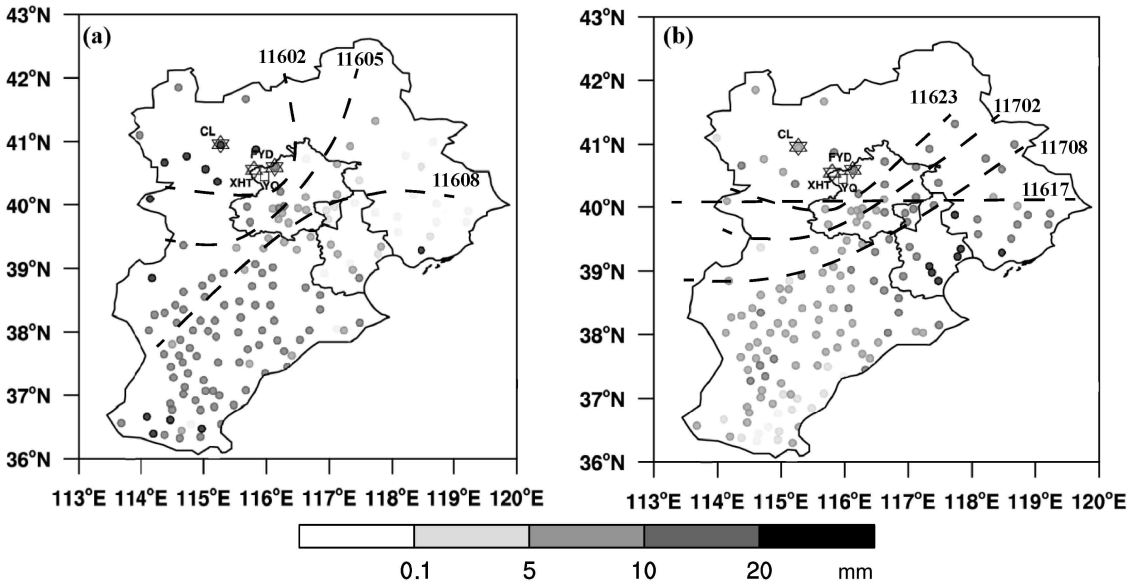

图 1 2015 年 11 月（a）5 日 08:00 至 6 日 08:00、（b）6 日 08:00 至 7 日 08:00 京津冀地区 24 h 累积降水量分布（单位：mm，黑色虚线代表降雪范围移动位置，CL 表示崇礼，XHT 表示小海陀站，YQ 表示延庆站，FYD 表示佛爷顶站）

Fig. 1 Distribution of 24-h accumulated precipitation (units: mm) in Beijing, Tianjin, and Heibei region (a) from 0800 LST 5 November to 0800 LST 6 November 6 2015 and (b) from 0800 LST 6 November to 0800 LST 7 November 2015. The black dotted lines represent the moving position of the snowfall range, CL represents Chongli station, XHT represents Xiaohaituo station, YQ represents Yanqing station, and FYD represents Foyeding station

西南走向。

从主要降雪时段（即 6 日 02:00 至 7 日 08:00）的逐 3 h 降水分布（图 2）可见，6 日 05:00 至 08:00，降水量比较大（图 2b），大降水中心出现在北京昌平区和延庆县。6 日 02:00 至 17:00（图 2a–2e）是降雪由发展逐渐减弱的阶段。图 3 是张家口市崇礼站和北京延庆站整个降雪过程（11 月 5 日 17:00 至 7 日 17:00）的 1 h 加密降水量变化，降雪过程以 6 日 17:00 为界划分为第一阶段和第二阶段。两个时段的降雪过程相比，第一时段过程（6 日凌晨至中午 12:00）降雪强度较大，并且降雪强度大致呈现先增后减，再增再减的过程。崇礼站最大小时降雪量为 4 mm，出现在 6 日 07:00。延庆站最大小时降雪量达 2 mm，6 日 05:00 至 10:00 降雪一直维持最大强度。

由此次京津冀降雪过程的 24 h、3 h 以及 1 h 降水分布可知，2015 年 11 月 6 日河北、北京初雪过程特点是持续时间长、雨雪变化频繁、降雪范围广、降雪强度大，尤其是张家口市和北京市西北部山区附近降雪强度大。下节将从环流、水汽及动力条件等方面进行此次降雪的发生发展过程分析。

3 环流形势演变特征和主要影响系统

环流形势分析选取主要降雪时段前后 3 h，即对 11 月 5 日 14:00 至 7 日 20:00 的 500 hPa、700 hPa 和 850 hPa 高度场进行分析。从近年来北京北部山区降雪天气过程看，山区降雪发生的天气形势配置主要为高空槽、低涡，配合地面倒槽和辐合线等（高茜等, 2016）。许敏等（2014）对华北回流形势降雪过程影响系统进行分析时指出，500 hPa 高空形势大致可分为两类，“两槽一脊型”和“多波动型”。此次降雪过程在 500 hPa 上，天气尺度环流背景类似于“两槽一脊”，但是，在槽脊发展过程中又存在西风带短波槽活动。正因为在两槽一脊的天气形势下叠加短波槽活动，导致了两日内出现两次降雪，雨夹雪转雪再转雨夹雪的复杂过程。11 月 5 日 14:00 至 7 日 20:00，一共有两支短波槽影响京津冀地区。11 月 5 日 14:00，东北及其以东地区为一大槽（图 4a），新疆西北的中高纬地区也为一深槽，两槽之间是经向发展强盛的深脊，脊区控制了西伯利亚。等温线和等高线的分布显示，温度场落后于高度场，具有明显斜压性，利于槽脊的进一步发展。此时，内蒙古西部地区有一中尺度涡旋出现，涡旋底部发展出一东北西南走向的短波槽，位于甘肃中南部。另外，新疆中部也有一支短波槽东移。随着时间推移，两支短波槽于 6 日、7

