暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

2022年北京一次回流强降雪过程诊断分析

李玉鹏 李吉 苏丽欣 冯喜媛 平凡 高枞亭 丁立

Diagnostic analysis of a return-flow heavy snowfall in Beijing in 2022

LI Yupeng，LI Ji，SU Lixin，FENG Xiyuan，PING Fan，GAO Zongting，DING Li

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2025-041

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

2024年1月引发雪崩的阿勒泰极端强降雪天气成因和预报分析

Analysis of the causes and forecast of the extremely heavy snowfall in Altay Area that triggered avalanches in January 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 407-418 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-059

2021年4月陕西一次极端暴雨过程的成因诊断

Diagnosis of the causation of an extreme rainstorm in Shaanxi in April 2021

暴雨灾害. 2022, 41(2): 109-118 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.02.001

四川盆地一次暖性西南低涡大暴雨的中尺度分析

Mesoscale analysis on one warm Southwest Vortex rainstorm in the Sichuan basin

暴雨灾害. 2023, 42(1): 24-36 https://doi.org/10.12406/byzh.2022-024

东北冷涡背景下中尺度低涡的演变成因及其对MCS的影响分析

Analysis of the evolution reason of the mesoscale vortex and its influence on MCS under the background of the northeast cold vortex

暴雨灾害. 2021, 40(5): 474-483 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.05.004

四川盆地一次暴雨过程中西南低涡非对称结构特征及其成因分析

Analysis on characteristics and causes of the Southwest Vortex asymmetric structure during one rainstorm in the Sichuan Basin

暴雨灾害. 2024, 43(6): 627-636 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-239

2024年春运期两次极端雨雪冰冻天气过程对比分析

Comparison of two extreme rainfall/snowfall and freezing weather events during the Spring Festival transportation period in 2024

暴雨灾害. 2024, 43(4): 371-383 https://doi.org/10.12406/byzh.2024-095

关注微信公众号，获得更多资讯信息

李玉鹏,李吉,苏丽欣,等.2026. 2022 年北京一次回流强降雪过程诊断分析[J].暴雨灾害,45(3):349−360. LI Yupeng, LI Ji, SU Lixin, et al. 2026. Diagnostic analysis of a return-flow heavy snowfall in Beijing in 2022 [J]. Torrential Rain and Disasters,45(3):349−360 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2025−041

2022 年北京一次回流强降雪过程诊断分析

李玉鹏[1, 2], 李吉[3], 苏丽欣[1, 2], 冯喜媛[1, 2], 平凡[4, 5], 高枞亭[1, 2], 丁立[1, 2]

(1. 吉林省气象科学研究所/长白山气象与气候变化重点实验室, 长春 130062; 2. 中国气象局流域强降水重点开放实验室北方暴雨研究中心, 长春 130062; 3. 吉林省气象台, 长春 130062; 4. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029; 5. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京 210044)

摘　要: 为深入理解华北地区冬季回流型强降雪的形成机制, 以 2022 年 2 月 12—13 日北京地区一次回流强降雪过程为例, 基于地面观测、风廓线、ERA5 再分析等资料, 采用天气学和动力诊断方法以及 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 粒子追踪模型, 对该过程的环流配置、粒子轨迹、物理量场及湿位涡 MPV (Moist Potential Vorticity) 进行分析, 并识别出具有预报指示意义的关键指标。结果表明: 此次强降雪发生在 500 hPa 冷涡、高低空急流耦合、850 hPa 低涡及低层偏东风回流共同作用的环流背景下。北京地区低层偏东风主要来自其东北方向, 且集中在 1.5 km 以下高度, 2.5 km 以上的西南气流主要来自其西南方向; 地形通过阻挡和强迫抬升等作用, 显著改变偏南气流的动力和热力性质, 对降雪的增幅作用明显。回流形成的“冷垫”与 700 hPa 西南暖湿气流叠加, 在偏南风增强背景下促进锋生, 显著加强上升运动与降雪强度; 强降雪发生在 MPV 分量 $MPV_1>0$ 和 $MPV_2<0$ 的高绝对值叠加区, 其发展主要源于暖湿空气沿冷垫斜升引发的气旋性涡度剧烈发展。具有预报指示意义的关键指标包括: 地面偏东风持续配合中低层偏南风加速预示降雪增强; MPV_1 极大值与 MPV_2 极小值同步突变也对应降水增加。最后, 给出本次回流降雪的物理概念模型, 以期丰富华北冬季回流强降雪的预报预警指标。

关键词: 强降雪; 东风回流; 倾斜涡度发展; 低涡; 地面倒槽

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2025−041

Diagnostic analysis of a return-flow heavy snowfall in Beijing in 2022

LI Yupeng[1, 2], LI Ji[3], SU Lixin[1, 2], FENG Xiyuan[1, 2], PING Fan[4, 5], GAO Zongting[1, 2], DING Li[1, 2]

(1. *Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology and Climate Change*, *Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province*, *Changchun* 130062; 2. *Northern Research Center of Key Laboratory for Basin Heavy Rainfall*, *China Meteorological Administration*, *Changchun* 130062; 3. *Meteorological Observatory of Jilin Province*, *Changchun* 130062; 4. *Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms* (*LACS*), *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029; 5. *School of Remote Sensing and Geomatics Engineering*, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044)

Abstract: To deeply understand the formation mechanisms of intense return-flow snowfall in North China during winter, this study analyzes the heavy snowfall event that occurred in Beijing on February 12–13, 2022, using ground observations, wind profiler data, and ERA5 reanalysis. Synoptic and dynamic diagnostic methods combined with the Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) particle trajectory model are employed to investigate the synoptic circulation configuration, Lagrangian particle trajectories, physical quantity field, and moist potential vorticity (MPV), while also identifying critical indicators with predictive value. The results show that the heavy snowfall resulted from the combined influence of a 500 hPa cold vortex, coupled upper- and lower-level jet streams, an 850 hPa low vortex, and a low-level easterly return flow. The low-level easterly flow over Beijing primarily originated from the

收稿日期: 2025−03−05; **定稿日期**: 2025−12−19

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42405014); 国家重点研发计划项目 (2023YFC3007700, 2023YFC3007702); 中国气象局流域强降水重点开放实验室项目 (2023BHR-Y12); 中国气象局沈阳大气环境研究所联合开放基金项目 (2024SYIAEKFMS02); 河北省技术创新引导计划科技冬奥专项 (19975414D)

第一作者: 李玉鹏, 主要从事中尺度气象学与数值模拟相关研究。E-mail: yupenglee_cn@126.com

通信作者: 平凡, 主要从事天气动力学和数值天气预报技术研究。E-mail: pingf@mail.iap.ac.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

northeast and was concentrated below approximately 1.5 km, whereas the southwesterly flow above 2.5 km mainly came from the southwest. Topography significantly modified the dynamical and thermodynamical characteristics of the southerly flow through blocking and forced lifting, thereby enhancing snowfall. The easterly return flow formed a near-surface “cold air cushion” that overlapped with a southwesterly warm and moist airstream around 700 hPa. Under strengthening southerly winds, frontogenesis was promoted, markedly intensifying the upward motion and snowfall intensity. The most intense snowfall occurred in the overlapping region with high absolute values of MPV components (MPV1 > 0 and MPV2 < 0). And the snowfall development was primarily driven by vigorous cyclonic vorticity generated through the slantwise ascent of warm, moist air over the cold cushion. Key indicators with forecasting significance include: persistent surface easterlies combined with accelerating southerly winds in the mid-to-lower troposphere indicating snowfall intensification; and the concurrent abrupt increases in the maximum of MPV1 and decreases in the minimum of MPV2 corresponding to precipitation enhancement. This study not only establishes a refined physical conceptual model for this return-flow snowfall event but also enriches the set of operational forecasting and warning indicators for intense winter return-flow snowfall in North China.

Key words: heavy snowfall; eastly return-flow; slantwise vorticity development; low level vortex; inverted trough

引　言

暴雪是我国冬半年的主要灾害性天气之一, 常伴有大风、寒潮以及冰冻, 往往会对交通运输、水利、电力、农业等行业及城乡居民生活造成影响 (Jiao et al., 2021; Li et al., 2022; 谷秀杰等, 2024; 陶亦为等, 2024), 其预报的准确性越来越受到社会大众的关注。回流天气是华北地区冬季产生降雪的主要天气类型之一 (张迎新和张守保, 2006; 季崇萍等, 2020)。冷空气从东北地区南下, 经渤海之后向西进入华北地区称为华北回流天气, 常会产生降雪甚至暴雪天气。

针对华北地区回流暴雪的研究已取得了较多有益的成果。在天气背景方面, 季崇萍等 (2020) 研究认为回流暴雪可受高空槽、低空切变线与地面倒槽共同影响, 易笑园等 (2010) 发现造成暴雪的天气系统是回流形势下的冷锋锢囚锋, 其形成发展以及尺度与温带气旋锢囚锋明显不同。在中尺度系统层面, 边界层动力强迫与地形效应贡献显著。于波等 (2022) 研究发现, 太行山地形阻挡使低层冷空气堆积形成“冷垫”, 李津等 (2017) 指出, 冷高压南侧“倒槽”通过加强水汽辐合和锋面逆温结构, 促进中尺度云团发展。冯丽莎等 (2020) 进行湿位涡诊断研究也发现, 锋生正反馈对暴雪有增幅机制。水汽输送特征上, 夏茹娣等 (2013) 研究认为, 偏东风回流对降雪区域的水汽辐合起到了主要作用, 而田秀霞等 (2016) 发现东南与西南两股水汽输送有叠加效应, 且中高层水汽通量散度大值区与暴雪落区高度吻合。云微物理特征方面, 钤伟妙等 (2022) 基于雨滴谱仪反演发现降雪强度与粒子数浓度呈线性正相关, 并建立了 *Z*-*R* (反射率-降水率) 关系式, 三维云层结构显示 1.3~5.5 km 为成云主体, 其中 3 km 以下冰雪混合层与上层冰雪层的湿度差异显著影响降雪效率。

