-次华北极端降雪天气过程中尺度涡旋的

特征分析

翟亮¹ 邢楠¹ 郝翠¹ 王颖² 刘文军³ 仲跻芹⁴

1 北京市气象台,北京 100097

2 61741 部队,北京 100094

3 海淀区气象局,北京 100080

4 北京城市气象研究院,北京 100089

摘要:本文利用 ERA5 逐小时再分析数据和实况观测资料,对 2020 年 2 月 13-14 日华北极端雨雪天气过程中的中尺度涡旋进行特征分析,并采用相对涡 度的环流积分变化方程对中尺度涡旋的发展机制做诊断。结果表明:中尺度 涡旋活动区域(简称"涡旋区")的平均涡度垂直廓线呈"S"型分布,正负 涡度极值分别在 800 hPa 以及 400 hPa。涡旋区内 800hPa 正涡度强度与上升 运动大值区一致。900~700hPa 平均涡度强度与北京平原地区降水强度同相位 变化,涡旋强度的峰值较降水强度峰值早约两小时,二者相关系数为 0.76, 说明低层涡度强度对降雪预报具有指示性。从涡旋发展的动力机制来看,涡 旋区 800hPa 以下压涡度主要源自水平风辐合;800~700hPa 上升运动与风随 高度顺转对涡度的贡献更大。对比无中尺度涡旋的降雪过程(2019 年 2 月 14 日),涡旋区内垂直方向涡度无"S"型结构,且中低层涡度强度较弱,北京 降雪量明显偏小。"涡旋区"是否存在中尺度涡旋发展,对北京冬季降雪量 级和极端性的预报有指示意义。

关键词:降雪,低涡,中尺度涡旋,涡度收支

中文分类号: P458 文献标志码: A

Characteristics of the Mesoscale Vortex in an Extreme Snowfall

¹ 国家重点研发计划 (2021YFC3000901)资助

第一作者: 翟亮, 主要从事天气预报与分析研究工作.E-mail:liang6302@163.com

in North China

Zhai Liang¹ Xing Nan¹ Hao Cui¹ Wang Ying² Liu Wenjun³ Zhong Jiqin⁴
1 Beijing Weather Forecast Centre, Beijing 100097
2 Unit 61741, Beijing 100094
3 Haidian Meteorological Bureau, Beijing 100080
4 Institute of Urban Meteorology,CMA, Beijing 100089

Abstract: Using hourly ERA5 and the real observation data, the characteristics of mesoscale vortices during the extreme rainand snowevent in North China on February13-14,2020 were analyzed, and the development mechanism of the mesoscale vortices was diagnosed by using Circulation integral equation of relative vorticity. The results show that the average vorticity vertical profile of the mesoscale vortex activity area (referred to as the "vortex zone") follows an "S"shaped distribution, with extreme positive and negative vorticity values at 800 hPa and 400 hPa. The average vorticity intensity from 900hPa to 700hPa varies in phase with the precipitation intensity in the Beijing Plain area. The peak of vortex intensity was about two hours earlier than the peak of precipitation intensity, and the correlation coefficient was 0.76, suggesting that the intensity of lower-level vorticity has indicative significance for snowfall forecasting. From the perspective of the dynamical mechanisms driving vortex development, the positive vorticity below 800hPa in the vortex zone mainly originates from horizontal wind convergence; The upwelling motion from 800hPa to 700hPa and the clockwise rotation of wind with increasing altitude contributed more to vorticity. Compared to the snowfall process without mesoscale vortex (February 14, 2019), The structure of vorticity in the vertical direction has no "S" shape, and the intensity of vorticity in the middle and lower layers was weak, and the snowfall in Beijing was significantly lower. The existence of mesoscale vortex development in the "vortex zone" has indicative significance for predicting winter snowfall levels and extremes in Beijing.Key words:Snowfall, low vortex, Mesoscale vortex, Vorticity budget