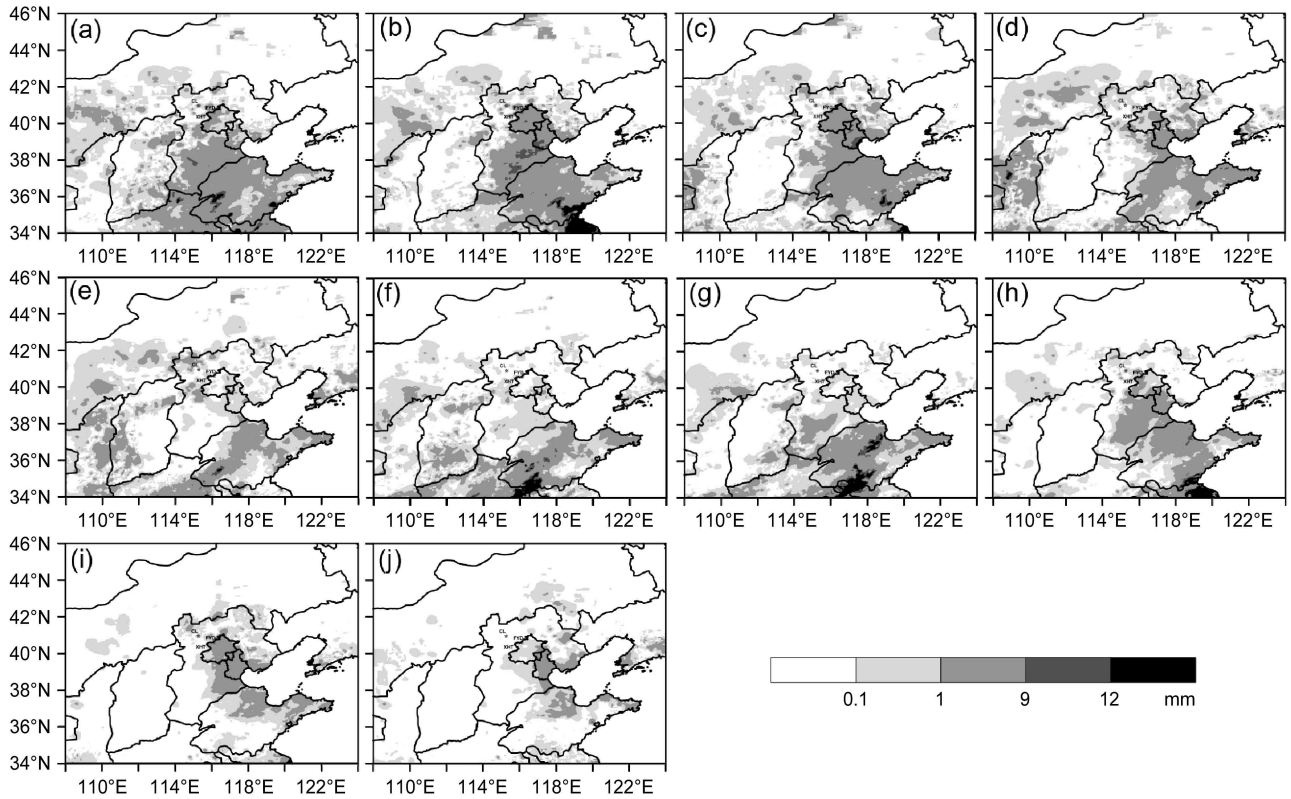

图 2　2015 年 11 月 6 日 05:00 至 7 日 08:00 京津冀地区 3 h 累计降水量分布（单位：mm）：（a）6 日 02:00 至 05:00；（b）6 日 05:00 至 08:00；（c）6 日 08:00 至 11:00；（d）6 日 11:00 至 14:00；（e）6 日 14:00 至 17:00；（f）6 日 17:00 至 20:00；（g）6 日 20:00 至 23:00；（h）6 日 23:00 至 7 日 02:00；（i）7 日 02:00 至 05:00；（j）7 日 05:00 至 08:00

Fig. 2　Distribution of 3-h accumulated precipitation (units: mm) in Beijing, Tianjing, and Heibei region: (a) 0200 LST to 0500 LST 6 November 2015; (b) 0500 LST to 0800 LST 6 November 2015; (c) 0800 LST to 1100 LST 6 November 2015; (d) 1100 LST to 1400 LST 6 November 2015; (e) 1400 LST to 1700 LST 6 November 2015; (f) 1700 LST to 2000 LST 6 November 2015; (g) 2000 LST to 2300 LST 6 November 2015; (h) 2300 LST 6 to 0200 LST 7 November 2015; (i) 0200 LST to 0500 LST 7 November 2015; (j) 0500 LST to 0800 LST 7 November 2015

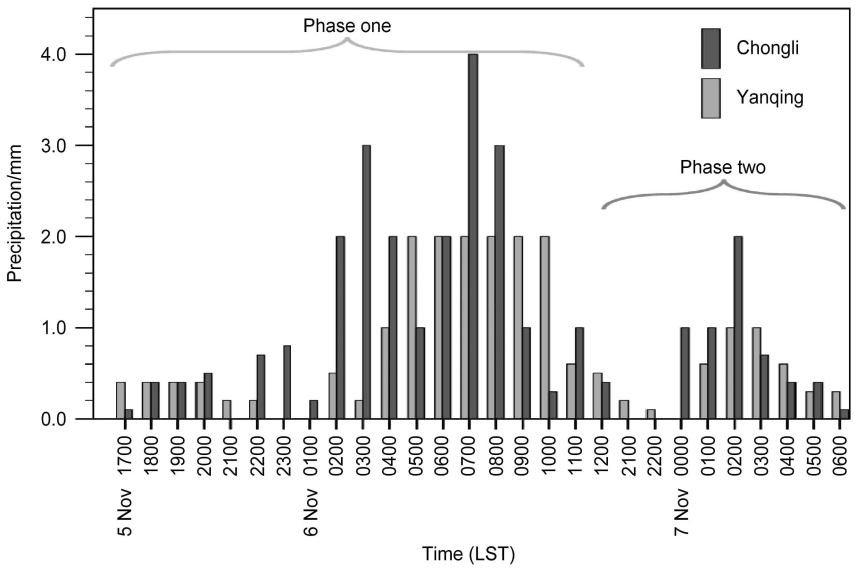

图 3　2015 年 11 月 5 日 17:00 至 7 日 17:00 崇礼、延庆站 1 h 加密降水量变化（单位：mm）

Fig. 3　Variation in 1-h intensive observed precipitation (units: mm) at Chongli and Yanqing stations from 1700 LST 5 to 1700 LST 7 November 2015