虽然前人对华北回流降雪的研究取得了丰富成果, 但研究仍然不够深入, 回流东风的“干”和“湿”特征存在不确定性。张迎新等 (2007) 对一次回流降雪过程的数值模拟指出, 偏东风为“干”冷性质, 主要起到冷垫作用; 而李青春等 (2011) 对一次回流暴雪过程的模拟指出, 低层东风水汽输送与上层水汽输送相结合增加了湿层厚度, 偏东风为“湿”冷性质。偏东风冷空气路径也存在差异, 于波等 (2022)研究表明, 有的个例东风回流几乎不经过洋面, 而有的个例东风回流会途经渤海湾洋面上较长距离, 这种路径的不确定性也影响着东风回流的干湿与降水相态 (刘正等, 2023)。因此, 回流降雪过程中东风回流干湿性质与输送路径尚不明确, 预报人员对回流天气系统的结构和特点认识不足, 从而导致预报产生偏差 (孙军等, 2018)。

在降雪的研究方法上, 湿位涡 (Moist Potential Vorticity, MPV) 可用来讨论倾斜涡度发展 (Slantwise Vorticity Development, SVD) 理论 (王建中和丁一汇, 1995; 吴国雄等, 1995), 其综合反映了大气动力、热力属性及水汽作用, 在强降雪事件研究中应用较广 (艾丽华等, 2008; 马新荣等, 2008; 冯丽莎等, 2020)。朱环娟等 (2010) 对 2007 年 3 月河北北部一次暴雪的湿位涡诊断表明, 暴雪发生在 MPV_1 正值区与 MPV_2 负值区中, 等 θ_{se} 线陡立密集引起的倾斜涡度发展是暴雪形成的重要原因。齐道日娜等 (2024) 对 2021 年 11 月华北、东北极端暴雪的分析进一步指出, 降雪落区位于 $MPV_1>0$ 与 $MPV_2<0$ 的配置区域, 条件性对称不稳定是主要动力机制。另外, 对于降雪的路径研究, HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 粒子追踪模型由美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的空气资源实验室 (ARL) 与澳大利亚气象局联合发布。此模型可以计算不同高度层气团轨迹扩散路径, 分析气象沉降和多类型大气污染物来源、扩散和输送, 模拟复杂的气象输入场和物理过程, 在强降雨 (雪) 的研究中被

广泛应用 (Li et al., 2016)。李双旭等(2024)利用 HYSPLIT 轨迹追踪模式, 对 2019 年 2 月北京地区 3 次回流降雪过程进行水汽输送分析, 发现偏东气流水汽含量有限, 需偏南水汽通道配合方可产生明显降雪, 且水汽输送至北京的时间与显著降雪时段基本对应, 可作为预报回流降雪的关键因子。于波等(2022)结合冬奥会延庆赛区地形特征, 利用 HYSPLIT 模式研究了边界层东风对降雪的作用机制, 指出途经渤海湾路径较长时有利于东风增湿, "干冷"偏东风垂直发展深厚时可翻越军都山并受海陀山阻挡形成强迫抬升, 造成延庆降雪东多西少的分布特征。上述方法可揭示强降雪的发生机制和演变情况, 是研究强降雪的重要手段。

2022 年 2 月 12—13 日北京地区出现回流强降雪天气过程, 具有降雪量大、积雪深的特点 (王璠等, 2022), 对北京冬奥会赛事及训练造成了不利影响。由于本次强降雪过程有地面边界层东风回流的参与, 加之其与北京北部复杂地形的相互作用, 进一步增加了对强降雪发生时段、落区及量级精细化预报的难度。为了深入分析本次东风回流强降雪过程, 本文利用 MICAPS 地面站点多要素观测、探空以及 ERA5 再分析资料, 在分析本次降雪过程的大尺度天气系统及配置的基础上, 采用天气学诊断与粒子轨迹追踪模型, 对该过程粒子轨迹、物理量场及湿位涡进行分析, 重点分析了东风回流冷空气路径、干湿特征、垂直结构及其演变特征, 并识别出具有预报指示意义的关键指标, 以期丰富北京地区回流强降雪产生机理及预报着眼点, 为提高此类强降雪的预警和预报准确率提供参考依据。

1 资料与方法

1.1 资料介绍

本文所用的气象站点观测资料来自中国气象局地面站点观测, 时间分辨率为 1 h, 包括国家气象观测站 (以下简称国家站) 与区域气象观测站 (以下简称区域站), 北京市观测站 300 余个, 时间段为 2022 年 2 月 12 日 17:00 (世界时, 下同) 至 13 日 18:00, 用于分析降雪的演变特征。积雪深度观测来自中国气象局国家气象信息中心, 北京市共 20 站, 该数据每日观测一次, 本文使用 2 月 13 日的观测结果。风廓线雷达观测资料来自北京延庆站, 站点所在的位置为 (115.97ºE, 40.45ºN), 站点海拔高度 487.9 m。延庆站布设的雷达型号为 CFL-08, 观测要素为水平风向、风速以及垂直速度, 时间分辨率 30 min, 时间段为 2 月 12 日 12:30—13 日 16:30, 用于分析降雪过程风场垂直结构的演变。另外, 还使用了欧洲中期天气预报中心发布的 ERA5 数据, 空间分辨率为 0.25°×0.25°, 垂直层次 37 层, 时间分辨率 1 h, 产品覆盖了基本气象要素和多种诊断量, 时间段为 2 月 12 日 15:00—13 日 17:00, 用于天气形势分析与诊断量的计算。文中所用的地形高度资料来自美国国家环境信息中心, 空间分辨率为 0.1°×0.1°。

1.2 研究方法

本文主要使用了湿位涡诊断分析与拉格朗日粒子追踪两种方法, 湿位涡诊断分析主要用于探究偏南暖湿气流在偏东风回流之上倾斜上升引发降雪增强的不稳定机制, 拉格朗日粒子追踪方法主要用于分析强降雪区上空不同高度上气块来源及地形对气流的影响。

1.2.1 湿位涡计算方法

在气压坐标系下, 假如垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多, 湿位涡 (MPV, 记为 M_{PV}) 由涡度矢垂直分量 MPV1 (记为 M_{PV1}) 和涡度矢水平分量 MPV2 (记为 M_{PV2}) 组成, 湿位涡计算公式如下

$$M_{\mathrm{PV1}} = -g(\zeta_p + f)\frac{\partial \theta_{\mathrm{e}}}{\partial p} \tag{1}$$

$$M_{\mathrm{PV2}} = -g\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial \theta_{\mathrm{e}}}{\partial y} + g\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial \theta_{\mathrm{e}}}{\partial x} \tag{2}$$

$$M_{\mathrm{PV}} = M_{\mathrm{PV1}} + M_{\mathrm{PV2}} \tag{3}$$

MPV1 是湿正压项, 主要表征大尺度水平方向的惯性稳定性和对流稳定性; MPV2 是湿斜压项, 主要包含湿斜压性和水平风垂直切变的贡献。当 $\mathrm{MPV}_1>0$ 时, 大气处于对流或惯性稳定状态, 反之不稳定; 当 $\mathrm{MPV}_1>0$ 且 $\mathrm{MPV}_2<0$ 时, 表示大尺度上大气处于层结对流稳定状态, 但在中尺度上发展出斜升气流, 有利于气旋性涡度发展和强降雪的发生。

1.2.2 拉格朗日粒子追踪方法

本文 HYSPLIT 模型以 ERA5 逐小时气象场作为模型输入场, 计算北京地区不同高度上气块拉格朗日的后向轨迹, 计算步长为 600 s。另外, 本文还利用该模型模拟的结果分析了地形对气流的影响。

2 降雪实况与天气形势

2.1 降雪实况

2022 年 2 月 12—13 日, 北京地区受到强降雪侵袭, 伴随低能见度、大风等不利天气条件, 使冬奥会期间赛事和训练受到影响。

图 1a 是北京地区 2 月 12 日 18 时—13 日 18 时 24 h 累积降水量和 13 日观测积雪深度的空间分布, 从中可见, 降雪量普遍超过 4 mm, 中部和偏北部地