引言

暴雪是我国冷季的最强气象灾害之一,我国暴雪的研究已有 60 年的历史, 其中有关华北区域暴雪天气的研究已取得诸多成果(张迎新等,2011;杨晓亮等, 2014;段字辉等,2013; 吴伟等,2011;叶晨等,2011),明确了华北暴雪的 形成机制和环流结构特征,为预报和灾害防范起到重要作用。北京因其超大城市 的特殊性和所处华北特殊的地理位置,其暴雪天气也备受关注(杜佳等,2019; 吴庆梅等,2014;李青春等,2011),针对北京地区暴雪天气预报偏差、预报着 眼点等已有较深入的分析(翟亮等,2018;郭锐等,2012;何娜等,2014)。已 有研究表明低空急流及中尺度系统与强降雪天气有紧密关系(Miyazawa,1968; Sanderson et al, 1990;陈雪珍等,2014;孟雪峰等,2012;Nicosia and Grumm, 1999;杨成芳等,2007)。周海光(2014)认为强降雪是由于低层有β中尺度气 旋性切变线和β中尺度涡旋话动而产生。邓远平等(2000)发现中尺度涡旋往往 与气流的辐合、涡度带、上升区和深厚显舌相对应,后者也是产生暴雪的强耦合 结构。

2020年2月13-14日,华北区域出现大范围的雨雪天气,北京14个国家级 气象观测站的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月份最大日降水量极值(其次为1959 年2月25日,29.3 mm)。极端降水的成因,除整层水汽通量散度存在异常辐合 (翟亮等,2022)外,北京及其以南地区存在一个完整的中尺度涡旋,这在北京 地区降雪天气过程中并不多见。与陈雪珍等(2014)的研究相比,本次过程的天 气背景完全不同,尤其所涉及的中尺度涡旋尺度更小、移速更慢。 Bosart and Sanders(1986)研究发现涡度对产生暴雪的中尺度切变线及中尺 度涡旋具有有效表征能力,可用于研究此类系统的发展演变。为了更好地分析这 次华北区域暴雪天气中的中尺度涡旋发展机理及作用,本文采用环流收支分析方 法(张元春等,2012),详细讨论中尺度涡旋的结构特征和发展机制,并对比相 同季节、相似环流背景下没有中尺度涡旋参与的降雪过程,寻找差异。以期加深 对北京冬季降水过程中中尺度涡旋的认识,进一步提高北京冬季极端强降水天气 的预报预警能力。

1 资料与方法

1.1 资料

本文使用欧洲中期数值预报中心第五代大气再分析全球数据 ERA5,时间分 辨率为 1h,水平分辨率为 0.25°× 0.25°, 垂直方向为 37 层(Hersbach et al, 2020),逐小时降水量来自于国家气象信息中心的地面自动站数据。

1.2 方法

本文利用涡度方程中各项的收支情况,分析中尺度涡旋的发展机理。即采用 p坐标系下大气运动学方程组的水平运动方程导出垂直方向上的环流收支方程 (舍去摩擦项),得到相对涡度的环流积分变化方程(张元春等,2012):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\bar{\eta}\tilde{\delta}A - \oint \dot{\eta}\,\vec{\vec{V}}\cdot\hat{n}dl - \oint \dot{\eta}\,\vec{\vec{v}}\cdot\hat{n}dl + \oint \omega\left(\vec{k}\times\frac{\partial\overline{v_h}}{\partial p}\right)\cdot\hat{n}dl \quad (1)$$

其中,C是相对涡度环流积分结果, η 为绝对涡度,A为积分面积, \hat{n} 为垂直 于涡旋区域边界法向向量, ω 为垂直速度, \vec{v}_{h} 为水平风矢量。方程右边第一项为 伸展项(Stretching term),表征气流辐合和辐散对涡度的贡献;第二项为平均通量 项(Mean term),表征边界上的平均气流对扰动绝对涡度的输送;第三项为扰动通 量项(Eddy term),代表涡旋边界上气流的扰动速度对扰动绝对涡度的输送;第四 项为类倾斜项(Tilting term),表征涡旋边界上垂直切变使涡度由水平方向向垂直 方向的倾斜。