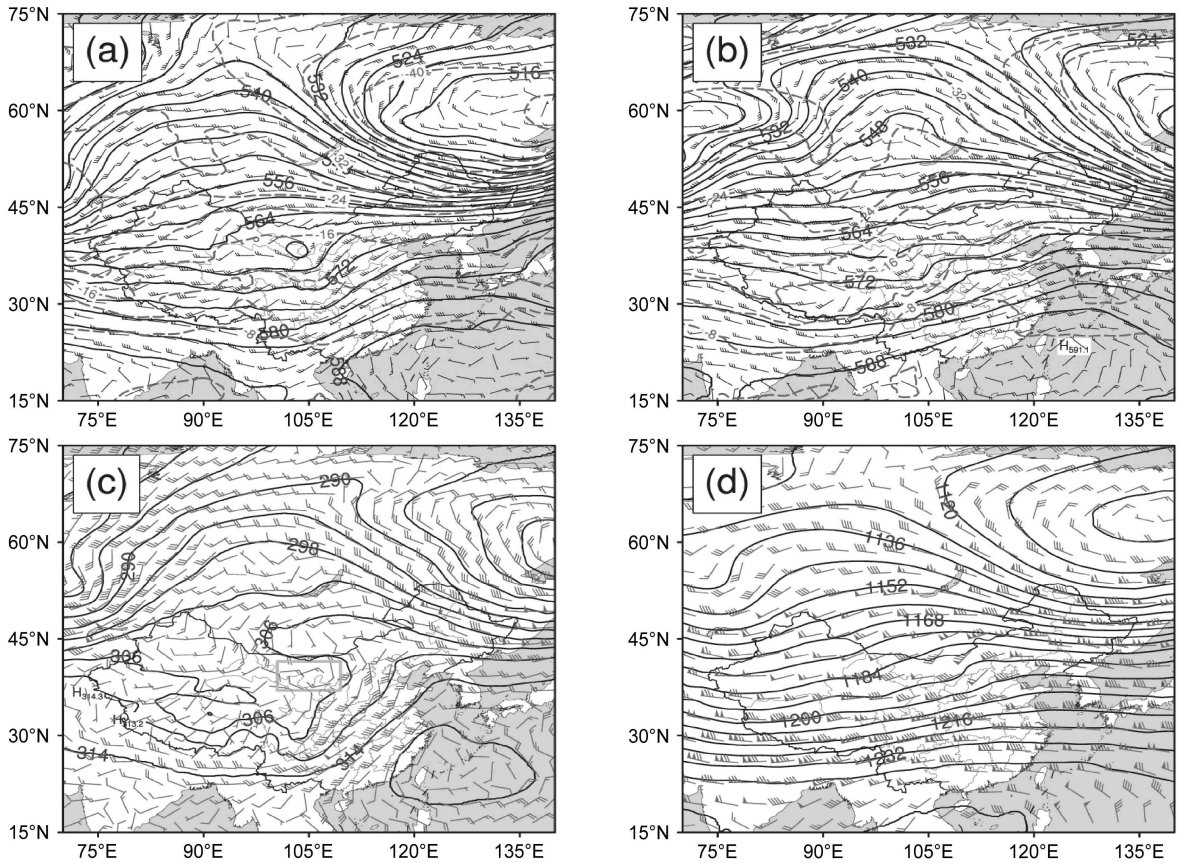

图 4 2015 年 11 月（a）5 日 14:00 和（b）7 日 02:00 500 hPa 位势高度场（黑色实线，单位：dgpm）和风场（单位：m s^{-1}）；2015 年 11 月 6 日 02:00（c）700 hPa 和（d）200 hPa 的位势高度场（黑色实线，单位：dgpm）和风场（单位：m s^{-1}）

Fig. 4 Geopotential height (solid black lines, units: dgpm) and wind field (units: m s^{-1}) at 500 hPa at (a) 1400 LST 5 November and (b) 0200 LST 7 November 7 2015; geopotential height (black solid lines, units: dgpm) and wind field (units: m s^{-1}) at (c) 700 hPa and (d) 200 hPa at 0200 LST 6 November 2015

日凌晨（图 4b）先后移近河北和北京地区，河北、北京位于槽前，槽前上升气流导致降雪发展加强。6 日 08:00 到 7 日 14:00，槽减弱移出，北京河北的降雪渐止。7 日 20:00，内蒙－陕西地区有一深槽，此槽加深并移入河北，影响范围更大，导致河北、北京大部分地区又出现降雨，山区雨夹雪。总的来说，多短波槽的相继发展和移动是影响河北和北京此次降雪和降雨的主要因素。

与 500 hPa 天气形势相对应，5 日 14:00，700 hPa 天气图上，内蒙古中西部地区有一中尺度低涡，6 日 02:00（图 4c），低涡东移至内蒙古中部，低涡东部偏南气流将南方丰沛的水汽输送到华北地区。6 日 02:00 至 08:00，西南气流发展最强盛，02:00 影响河北地区的偏南风最大风速增加到 16 m s^{-1}。6 日 14:00，低涡位于河北西北部张家口附近，6 日 14:00 至 7 日 02:00 西南气流逐渐加强，至 7 日 08:00 涡旋逐渐减弱，影响京津冀地区的主要是偏西风。850 hPa 环流形势场（图略）也是低涡东移的过程，但相比 700 hPa 低涡位置偏东，且整个降雪期间京津冀地区受偏东气流控制。200 hPa 高空环流形势场（图 4d）较平直。纵观天气形势场，低值系统从低层至高层向西倾斜，有明显的斜压性。

从 925 hPa 位势高度分布可见（图 5），北京此次降雪过程发生发展也与大陆冷高压的发展东移有关。我国东北到贝加尔湖的大部分地区被蒙古高压所控制，在高压东移过程中，其东部偏北气流流经洋面后转为东南气流回流到华北地区。5 日 14:00 至 6 日 08:00 蒙古高压明显加强，回流相应加强，京、津及河北省中北部处在地面冷高压底部偏东气流控制下，倒槽位于华北地区，这样的形势有利于出现低层东北风，使得冷空气入侵到北京和河北近地面，低层暖湿空气抬升后释放凝结潜热。因此，从地面形势场上，本次降雪过程属于在中纬度高空气流较为平直的情况下，高空气流引导大陆

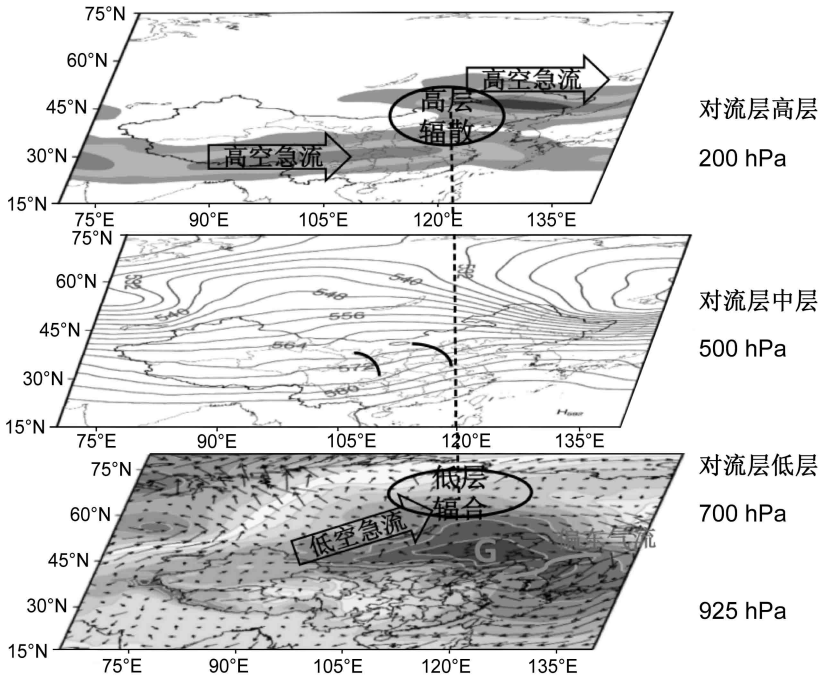

图 5　2015 年 11 月 6 日 08:00 高低空系统配置概略图

Fig. 5　Sketch of the configuration of high and low altitude systems at 0800 LST 6 November 2015

小高压移出至海上，小高压后部来自海上的空气回流所致，即属于华北地区比较常见的回流型降雪天气类型。

综上所述，500 hPa 两槽一脊叠加多波动小槽、700 hPa 低涡配合较强偏南气流的水汽输送以及 850 hPa 低涡及偏东气流的水汽输送是此次华北降雪过程的基本天气形势配置（图 5）。低层低涡自西向东移动至河北，与 500 hPa 槽前的上升区相对应，结合高层辐散的作用，使得河北和北京地区从低层到高层的上升运动发生发展，利于降雪发生。

