

翟亮, 邢楠, 郝翠, 等, 2024. 一次华北极端降雪天气过程的中尺度涡旋特征[J]. 气象, 50(9): 1120-1128. Zhai L, Xing N, Hao C, et al, 2024. Characteristics of the mesoscale vortex in an extreme snowfall process in North China[J]. Meteor Mon, 50(9): 1120-1128(in Chinese).

一次华北极端降雪天气过程的中尺度涡旋特征*

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 中国人民解放军 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

提 要: 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进行诊断。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, 正负涡度极值分别位于 800 hPa 及 400 hPa。涡旋区内 800 hPa 正涡度强度与上升运动大值区一致。900~700 hPa 平均涡度强度与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 2 h, 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 800 hPa 以下正涡度主要源自水平风辐合; 800~700 hPa 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

中图分类号: P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.071601

Characteristics of the Mesoscale Vortex in an Extreme Snowfall Process 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 of CPLA, Beijing 100094

3 Haidian Meteorological Office of Beijing, Beijing 100080

4 Institute of Urban Meteorology, CMA, Beijing 100089

Abstract: Using hourly ERA5 reanalysis data and observation data, the characteristics of mesoscale vortices during the extreme rain and snow event in North China from 13 to 14 February 2020 are analyzed. Besides, the development mechanism of the mesoscale vortices is diagnosed by the 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) exhibits an “S” shaped distribution, with extreme positive and negative vorticity values at 800 hPa and 400 hPa, respectively. The average vorticity intensity from 900 hPa to 700 hPa varies in the same phases with the precipitation intensity in the plain area. The peak of vortex intensity is about two hours earlier than the peak of precipitation intensity, and the correlation coefficient between the two is 0.76, suggesting that the intensity of lower-level vorticity has indicative

* 国家重点研发计划(2021YFC3000901)资助

2022 年 7 月 6 日收稿; 2024 年 7 月 16 日收修定稿

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

significance for snowfall forecasting. From the perspective of the dynamical mechanisms driving vortex development, the positive vorticity below 800 hPa in the vortex zone mainly originates from horizontal wind convergence. The upward motion from 800 hPa to 700 hPa and the clockwise rotation of wind with increasing altitude contribute more to vorticity. Compared to the snowfall process without mesoscale vortex on 14 February 2019, the structure of vorticity in the vertical direction has no “S” shape, and the intensity of vorticity in the middle and lower layers is weak, resulting in obviously lower snowfall amount over Beijing. The existence or absence of mesoscale vortex development in the vortex zone has indicative significance for predicting winter snowfall magnitude and extremity 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,我国暴雪研究已有60年历史,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;段宇辉等,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 中尺度涡旋活动而产生。邓远平等(2000)发现中尺度涡旋往往与气流的辐合、涡度带、上升区和深厚湿舌相对应,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1 h,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,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自动气象站数据。

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):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\bar{\eta} \delta A - \oint \eta' \bar{\mathbf{V}} \cdot \hat{\mathbf{n}} dl - \oint \eta' \mathbf{V}' \cdot \hat{\mathbf{n}} dl + \oint \omega \left(\mathbf{k} \times \frac{\partial \mathbf{V}_h}{\partial p} \right) \cdot \hat{\mathbf{n}} dl \quad (1)$$

式中: C 是相对涡度环流积分结果, $\bar{\eta}$ 和 η' 为绝对涡度的平均量和扰动量, A 为积分面积, $\hat{\mathbf{n}}$ 为垂直于

涡旋区域边界法向向量, ω 为垂直速度, $\bar{\mathbf{V}}$ 和 \mathbf{V}' 为风矢量的平均量和扰动量, \mathbf{V}_h 为水平风矢量, p 为气压, t 为时间, l 代表环流边界。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 $36.0^\circ \sim 41.0^\circ \text{N}$ 、 $113.0^\circ \sim 118.0^\circ \text{E}$ 为研究范围(简称涡旋区), 通过式(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, 下同), 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(雨、雪)量为 22.5 mm(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 7.5 mm, 城区平均为 10.1 mm, 最大降雪量为平谷门楼庄(16.4 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, 对流层中下层形成了一个中尺度涡旋(图 2)。该中尺度涡旋在 14 日

