

李博,王玮,刘飞,等.山东初冬一次极端降水和大风天气成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(4):30-37.

doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.04.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



山东初冬一次极端降水和大风天气成因分析

李 博¹,王 玮¹,刘 飞²,景安华¹,郭文明³

(1.菏泽市气象局,山东 菏泽 274000;2.91937 部队,浙江 舟山 316000;3.91876 部队,河北 秦皇岛 066000)

摘 要:利用常规地面、高空观测、雷达及 ERA5 再分析等资料,对 2021 年 11 月 6—7 日山东初冬一次极端降水、大风天气成因分析,结果表明:低槽东移发展,冷空气南压,低空切变线配合东北、西北地区地面高压坝形成的“阻挡”形势利于极端降水的产生。本次过程水汽条件具有较强的极端性,水汽通量辐合远强于气候平均态,925 和 700 hPa 水汽通量辐合大值区与雨、雪区域配合较好。冷锋过境条件对称不稳定触发产生对流,随后在冷锋后侧逆温层上由锋生过程的上升支环流强迫产生高架对流。强冷空气扰动从内蒙古高原下滑至华北平原,与近地面冷平流汇合增强,产生较强变压风,同时促进了势能向动能转换及动量下传。地形强迫造成下沉运动增强,华北地区低层形成锋面次级环流,环流前部锋区暖界面为地转偏差辐合,冷界面为地转偏差辐散。环流内有水平动能和地转偏差大值区,偏北气流和下沉运动使水平动能向南、向下输送,导致地面极端大风。

关键词:暴雪;寒潮大风;高架对流;温度平流;水平动能;地转偏差

中图分类号:P458

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2023)04-0030-08

寒潮是我国北方冬季易发的灾害性天气之一,其伴随的暴雪、大风和强降温对人民群众的生产生活常造成严重影响。众多学者对寒潮、暴雪和大风天气的预报方法、成因机理等分析取得了许多成果:杨成芳等^[1]基于构成要素的预报方法,从动力抬升、水汽输送以及降雪效率和冷垫作用等方面对山东一次切变线暴雪天气进行了诊断分析。肖贻青等^[2]、胡顺起等^[3]、周芳等^[4]、徐娟娟等^[5]、胡玲等^[6]对多次暴雪过程分析得出,700 hPa 西南暖湿急流和动力因子对暴雪的形成较关键。冬季暴雪过程常伴有深厚的锋生区和较强的锋面次级环流,锋区以上的强上升运动导致不稳定能量触发,利于极端暴雪的产生^[7-12]。冷锋过境时受冷平流影响低空形成逆温,具有较强的静力稳定度,逆温层以上气块绝热上升获得浮力,

可形成高架对流,其形成机制包括条件不稳定、条件对称不稳定以及两种不稳定共存和条件稳定、对称稳定中性条件下的锋生环流强迫型^[9-15]。对称不稳定通常出现在大气处于几乎饱和的情况下,触发后形成倾斜对流,实际业务中主要依据等位温面和等地转绝对角动量面的坡度对比进行判断^[16]。

冷空气主体南压的方向即冷平流最强、气压梯度最大处,是最易出现寒潮大风的区域。强冷平流造成较大的气压梯度和变压,同时存在动量下传。下沉气流的高度越低、持续时间越长,造成的大风就越剧烈,说明较强的冷平流和动量下传是造成地面极端大风的重要因素^[17-20]。位涡是综合表征大气的热力和动力因子,等熵位涡分析可用来分析寒潮过程强冷空气的输送和扰动,对冷空气的源地有较好的指示意义^[21-24]。寒潮过程地面冷高压前部有深厚的斜压性,锋生对锋面次级环流和降水有正反馈作用^[25-26]。地转偏差使实际风穿越等压线,气压梯度力做功,空气动能发生变化。地转偏差及空气水平动能与急流的形成关系密切,在降水过程中应用反馈较好^[27-28],

收稿日期:2022-05-15;修回日期:2022-08-14

基金项目:山东省气象局面上项目(2018sdqxm01);菏泽市气象局面上项目(2020006)

作者简介:李博(1985—),男,高级工程师,主要从事气象防灾减灾研究。E-mail:cyqxjlb@126.com

但大风过程中应用较少。寒潮过程大气斜压性强,地转关系受到破坏,以非地转风为主,大风成因与地转偏差、空气动能关系密切。

2021年11月6—7日山东省出现一次极端降水和大风天气,是1961年以来平均最早初雪日,36个区(县)破1991年以来11月历史降水极值,66个区(县)出现暴雪,同时出现“雷打雪”现象。53个区(县)出现8级以上阵风,19个区(县)出现9级及以上阵风。本文对此过程进行诊断分析,以期为当地防灾减灾提供依据。

1 天气实况

11月6日20时—7日20时,山东省平均降水量为31.9 mm,降水分布呈西北多、东南少,最大降水量在东营市垦利区(75.5 mm),最大小时雨强在聊城茌平(17.8 mm)。6日夜间以降雨为主,7日05时转为降雪。积雪主要集中在鲁西北和鲁中,最大积雪深度达20 cm。大风主要在鲁西和半岛沿海一线,鲁西地区大风主要出现在7日02—05时,其中聊城02:46的极大风速达 $22.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;半岛地区大风主要出现在7日15—17时,其中日照15:05的极大风速达 $26.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图1)。