4　物理量场的诊断分析

4.1　水汽条件分析

水汽充足是产生降水的必要条件。水汽通量散度一定程度上反映了大气中水汽的含量与聚集程度。水汽通量辐合强度与降雪强度也有一定的联系，辐合加强，水汽充足，降雪强度增大。根据水汽通量方程和水汽通量散度方程绘制了水汽通量和水汽通量散度分布（图 6）。水汽通量方程和水汽通量散度方程为

$$A_1 = \frac{1}{g}\boldsymbol{V}q = \frac{1}{g}(uq\boldsymbol{i} + vq\boldsymbol{j}), \qquad (1)$$

$$A_2 = \nabla\cdot(\frac{1}{g}\boldsymbol{V}q) = \frac{\partial}{\partial x}(\frac{1}{g}uq) + \frac{\partial}{\partial y}(\frac{1}{g}vq), \qquad (2)$$

其中，A_1 为水汽通量，单位：g hPa^{-1} s^{-1}；A_2 为水汽通量散度，单位：g cm^{-2} hPa^{-1} s^{-1}；q为比湿，单位 g/g；g=9.8 m s^{-2}；u 和 v 分别是风速分量，单位：m/s。

降雪期间，850 hPa 东南气流将东海南部、西太平洋和黄海的水汽输送至河北和北京地区。5 日 14:00 至 6 日 02:00，水汽辐合区范围逐渐扩大至整个京津冀地区。6 日 02:00 水汽条件最好（图 6a、6d），北京北部、河北西部有水汽通量辐合中心，最大值为-3×10^{-5} g cm^{-2} hPa^{-1} s^{-1}，京津冀东南部的渤海和山东半岛附近地区有较强的水汽通量，其最大值达 1.5 g cm^{-2} hPa^{-1} s^{-1}。至 14:00（图 6b 和 e），水汽通量大值区东移入海，强辐合中心基本移出了京津冀，中心辐合强度和范围都减弱，但河北和北京北部还有水汽辐合区，其值为-2×10^{-5} g cm^{-2} hPa^{-1} s^{-1}，600～400 hPa 出现干区（相对湿度小于 50%）。6 日 20:00 至 7 日 02:00，水汽通量有加强的趋势，京津冀地区水汽辐合加强（图 6c 和 6f）。7 日 08:00 后，水汽辐合中心消失，水汽供应条件不足。

受偏南暖湿气流影响，降雪期间，700 hPa 上有水汽从孟加拉湾源源不断输送到京津冀地区，有较好的水汽输送条件。从沿 40.7°N 的比湿剖面可

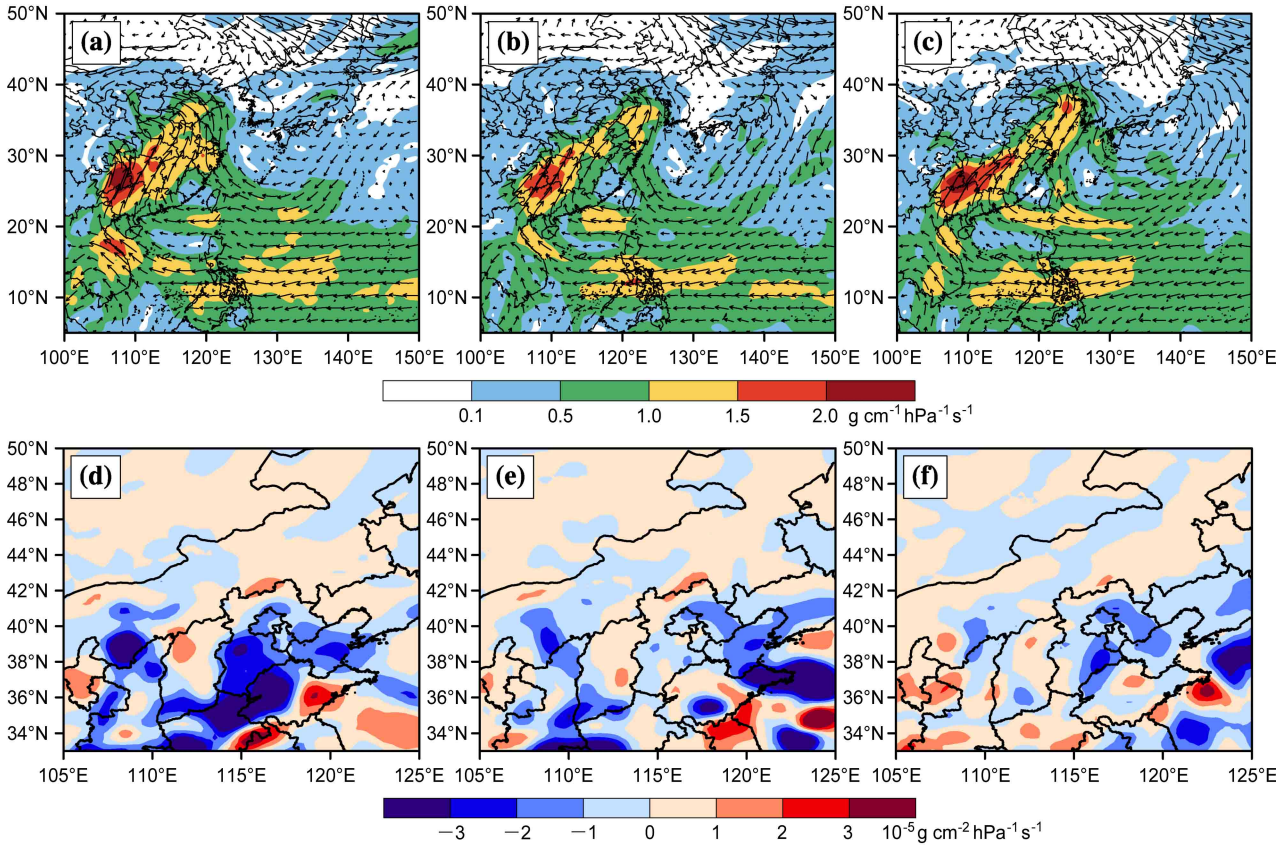

图 6 2015 年 11 月（a、d）6 日 02:00、（b、e）6 日 14:00 和（c、f）7 日 02:00 的 850 hPa 水汽通量（第一行，单位：g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}）和水汽通量散度（第二行，单位：g cm^{-2} hPa^{-1} s^{-1}）

Fig. 6 Distribution of water vapor flux (the first line, units: g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}) and water vapor flux divergence (the second line, units: g cm^{-2} hPa^{-1} s^{-1}) at 850 hPa at (a, d) 0200 LST 6 November 2015, (b, e) 1400 LST 6 November 2015, and (c, f) 0200 LST 7 November 2015