本文根据中尺度涡旋活动区域,选取 36.0°N-41.0°N 和 113.0°E-118.0°E 为研究范围(简称"涡旋区"),通过公式(1)对该范围进行面积积分求得该区域内的涡度收支情况。

2 过程回顾

2020年2月13日18时至14日20时(北京时),华北大部出现明显降雪或雨转雪天气,其中北京全市平均降水量(雨、雪)为22.5mm(图1a)。过程期间, 北京的平原地区于14日08时转为纯雪,14日08—20时全市平均降雪量(图1b) 为7.5mm,城区平均为10.1mm,最大降雪为平谷门楼庄(16.4mm)。



图 1 2020 年 2 月 (a) 13 日 18 -14 日 20 时降水量, (b) 14 日 08-20 时降雪量(单位: mm)

Fig.1 (a) Precipitation from 18:00 BT 13 to 20:00 BT 14,

(b)snowfall from 08:00 BT to 20:00 BT in 14 February 2020(unit:mm),

本次天气过程是典型的华北低涡型暴雪。从天气形势来看,蒙古中部 500 hPa 有完整的天气尺度低涡环流,低涡前强盛暖湿气流下,对流层中低层形成了一个 中尺度涡旋(图2)。该中尺度涡旋在 14 日 05 时位于河北保定地区(图2a), 14 时移动至北京东南方向的廊坊地区(图2b),表现为自西向东缓慢移动。该 涡旋东部西南风和北部偏东风强盛,除了为降水提供动力抬升条件外,也显著影 响水汽的输送和辐合,进而促进了中尺度低涡系统进一步发展(徐姝等,2024)。 此外,低层 1000hPa 的流场反映出冷空气前沿在燕山和太行山影响下变为东、西 两股冷空气相向挤压,形成华北锢囚锋(叶晨等,2011)。由此可见,蒙古低涡、 中尺度涡旋、华北锢囚锋、低空急流等,是本次极端雨雪天气产生的主要原因。 有研究表明,中尺度涡旋对强降雪有非常大的影响(杨成芳等,2007),850 hPa 中尺度涡旋系统的强烈发展更是为暴雪,五气的产生提供了很强的动力条件 (Nicosia and Grumm, 1999),因此深入分析涡旋区的涡度变化特征,研究中 尺度涡旋发展机理尤为重要。



注:紫色虚线方框为涡旋区。

图 2 2020 年 2 月 14 日 (a) 05 时、(b) 14 时 500hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm), 700hPa 相对湿度(填色), 850hPa 风场(风羽)

Fig.2 Weather chart at (a)05:00 BT, (b) 14:00 BTon 14 February 2020

: 500hPa geopotential height (contour, unit: dagpm),700hPa relative humidit y (colored),850hPa wind field (wind

bard)

Fig.2 500hPa geopotential height (contour, unit: dagpm),700hPa relative humidit y (colored),850hPa wind field (wind bard) at (a)05:00 BT, (b) 14:00 BT 14 February 2020

3 中尺度涡旋涡度特征分析

文中选取该中尺度涡旋活动的区域为涡度分析重点,如图2所示,紫色方框

(36.0°~41.0°N; 113.0°~118.0°E)为"涡旋区"。

3.1 涡度垂直结构特征

该中尺度涡旋移入"涡旋区"影响京津冀地区的主要时段 13 日 20 时至 14 日 17 时,影响时长达 22 个小时(图略)。受涡旋活动影响, "涡旋区"涡 度随高度呈"S"型分布,且呈上负、 下正的分布特征,正、负涡度极值分别在 800 hPa 和 400 hPa (图 3a) 🕻 从时间演变来看, "涡旋区"各层涡度在13日14 时后快速增强,至14日02时达到峰值;低层正涡度值超过4×10⁻⁵s⁻¹,500 hPa 平均涡度在高空正涡度平流的作用下也由-4×10⁻⁵s⁻¹增长至-2×10⁻⁵s⁻¹左右。与发 生在 500 hPa 正涡度最大值前侧的小尺度非锋面气旋不同(Takeuchi and Uchiyama, 1985),本次过程中的中尺度涡旋出现在 500 hPa 涡前正涡度平流区 内。中尺度涡旋主要在 700 hPa 以下表现比较明显, 尤其在 800hPa 最为清晰。 有研究发现中尺度低涡与暴雪强度有密切关系(姜学恭等,2006),因此我们对 比分析了"涡旋区"涡度显著层(900~700hPa)平均涡度与北京平原地区小时雨 (雪)强的演变特征。由图 3b 可见,二者呈同位相变化,相关系数为 0.76,且 平均涡度的峰值较小时雨(雪)强峰值早约两小时,与 Bosart and Sanders(1986)