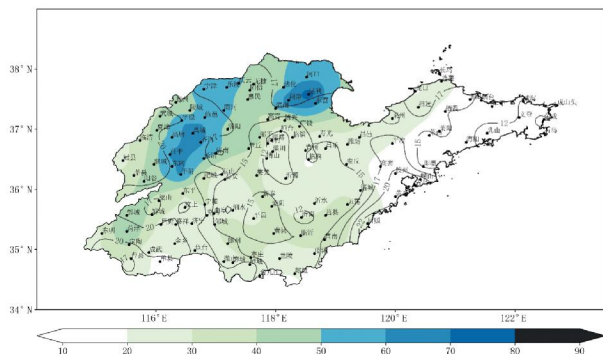


图1 6日20时—7日20时山东降水(填色,单位:mm)和极大风速(等值线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)分布

本次过程鲁西地区降水和大风均较强,对该区域降水量最大的站点德州禹城(116.63°E , 36.93°N)降水、气温和极大风速时间序列(图2)分析得出,7日01—10时气温由 17.1°C 下降到 -1.5°C ,降幅达 18.6°C 。7日04,05时阵风最大,分别为 16.9 和 $17.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,最大小时雨强为 15.9 mm ,出现在7日01—02时。最大小时降雪量为 6.0 mm ,出现在7日08—09时。

2 环流背景

4日08时,500 hPa冷涡中心位于 105°E 、 60°N

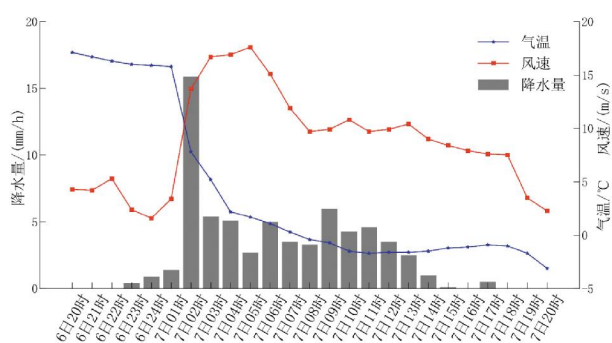


图2 6日20时—7日20时德州禹城降水、气温和极大风速序列

附近,冷涡后部冷平流较强,冷空气不断向冷涡积聚,冷涡中心至巴尔喀什湖为东北—西南向的槽。锋区分为两段,北段移动快,南段与低涡分离,移速慢。700 hPa北段锋区槽后冷平流强,移至贝加尔湖;南段低槽为东北—西南向,在新疆地区,南支槽在西南地区,中东部受西南气流控制。850 hPa偏南暖湿急流主要在华南,黄淮到华北地区为暖脊。地面寒潮高压中心1047.5 hPa在乌拉尔山附近,高压前部蒙古到新疆为强冷锋,冷锋后有大的降雪区域。

6日20时,500 hPa北支槽在黄河上游,与南支槽呈阶梯状,槽前疏散配合槽后冷平流,发展为冷涡,我国中东部受西南气流控制。700 hPa冷空气在华北受太行山脉阻挡移速慢,在东北至西北地区移速快,与黄淮、江淮地区的西南气流形成西北—西南风的切变线。受500 hPa槽前正涡度平流、气压梯度力增大以及西南气流同位相叠加等作用,700 hPa西南急流增强。7日08时,急流核风速增至 $20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,山东处于西南急流西北侧,为过程提供了充足的水汽。850 hPa海上低压和亚洲东岸高压之间气压梯度力增大,东南气流较强,在华北地区形成西北—东南向的“对头风”切变。地面形势显示寒潮高压中心1062.5 hPa位于蒙古,冷锋位于亚洲东岸到我国西北地区,东北和西北地区为高压脊。华北和渤海湾地面为东北风,山东被地面倒槽控制,有冷空气侵入。

此次寒潮天气是低槽东移发展造成。前期,欧洲西部阻塞高压崩溃,冷空气在西伯利亚积聚形成冷涡并东移,其南部低槽受槽后冷平流影响,东移再次发展,于河套地区形成冷涡。山东位于冷涡东南部,高空为西南气流、低空为东南气流,与冷涡后部的西北风形成强切变。东北和西北地区地面有高压坝形成“阻挡”形势,使暖湿气流只能沿越过太行山脉的