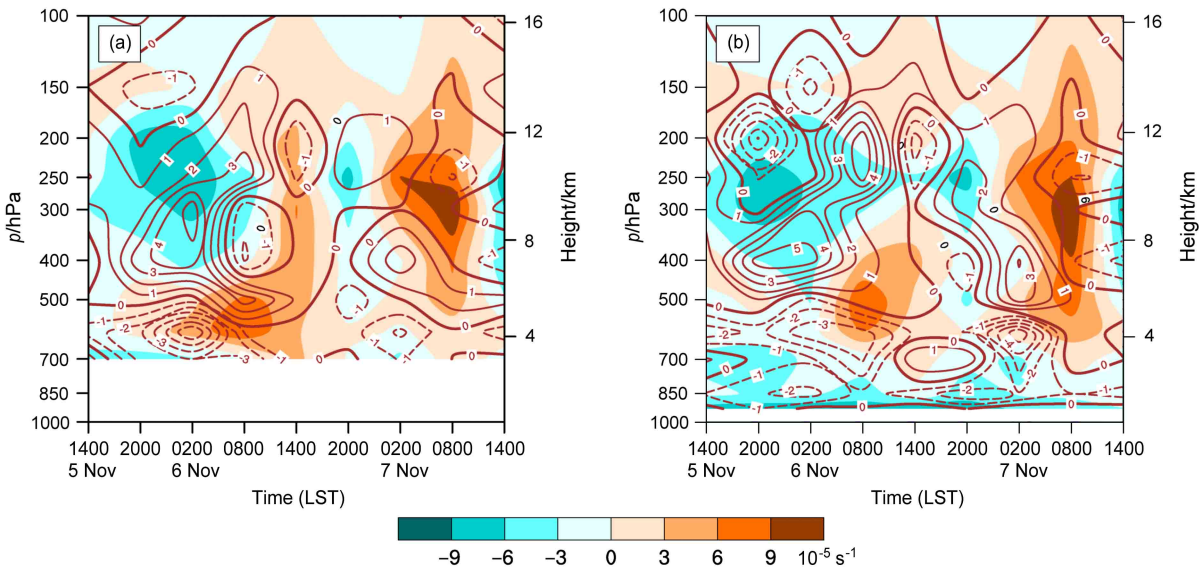

图 7 2015 年 11 月 5 日 14:00 至 7 日 14:00（a）崇礼站和（b）延庆站散度（等值线，单位：10^{-5} s^{-1}）和相对涡度（填色，单位：10^{-5} s^{-1}）的时间—高度剖面

Fig. 7 Time and altitude profile of divergence (isoline, units: 10^{-5} s^{-1}) and relative vorticity (colored map, units: 10^{-5} s^{-1}) at (a) Chongli station and (b) Yanqing station from 1400 LST 5 November to 1400 LST 7 November 2015

见（图略），降雪期间 700 hPa 至 850 hPa 层次比湿较高，达到 3.5～5 g kg^{-1}，为降雪发生提供了丰沛的水汽。

4.2 动力条件分析

4.2.1 散度和相对涡度的垂直分布

散度和相对涡度随时间的垂直分布变化（图 7）显示，5 日 14:00 至 6 日 14:00，崇礼站和延庆站低层有辐合，中低层的风场辐合向上延伸到 500 hPa，在 6 日 02:00 辐合达到最强，对应了降雪发展的强盛阶段。500 hPa 以上为辐散，高层辐散具有抽吸作用，有利于低空暖湿气流的抬升，从而触发不稳定能量释放。与辐散对应的上空高层始终存在负涡度中心，而在低层有正涡度中心与之对应，存在正涡度中心和高层强辐散中心相耦合，这种高层辐散、低层辐合的垂直配置结构为此次降雪发生提供了有利动力条件。强抽吸的动力结构也导致低层减压，低层的气旋得以发展，配合高湿的环境条件，导致了区域性的降雪天气发生。第二次降雪过程中，6 日 20:00 至 7 日 08:00，在垂直方向上，北京延庆站中低层的风场辐合延伸到 600 hPa，高层辐散中心位于 400 hPa，正涡度中心位于高层 300 hPa，负涡度中心较弱，其中 7 日 02:00 附近辐合最强。崇礼站的高底层配置和延庆站相似，低层辐合更弱。整体来看，高低空垂直配置动力条件较前一次过程弱，降雪强度也明显弱于第一次过程。

可见，降水区上空有辐合运动加强，对应低层有低涡发展。高空有高空急流维持，河北和北京处在高空槽前和急流出口区左侧，对应辐散运动，这种高低空配置使整层上升运动得到发展，加强了水汽垂直输送，利于降雪发生。第二次降雪过程，低层为负散度和负涡度结合，高空是正散度和正涡度的结合，上升运动相对较弱，降雪强度也较弱。

4.2.2 大气层结及水平风垂直切变分析

层结状况和水平风的垂直风切对降雪过程影响极大，崔慧慧和苏爱芳（2019）研究表明，低层冷垫对其上部的暖湿气流具有强烈抬升作用，西南低空急流与近地面东北气流所造成的垂直风切变的变化，反映了低层冷垫和其上部暖湿气流的反差程度，二者反差越大，意味着动力抬升越强，这对降雪强度变化有一定指示意义。北京站的探空图（图 8a）显示，从层结条件来看，5 日 20:00 北京地区上空湿层较厚，从近地面直达 400 hPa，整层湿度条件良好。由于大气湿度大，抬升凝结高度（LCL）低，低层大气极容易被抬升，6 日 08:00（图 8b）抬升凝结高度下降到 1012.5 hPa，湿层抬升，20:00 湿层下降至 500 hPa。到 7 日 20:00 700 hPa 以上水汽严重不足。对比发现，5 日 08:00 至 20:00，0°C 线迅速从 800 hPa 下降至 925 hPa 以下，近地面 1000～925 hPa 有东北风形成的冷垫，925～700 hPa 有多个逆温层，存在位势不稳定，700 hPa 以上为西南风，与低层东北风之间形成明显的垂直风切变，700 hPa 与 925 hPa 之间垂直风切变达 16 m s^{-1}。6 日 08:00，北京整层大气温度在 0°C 以下（0°C 线位于 1000 hPa 以下），925～850 hPa 逆温层明显，水平风垂直风切变增大至 22 m s^{-1}，对应着降雪强度继续增大。6 日 20:00，北京整层大气温度维持在 0°C 以下，但 700 hPa 西南风减弱至 4 m s^{-1}，低层东北风也减弱，导致垂直风切变减弱，降雪强度相应减弱。

张家口站的探空图（图 8c、8d）显示，5 日 20:00 至 6 日 08:00，对流层整层温度露点差较小，湿度较大，6 日 20:00，500 hPa 附近有干冷空气入倾，上下层的干湿对比更强烈，7 日 08:00，500 hPa 以下湿度条件较好。5 日 20:00 降雪开始时，0°C 层位于 925 hPa 以上，850 hPa 有偏东风，700 hPa 顺转为西南风，风速为 10 m s^{-1}，风向随高度顺转，张家口上空有暖平流，并存在很强的水平风垂直切变，有利于对流性天气产生。6 日 08:00 和 20:00，张家口站气温整层处于 0°C 以下，850～700 hPa 存在逆温层，08:00 低层垂直风切增大至 26 m s^{-1}，20:00 风切减弱至 14 m s^{-1}。7 日 08:00，气温持续在 0°C 以下，虽然逆温层仍存在，但垂直风切逐渐减小，至 20:00 后基本无垂直风切变，降雪量与垂直风切变化趋势基本一致，说明垂直风切对此次降雪过程有重要作用。