7

的研究成果一致,这对降雪预报具有一定的指示意义。



Fig.3 (a) Vertical profile of the mean vorticity in the "vortex region", (b) mean vorticity of 900-700hPa (unit: $10^{-5}s^{-1}$) and the time series diagram of hourly rain (snow) intensity over Beijing plain area (unit:mm h⁻¹)on 14 February 2020

800hPa 作为中尺度涡旋最清晰的层次,其强度变化具有一定代表性。14 日 02 时至 05 时是北京地区降水强度最大时段,这也恰恰是北京区域 800hPa 涡度 最强时段,同时,该层的垂直上升速度也最强,中心强度超过-3pa/s(图4)。 中尺度涡旋发展所引起的强烈上升运动,是造成北京地区极端降水的重要原因 (吴伟等,2011)。因此,我们将基于涡度方程分析中尺度涡旋发展机制,进一 步研究此次暴雪的形成机制。

8



图 4 2020 年 2 月 14 日(a)02 时,(b)05 时 800hPa 涡度(填色,单位:10⁻⁵s⁻¹)和垂直速度(等值线,单位:pa • s⁻¹) Fig.4 800hPa vorticity (colored,unit: 10⁻⁵s⁻¹) and 700hPa vertical velocity (contour,unit:pa s⁻¹) at (a) 02 BT, (b) 05BT 14 February 2020

3.2 涡度收支特征分析

采用方程(1)右侧四项:伸展项(Stretching term)、平均通量项(Mean term)、 扰动通量项(Eddy term)和类倾斜项(Tilting term)进一步分析"涡旋区"涡度 收支情况及原因。

由图 5a 可见,在 700 hPa 以下伸展项基本为正贡献,并在 14 日 02 时前后 出现 3×10⁻⁹s⁻² 的大值中心,这与涡旋强度和北京降水强度的峰值出现时间基本 一致。可见,气流的辐合为 700hPa 以下中尺度涡旋发展提供明显的正贡献,这 与 Bartels and Maddox (1991)和 Davis and Trier (2002)的研究结论一致。

据以往研究(Davis and Galarneau, 2009;张元春等, 2012),不同天气 过程,其平均通量项的作用亦有差异,本次过程中,平均通量项在 700hPa 以上 涡度的发展中起主导作用,即涡旋尺度上的边界气流所输送扰动绝对涡度对中高 空涡度影响更大,但对 700hPa 以下涡度的发展贡献不大(图 5b)。扰动通量项 在整层的涡度变化贡献均较小(图 5c)。类倾斜项与垂直运动和水平风矢量随 高度变化有关(Davis and Galarneau, 2009),有些天气过程中其贡献较小(张 元春等,2012),但本次过程中由于中尺度涡旋的强烈发展,垂直上升运动和风 垂直切变变化强烈,致使类倾斜项的贡献不可忽视。该项在 800hPa 以上涡旋发 展中提供正贡献,尤其在 14 日 05 时前,800~700hPa 有超过 2×10°s² 的大值中 心。而在 800hPa 以下则为负贡献,并于 14 日 05 时后有所增强,且逐渐向高空 延伸(图 5d)。在强上升运动背景下,类倾斜项从 800hPa 以下的负贡献转为 800hPa 之上的正值,这主要与垂直方向风矢量随高度从逆转到顺转有关,可见低层涡度 发展除气流辐合影响较大外,强的垂直风切也有重要贡献。