冷锋爬升,增强了垂直上升运动、水汽凝结率和降水效率,有利于产生极端降水。

3 降水成因分析

3.1 水汽通量散度和比湿

极端降水和大风过程开始前,850和925 hPa受低层东南气流影响,暖湿气流由黄海向华北输送,与冷空气在华北汇合形成切变,切变线上有水汽通量辐合大值区。7日01时切变线移至山东西部,925 hPa水汽通量散度和流场分布(图3a)显示,鲁西南到鲁西北为 $-7 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的水汽通量辐合区,降水明显增强。7日05时后转为降雪,700 hPa西南急流强,降水在“冷垫”和暖湿气流爬升的作用下产生,边界层水汽通量散度辐合大值区与降雪区域不匹配。7日08时,700 hPa(图3b)水汽通量散度和流场分布显示,鲁西南到鲁西北为 $-5 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的辐合大值区,此时鲁西南小时降雪量最大,700 hPa水汽通量辐合区与降雪区域配合较好。

水汽是产生降水的必要条件,7日01时鲁西北降水增强,850 hPa鲁西南到鲁西北有 $6 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的湿舌。降水相态转为降雪时,比湿迅速减小,08—09时降雪强度最大,边界层比湿为 $3 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。同时采用公式: $D_s = \frac{F-M}{\delta}$ 分析水汽通量散度、比湿与气候平均态的标准化异常程度(D_s),以判断水汽条件的极端性, D_s 偏离3倍以上标准差说明小概率严重事件可能发生。公式中, F 为某时刻气象要素的值, M 为同时刻30 a气候平均值,同时使用前后各10 d的要素值平均以消除小波动影响^[29]。分别对德州禹城降水时段925 hPa和降雪时700 hPa水汽通量散

度和比湿进行标准化异常分析。7日01时,925 hPa水汽通量散度 $|D_s|$ 为7.2,极端性非常明显;比湿 $|D_s|$ 为1.9,为中等异常。7日08时,700 hPa水汽通量散度 $|D_s|$ 为12.7,极端性非常明显;比湿 $|D_s|$ 为3.1,具有极端性。

3.2 不稳定条件和雷达产品分析

沿禹城对相当位温 θ_e 、地转绝对角动量 M_g 以及风场进行经向垂直剖面分析,地面冷高压前部、锋面北侧,850 hPa以下为东北风和强冷平流,由于锋面逆温, θ_e 随高度基本不变。850 hPa为南风、700 hPa为西南风,热成风呈西南—东北向。7日01时(图4a)冷锋过禹城,850 hPa以下有锋面逆温,等 θ_e 线坡度大于等 M_g 线坡度,条件对称不稳定在850 hPa以下。配合散度、垂直上升运动分析,该时次边界层有明显的辐合和垂直上升运动,导致条件对称不稳定能量触发。对比济南7日00:58雷达 0.5° 仰角基本反射率因子图(图4c),在鲁西北上空的大片层状云中,有沿热成风方向的中尺度对流降水带,最大反射率因子为45~50 dBZ。中尺度对流雨带随冷锋南压,7日01:26移出禹城。反射率因子剖面显示,中尺度雨带强回波接地,条件对称不稳定和主要降雨时段重合,对流由条件对称不稳定的触发造成。

7日05—08时鲁西北出现“雷打雪”现象,济南05:34雷达 1.5° 仰角基本反射率因子显示(图4d),德州南部有45~50 dBZ的强回波,沿热成风方向排列,由西南向东北移动。剖面图可以看出强回波中心在2~3 km高度,对流在逆温层上触发,为高架对流。05时(图4b) θ_e 、 M_g 和风场垂直分布显示,条件对称不稳定和条件不稳定均接近中性。850 hPa为 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的北风,700 hPa为 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风,垂直风切变强。径向速度图上2~3 km高度有强水平风切变,呈气旋

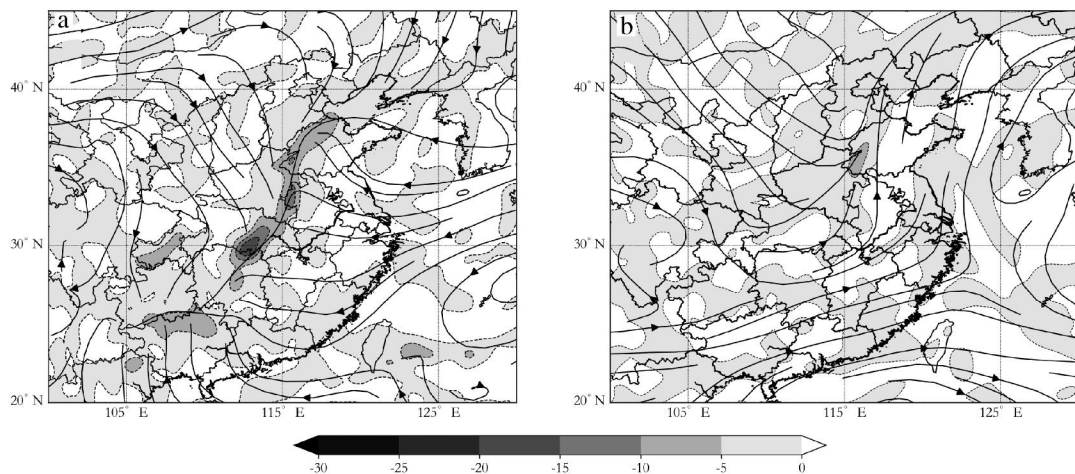


图3 7日01时925 hPa(a)、08时700 hPa(b)水汽通量散度(填色,单位: $10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和流场