总的来看，降雪期间水汽充足，整层大气温度基本在 0°C 以下，有明显逆温层，700 hPa 以上一直维持暖湿气流，且存在强的水平风垂直切变，尤其强降雪时段，湿层较厚，垂直风切变也最强。第二段降雪过程相对第一段降雪，垂直风切变较弱，500 hPa 以上水汽不够充沛，降雪较弱。7 日 20:00，由于低层无风切变且水汽严重不足，降雪结束。

4.2.3 高低空急流分析

研究表明，高低空急流耦合对暴雪发生形成起关键作用（黄安丽和高坤, 1982; Uccellini and Johnson, 1979; 钟中等, 2010）。5 日 14:00，700 hPa 上，从

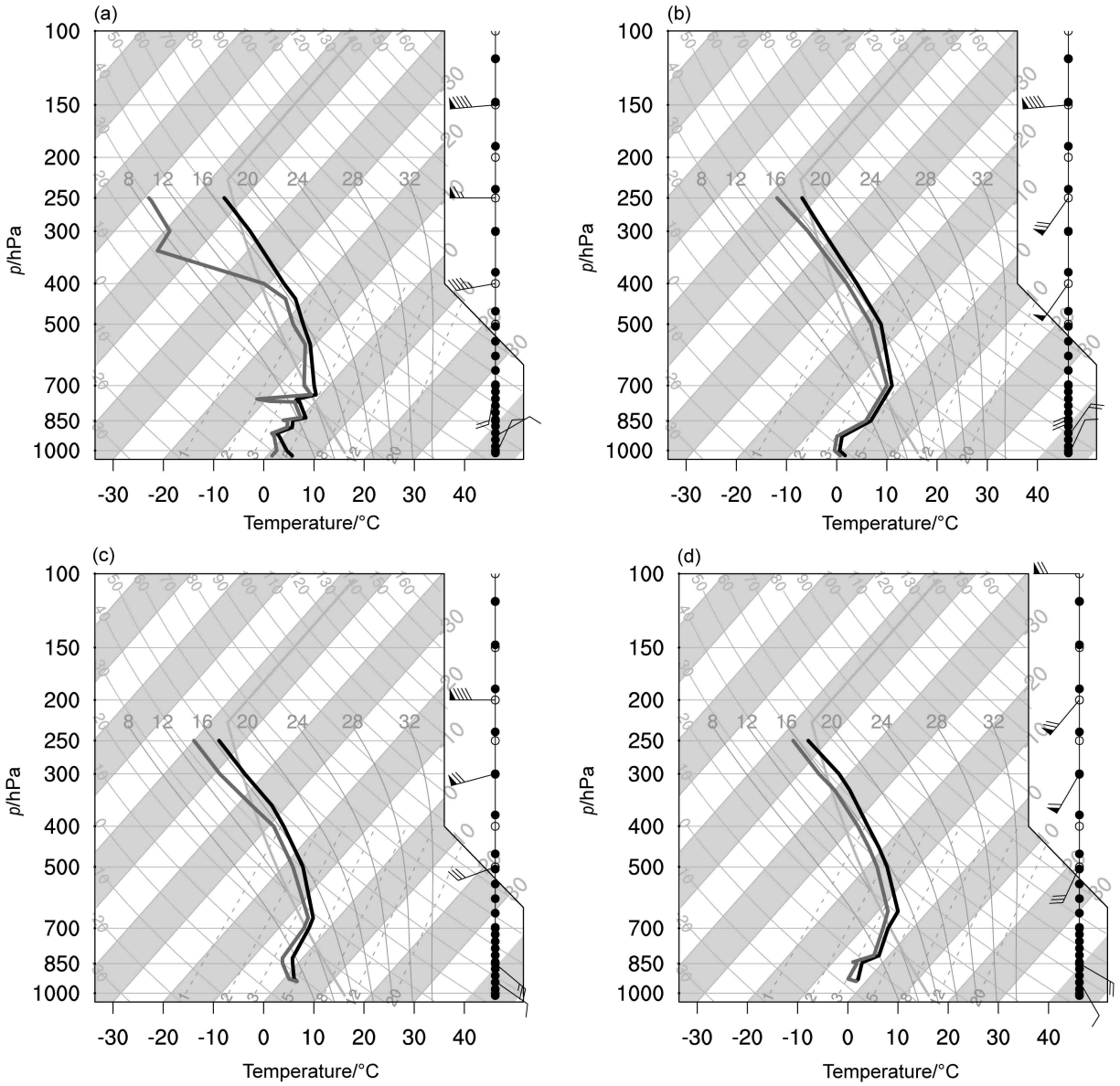

图 8 2015 年 11 月（a）5 日 20:00 北京站、（b）6 日 08:00 北京站、（c）5 日 20:00 张家口站和（d）6 日 08:00 张家口站的探空曲线（Skew T−ln$p$）

Fig. 8 Radiosonde sounding (Skew T−ln$p$) at (a) Beijing station at 2000 LST 5 November 2015, (b) Beijing station at 0800 LST 6 November 2015, (c) Zhangjiakou station at 2000 LST 5 November 2015, and (d) Zhangjiakou station at 0800 LST 6 November 2015

贵州到山西一带的西南低空急流已经建立，但还没有影响到河北和北京地区，随着低空急流向北推进，于 20:00 开始影响到河北西部，强度进一步加强，最大中心达到 20 m s^{-1}（图 9a），此后至 6 日 08:00，急流进一步加强并逐步大范围影响华北地区，将南方水汽输送到河北和北京附近（图 9b），并且这支强的水汽输送带与渤海的偏东气流在河北省东部交汇辐合，低层在急流出口区左侧形成一个强的水汽辐合中心。过降雪区（区域选择如图 9c）的风场和水汽的时间高度垂直剖面（图 9d）表明，降雪时段水汽充足，降雪天气发生前后，华北上空 200 hPa 一直有高空急流维持，河北、北京正处在高空槽前急流出口区左侧，导致了高空辐散气流的维持（图 9b）。低层有低涡发展导致辐合上升，中层低槽前上升气流与高层辐散的共同作用，导致河北和北京地区从低层到高层的上升运动发展加强，将低空急流输送的南方水汽和偏东风回流输送的东海南部、西太平洋和黄海的水汽输送至河北、北京地区，有利于降水的发生。7 日 08:00 之前，高空急流继续加强，最大急流中心达 50 m s^{-1}，随着低