总之,本文关注的中尺度涡旋,其 800hPa 以下的正涡度发展更多源于伸展 项,即风的辐合作用。而 800~700hPa 涡度的发展与类倾斜项的正贡献关系更大, 反映了强垂直上升运动与垂直风切变对涡度的共同作用。







注:紫色虚线方框为涡旋区。

图 6 2019 年 2 月 14 日 (a) 08 时、(b) 20 时 500hPa 位势高度(等值线,单位:dagpm), 700hPa 相对湿 度(填色), 850hPa风场(风羽)

Fig.6 500hPa geopotential height (contour, unit: dagpm),700hPa relative humidit y (colored),850hPa wind field (wind bard) at (a)08:00 BT, (b) 20:00 BT 14 February 2019

该过程主要降雪时段为 2019 年 2 月 14 日 05-23 时,全市平均降雪量 1.6 mm(图 7a),城区平均为 0.5 mm;最大降雪出现在北京北部怀柔(渤海站,9.4 mm,平均降雪量和最大降雪量相较于 2020 年 2 月 13-14 日过程的均明显偏小。从"涡旋区"的涡度演变特征来看,平均涡度随高度未见"S"型特征,且 700 hPa 以下的涡度增幅较小,最大值仅为 2×10⁻⁵s⁻¹(图 7b)。这说明低空辐合系统并未得到充分发展,这反映出此过程整体上升运动偏弱(朱乾根等, 2000),导致降雪量明显偏小。



(b) The vertical profile of the mean vorticity in the "vortex region" (unit: $10^{-5}s^{-1}$)

我们进一步分析了影响涡度变化的各项特征,伸展项,在主要降水时段 (10-17时)700hPa以下总体贡献不大,说明气流辐合不强,不利于涡旋的形成 和发展(图 8a)。平均通量项,在高层(500hPa以上)正负极值交替出现,在 主要降水时段以正贡献为主,中心强度超过 6×10⁻⁹s⁻²,这也是引起高空涡度大幅增加的重要原因;但在 700hPa 以下更多的表现为负贡献,总体不利于低层"涡旋区"气旋性涡度发展(图 8b)。此外,扰动通量项和类倾斜项的贡献很低(图 略),可以忽略不计。与 2020 年 2 月 13-14 日的过程相比,此次过程中伸展项和类倾斜项均较弱,不利于低层涡旋发展,进而导致北京地区的降雪量级和极端性也显著降低。



(a) strething term, (b) meanflux term

5总结与讨论

蒙古低涡低槽配合地面倒槽回流形势,是华北雨雪天气的典型概念模型,而 "涡旋区"内是否有中尺度涡旋对北京地区的降水有重要影响。本文通过分析 2020年2月13-14日华北极端雨雪天气过程中的中尺度涡旋特征及其发展机制, 并与2019年2月14日的相似个例对比发现:

(1) 2020年2月13-14日极端雨雪天气中,中尺度涡旋主要活动区域内,

平均涡度的垂直廓线呈"S"型分布,且为上负/下正的特征,正负涡度极值分别在 400 hPa 和 800 hPa。

(2)中尺度涡旋表现最强层次(800hPa)的涡度与垂直上升运动大值区高度一致。中尺度涡旋的强度与北京平原地区降水强度同相位变化,相关系数为
0.76,涡旋强度的峰值较降水强度峰值早约2个小时。这种超前特征对降雪预报具有一定的指示意义。

(3)本次华北极端降水天气过程的中尺度涡旋 800hPa 以下正涡度的发展 更多源于伸展项的正贡献,即风的辐合作用。而 800~700hPa 涡度的发展与类倾 斜项的正贡献关系更大,即在强的垂直上升运动背景下,水平风矢量随高度的顺 转进一步促进了中尺度涡旋的发展和维持。

(4) 2019 年 2 月 14 日天气过程中受弱的低层辐合和上升运动等影响,"涡旋区"内没有中尺度涡旋发展,区域内涡度在垂直方向未形成"S"型特征,导致北京地区的降雪量明显偏小,