式辐合,有较强的辐合上升运动,高架对流是由中性条件下的锋生环流上升支强迫产生。

4 大风成因分析

4.1 等熵位涡

等熵面上位涡公式为 $V_p = (\xi_\theta + f)(-g \frac{\partial \theta}{\partial p})$, 是绝对涡度和位温梯度的乘积, 常用等熵位涡分析冷空气扰动。高位涡从北向南移动, 温压场与周围环境不适应, 强冷空气旋转将加强。等熵面高度与等压面也相关, 此次过程低层冷空气活动强, 将位涡和风场逐小时插值到 295 K 的等熵面分析冷空气活动。

6 日 14 时前, 冷涡位于 100°E 以西, 对应有高位涡区, 低层锋区西北到东北有狭长的高位涡带。西北地区低层冷空气南压快, 风向从南向北由低层东南风顺转为高层偏西风。6 日 20 时, 华北地区平行于地面冷锋有 >1.0 PVU 的高位涡带, 在燕山山脉 ($40^\circ\text{N}, 115^\circ\text{E}$) 出现 >1.5 PVU 的扰动, 冷空气扰动从燕山下滑至华北平原, 气流下沉导致低层锋生, 边界层静力稳定度 $-\frac{\partial \theta}{\partial p}$ 和相对涡度 ξ_θ 增大, 位涡也随之增大, 高位涡扰动沿太行山脉东侧南移。7 日 02 时

(图 5a) 500 hPa 冷涡中心移至河套地区, 冷涡低槽前有位涡大值区。平行于地面锋线的高位涡带移至鲁西南到渤海湾一带, 内蒙古到华北 >1.5 PVU 的高位涡扰动影响鲁西地区。7 日 08 时, 冷涡主体东移, 高位涡扰动稳定在鲁西北, 并不断增强, 中心强度增至 3 PVU 以上。其增强的原因: 一是东南海上气旋和东北地区沿海高压使冷空气南侧东南风加强, 阻挡了冷空气前进, 在鲁西北不断聚集; 二是冷空气沿太行山脉东侧南下, 近地面冷平流从东北向西南移动, 在河北和山东交界处汇合增强。随着冷空气不断南压, 高位涡区东移, 在鲁中受泰沂山脉阻挡移速稍慢, 在鲁南则移速快。7 日 15 时(图 5b) 高位涡区接近半岛, 该区域风力开始增大, 此时中心强度已减弱至 2.1 PVU, 鲁中地区 1.2 PVU 的位涡带与地面冷锋对应较好。

4.2 温度平流和锋生函数

锋区斜压性强、地转偏差大, 不满足地转关系, 不计摩擦力时, 使用 $D = \frac{1}{f} \vec{k} \times \frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$ 计算气压局地变化造成的地转偏差即变压风。使用 $F = \frac{1}{2} |\nabla \theta| [D \cos(2\beta) - \delta]$ 诊断分析过程锋生情况, 式中 F 为水