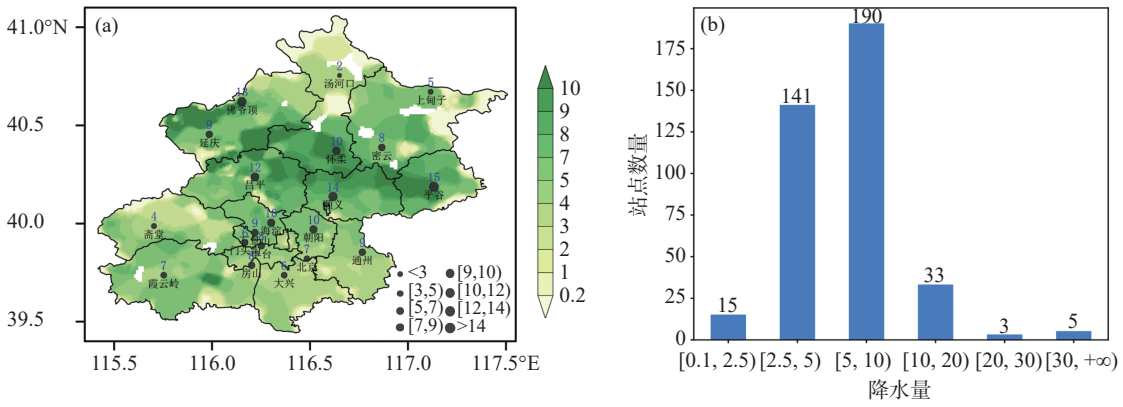


图 1 2022 年 2 月 12 日 18:00 至 13 日 18:00 北京地区 24 h 累积降水量 (填色, 单位: mm)、2 月 13 日观测的积雪深度 (圆点, 单位: cm) 分布 (a) 及不同降水量 (单位: mm) 站点数 (b)

Fig. 1 Distribution of (a) observed 24-h accumulated precipitation (shaded, unit: mm) from 18:00 UTC on 12 to 18:00 UTC on 13 and observed snow depth (dot, unit: cm), (b) number of stations with different precipitation ranges (unit: mm) in the Beijing area on 13 February 2022

区 8 mm 以上, 多站降雪量超过 10 mm (暴雪量级), 强降雪落区呈现西北—东南走向, 与地形分布较为一致。本次降水相态为纯雪, 降雪强度较大时段主要发生在当年 2 月 12 日 18:00—13 日 18:00。2 月 13 日观测的积雪深度与降水量有着较好的空间一致性, 大值区均位于北京中北部, 呈西北—东南分布。图 1b 是 24 h 不同累积降水量站点频数分布, 大部分站点达到中雪以上量级。大雪级别的站点最多, 为 190 站, 中雪量级次之, 为 141 站, 达到暴雪量级的有 33 站, 而大暴雪及以上量级的站点有 8 站。达到暴雪以上的站点主要分布于山区, 说明降雪的空间分布非均匀特征显著, 地形对降雪过程起重要作用。

2.2 天气形势

图 2 是此次天气过程发生时不同高度的大尺度环流形势场。强降雪发生前 (12 日 00:00), 500 hPa 高度场中高纬地区维持着“Ω”型“两低一高”环流形势。北京地区位于东侧高空冷涡底部平直西风气流中, 随后西部的低槽不断东移, 东部冷涡横槽缓慢转竖, 使得北京位于槽前正涡度平流区, 有利于上升运动 (图 2a)。至 13 日 18:00 北京已经位于槽后, 这时北京地区的降雪结束。200 hPa 的环流基本与 500 hPa 类似, 也是“两低一高”形势, 在 200 hPa 存在明显高空急流, 北京地区位于高空急流入口区左侧的上升区, 利于降雪天气发生 (图 2b)。850 hPa 上, 3 日 03:00—06:00, 低涡中心气压不断降低, 低涡外围东南侧的西南风不断增大至 12 m·s^{-1}, 低空急流建立, 该时段刚好对应北京强降雪时段 (图 2c)。图 2d 为地面形势场, 北京位于河套倒槽前侧, 自我国东北地区向华北地区的东风输送可影响北京地区, 0 ℃ 等值线位于天津湾附近, 北京地区地表气温低于 0 ℃, 表明此次降水粒子以冰相为主。

3 HYSPLIT 粒子追踪结果分析

首先利用 HYSPLIT 模型计算气流的后向粒子追踪, 分析降雪发生地不同高度上的气块来源及轨迹。然后, 利用 HYSPLIT 模型分别计算山区南侧一处前向和后向粒子轨迹。最后, 采用模型输出结果分析地形对气流的影响。

3.1 气块运动轨迹特征

为了分析降雪发生地不同高度上的气块来源, 使用 HYSPLIT 模型计算粒子的后向轨迹。由于 2 月 13 日 03:00 起北京地区降水强度增长幅度明显加大, 因此选取该时刻作为追踪起始时间, 对北京站上空地面至 4.5 km 不同高度处进行 12 h 后向轨迹追踪, 追踪结果如图 3 所示, 可见北京地区 1.5 km 以下的气块主要来自北京东北方向的辽宁西部以及河北东部地区, 高度也主要集中在 1.5 km 以下, Lee 等 (2011) 针对朝鲜半岛回流降雪的研究发现, 近地面气块经过洋面时, 气块会被加热和增湿, 而本次过程气块路径位于渤海湾西北部的陆地上空, 对应冷平流输送 (见图 7a)。而 1.5 km 以上随着高度的增加, 气块的源地呈顺时针方向偏转, 总体而言, 2.5 km 以上空气主要来自北京的西南方向, 对应了对流层下层的西南风暖平流输送 (见图 7a)。另外, 分析北京上空 2.5 km 之上的气块轨迹可知, 随着气块向北移动, 气块的高度不断增加 (图 3b), 体现了暖湿气流在冷空气堆上的爬升过程。

3.2 地形对降雪增幅作用

为更清晰地显示地形对降雪的影响, 在山区的南侧选取一点 (116.45°E, 40.37°N), 利用 HYSPLIT 模型计算该点 2022 年 2 月 13 日 03:00 不同高度处 6 h 后向和 8 h 前向粒子轨迹, 以便直观地展示地形对气

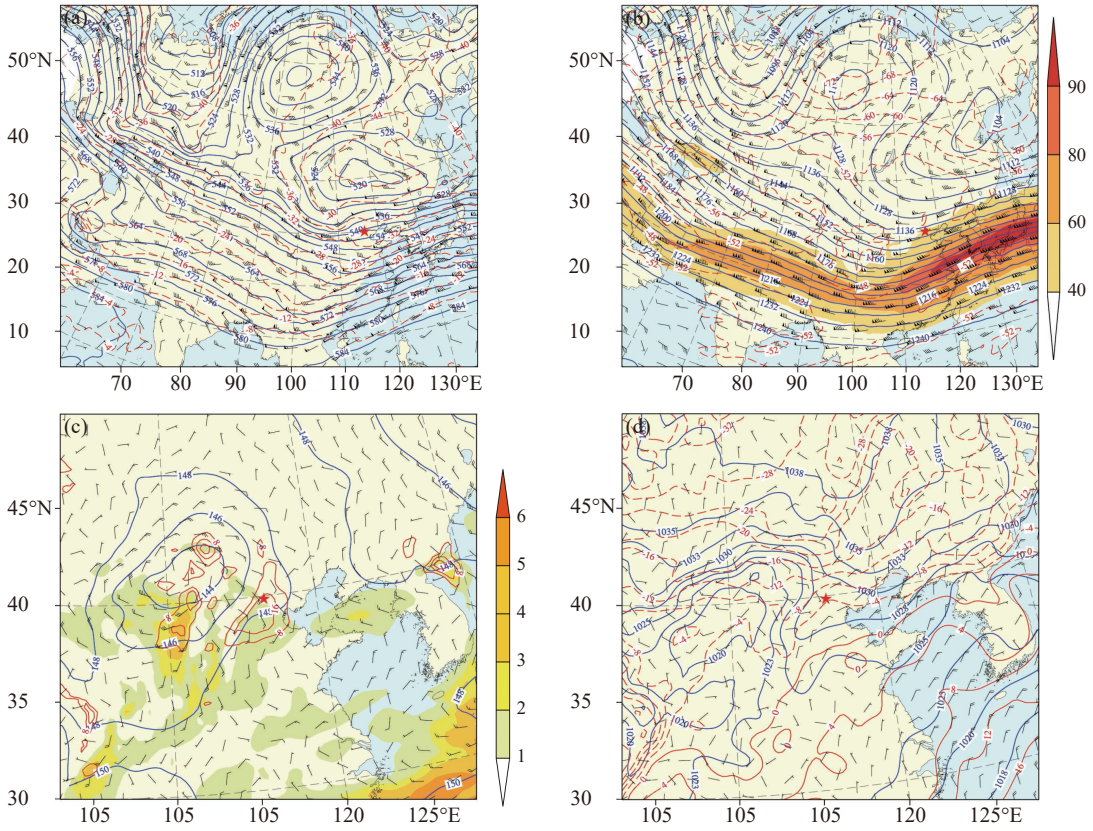


图 2 2022 年 2 月 13 日 00:00 500 hPa (a)、200 hPa (b) 位势高度 (蓝色等值线, 单位: dagpm)、温度 (红色等值线, 单位: ℃)、风 (风羽, 单位: m·s^{-1}, 色斑为≥30 m·s^{-1} 的高空急流) 分布; 850 hPa 位势高度 (蓝色等值线, 单位: dagpm)、风 (风羽, 单位: m·s^{-1})、温度平流 (红色等值线, 单位: 10^{-5} K·s^{-1}) 以及水汽通量 (填色, 单位: g·s·kg^{-1}) 分布 (c); 海平面气压 (蓝色等值线, 单位: hPa)、地面温度 (红色等值线, 单位: ℃)、风 (风羽, 单位: m·s^{-1}) 分布 (d) (红色星号为北京站位置, 下同)

