

龚佃利, 庞华基, 王俊, 等. 2006年4月28日山东强飚线过程中尺度结构和动力机制分析[J]. 海洋气象学报, 2019, 39(3): 64-73.

GONG Dianli, PANG Huaji, WANG Jun, et al. Analysis of mesoscale structure and dynamic mechanism for a severe squall line process in Shandong Province on 28 April 2006[J]. Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(3): 64-73. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.008. (in Chinese)

2006年4月28日山东强飚线过程中尺度结构和动力机制分析

龚佃利¹, 庞华基², 王俊¹, 余兴³

(1. 山东省人民政府人工影响天气办公室, 山东 济南 250031; 2. 青岛市气象局, 山东 青岛 266003; 3. 陕西省气象科学研究所, 陕西 西安 710015)

摘要: 利用探空、地面自动气象站、多普勒天气雷达和NCEP/NCAR再分析等资料, 对2006年4月28日影响山东大部的强飚线过程的中尺度结构进行了诊断分析。此次强飚线是由东北冷涡横槽沿西北气流下滑激发对流发展形成的, 冷涡横槽底部为后倾的干冷下沉气流区, 干空气侵入有利于位势不稳定能量的储存。冷涡横槽在300 hPa最为强盛, 并连接横槽前后南北两支急流, 对流层顶折叠特征明显; 高空横槽区的地转调整运动引发中尺度重力波, 促进了高空急流动量向对流层中下部的传输, 加剧了地面大风灾害。风暴发生区具有明显的等熵面倾斜、对流不稳定和垂直风切变, 具有倾斜涡度剧烈发展的条件。风暴发生区中低层散度场、垂直速度场和地面风压扰动场均具有典型中尺度重力波的结构特征, 风暴和中尺度重力波相互耦合促进, 是强飚线发展维持的重要动力机制。

关键词: 飚线; 冷涡横槽; 高空急流; 中尺度重力波; 倾斜涡度发展

中图分类号: P458.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)03-0064-10

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.03.008

Analysis of mesoscale structure and dynamic mechanism for a severe squall line process in Shandong Province on 28 April 2006

GONG Dianli¹, PANG Huaji², WANG Jun¹, YU Xing³

(1. Weather Modification Office of Shandong Province, Jinan 250031, China; 2. Qingdao Meteorological Bureau, Qingdao 266003, China; 3. Shaanxi Institute of Meteorological Sciences, Xi'an 710015, China)

Abstract Using data of sounding, surface automatic weather stations, and doppler radar, as well as NCEP/NCAR reanalysis data, a severe squall line process that affected the greater part of Shandong Province on 28 April 2006 is diagnosed and analyzed. The severe squall line was generated by convections triggered by a moving transversal trough of a northeast vortex. The backward-tilting dry and cold downdraft dominated the bottom layer of the transversal trough, and the dry intrusion was favorable for accumulation of unstable energy. The transversal trough was the strongest at 300 hPa, connecting southern and northern upper jet streams with obvious tropopause folding; the geostrophic adjustment of the upper transversal trough induced mesoscale gravity waves (MGWs), which promoted the downward transmission of upper momentum, acting as an important dynamic source for severe surface wind. The storm area had characteristic of slantwise isentropic surface, convective instability, and vertical wind shear, which satisfied the key condition of slantwise vorticity development. In the mature period of the

收稿日期: 2018-12-22; 修订日期: 2019-04-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC150790X)

作者简介: 龚佃利, 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要从事中尺度气象和人工影响天气研究, shgongdl@163.com。

squall line, the divergence, vertical velocity, and the perturbations of surface wind and pressure showed the characteristics of typical MGWs in the lower and middle layer of troposphere. The storm and MGWs forms a self-developed system, and it is a key dynamic mechanism to enhance the squall line.