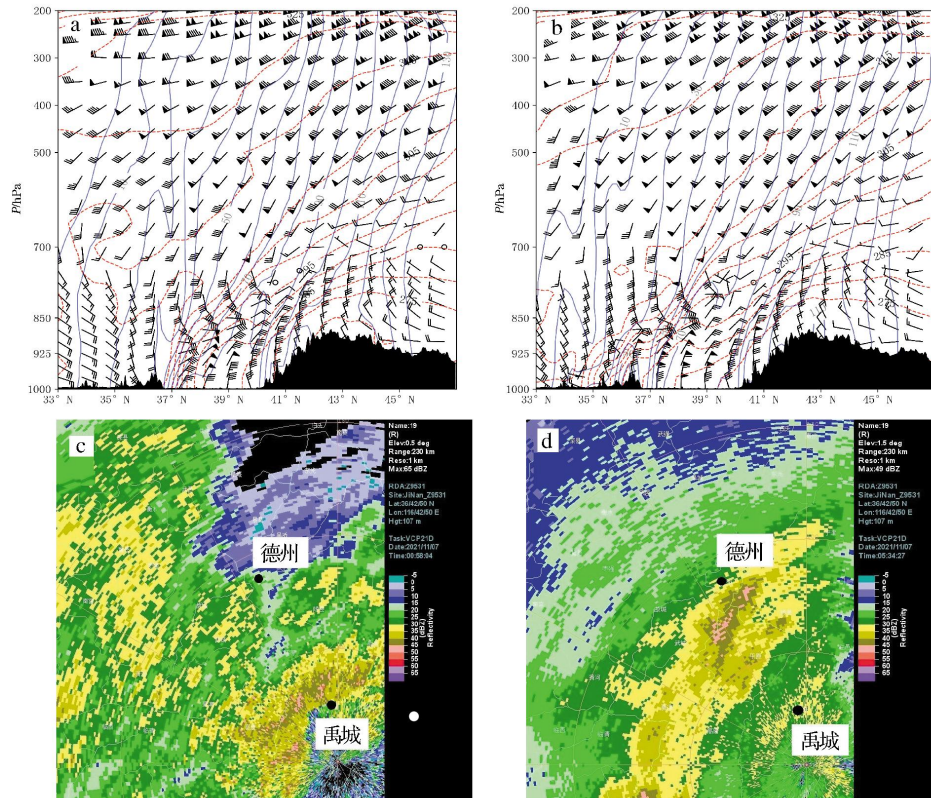


图 4 7 日 01 时(a)、05 时(b)沿德州禹城相当位温(红色等值线, 单位: K)、地转绝对角动量(蓝色等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、风场及地形(阴影)经向垂直剖面, 7 日 00:58 济南雷达 0.5° 仰角(c)、05:34 济南雷达 1.5° 仰角(d)基本反射率因子

平锋生函数, D 为变形项, β 为膨胀轴与等熵线的夹角, δ 为散度^[30]。逐小时分析各层温度平流、锋生函数和变压风可知, 强冷空气扰动由内蒙古高原经燕山山脉进入华北, 925 hPa 强冷平流沿太行山脉东侧向山东移动, 近地面冷平流由东北地区经渤海湾向华北移动。6 日 23 时 925 hPa 和近地面冷平流在山东与河北交界处汇合增强, 德州出现 8 级阵风。7 日 02 时, 冷锋继续南压, 925 hPa 冷平流中心位于山东、河南和河北三省交界处, 强度 $> -11 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。冷平流前部有 $> 14 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强锋生带, 气压局地变化导致的变压风在鲁西最大, 为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6a)。7 日 15 时, 冷锋移至山东半岛地区, 冷平流略有减弱, 为 $-8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, 锋生函数强度为 $7 \times 10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 半岛沿海变压风为 $12 \sim 14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 日照等站点出现了 9 级以上阵风 (图 6b)。

冷锋南压时低层锋区超前于高层, 低层为冷平流, 中、高层为暖平流, 700~500 hPa 山东上空处于槽前, 为正涡度平流。根据 ω 方程, 涡度平流随高度增加为上升运动、随高度减小为下沉运动; 冷平流为下沉运动、暖平流为上升运动, 形成边界层以上为

上升运动、以下为下沉运动的垂向分布。配合聊城和日照上空的垂直上升运动垂向分布分析, 7 日 02 时聊城 925 hPa 下沉运动强度 $> 3 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 07 时下沉运动增强至 $7 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 下沉中心高度在 850 hPa。7 日 15—16 时, 日照近地面下沉运动达 $12 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$, 冷平流造成的下沉气流核高度低, 将势能转换为动能, 同时将动量快速传送到地面, 增强了大风的极端性。

4.3 水平动能和地转偏差

水平动能公式为 $E = \frac{u^2 + v^2}{2}$, 其大小与水平风速和地转偏差相关, 水平风速、地转偏差越大水平动能越大^[31]。位涡在等压面上公式为 $V_p = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right)$, 冷空气内静力稳定度较大, 前端会产生高位涡, 所以也可在等压面中使用位涡分析冷空气活动。

沿聊城 (115.97°E , 36.42°N) 和日照 (119.55°E , 35.47°N) 对 V_p 、 E 、垂直风场以及地转偏差 (非地转风) 进行经向垂直剖面分析, 6 日 08 时, 500 hPa 冷

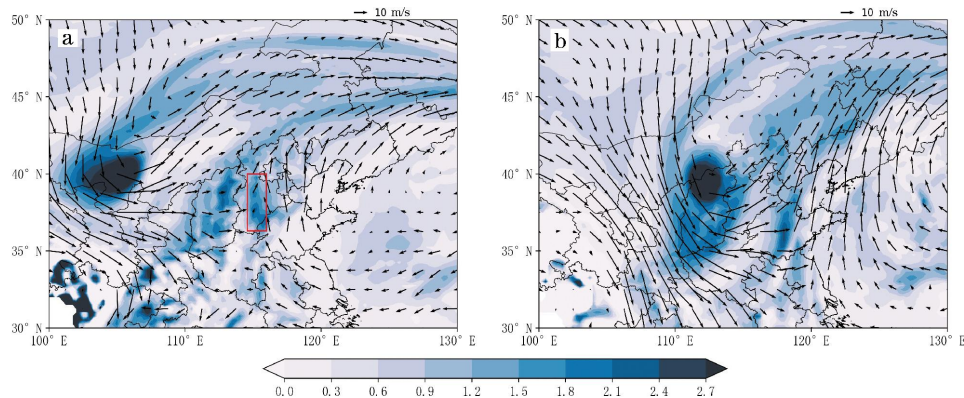


图 5 7 日 02 时(a)、15 时(b)295 K 等熵面位涡(填色, 单位: PVU)和风场分布
(图 a 红色方形为边界层强冷空气扰动南压路径)