Fig. 2 Distribution of (a) 500 hPa and (b) 200 hPa geopotential height (blue contours, unit: dagpm), temperature (red contours, unit: °C), and wind (barbs, unit: m·s^{-1}; shaded denotes upper-level jet streams ⩾ 30 m·s^{-1}), (c) 850 hPa geopotential height (blue contours, unit: dagpm), wind (barbs, unit: m·s^{-1}), temperature advection (red contours, unit: 10^{-5} K·s^{-1}), and water vapor flux (shaded, unit: g·s·kg^{-1}), (d) sea level pressure (blue contours, unit: hPa), surface temperature (red contours, unit: °C), and wind (barbs, unit: m·s^{-1}) at 00:00 UTC on 13 February 2022. (The red asterisk indicates the location of the Beijing Station, the same hereinafter)

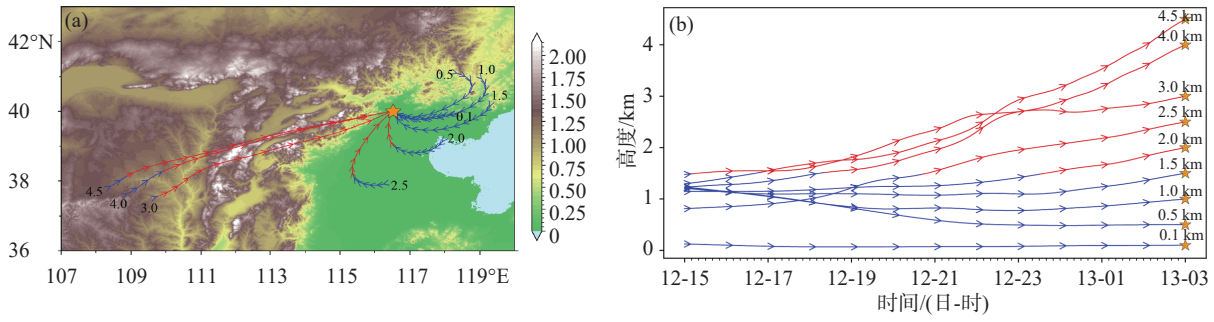


图 3 2022 年 2 月 13 日 03:00 北京站上空地面至 4.5 km 不同高度处 12 h 后向轨迹 (流线) 的水平及地形 (单位: km) 分布 (a) 和粒子轨迹高度随时间的演变 (b) (五角星示轨迹计算的起始点位置, 红 (蓝) 色线和箭头表示所在高度位于 1.5 km 以上 (下), 逐小时位置用箭头表示, a 图中的数字表示轨迹起点的高度, 单位: km)

Fig. 3 (a) Horizontal distribution of the particle trajectories (streamlines) and terrain height (shading, units: km) and (b) the heights evolution of 12-h backward parcels trajectories from the ground to 4.5 km over Beijing station at 03:00 UTC on 13 February 2022 (The asterisks indicate the starting positions of the trajectories calculation and the red (blue) lines and arrows indicate the height being above (below) 1.5 km. Hourly positions are indicated by the arrows, and the starting height (unit: km) of each trajectory is indicated by the numbers)

流运动的影响。

图 4 给出了气流轨迹运动的水平分布特征, 可见北京地区低层气流来自偏东风回流, 东风回流进入北京后, 在北京南部受地面倒槽影响, 使其南风分量加

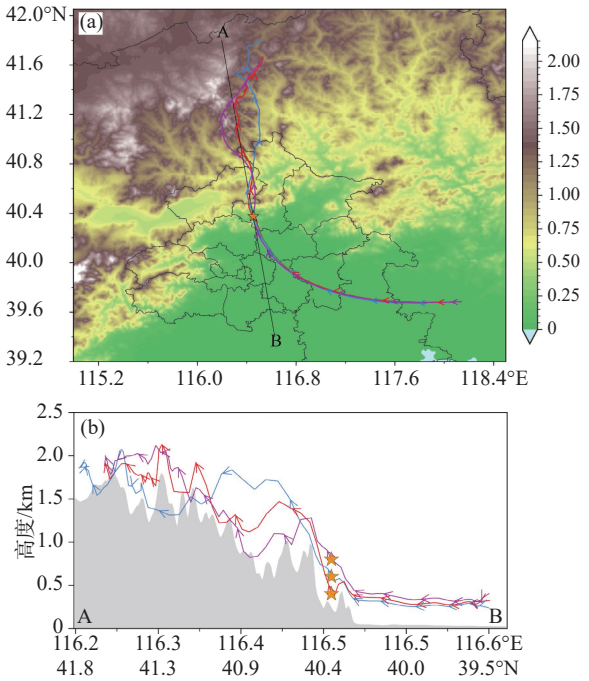


图 4 2022 年 2 月 13 日 03:00 山区南侧 (116.45°E, 40.37°N) 不同高度粒子 6 h 后向和 8 h 前向轨迹 (流线) 水平和地形 (色斑, 单位: km) 分布及粒子轨迹在图 a 中沿线段 AB 的垂直剖面 (b) (五角星表示轨迹计算的起始点位置, 由低至高分别位于 0.4、0.6、0.8 km 海拔高度, 对应的三条轨迹分别用红色、紫色、蓝色线条表示)

Fig. 4 (a) Horizontal distribution of 6-h forward and 8-h backward particle trajectories (streamlines) at different heights over (116.45°E, 40.37°N) on the southern side of the mountains at 03:00 UTC on 13 February 2022 and terrain height (shaded, unit: km) and (b) the vertical cross-section of the line AB in Fig. a (pentagram markers denote the starting points of forward and backward trajectory calculations, located at altitudes of 0.4, 0.6, and 0.8 km from low to high, respectively, with the three corresponding trajectories represented by red, purple, and blue lines)

大, 随后继续向北部山区移动, 最后越过山体。图 4b 给出了气流轨迹在图 4a 中 AB 线段垂直剖面上的投影情况, 由图中清晰可见, 气流先经由北京南部平原地区, 不断北进的过程中, 遇到地形的阻挡后沿着山体不断爬升, 近地层的气块最低高度位于 0.3 km 左右, 受地形影响抬升后, 最高可达 1.8 km, 可见地形对气流的抬升十分明显。

图 5 进一步给出图 4 中 HYSPLIT 模型气流运动轨迹上气块的相当位温和垂直速度随时间的变化, 由图可见, 气块在沿山体向上爬升的过程中相当位温显著增加, 13 日 03:00—09:00 三条轨迹大约由 273.5 K 增大至 279 K, 而由气块轨迹的垂直速度变化可知, 气块在受到山地阻挡之前, 在平原地区一直维持弱的下沉运动且较为稳定, 而当遇到山体后, 气块的垂直速度快速增大, 其中一条轨迹的垂直速度

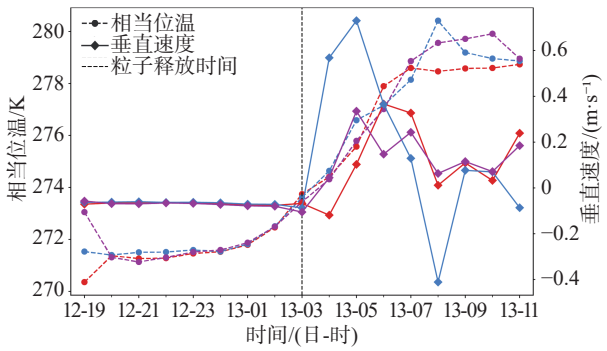


图 5 图 4 中粒子轨迹上的相当位温 (单位: K) 与垂直速度 (单位: $m \cdot s^{-1}$) 的时间演变 (红色、紫色、蓝色线分别对应处于 0.4、0.6、0.8 km 海拔高度起始点轨迹上物理量的演变)

Fig. 5 Time evolution of equivalent potential temperature (unit: K) and vertical velocity (unit: $m \cdot s^{-1}$) on the particle trajectory in Fig. 4 (The red, purple, and blue lines correspond to the evolution of physical quantities along the trajectories originating from starting points at altitudes of 0.4, 0.6, and 0.8 km, respectively)

最高可达约 0.7 $m \cdot s^{-1}$。气块爬坡之后, 继续受到复杂地形的影响, 垂直速度呈波动变化。以上分析表明, 山区地形的存在, 加之偏南风的影响, 山体通过阻挡和强迫抬升等作用, 显著改变气块的动力和热力性质, 相当位温和垂直速度均增大。气块被迫沿山坡快速上升, 绝热冷却加剧, 使得气块更容易达到饱和甚至过饱和状态, 促进水汽凝华成冰晶或雪花, 从而对后续的降水过程产生促进作用。

4 强降雪过程物理量分析

由前文分析可知, 本次强降雪在 850 hPa 以下近地层受偏东风回流影响, 而在 850 hPa 至 600 hPa 较高层次则受到低涡东南侧的偏南气流影响。为了综合分析上述因素的影响, 本节首先分析风场、湿度场等物理量场的垂直结构特征, 然后分析动力、热力和水汽因子的时间演变情况, 最后利用湿位涡诊断方法分析本次降雪的不稳定机制。

4.1 东风回流高度及干湿特征

为探究东风回流在垂直方向上的影响高度以及其干湿特征, 图 6 给出不同时刻东西方向上沿 40ºN 风场、相对湿度及相当位温的纬向垂直剖面。12 日 12:00 之前, 地面东风回流垂直方向上较为浅薄, 影响高度在 900 hPa 以下 (图略)。12 日 12:00 之后, 偏东风在垂直方向上迅速扩展到 850 hPa 高度 (图 6a)。以往针对华北回流降雪的研究, 对回流的“干湿”特性十分关注, 一些学者认为东风回流表现为“干”的特性 (张迎新等, 2007; 吴庆梅等, 2014; 田秀霞等, 2016), 但也有研究者在个例研究中发现东风回流在华北表