本文讨论了"涡旋区"内涡度的垂直分布特征及其收支来源,通过个例对比 发现,"涡旋区"内中尺度涡旋的发展维持,对北京地区冬季降水量级和极端性 具有重要影响和预报指示意义。下一步将通过对不同类型的降雪过程进行数值模 拟诊断,进一步研究引起"涡旋区"涡度变化的其他可能原因及其与北京地区降 水的关系。

参考文献:

陈雪珍, 慕建利, 赵桂香, 等, 2014. 华北暴雪过程中的急流特征分析[J]. 高原气象, 33(4): 1069-1075. Chen X Z, Mu J L, Zhao G X, et al, 2014. Analysis of jet stream characteristic during the snowstorm process in North China[J]. Plateau Meteor, 33(4): 1069-1075 (in Chinese). 邓远平, 程麟生, 张小玲, 2000. 三相云显式降水方案和高原东部"96.1"暴雪成因的中尺度数 值模拟[J]. 高原气象, 19(4): 401-414. Deng Y P, Cheng L S, Zhang X L, 2000. Three-phase cloud explicity precipitation scheme and mesoscale numerical simulation for generated cause of the "96.1" snowstorm[J]. Plateau Meteor, 19(4): 401-414 (in Chinese).

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).

段字辉, 王文, 田志广, 等, 2013. 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, 31(4): 784-789. Duan Y H, Wang W, Tian Z G, et al, 2013. Comparison of two rain to heavy snowstorm weather processes under the similar weather situation in northern part of North China[J]. J Meteor, 31(4): 784-789 (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).

姜学恭,李彰俊,康玲,等,2006. 北方一次强降雪过程的中尺度数值模拟[J]. 高原气象, 25(3): 476-484. Jiang X G, Li Z J, Kang L, et al, 2006. Mesoscale numerical simulation of a heavy snowfall process in northern China[J]. Plateau Meteor, 25(3): 476-484 (in Chinese).

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): 54-62. Li Q Q, Cheng C L, Gao H, et al, 2011. Numerical simulation and analysis on a heavy snow of return-flow events in Beijing[J]. Meteor Mon, 37(11): 54-62 (in Chinese).

孟雪峰, 孙永刚, 姜艳丰, 2012. 内蒙古东北部一次致灾大到暴雪天气分析[J]. 气象, 38(7): 877-883. Meng X F, Sun Y G, Jiang Y F, 2012. Weather analysis on a disastrous heavy snow in northeast of Inner Mongolia on November 20, 2010[J]. Meteor Mon, 38(7): 877-883 (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).

吴伟,邓莲堂,王式功,2011. "0911" 华北暴雪的数值模拟及云微物理特征分析[J].气象, 37(8): 991-998. Wu W, Deng L T, Wang S G, 2011. A numerical simulation of snowstorm in North China during 9-11 November 2009 and its cloud microphysics[J]. Meteor Mon, 37(8): 991-998 (in Chinese).

徐姝, 易笑园, 熊明明, 等, 2024. 华北局地大暴雨过程中多个β中尺度对流系统发生发展对 比分析[J]. 气象, 50(2): 181-194. Xu S, Yi X Y, Xiong M M, et al, 2024. Comparative analysis of occurrence and development of multiple β-meso scale convective systems during a localized severe torrential rain event in North China[J]. Meteor Mon, 50(2): 181-194 (in Chinese).

杨成芳, 李泽椿, 周兵, 等, 2007. 渤海南部沿海冷流暴雪的中尺度特征[J], 南京气象学院学报, 30(6): 857-865. Yang C F, Li Z C, Zhou B, et al, 2007. Mesoscale analysis of ocean-effect snowstorms in the south coastland of Bohai Sea[J]. J Nanjing Inst Meteor, 30(6): 857-865 (in Chinese).

杨晓亮, 王咏青, 杨敏, 等, 2014. 一次暴雨与特大暴雪并存的华北强降水过程分析[J]. 气象, 40(12): 1446-1454. Yang X L, Wang Y Q, Yang M, et al, 2014. Analysis on severe heavy precipitation event with rainstorm and large blizzard in North China[J]. Meteor Mon, 40(12): 1446-1454 (in Chinese).