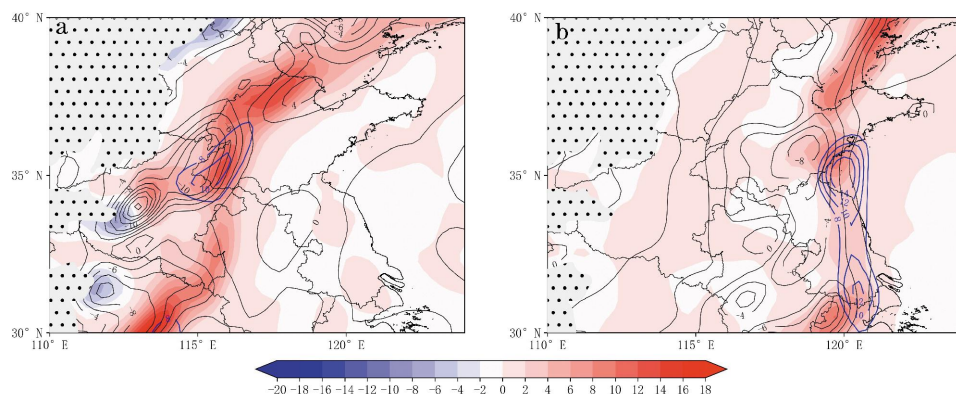


图 6 7 日 02 时(a)、15 时(b)925 hPa 温度平流(黑色等值线, 单位: $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)、锋生函数(填色, 单位: $10^{-9} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)、变压风(蓝色等值线, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和地形(阴影)分布

涡位于新疆东北部,内蒙古、东北和华北地区上空为西南气流,925~700 hPa 切变线及地面冷锋位置在42°N 附近,对应3.5 PVU 的高位涡柱。强冷平流破坏热成风平衡,形成锋面次级环流,上升支在42°N 附近,下沉支在47°N 附近,此时华北平原从地面到500 hPa 的 V_p 、 E 和风速较小。次级环流的斜升气流中有 E 高能舌,对应700~300 hPa 的 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的南风地转偏差;冷锋后有 $>100 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 的 E 大值区,对应 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的北风地转偏差。随着冷空气南压,高、低层地转偏差变化不同,700 hPa 以上中高层受西风加速影响,稳定为偏南风地转偏差。低层地转偏差变化复杂,西风减速和气压局地变化均有影响。6日23时,冷空气经燕山山脉下滑至华北平原时,地形造成下沉运动增大,势能向动能转换, E 和风速明显增强。同时,为维持热成风平衡,中高层西风加速,产生南风地转偏差,低层西风减速,产生北风地转偏差。冷锋前端逆温强,形成高位涡柱。6日23时,内蒙古高原下滑的冷空气与近地面从渤海湾来的冷空气汇合增强,高位涡柱由4.0 PVU 跃增到7.0 PVU 以上。由于低层冷平流增强,变压幅度增大,气压局地变化造成的地转偏差影响增强。低层锋区暖界面南部为南风地转偏差,北部为正变压造成的北风地转偏差,形成地转偏差辐合,锋区冷界面为地转偏差辐散。

7日02时,聊城垂直剖面分布(图7a)显示,低层锋区由于地形强迫和冷平流汇合增强,华北平原41°~35°N 形成接近闭合的锋面次级环流,上升支在

36°N 附近,暖界面为地转偏差辐合,冷界面为地转偏差辐散。环流内边界层有 $300 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 的 E 大值区,由于锋后较强偏北气流和下沉运动, E 将向南、向下输送。7日15时,日照垂直剖面分布(图7b)显示,高位涡柱强度减弱至2.5~3.0 PVU,锋面次级环流闭合,上升支位于34°N,下沉支位于40°N。斜升气流中有高能舌,环流内边界层有 $150 \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ 的 E 大值区,锋区暖界面为地转偏差辐合,冷界面为地转偏差辐散。

5 结论和讨论

(1)此次过程是初冬时节一次低槽东移发展造成的寒潮天气,北支槽在河套地区发展为冷涡,低空有西北风与东南风的强切变,地面东北和西北地区有高压坝,高低空配合形成“阻挡”形势,强冷空气和切变线南压造成极端雨雪和大风天气。

(2)过程水汽条件有较强的极端性,水汽通量散度远强于气候平均态。降雨期间水汽来源于东南海上暖湿气流,925 hPa 水汽通量辐合大值区与降雨区域配合较好。降雪期间水汽由西南暖湿急流提供,700 hPa 水汽通量辐合大值区对降雪区域的指示意义较好。

(3)冷锋过境时,边界层条件对称不稳定配合锋面的抬升运动触发对流,降雪时高架对流是在条件稳定和条件对称稳定的中性条件下,由锋生环流的上升支强迫产生,对流的出现增强了降水的极端性。