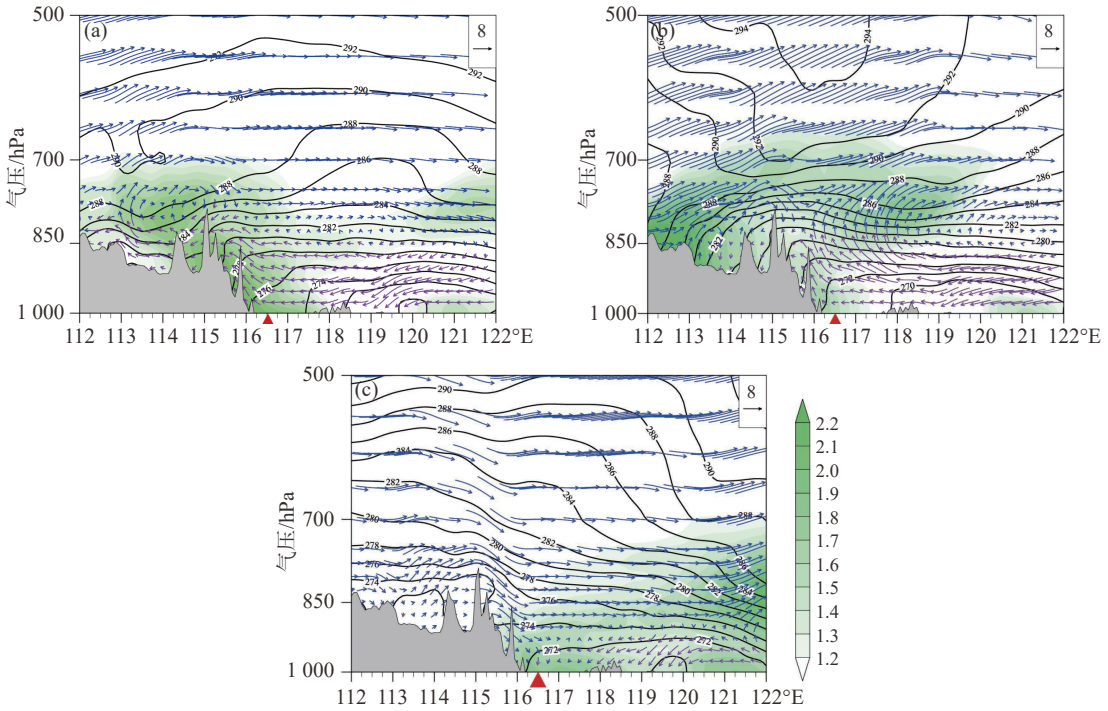


图 6 2022 年 2 月 12 日 18:00 (a) 以及 13 日 03:00 (b)、13 日 15:00 (c) 沿 40ºN 垂直风和纬向风的合成风 (矢量箭头, u 风分量与 $-10\times\omega$)、相当位温 (黑色等值线, 单位: K) 与比湿 (填色, 单位: g·kg^{-1}) 纬向剖面图 (紫色和蓝色矢量箭头分别表示偏东风和偏西风, 红色三角表示北京经度所在位置, 灰色阴影表示地形)

Fig. 6 Vertical cross-sections along 40º N of vertical and zonal wind vector composition (vector, u-wind vs. -10 × ω), equivalent potential temperature (black contours, unit: K), and specific humidity (shaded, unit: g·kg^{-1}) at (a) 18:00 UTC on 12, (b) 03:00 UTC, and (c) 03:00 UTC on 13 February 2022 (The purple and blue vector arrows indicate easterly and westerly winds, respectively, the red triangle indicates the location of Beijing's central longitude, and the gray shading indicates topography)

现为“湿”特性 (李青春等, 2011)。针对本次强降雪事件, 由图 6 中空气相对湿度随时间的演变可知, 降雪初期, 116º—120ºE 之间的近地层既是相对湿度低值区, 此时低层东风回流较“干” (图 6a), 而随着降雪系统的发展, 近地面东风层相对湿度不断增加, 到降雪尾声时, 北京地区相对湿度已由原本 75% 以下增加到 85% 以上, 东风回流变“湿” (图 6b、c)。同时, 相当位温在 500—700 hPa 存在漏斗状结构, 说明暖湿空气锢囚于东西两侧冷空气之上。另外, 低涡槽前的上升区与地形阻挡东风回流形成的上升气流区重合叠加产生更强上升运动, 北京地区上空 900—500 hPa 之间存在较强的上升运动, 引起降雪的进一步加强 (图 6b)。13 日 15:00 之后, 随着低涡移出, 中高层转变为一致偏西风, 850—700 hPa 之间已无上升运动, 偏西气流沿北京西部山区下坡向东侵入北京, 北京地区的地面偏东风向东回撤到 118ºE 左右, 且垂直伸展高度降低到 900 hPa 以下, 此时北京地区的降雪也基本结束 (图 6c)。

4.2 动力、热力、水汽因子时间演变特征

进一步给出温度、温度平流、水汽通量、水汽通量散度、相当位温、垂直速度等物理量的时间-高度剖面如图 7a、b 所示。12 日 16:00 左右开始, 850—600 hPa 最开始出现西南风的加强, 由低层向高层伸展。在 800—600 hPa 之间西南风风速明显增大, 达到低空急流的标准, 700 hPa 最大西南风更达到 20 m·s^{-1}, 西南风低空急流最强的时段降雪也最强。在近地层 850 hPa 以下偏东风自降雪发生前一直存在, 维持到 13 日 11:00 开始减弱逐渐被西北气流取代, 然后偏西气流影响的层次不断靠近地面, 直到近地层偏东风完全消失, 北京地区降雪结束 (图 7a、b)。以往有关华北回流强降雪研究表明, 低空西南急流与近地层东风回流的配合是降雪发生的重要条件 (张迎新等, 2007; 李青春等, 2011; 钤伟妙等, 2022), 另外, 西南风也带来了明显的暖平流, 当西南风转变为西北风时, 相应高度上则转为冷平流并向地面延伸。暖平流的大值中心约位于 800 hPa 高度, 等温线上表现为 850—700 hPa 之间温度的垂直梯度明显小于其他高度, 而低层偏东风控制区域则为冷平流 (图 7a)。由水汽通量以及水汽通量散度的时间-高度演变情况可知, 二者同样与对流层下层的西南风有很好的对应关系, 其中, 水汽通量大值中心约位于 700 hPa 高度, 而水汽通量散度大值中心主要位于 900—700 hPa 之间,

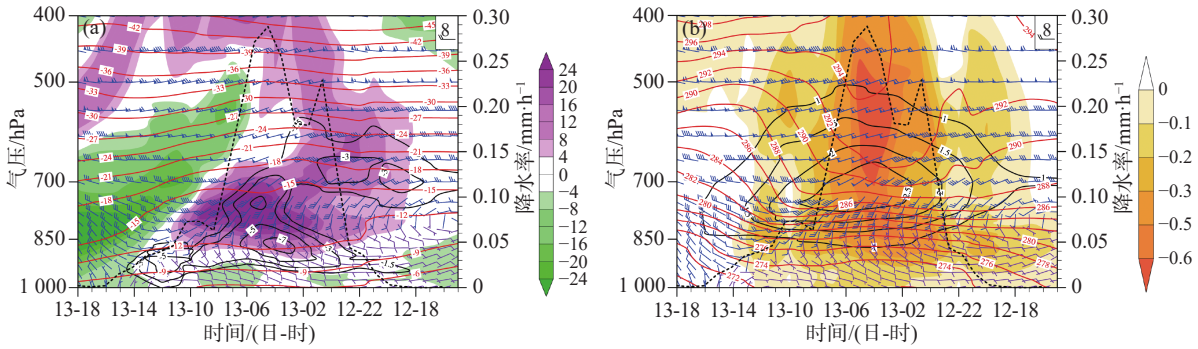


图 7 2022 年 2 月 12 日 15:00—13 日 18:00 北京地区 (115°—117.5°E, 39°—41°N) 区域平均温度平流 (阴影, 单位: 10^{-5} K·s^{-1})、温度 (红色等值线, 单位: ℃)、水汽通量散度 (黑色等值线, 单位: 10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) (a) 以及垂直速度 (阴影, 单位: Pa·s^{-1})、相当位温 (红色等值线, 单位: K)、水平水汽通量 (黑色等值线, 单位: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) (b) 时间-高度剖面 (黑虚线为区域平均的降水率, 风羽为水平风场, 蓝色和紫色风羽分别代表偏西风和偏东风)

Fig. 7 Time-height contours of the regional average (115°-117.5°E, 39°-41°N) of (a) temperature advection (shaded, units: 10^{-5} K·s^{-1}), temperature (red contour, unit: ℃), and divergence of water vapor flux (black contour, unit: 10^{-6} g·cm^{-2}·hPa^{-1}·s^{-1}) and (b) vertical velocity (shaded, units: Pa·s^{-1}), equivalent potential temperature (red contour, unit: K), and horizontal water vapor flux (black contour, unit: g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}) from 15:00 UTC 12 to 18:00 UTC 13 February 2022 (The black dashed line represents the regional average precipitation rate, and the wind barb represents the horizontal wind field at each pressure layer, where the blue and purple barbs represent westerly and easterly winds, respectively)