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 C, Wang J J, Zhang W L, 2011. Formation mechanism of the snowstorm over Beijing in early winter of 2009[J]. J Appl Meteor Sci, 22(4): 398-410 (in Chinese).

张迎新, 张守保, 裴玉杰, 等, 2011. 2009 年 11 月华北暴雪过程的诊断分析[J]. 高原气象, 30(5): 1204-1212. Zhang Y X, Zhang S B, Pei Y J, et al. Diagnostic analysis on snowstorm process in North China in November 2009[J]. Plateau Meteor, 30(5): 1204-1212 (in Chinese).

张元春, 孙建华, 傅慎明, 2012. 冬季一次引发华北暴雪的低涡涡度分析[J]. 高原气象, 31(2): 387-399. Zhang Y C, Sun J H, Fu S M, 2012. Analysis of vorticity during vortex producing snowstorm in North China in winter[J]. Plateau Meteor, 31(2): 387-399 (in Chinese).

翟亮, 郭淳薇, 马新成, 等, 2018. 北京 2016 年 "11 • 20" 初雪预报偏差分析[J]. 气象, 44(1): 151-158. Zhai L, Guo C W, Ma X C, et al, 2018. Forecast deviation analysis of the first snow in Beijing on 20 November 2016[J]. Meteor Mon, 44(1): 151-158 (in Chinese).

翟亮, 王林, 郭金兰, 等, 2022. 北京一次极端雨雪天气异常诊断分析[J]. 沙漠 与绿洲气象, 16(4): 9-13. Zhai L, Wang L, Guo J L, et al, 2022. Abnormal diagnosis and analysis of an extreme rain and snow weather in Beijing[J]. Desert Oasis Meteor, 16(4): 9-13 (in Chinese).

周海光, 2014. 2008年1月26日南京暴雪中尺度风场结构双雷达反演研究[J]. 热带气象学报, 30(4): 786-794. Zhou H G, 2014. Study on the mesoscale structure of a snowstorm on 26 January 2008 using dual-Doppler[J]. J Trop Meteor, 30(4): 786-794 (in Chinese).

朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等,2000. 天气学原理和方法:第 4 版[M]. 北京: 气象出版社, 121-122. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al, 2000. The Principles and Methods of Weather [M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 121-122 (in Chinese). Bartels D L,Maddox R A,1991.Midlevel cyclonic vortices generated by mesoscale convective systems[J].Mon Wes Rev,119:104-118.

Bosart L F, Sanders F, 1986. Mesoscale structure in the megalopolitan snowstorm of 11-12 February 1983. Part III: a large-amplitude gravity wave[J]. J Atmos Sci, 43(9): 924-939.

Davis C A, Trier S B, 2002. Cloud-resolving simulations of mesoscale vortex intensification and its effect on a serial mesoscale convective system [J]. Mon Wes Rev, 130(12): 2839-2858.

Davis C A, Galarneau Jr T J, 2009. The vertical structure of mesoscale convective vortices[J]. J Atmos Sci, 66: 686-704.

Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 Global Reanalysis[J]. Quar J Royal Meteorological Society, 146 (730), 1999 – 2049. doi: 10.1002/qj.3803.

Miyazawa S. 1968. A mesoclimatological study on heavy snowfall-a synoptic study on the mesoscale disturbances[J]. Meteor Geophys, 19(4): 487-550 (in Japanese).

Nicosia D J, Grumm R H, 1999. Mesoscale band formation in three major northeastern United States snowstorms[J]. Wea Forecasting, 14(3): 346-368.

Sanderson R M, Golding B, Bader M, 1990. A heavy snowfall within a mesoscale convergence zone[J]. Meteor Mag, 119(1412): 41-52.

Takeuchi M,Uchiyama T,1985.Synoptic analysis of polar lows over the Japan Sea area and heavy snowfalls in the coastal plain regions[J].Meteorology & Geophysics, 36(1):1-21.