(4)等熵位涡和温度平流分析得出强冷空气扰

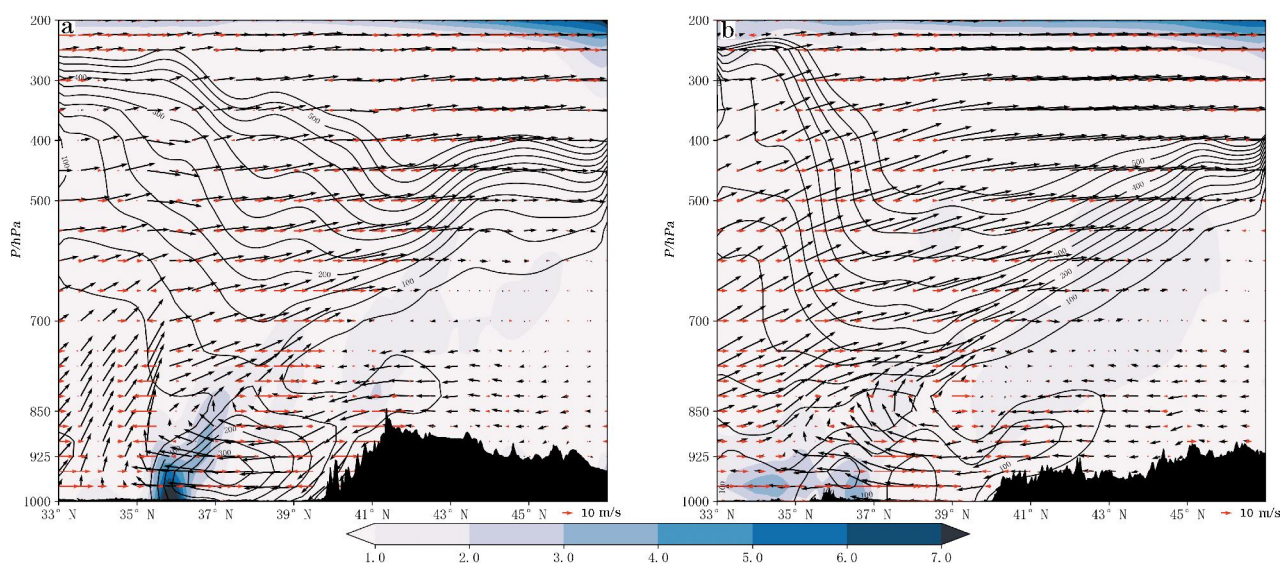


图7 7日02时沿聊城(a)、15时沿日照(b)经向位涡(填色,单位:PVU)、水平动能(等值线,单位: $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$)、垂直风场(黑色矢量箭头, v ,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; $\omega\times 5$,单位: $10^{-3} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$)、地转偏差(红色矢量箭头, v_a ,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)及地形(阴影)垂直剖面分布

动从内蒙古高原经燕山山脉下滑至华北平原,与从东北经渤海湾向华北移动的近地面冷空气汇合增强。强冷空气扰动南压,增强了大气的斜压性和低层锋生,强冷平流导致地面出现 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上的变压风。

(5)冷平流破坏了热成风平衡,700 hPa 以上维持南风地转偏差,低层地转偏差变化复杂,西风减速和气压局地变化均有较大影响。由于地形强迫,华北地区 700 hPa 以下产生非地转次级环流,锋区暖界面为地转偏差辐合,冷界面为地转偏差辐散,次级环流内边界层有地转偏差和水平动能大值区,偏北气流和下沉运动引导水平动能向南、向下输送,增强了大风的极端性。