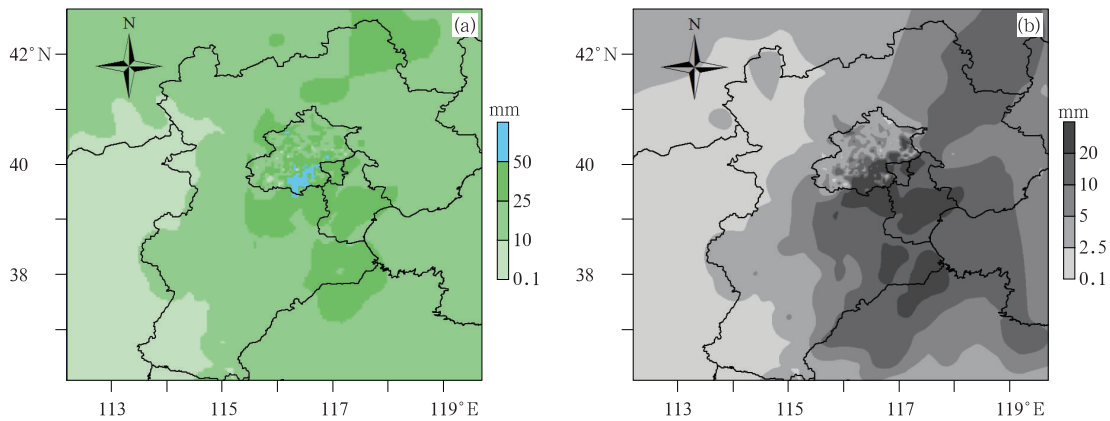
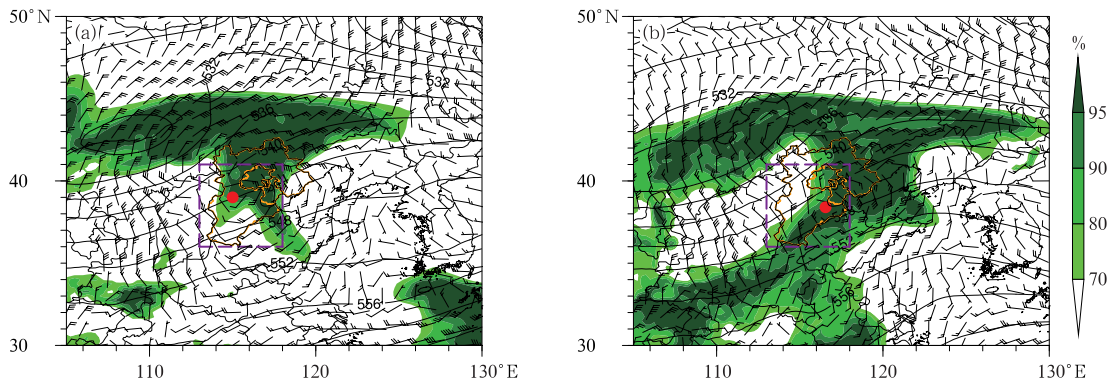


图 1 2020年2月(a)13日18时至14日20时累计降水量, (b)14日08—20时降雪量

Fig. 1 (a) Accumulated rainfall from 18:00 BT 13 to 20:00 BT 14 and (b) snowfall from 08:00 BT 14 to 20:00 BT 14 February 2020



注: 紫色虚线方框为涡旋区, 红色圆点为涡旋中心。

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

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

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 1000 hPa 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天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。

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作为涡度分析重点,如图 2 所示,紫色虚线方框(36.0°~41.0°N、113.0°~118.0°E)即为涡旋区。

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为 13 日 20 时至 14 日 17 时,影响时长达 22 h(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、负涡度极值分别位于 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 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,500 hPa 平均涡度在高空正涡度平流的作用下也由 $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 增长至 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 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 800 hPa 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),我们对比分析了涡旋区涡度显著层(900~700 hPa)平均涡度与北京平原地区小时降水强度的演变特征。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降水强度峰值早约 2 h,与