说明水汽到水凝物粒子的转化主要发生于此高度 (图 7a、b)。由垂直运动的演变情况可知, 降雪发生时, 上升运动由地面附近一直延伸到 400 hPa 左右, 上升运动在 13 日 03:00—06:00 最强, 强上升运动中心所在高度在 700 —500 hPa 之间, 可见降水强度与上升运动的演变存在较好的一致性, 这与风廓线雷达的观测结果一致 (图 8a)。由相当位温时间-高度剖面可知, 12 日 23:00 至 13 日 09:00, 700 hPa 之上存在明显的漏斗状暖心结构, 主要是因为东、西两路冷空气对暖湿空气的抬升锢囚引起的 (图 7b)。另外, 12 日 23:00 至 13 日 09:00, 相当位温的等值线在 900—800 hPa 之间非常密集, 垂直梯度很大, 说明存在较强的锋区 (图 7b)。这是因为上层的西南暖湿气流在地面东风干冷空气之上爬升, 加剧了两者物理量差异, 因相当位温是综合考虑了温湿特性的守恒量, 因此两层交界就表现为较大的相当位温垂直梯度。

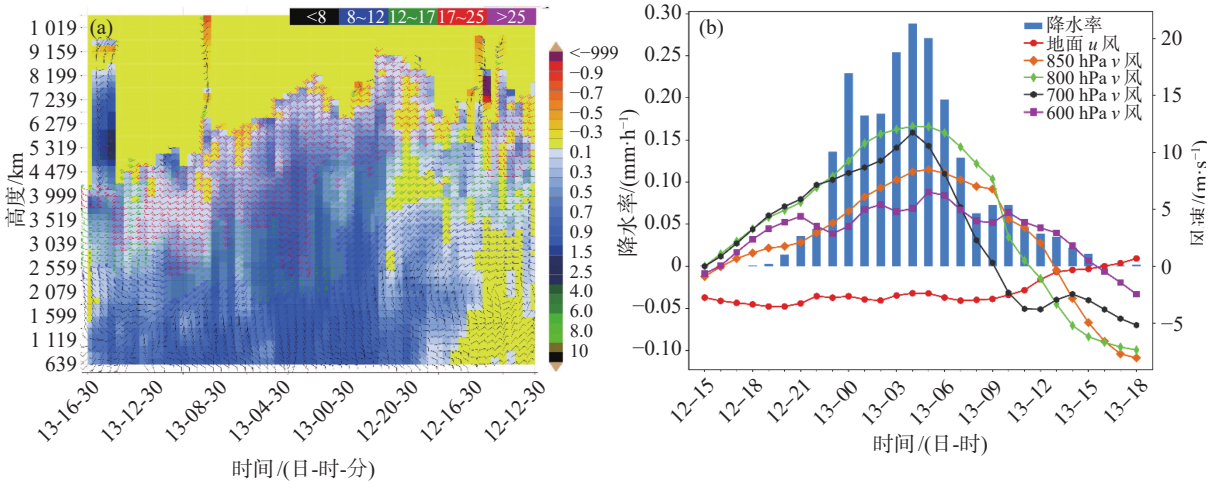


图 8 2022 年 2 月 12 日 12:30—13 日 16:30 北京延庆站风廓线观测的水平风场 (风羽) 和垂直速度 (填色, 单位: m·s^{-1}) 时间-高度演变 (a); 2022 年 2 月 12 日 15:00—13 日 18:00 北京地区地面 *u* 风分量 (单位: m·s^{-1})、850—600 hPa 各气压层 *v* 风分量 (单位: m·s^{-1}) 及区域平均观测降水率 (单位: mm·h^{-1}) 演变 (b) (图 a 右上角不同颜色矩形色块和数字对应不同的水平风速区间)

Fig. 8 (a) Time-height contours of horizontal wind field (barbs) and vertical velocity (shaded, unit: m·s^{-1}) observed by wind profile at Yanqing station in Beijing from 12:30 UTC 12 February to 16:30 UTC 13 February 2022, (b) tvolution of simulated surface *u*-wind component (unit: m·s^{-1}), *v*-wind component (unit: m·s^{-1}) at pressure levels from 850-600 hPa, and regional average precipitation rate (unit: mm·h^{-1}) in the Beijing area from 15:00 UTC 12 February to 18:00 UTC 13 February 2022. The colored rectangles and numbers in the upper-right corner of (a) indicate the horizontal wind speed ranges corresponding to the wind barbs of each color

由前文的分析可知, 对流低层西南风与地面附近偏东风的配合对降雪的影响非常大, 进一步分析了地面 *u* 风分量、对流层低层各高度上的 *v* 风分量以及区域降水随时间的变化 (图 8b), 可见对流层中下层偏南风变化对降雪的发生和结束均有较好的指示和预报意义。因此, 在对北京和华北冬季回流暴雪的预报、预警及监测过程中, 可重点关注对流层中下层偏南风和地面偏东风的变化以及两者的配合情况。如地面有偏东风存在, 高层 850 hPa 至 600 hPa 偏南风不断增强, 预示降雪加强; 反之, 当高层 850 hPa 至 600 hPa 偏南风不断减弱, 地面偏东风也减弱, 预示降雪减弱。

4.3 湿位涡特征分析

分析北京探空站的层结曲线 (图略) 可知, 此次强降雪发生前对流有效 位能 CAPE 为 0, 没有明显的对流不稳定能量存在。为了更深入探究本次过程的降雪增强和发展的不稳定机制, 采用 ERA5 再分析数据计算 MPV, 并分析其垂直分量和水平分量的变化, 两者结合, 有利于分析两者的空间配置情况, 也有助于分析降水率与两者的演变关系。

图 9 给出的是不同时刻 MPV 分量、相当位温以及垂直风场沿 116.5ºE 的经向垂直剖面, 由图可知, 在强降雪发生时, 36º—39ºN 所处位置由地面到高空为相当位温等值线密集区, 并且随高度升高向北倾斜 (图 9a—c)。随着时间的推移, 南侧的相当位温大值区不断向北推进使等值线更密集更竖直, 这对应着降雪的加强 (图 9b、c)。由垂直风场分布可知, 偏南风在偏东风之上斜升显著, 两股气流的交界处即相当位温等值线密集区和 MPV 分量高绝对值的叠加区。从沿 116.5ºE 经向垂直剖面看, 北京地区上空出现了 $MPV_1>0$ 而 $MPV_2<0$, 且高绝对值的配置, 同时存在自低向高、由南向北的移动特征, 体现了暖湿空气的爬升作用 (图 9b、c)。可见, MPV_2 的中心值不断增大, MPV_2 绝对值的显著增长是由于等熵面的倾斜和水平风的垂直切变造成的, 根据倾斜涡度发展理论, 由于等熵面的倾斜以及水平风垂直切变的加强, 能够导致垂直涡度的显著发展。

图 10 是最大 MPV_1 和最小 MPV_2 以及降水的演变情况, 由图可见, 最大 MPV_1 和最小 MPV_2 与降水的变化有较好的对应关系, 降雪增强时, MPV_1 和

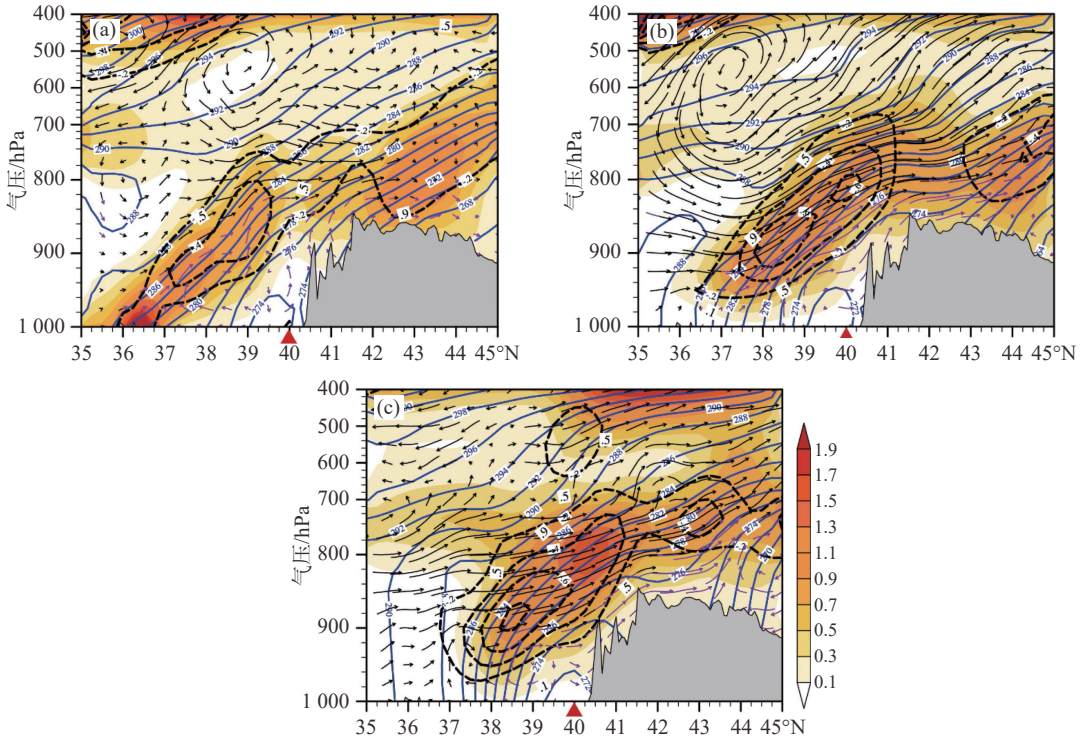


图 9 2022 年 2 月 12 日 21:00 (a) 以及 13 日 03:00 (b) 和 09:00 (c) 沿 116.5ºE MPV_1 (色斑, 单位: PVU)、MPV_2 (黑色等值线, 单位: PVU)、相当位温 (蓝色等值线, 单位: K) 与垂直风场 (矢量箭头, *u* 风分量与-10 × *ω*) 经向垂直剖面 (紫色和黑色矢量箭头分别表示偏东风和偏西风, 红色三角表示北京中心纬度所在位置, 灰色阴影表示地形)