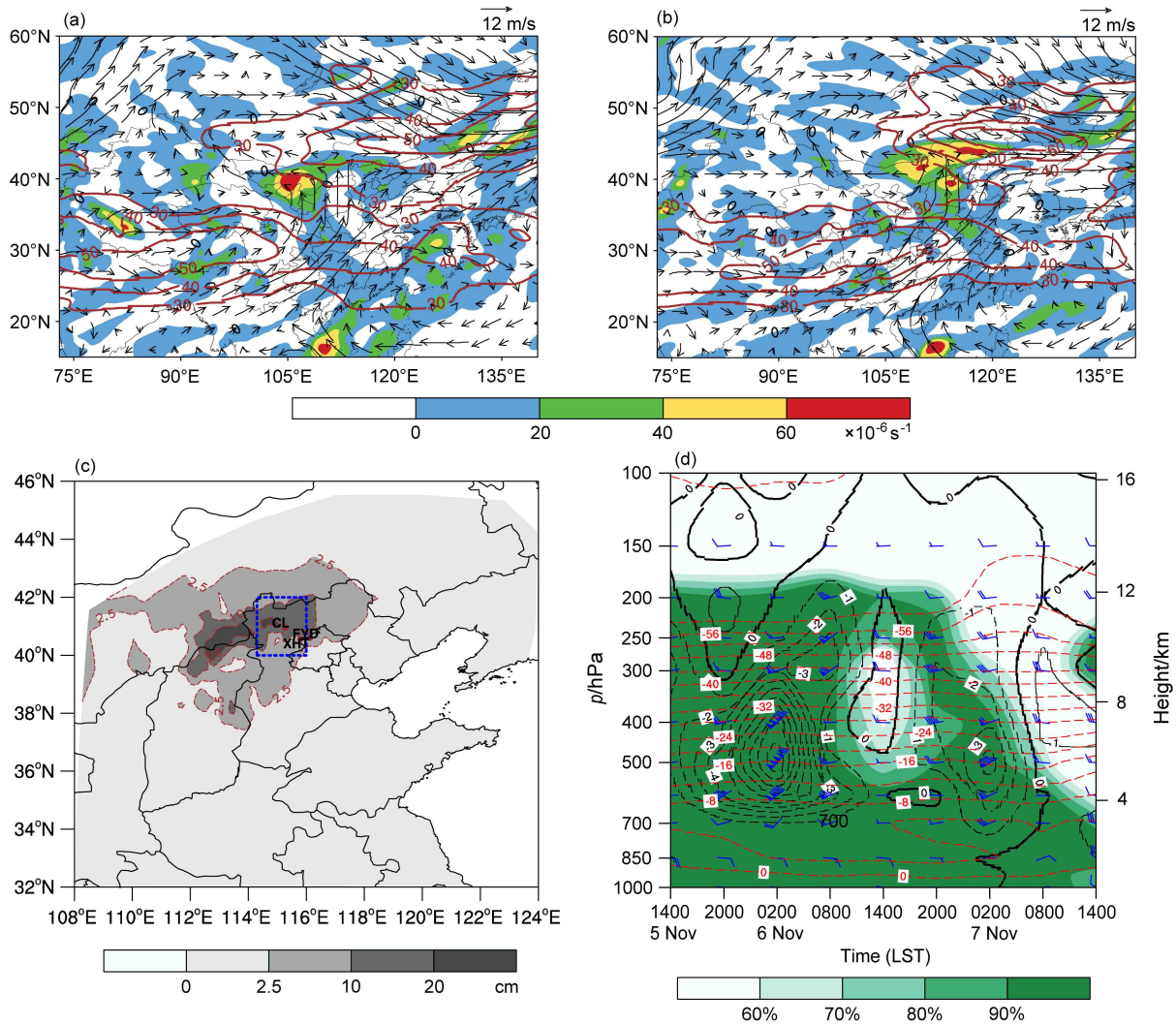

图 9　2015 年 11 月（a）5 日 20:00 和（b）6 日 08:00 200 hPa 高空急流（棕色实线，风速大于等于 30 m s^{-1}）与 700 hPa 低空急流（箭头风速大于或等于 12 m s^{-1}）和散度场（填色，单位：10^{-6} s^{-1}）；（c）2015 年 11 月 6 日 08:00 京津冀地区积雪深度（单位：cm）；（d）京津冀地区过降雪区（即图 c 蓝色虚线区）区域平均的相对湿度（填色）、风速（黑色等值线为垂直速度，单位：Pa/s，风杆为 *u* 和 *v* 分量的合成）和温度（红色虚线）的时间—高度垂直剖面

Fig. 9　200 hPa upper-level jet (solid brown line, wind speed ≥30 m s^{-1}) and 700 hPa low-level jet (wind speed ≥12 m s^{-1}) and divergence (colored, units: 10^{-6} s^{-1}) on (a) 2000 LST 5 November 2015 and (b) 0800 LST 6 November 2015; (c) snow depth (units: cm) in Beijing, Tianjin, and Hebei regions on 0800 LST 6 November 2015; (d) time and altitude profile of regional average relative humidity (colored map), wind speed (black contour is vertical velocity, units: Pa/s, wind pole is the combination of *u* and *v* components) and temperature (red dotted line) in the snowfall area (blue dotted area in the left figure)

空急流向北推进，6 日 02:00 高低空急流在垂直方向上的耦合叠加作用造成抽吸作用最强，为降雪加强提供了有利的动力条件；7 日 08:00 之后，高空最大急流中心虽然继续加强，但由于低空急流走向发生变化，逐渐与高空急流平行，高低空急流间的垂直叠加耦合消失，高低空的抽吸作用减弱，垂直上升运动维持机制不复存在，降雪逐渐减弱并停止。

可见，低空急流不仅为这次降雪过程提供了充沛的水汽来源，而且其与高空急流的加强及垂直叠加耦合，有利于在低空急流前方和高空急流右后方形成大范围强上升运动，抬升了低层水汽，为降雪天气的发生提供了动力和水汽条件。

5　结论和讨论

本文利用常规观测资料和欧洲中心 ERA-Interim 再分析资料，对 2015 年 11 月 5～7 日的河北、北京的降雪特点和形成原因进行分析。此次降雪过程

雪量较大，持续时间长，雨雪相态转换较多，属于华北地区比较常见的“回流型”降雪。

500 hPa 西伯利亚脊的发展导致对流层中层中高纬度环流经向度加大，内蒙古涡旋及其南部有弱槽发展，使得西伯利亚脊前偏北冷空气与槽前西南暖气流在河北地区交汇，配合 700 hPa 和 850 hPa 低涡发展，是造成此次降雪天气的直接原因。500 hPa 为两槽一脊天气形势下，有多波动小槽发展东移，使得雨雪天气维持时间较长。降雪期间整层大气温度处于 0°C 下，湿层几乎贯穿整个对流层，有利于降雪的形成。降雪过程中主要有两条水汽通道，一条是 850 hPa 东南气流对东海南部、西太平洋和黄海的水汽输送，另一条是 700 hPa 偏南气流对孟加拉湾的水汽输送。高湿的大气环境条件，低层水汽输送和水汽辐合为降雪天气提供了丰沛水汽。700 hPa 的偏南暖湿气流，850 hPa 的偏东风以及地面高压底部偏东风配合倒槽，散度场、涡度场和垂直速度场的高低空耦合配置，以及中低层的水平风垂直切变均为降雪天气的发生创造了良好的动力条件。降雪天气发生前后，华北上空有高空急流维持，河北和北京正处在高空槽前急流出口区左侧，维持了高空辐散气流。低层的低涡发展引起低层辐合加强，中层低槽槽前上升气流与高层辐散的共同作用，导致河北和北京地区从低层到高层的上升运动发生发展，将低空急流输送的南方水汽和偏东风回流输送的东海南部、西太平洋和黄海的水汽输送至河北、北京地区后辐合抬升。高低空急流耦合，使得抽吸作用加强，为降雪加强提供了有利的动力条件。

在有利的天气形势和动热力条件下，本次降雪过程中出现了降雪、雨或雨夹雪等降水形态的变化。本文只是进行了降雪过程中的天气学诊断分析，尚未涉及降水相态演变的机理，后续工作重点是结合数值模拟，分析并揭示造成不同降水相态的动热力和微物理过程的作用。