致谢: 感谢中国科学院海洋研究所郑建副研究员对本文撰写给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 杨成芳,周雪松,李静,等.基于构成要素的一次切变线暴雪天气分析[J].高原气象,2015,34(5):1402-1413.
- [2] 肖贻青,肖湘卉,娄盼星,等.陕西省两次暴雪过程的对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(2):27-35.
- [3] 胡顺起,曹张弛,陈滔.山东省南部一次极端特大暴雪过程诊断分析[J].高原气象,2017,36(4):984-992.
- [4] 周芳,王晓东,毛连海.一次高空急流背景下江西暴雪过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(1):36-45.
- [5] 徐娟娟,郝丽,刘慧慧敏,等.2018年1月陕西区域性暴雪过程诊断[J].干旱气象,2020,38(1):117-125.
- [6] 胡玲,刘锦,东高红,等.天津城区暴雪的环流形势与雷达特征分析[J].气象与环境科学,2020,43(1):34-42.
- [7] 杜佳,杨成芳,戴翼,等.北京地区4月一次罕见暴雪的形成机制分析[J].气象,2019,45(10):1363-1374.
- [8] 冯丽莎,宋攀,郑飞,等.2016年初冬河南区域暴雪过程诊断分析[J].大气科学,2020,44(1):13-26.
- [9] 朱蕾,王清平,王勇,等.乌鲁木齐两次极端暴雪天气过程对比分析[J].暴雨灾害,2020,39(3):225-233.
- [10] 黄晓璐,李一平,林弘杰,等.2020年初内蒙古一次暴雪天气过程的成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(6):18-25.
- [11] 孙继松,戴建华,何立富,等.强对流天气预报的基本原理与技术方法[M].北京:气象出版社,2014:23-25.
- [12] 刘洲洋,俞小鼎,王秀明,等.中国泛华北地区冷季高架对流特征气候统计分析[J].气象,2018,44(2):258-267.
- [13] 俞小鼎,王秀明,李万莉,等.雷暴与强对流临近预报[M].北京:气象出版社,2020:94-95.
- [14] COLMAN B R.Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE.Part I :a climatology [J].Mon Wea Rev,1990,118(5):1103-1121.
- [15] COLMAN B R.Thunderstorms above frontal surfaces in environments without positive CAPE.Part II :organization and instability mechanisms [J].Mon Wea Rev,1990,118(5):1123-1144.
- [16] 章丽娜,周小刚,夏扬.关于业务上应用条件对称不稳定相关问题的讨论[J].气象学报,2018,76(5):824-832.
- [17] 朱男男,刘一玮,孙密娜.一次罕见黄渤海大风天气成因分析[J].气象科技,2017,45(6):1070-1076.
- [18] 王伏村,许东蓓,王宝鉴,等.河西走廊一次特强沙尘暴的热力动力特征分析[J].气象,2012,38(8):950-959.
- [19] 张文军,李健,杨庆华,等.河西走廊西部一次极端大风天气过程3次风速波动的动力条件分析[J].高原气象,2019,38(5):1082-1090.
- [20] 于波,李桑,黄富祥,等.2016年1月京津冀地区连续性寒潮事件对比分析[J].干旱气象,2019,37(6):954-963.
- [21] 丁一汇,马晓青.2004/2005年冬季强寒潮事件的等熵位涡分析[J].气象学报,2007,65(5):695-707.
- [22] 黄文彦,董伟,沈新勇,等.一次寒潮降温过程的等熵位涡和热力学分析[J].气象科学,2020,40(6):769-781.
- [23] SI D,JIANG D,LANG X, et al.Unprecedented North American snowstorm and East Asian cold wave in January 2016:Critical role of the Arctic atmospheric circulation[J].Atmospheric Science Letters,2021,22(11):1056.
- [24] 张弛,沈新勇,张玲,等.一次寒潮过程中冷堆增强的动力原因分析[J].高原气象,2021,40(2):394-402.
- [25] 徐亚钦,吴松涛,杨旺文,等.浙江省梅雨锋强降水的锋生及环流特征分析[J].大气科学,2019,43(6):1219-1232.
- [26] 查书瑶,陈潇潇,沈雨辰,等.2017年3月江苏省一次伴有对流激发的冷空气大风分析[J].沙漠与绿洲气象,2020,14(2):36-42.
- [27] 于杰,张继权,朱娟,等.正压大气动能梯度与地转偏差的关系及其对暴雨的诊断[J].气象科学,2017,37(2):265-271.
- [28] ZUO Qunjie,GAO Shouting, LV Daren.Eddy kinetic energy study of the snowstorm over southern China in January 2008 [J].Advances in Atmospheric Sciences,2014,31(4):972-984.
- [29] 杨舒楠,端义宏.台风温比亚(1818)降水及环境场极端性分析[J].应用气象学报,2020,31(3):290-302.
- [30] BLUESTEIN H B.Synoptic -dynamic meteorology in midlatitudes Vol H [J].Observation & Theory of Weather Systems,1993:248-253.
- [31] 冉令坤,李舒文,周玉淑,等.2021年河南“7·20”极端暴雨动、热力和水汽特征观测分析[J].大气科学,2021,45(6):1366-1383.

Causes of an Extremely Precipitation and Gale in Shandong Province in Early Winter

LI Bo¹, WANG Wei¹, LIU Fei², JING Anhua¹, GUO Wenming³

(1.Heze Meteorological Bureau, Heze 274000, China;

2.No.91937 Army of PLA, Zhoushan 316000, China;

3.No.91876 Army of PLA, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract Based on conventional ground and upper air observation data, radar data, and ERA5 reanalysis data, this study analyzes the causes of an extreme precipitation and gale in early winter in Shandong. The results reveal that the eastward movement of a low trough, the southward press of cold air, and the “blocking” situation formed by the low altitude shear line in coordination with the high-pressure dam in the northeast and northwest of the ground contribute to the occurrence of extreme precipitation. The water vapor condition in this process is characterized by extreme values, with water vapor flux convergence much stronger than the climate mean state. The moisture flux convergence regions at 925 hPa and 700 hPa correspond well with rain and snow regions, respectively. Convection is triggered by the asymmetric instability of cold front transit conditions, followed by elevated convection forced by upward-ramus circulation in the inversion layer behind the cold front. The strong cold air disturbance slips from the Inner Mongolia Plateau to the North China Plain, then converges with the cold advection and intensifies, generating stronger variable pressure wind and resulting in the conversion of potential energy to kinetic energy and momentum down. Topographic forcing enhances subsidence movement and the formation of frontal secondary circulation in the lower layer of north China. The warm interface of the front region is the convergence of geostrophic deviation, and the cold interface is the divergence of geostrophic deviation. The circulation is characterized by large values of horizontal kinetic energy and geostrophic deviation, and the northerly airflow and descending movement transport the horizontal kinetic energy southward and downward, leading to extreme surface winds.

Key words snowstorm; cold wave gale; elevated convection; temperature advection; horizontal kinetic energy; geostrophic deviation