Fig. 9 Vertical cross-sections along 116.5ºE of MPV_1 (shaded, unit: PVU), MPV_2 (black contours, unit: PVU), equivalent potential temperature (blue contours, unit: K), and vertical wind field (vector, *u*-wind vs. -10 × *ω*), at (a) 21:00 UTC on 12 February 2022, (b) 03:00 UTC and (c) 09:00 UTC on 13 February 2022 (The purple and black vector arrows indicate easterly and westerly winds, respectively. The red triangle indicates the location of Beijing. The gray shaded indicates topography)

MPV_2 变化更为显著，能体现降雪先增强后减弱的变化趋势。最大 MPV_1 大于 0，表明大气处于对流稳定状态，但当西南暖湿气温的输送加强时，一方面会使风的垂直切变加强，最小 MPV_2 的绝对值增大，另一方面由于两股气流的热力和湿度属性差异增大，使得相当位温的垂直梯度增大，因此最大 MPV_1 也快速增大，而 MPV_1 和 MPV_2 显著变化的时段即对应着强降雪发生的时段，因此在华北回流降雪的实际预报预警中，密切关注 MPV 分量的变化情况，有助于判断降雪增强或减弱阶段，进而提前进行预警。

5 回流暴雪天气过程系统配置及概念模型

通过前文的分析，对本次北京回流降雪的天气系统配置及其相互作用有了综合的认识，图 11 给出本次北京回流降雪的天气系统配置及物理概念模型。

本次过程发生在 500 hPa 和 200 hPa 高空冷涡背景下，同时高低空急流、850 hPa 低涡以及地面倒槽和偏东风回流共同作用，造成了强降雪。由图 11b 大气层结曲线可见，降雪前期，低层的偏东风回流主要起着“冷垫”作用，空气的温度露点差较上层 800 hPa 更大，湿度较小；降雪发展时，位于 800—700 hPa 高度附近的暖湿空气，为降雪提供了主要的水汽来源，地面附近为东南风，至 700 hPa 转换为西南风，且风速明显增大，偏南风增强会使东风层之上的水汽输送和暖平流加强，从而促进锋生，上升运动和降雪强度也进一步得到加强。本次强降雪过程增强和发展的主要机制可用 SVD 理论 (王建中和丁一汇, 1995; 吴国雄, 1995) 加以解释，即暖湿空气在东风回流形成的冷垫之上斜升，引起气旋性涡度的不断发展，从而为降雪的增强提供了有利的动力条件。

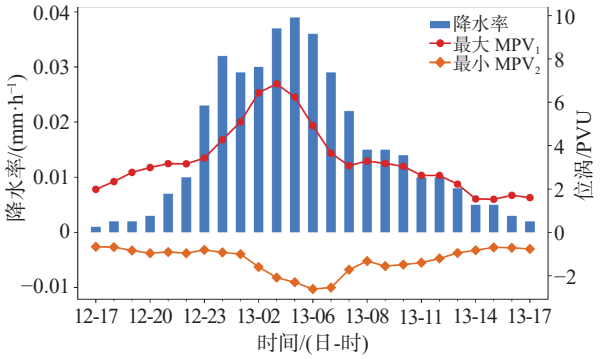


图 10 2022 年 2 月 12 日 17:00—13 日 17:00 北京地区 850 hPa 最大 MPV_1 (单位: PVU)、最小 MPV_2 (单位: PVU) 以及区域平均降水率 (单位: $mm·h^{-1}$) 的时间演变

Fig. 10 Time series of maximum MPV_1 (unit: PVU) and minimum MPV_2 (unit: PVU) at 850 hPa and regional mean precipitation rate (unit: $mm·h^{-1}$) in the Beijing area from from 17:00 UTC on 12 February to 17:00 UTC on 13 February 2022

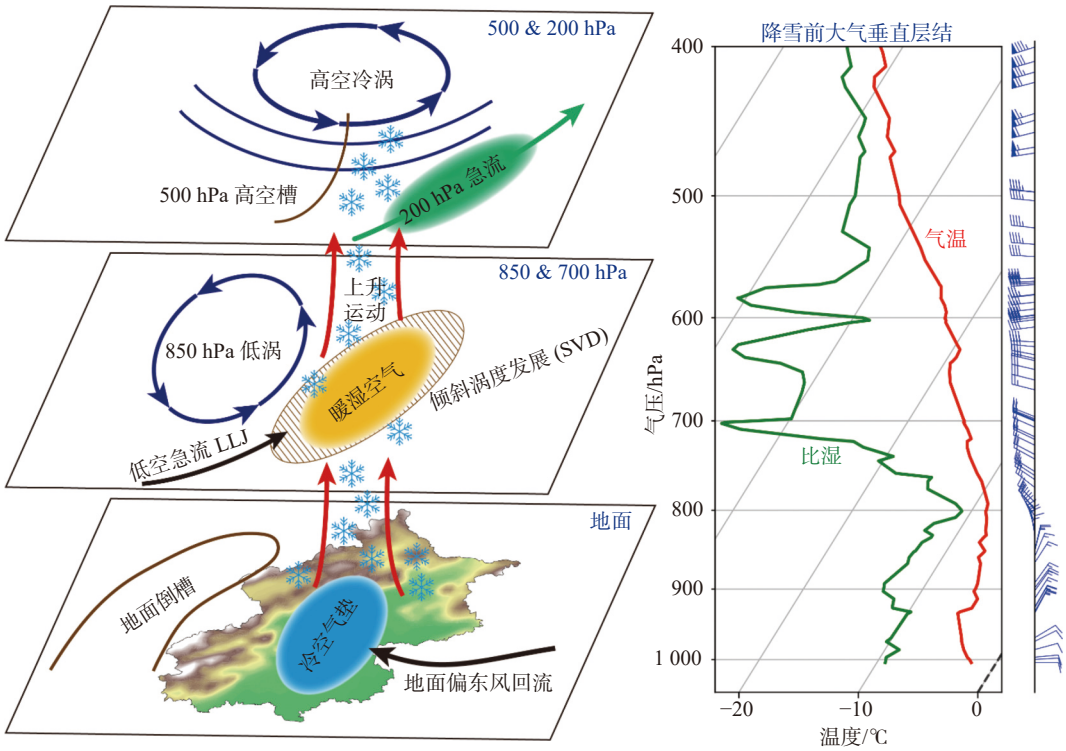


图 11 北京地区回流强降雪的天气系统配置概念模型 (a) 及降雪前大气垂直层结图 (b)

Fig. 11 (a) Conceptual model depicing the synoptic system configuration and (b) vertical stratification before snowfall for return-flow heavy snowfall in Beijing

6 结论与讨论

2022 年 2 月 12—13 日北京地区出现强降雪天气, 大部站点 24 h 降水达到中到大雪量级, 部分站点达到暴雪以上量级。本文利用地面观测、风廓线、ERA5 再分析等多源资料, 采用天气学诊断分析方法和粒子追踪 HYSPLIT 模型, 剖析该过程环流配置、粒子输送特征及动力和热力因子分布, 提炼回流背景下强降雪具有预报指示意义的关键指标, 并给出本次强降雪主要影响系统的三维结构配置。得出以下主要结论:

(1) 本次强降雪发生期间, 500 hPa 维持“两低一高”的环流形势, 强降雪在高空冷涡、高低空急流、850 hPa 低涡及偏东风回流等系统的影响下产生。

(2) 粒子追踪结果显示, 北京地区低层偏东风气流主要来自辽宁西部与河北东部地区, 高度主要集中在 1.5 km 以下, 2.5 km 以上空气主要来自我国西南地区。北京北部地形通过阻挡和强迫抬升等作用, 显著改变偏南气流的动力和热力性质, 从而对后续的降水过程产生促进作用。

(3) 在降雪初期, 东风回流自身湿度较小, 主要起着“冷垫”作用。物理量场分析显示, 地面降雪主要的水汽源为 700 hPa 高度附近西南暖湿气流, 水汽汇主要位于 900—700 hPa 之间。偏南风增强会使东风回流之上的水汽输送和暖平流加强, 从而促进锋生, 使上升运动和降雪强度得到加强。

(4) 本次过程中强降雪增强和发展主要机制为暖湿空气斜升引起气旋性涡度的发展, 强降雪发生在 $MPV_1>0$ 和 $MPV_2<0$ 的区域, 同时这种配置存在自低向高、由南向北的移动特征, 体现了暖湿空气的倾斜爬升作用。