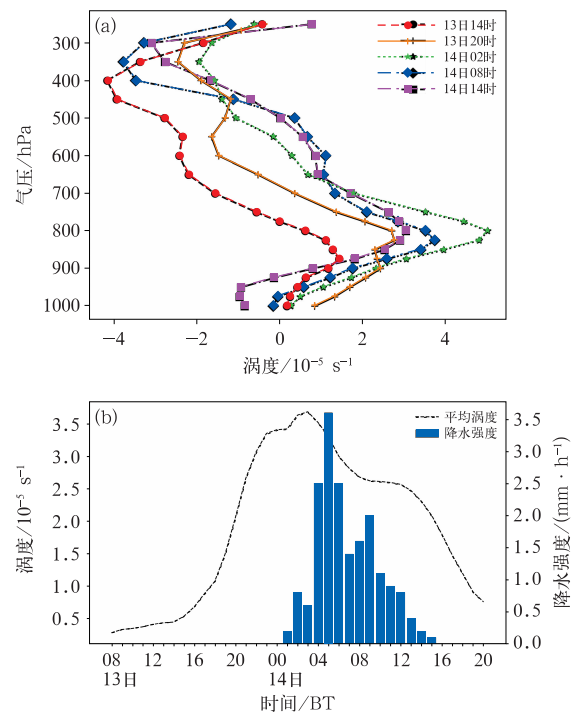


图 3 2020 年 2 月 13—14 日(a) 涡旋区内平均涡度垂直廓线,(b)900~700 hPa 平均涡度和北京平原地区小时降水强度时间序列

Fig. 3 (a) Vertical profile of average vorticity in vortex zone, (b) average vorticity of 900—700 hPa and the time series of hourly precipitation intensity over Beijing Plain Area from 13 to 14 February 2020

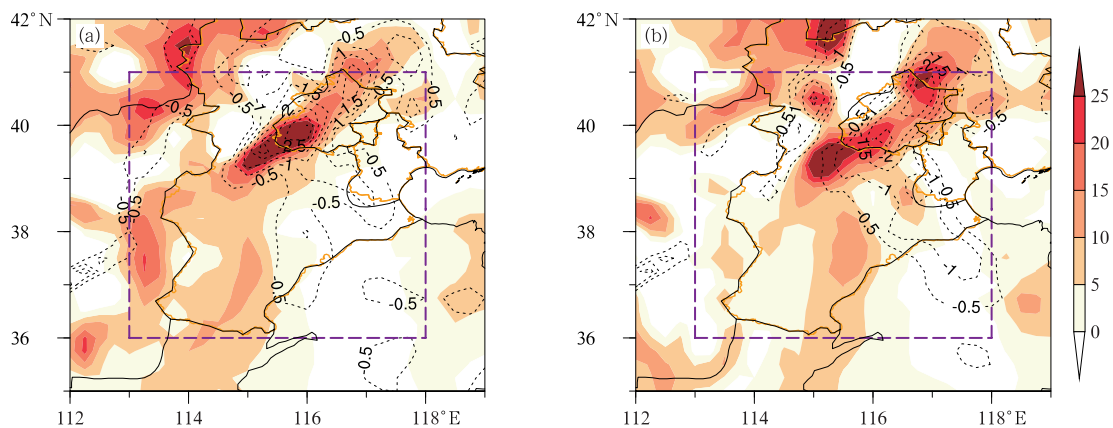
Bosart and Sanders(1986)的研究成果一致,这对降雪预报具有一定的指示意义。

800 hPa 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—05 时是北京地区降水强度最大时段,也恰是北京区域 800 hPa 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 $-3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (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。

3.2 涡度收支特征分析

采用方程(1)右侧四项:伸展项、平均通量项、扰动通量项和类倾斜项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 $3 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ 的大值