致 谢 感谢 ECMWF 提供的资料在线下载服务。ERA-Interim 数据介绍详见 https://www.ecmwf.int/node/8174[2020-01-01]。

参考文献（References）

崔慧慧, 苏爱芳. 2019. 2018 年初豫南特大暴雪过程的特征与成因分析 [J]. 暴雨灾害, 38(2): 169−176. Cui Huihui, Su Aifang. 2019. Analysis on characteristics and causes of a heavy snowstorm event in southern Henan in the beginning of January 2018 [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 38(2): 169−176. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.02.009

Elliott R D. 1986. Review of wintertime orographic cloud seeding [M]//Precipitation Enhancement—A Scientific Challenge. Meteorological Monographs. Boston, MA: American Meteorological Society, 87–103. doi: 10.1007/978-1-935704-17-1_9

高茜, 郭学良, 何晖, 等. 2016. 不同天气条件下北京山区冬季降雪云系微物理特征及地形影响分析 [C]//第 33 届中国气象学会年会 S15 人工影响天气关键技术与业务应用. 北京: 中国气象学会. Gao Xi, Guo Xueliang, He Hui, et al. 2016. Microphysical characteristics and topographic effects of winter snowfall cloud system in Beijing mountainous area under different weather conditions [C]// Key technologies and business applications of weather modification of the 33rd annual meeting of Chinese Meteorological Society (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.

Grant L O, Kahan A M. 1974. Weather modification for Augmenting Orographic Precipitation, Weather and Climate Modification [M]. New York: Willey Publications.

河北省气象局. 1987. 河北省天气预报手册 [M]. 北京: 气象出版社. Hebei Meteorological Bureau. 1987. Hebei Weather Forecast Manual (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.

黄安丽, 高坤. 1982. 对流层高、低空急流耦合作用的动力学分析 [J]. 浙江大学学报 (理学版), (3): 356−364. Huang Anli, Gao Kun. 1982. Dynamical analysis on the coupling of upper and lower tropospheric jet streaks [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition) (in Chinese), (3): 356−364. doi:10.3321/j.issn:1008-9497.1982.03.019

Huo Z H, Zhang D L, Gyakum J, et al. 1995. A diagnostic analysis of the superstorm of March 1993 [J]. Mon. Wea. Rev., 123(6): 1740−1761. doi:10.1175/1520-0493(1995)123<1740:ADAOTS>2.0.CO;2

Koning D, Carne A, Babu B G. 2014. Exploring patterns in November snowfall using GIS mapping and analysis [Z]. Symposium on Undergraduate Research and Creative Expression (SOURCE).

李津, 赵思雄, 孙建华. 2017. 一次华北破纪录暴雪成因的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 22(6): 683−698. Li Jin, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2017. Analysis of a record heavy snowfall event in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(6): 683−698. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16121

李江波, 李根娥, 裴雨杰, 等. 2009. 一次春季强寒潮的降水相态变化分析 [J]. 气象, 35(7): 87−94. Li Jiangbo, Li Gene, Pei Yujie, et al. 2009. Analysis on the phase transformation of precipitation during a strong cold wave happened in spring [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35(7): 87−94. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.07.013

马秀玲, 彭九慧, 杨雷斌, 等. 2008. 华北地区一次局地暴雪天气过程的诊断分析 [J]. 干旱气象, 26(1): 64−68. Ma Xiuling, Peng Jiuhui, Yang Leibin, et al. 2008. Analysis of a local snow storm in spring of 2007 in North China [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 26(1): 64−68. doi:10.3969/j.issn.1006-7639.2008.01.012

Ninomiya K. 1991. Polar low development over the east coast of the Asian continent on 9–11 December 1985 [J]. J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II, 69(6): 669−685. doi:10.2151/jmsj1965.69.6_669

Uccellini L W, Johnson D R. 1979. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms [J]. Mon. Wea. Rev., 107(6): 682−703. doi:10.1175/1520-0493(1979)107<0682:TCOUAL>2.0.CO;2

Ulbrich U, Fink A H, Klawa M, et al. 2001. Three extreme storms over Europe in December 1999 [J]. Weather, 56(3): 70−80. doi:10.1002/j.1477-8696.2001.tb06540.x

王迎春, 钱婷婷, 郑永光. 2004. 北京连续降雪过程分析 [J]. 应用气象学报, 15(1): 58−65. Wang Yingchun, Qian Tingting, Zheng Yongguang. 2004. Primary analysis of the longest-lasting snowfall in Beijing [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 15(1): 58−65. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2004.01.007

许敏, 刘艳杰, 王洁, 等. 2014. 廊坊市回流型强降雪天气及预报指标分析 [J]. 气象与环境学报, 30(2): 31−37. Xu Min, Liu Yanjie, Wang Jie, et al. 2014. Analysis of backflow heavy snowfall weather and its prediction index Langfang [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30(2): 31−37. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.02.004

叶晨, 王建捷, 张文龙. 2011. 北京 2009 年“1101”暴雪的形成机制 [J]. 应用气象学报, 22(4): 398−410. Ye Chen, Wang Jianjie, Zhang Wenlong. 2011. Formation mechanism of the snowstorm over Beijing in early winter of 2009 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 22(4): 398−410. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2011.04.002

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 Linna, Guo Rui, Zeng Jian, et al. 2013. Research on discrimination criterion of precipitation types in Beijing in winter [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32(6): 1780−1786. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00147

张守保, 张迎新, 王福侠, 等. 2008. 华北回流天气多普勒雷达径向速度分布特征 [J]. 气象, 34(2): 33−37. Zhang Shoubao, Zhang Yingxin, Wang Fuxia, et al. 2008. Distribution of Doppler radar radial velocity of the return-flow events over North China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34(2): 33−37. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.02.005

张文龙, 崔晓鹏. 2012. 近 50a 华北暴雨研究主要进展 [J]. 暴雨灾害, 31(4): 384−391. Zhang Wenlong, Cui Xiaopeng. 2012. Main progress of torrential rain researches in North China during the past 50 years [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 31(4): 384−391.

张迎新, 张守保. 2006. 华北平原回流天气的结构特征 [J]. 南京气象学院学报, 29(1): 107−113. Zhang Yingxin, Zhang Shoubao. 2006. Structural feature of the backflow precipitation over North China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29(1): 107−113. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.01.016

张迎新, 侯瑞钦, 张守保. 2007. 回流暴雪过程的诊断分析和数值试验 [J]. 气象, 33(9): 25−32. Zhang Yingxin, Hou Ruiqin, Zhang Shoubao. 2007. Numerical experiments and diagnosis on a heavy snow of return-flow events [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(9): 25−32. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2007.09.004

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. doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.01.002

钟中, 元慧慧, 李杰, 等. 2010. 一次高空急流增强过程中的中尺度扰动和动量输送特征 [J]. 气象科学, 30(5): 639−645. Zhong Zhong, Yuan Huihui, Li Jie, et al. 2010. Characteristics of the meso-scale perturbations and momentum transportation associated with an intensification process of upper-level jet [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 30(5): 639−645. doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2010.05.010