(5) 本文还发现了对降雪起止和降雪强弱变化具有指示或预报意义的物理量: 对流层中下层偏南风变化及其与地面东风的配合情况对降雪的发生和结束有一定的指示意义, 地面偏东风维持, 同时对流层中下层偏南风风速增加时, 降雪增强; MPV_1 和 MPV_2 变化也可以指示降雪强度的演变, 当 MPV_1 最大值与 MPV_2 最小值在某一时段内突然发生增大和减小的变化, 降雪强度增大。

本研究利用天气学分析及 HYSPLIT 粒子追踪模型, 对北京地区一次回流强降雪过程的环流配置、粒子轨迹、物理量场及湿位涡进行分析, 提炼了对强降雪具有预报指示意义的指标。下一步将结合高分辨率数值模拟, 进一步揭示降雪云系内部的云微物理特征。

参考文献 (References):

艾丽华,井喜,王淑云,等.2008.湿位涡诊断在青藏高原东北侧暴雪预报中的应用个例[J].气象科学,28(S1):92−96. Ai L H, Jing X, Wang X Y, et al. 2008. The application of wet potential vorticity diagnosing to forecast of blizzard in northeast of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Scientia Meteorologica Sinica,28(S1):92−96 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1009−0827.2008.z1.017

冯丽莎,宋攀,郑飞,等.2020. 2016 年初冬河南区域暴雪过程诊断分析[J].大气科学,44(1):13−26. Feng L S, Song P, Zheng F, et al. 2020. Diagnostic analysis of a severe regional snowstorm event in the early winter of 2016 in Henan Province, China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,44(1):13−26 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.1909.18170

谷秀杰,郭紫薇,杨慧,等.2024. 2024 年 2 月初河南一次罕见雨雪冰冻过程诊断分析[J].暴雨灾害,43(4):469−478. Gu X J, Guo Z W, Yang H, et al. 2024. Diagnostic analysis of a rare rainfall/snowfall and freezing process in Henan in early February 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):469−478 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−058

季崇萍,张迎新,乔林,等.2020.北京天气预报手册[M].北京:气象出版社. Ji C P, Zhang Y X, Qiao L, et al. 2020. Beijing Weather Forecast Manual [M]. Beijing:Meteorological Press (in Chinese)

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 J, Zhao C X, Sun J H. 2017. Analysis of a record heavy snowfall event in North China [J]. Climatic and Environmental Research,22(6):683−698 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2017.16121

李青春,程丛兰,高华,等.2011.北京一次冬季回流暴雪天气过程的数值分析[J].气象,37(11):1380−1388. Li Q C, Cheng C L, Gao H, et al. 2011. Numerical simulation and analysis on a heavy snow of return-flow events in Beijing [J]. Meteorological Monthly,37(11):1380−1388 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2011.11.008

李双旭, 任阳泽, 章露露, 等.2024. 2019 年 2 月北京地区 3 次回流降雪过程的水汽输送特征分析[J].北京大学学报 (自然科学版),60(5):807−814. Li S X, Ren Y Z, Zhang L L, et al. 2024. Characterization of water vapor transport during three return flow snowfall cases in Beijing area in February 2019 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis,60(5):807−814 (in Chinese). doi:10.13209/j.0479−8023.2024.061

刘正,文军,王宗敏.2023.华北一次冷空气回流路径对降水相态的影响分析[J].沙漠与绿洲气象,17(5):47−55. Liu Z, Wen J, Wang Z M. 2023. Analysis on path of cold air in a returning flow weather in North China and its impact on precipitation type [J]. Desert and Oasis Meteorology,17(5):47−55 (in Chinese). doi:10.12057/j.issn.1002−0799.2023.05.006

马新荣,任余龙,丁治英.2008.青藏高原东北侧一次暴雪过程的湿位涡分析[J].干旱气象,26(1):57−63. Ma X R, Reng Y L, Ding Z Y. 2008. Analysis of moist potential vorticity for a snowstorm process in the northeast side of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Arid Meteorology,26(1):57−63 (in Chinese)

齐道日娜, 何立富, 张乐英.2024. "21·11"极端暴雪过程多系统结构演变

及热动力机制[J].气象,50(1):18−32. Qi D R N, He L F, Zhang L Y. 2024. Multi-system structure evolution and thermodynamic mechanism of the extreme snowstorm during 6-8 November 2021 [J]. Meteorological Monthly,50(1):18−32. doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2023.091401

钤伟妙,罗亚丽,曹越,等.2022.基于多种探测资料对华北中部一次回流暴雪过程的分析[J].气象学报,80(5):732−747. Qian W M, Luo Y L, Cao Y, et al. 2022. Analysis of a backflow heavy snowfall event in central North China using multi-source data [J]. Acta Meteorologica Sinica,80(5):732−747 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2022.052

孙军,马学款,代刊,等.2018.北京几次弱降水过程预报失误分析[J].气象,44(1):26−41. Sun J, Ma X K, Dai K, et al. 2018. Analysis of unsuccessful forecasts of several weak rainfall processes in Beijing [J]. Meteorological Monthly,44(1):26−41 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.10000526.2018.01.003

陶亦为,张芳华,于碧馨,等.2024. 2024 年 1 月引发雪崩的阿勒泰极端强降雪天气成因和预报分析[J].暴雨灾害,43(4):407−418. Tao Y W, Zhang F H, Yu B X, et al. 2024. Analysis of the causes and forecast of the extremely heavy snowfall in Altay Area that triggered avalanches in January 2024 [J]. Torrential Rain and Disasters,43(4):407−418 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−059

田秀霞,李娟,何丽华,等.2016. 2011 年初冬华北南部回流暴雪诊断分析[J].暴雨灾害,35(3):243−251. Tian X X, Li J, He L H, et al. 2016. Diagnostic analysis of the backflow snowstorm in early winter of 2011 in the southern part of North China [J]. Torrential Rain and Disasters,35(3):243−251 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004−9045.2016.03.007

王璠,张峰,符娇兰.2022. 2022 年 2 月大气环流和天气分析[J].气象,48(5):658−664. Wang F, Zhang F, Fu J L. 2022. Analysis of the February 2022 atmospheric circulation and weather [J]. Meteorological Monthly,48(5):658−664 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2022.041302

王建中,丁一汇.1995.一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究[J].气象学报,53(4):451−460. Wang J Z, Ding Y H. 1995. Research of moist symmetric instability in a strong snowfall in North China [J]. Acta Meteorologica Sinica,53(4):451−460 (in Chinese)

吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁.1995.湿位涡和倾斜涡度发展[J].气象学报,53(4):387−405. Wu G X, Cai Y P, Tang X J. 1995. Moist potential vorticity and slantwise vorticity development [J]. Acta Meteorologica Sinica,53(4):387−405 (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 Meteorology,33(2):539−547 (in Chinese). doi:10.7522/j.issn.1000−0534.2012.00194

夏茹娣,王东海,张立生.2013. 2009 年冬季华北初雪对流层低层风场及大气层结特征[J].气候与环境研究,18(1):87−100. Xia R D, Wang D H, Zhang L S. 2013. Wind field characteristics in the lower troposphere and atmospheric stratification of the first snowfall over North China in winter 2009 [J]. Climatic and Environmental Research,18(1):87−100 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9585.2012.11074

易笑园,李泽椿,朱磊磊,等.2010.一次 β-中尺度暴风雪的成因及动力热力结构[J].高原气象,29(1):175−186. Yi X Y, LI Z C, Zhu L L, et al. 2010. A case study on dynamic and thermal structures and mechanism of β-mesoscale snowstorm [J]. Plateau Meteorology,29(1):175−186 (in Chinese)

于波,李桑,郝翠,等.2022.冬奥会延庆赛区降雪与边界层东风的关系[J].大气科学,46(1):181−190. Yu B, Li S, Hao C, et al. 2022. Relationship between snowfall in the Yanqing zone of Winter Olympic Games and the easterly wind in the boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,46(1):181−190 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006−9895.2106.21055

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 Y X, Hou R Q, Zhang S B. 2007. Numerical experiments and diagnosis on a heavy snow of return-flow events [J]. Meteorological Monthly,33(9):25−32 (in Chinese)

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 Y X, Zhang S B, 2006. Structural feature of the backflow precipitation over North China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 29(1): 107-113 (in Chinese).

朱环娟, 王宏, 王万筠, 等.2010.河北北部一次区域性暴雪过程的湿位涡分析[J].沙漠与绿洲气象,4(3):26−29. Zhu H J, Wang H, Wang W J, et al. 2010. Analysis of moist potential vorticity for a snowstorm process in the north of Hebei Province [J]. Desert and Oasis Meteorology,4(3):26−29 (in Chinese)

Jiao B, Ran L, Shen X, et al. 2021. Trigger mechanism of a snow burst event in Northeast China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters,14(2):100017. doi:10.1016/j.aosl.2020.100017

Lee J G, Kim S D, Kim Y J. 2011. A trajectory study on the heavy snowfall phenomenon in Yeongdong Region of Korea [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences,47(1):45−62. doi:10.1007/s13143−011−1004−9

Li N, Jiao B, Ran L, et al. 2022. Influence of the upstream terrain on the formation of a cold frontal snowband in Northeast China [J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences,58:243−264. doi:10.1007/s13143−021−00243−4

Li X, Zhou W, Chen Y D. 2016. Detecting the origins of moisture over southeast China: seasonal variation and heavy rainfall [J]. Advances in Atmospheric Sciences,33(3):319−329. doi:10.1007/s00376−015−4197−5

(责任编辑 张 文)