注:紫色虚线方框为涡旋区。

图 4 2020 年 2 月 14 日 (a)02 时, (b)05 时 800 hPa 涡度(填色, 单位: 10^{-5} s^{-1}) 和垂直速度(等值线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 The 800 hPa vorticity (colored, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) at (a) 02:00 BT and (b) 05:00 BT 14 February 2020

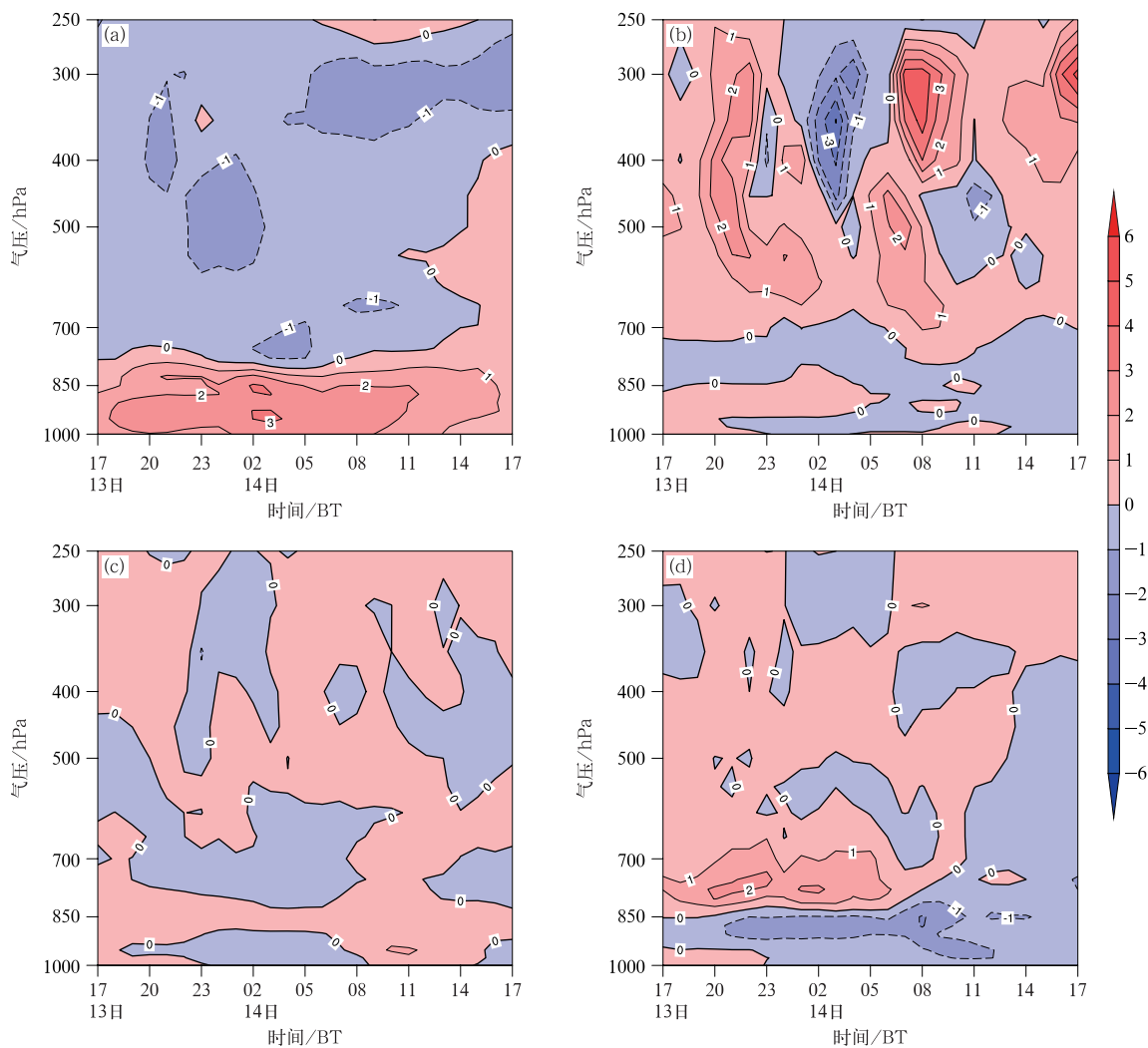


图 5 2020 年 2 月 13—14 日涡旋区涡度收支各项垂直演变(单位: 10^{-9} s^{-2})

(a)伸展项, (b)平均通量项, (c)扰动通量项, (d)类倾斜项

Fig. 5 Vertical variations of vorticity budget (unit: 10^{-9} s^{-2}) in vortex zone from 13 to 14 February 2020

(a) stretching term, (b) mean term, (c) eddy term, (d) tilting term

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700 hPa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700 hPa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空高涡度影响更大,但对700 hPa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,垂直上升运动和水平风切变变化强烈,致使类倾斜项的贡献不可忽视。该项在800 hPa以上涡旋发展中提供正贡献,尤其在14日05时前,800~700 hPa有超过 $2 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ 的大值中心;而在800 hPa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800 hPa以下的负贡献转为800 hPa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800 hPa以下

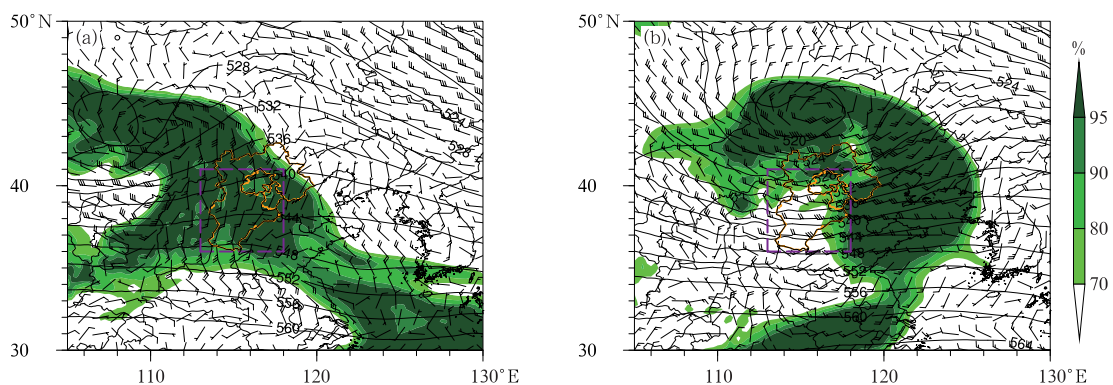
的正涡度发展更多源于伸展项,即风的辐合作用。而800~700 hPa涡度的发展与类倾斜项的正贡献关系更大,反映了强垂直上升运动与垂直风切变对涡度的共同作用。

4 相似个例涡度特征对比

2019年2月14日同样是一次由高空冷涡东移引发的华北区域降雪天气。其500 hPa冷涡位置同样位于蒙古中部,北京亦位于地面低压倒槽顶端的回流东风中(图6)。季节相同,环流相似,区别在于该个例中没有中尺度涡旋生成。

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较之2020年2月13—14日过程均明显偏小。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 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图7b)。这说明低空辐合系统并未得到充分发展,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。

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)700 hPa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(500 hPa以上)



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500 hPa位势高度(等值线,单位:dagpm), 700 hPa相对湿度(填色)、850 hPa风场(风羽)

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

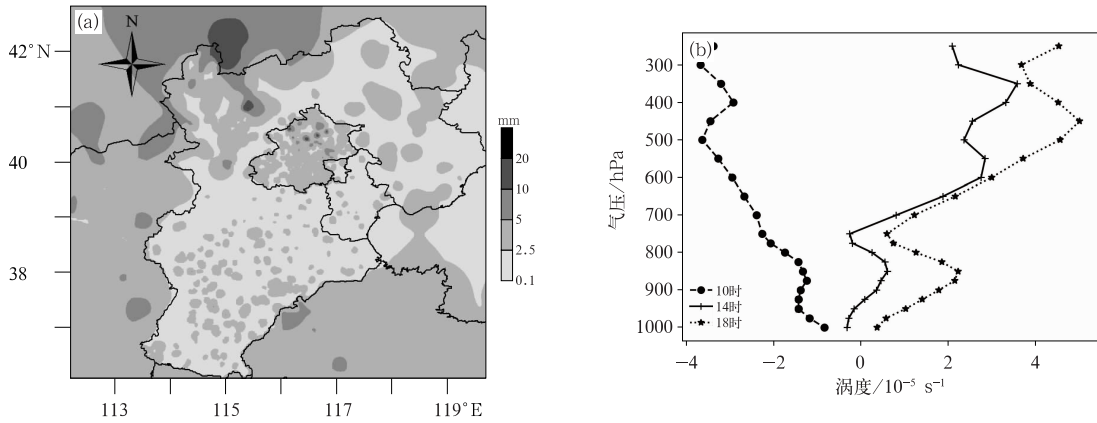


图 7 2019 年 2 月 14 日 (a)00—23 时降雪量, (b) 涡旋区内平均涡度垂直廓线
Fig. 7 (a) Snowfall from 00:00 BT to 23:00 BT and (b) vertical profile of average vorticity in vortex zone on 14 February 2019

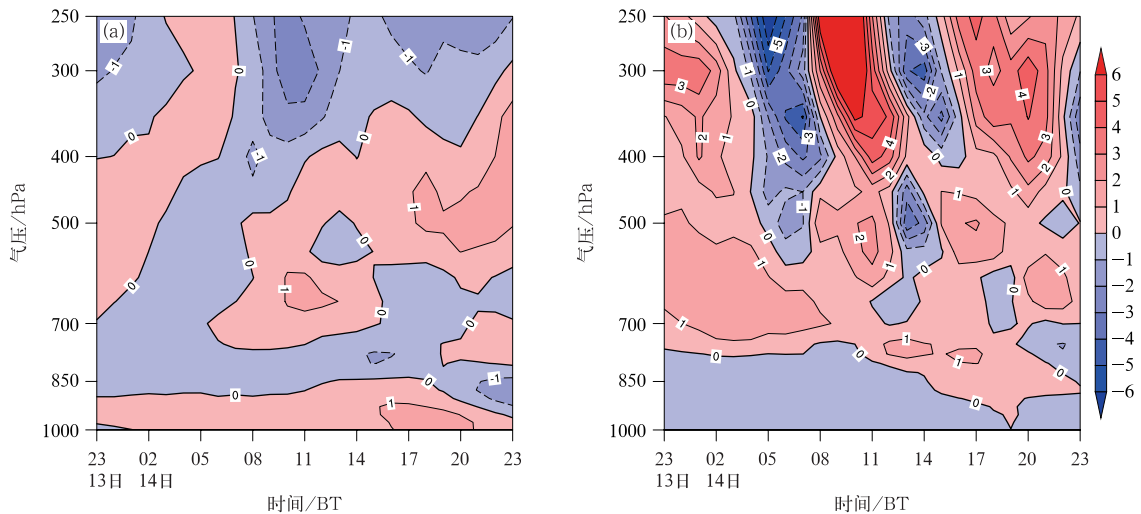


图 8 2019 年 2 月 13—14 日涡旋区涡度收支各项垂直演变(单位: 10^{-9} s^{-2})
(a) 伸展项, (b) 平均通量项

Fig. 8 Vertical variations of vorticity budget (unit: 10^{-9} s^{-2}) in vortex zone from 13 to 14 February 2019
(a) stretching term, (b) mean term

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 $6 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$,这也是引起高空涡度大幅增加的重要原因;但在 700 hPa 以下的表现为负贡献,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。

5 结论与讨论

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,正负涡度极值分别位于400 hPa和800 hPa。

(2)中尺度涡旋表现最强层次(800 hPa)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,涡旋强度的峰值较小时降水强度峰值早约2 h。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800 hPa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800~700 hPa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 explicit 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 Chi-

nese).

段宇辉,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,李影俊,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 C, 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雨过程分析[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, 2011. 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 Roy Meteor Soc*, 146(730): 1999-2049.
- 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.

(本文责编: 戴洋、王蕾)