Key words squall line; transversal trough of cold vortex; upper-level jet stream; mesoscale gravity wave; slantwise vorticity development

引言

飏线是一种带(线)状的中尺度深厚对流系统,水平尺度通常为几百千米,典型生命史6~12 h,常带来灾害性的雷雨大风或局地强降水,有时伴有冰雹和龙卷,是一种发展快、破坏力强的天气系统。东北冷涡西侧横槽的转竖过程往往给华北南部带来持续性强对流灾害天气,由于对其中的中尺度特征和动力机制认识不足,目前对其引发的灾害天气发生的时间、地点和强度尚存在诸多预报难点^[1-4]。飏线等强对流天气常伴有重力波活动,在适当大气条件下,重力波可触发积云对流的产生,而强对流也可激发重力波,两者之间的相互作用一般可由WAVE-CISK理论进行解释^[5-6]。RUPPERT and BOSART^[7]利用地面气象站、探空、天气雷达等资料,详细分析了一次大振幅中尺度重力波的演变过程及其与中尺度对流系统的相互作用。李驰钦等^[8]应用ERA Interim再分析资料、多套卫星反演资料和天气研究及预报模式(WRF)数值模拟资料,识别分析了青藏高原上空一次重力波过程以及重力波对青藏高原西部降雪的影响。孙艳辉等^[9]利用实测和数值模拟数据,研究了辽宁一次暴雪过程中的中尺度重力波与基本气流的相互作用,以及重力波活动对暴雪和大风天气的影响。上述研究利用实测资料识别分析灾害天气过程中的中尺度重力波现象,加深了对中尺度重力波基本特征、发生机制、影响作用等的认识。

2006年4月28日,山东自鲁西北到鲁南地区出现一次春季强飏线过程,造成严重的人员和财产损失。多位研究者从不同角度对该过程灾害特点和可能的发生机制进行了分析研究。朱君鉴等^[10]通过对连云港多普勒天气雷达(CINRAD/SA)产品资料的分析,认为弓状回波后部强下沉入流与中气旋右侧动量的同向叠加,使地面风速加大,是造成大风灾害的直接原因。徐小红等^[11]利用美国国家海洋大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)卫星AVHRR资料,对该强飏线的云顶结构和微物理特征进行了反演分析。朱

磊磊等^[12]利用小波分析方法对WRF数值模式模拟结果进行连续小波变换,分析识别该过程有明显的中尺度重力波结构。此文拟利用探空、地面自动气象站、NCEP/NCAR再分析($1^\circ \times 1^\circ$)和多普勒天气雷达等资料,通过客观分析方法,揭示此次飏线系统的中尺度结构及重力波特征,探讨飏线发展的动力机制,总结给出风暴中对流-重力波结构示意图,以期对山东致灾强飏线天气的发生演变机理有更深入的认识,指导做好飏线天气的预警预报工作。

1 过程简介

2006年4月28日午后到傍晚,聊城、济南、泰安、济宁、枣庄、临沂等地先后出现雷雨大风和冰雹天气(图1)。位于鲁南的临沂市及周边费县、苍山、郯城、临沭等地瞬时极大风速超过 $24 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,苍山极大风速达到 $28.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,局地冰雹最大直径达2~3 cm。这次罕见的春季飏线过程,发展快、影响范围广、持续时间长,山东全省灾害损失严重;据民政部门调查,此次灾害造成17人死亡,直接经济损

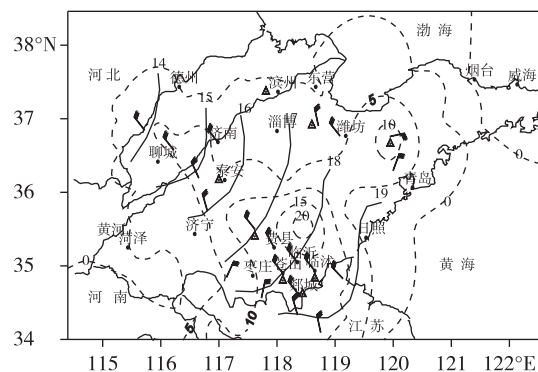


图1 2006年4月28日强飏线移动路径和主要天气现象(粗实线为风暴前沿逐时位置,线顶端数字为北京时间;虚线为过程降雨量,单位:mm;三角符号 Δ 表示出现冰雹灾害)

Fig.1 Track and main weather phenomenon of the severe squall line on 28 April 2006 (solid curve for hourly position of the outflow boundary, number on the top of solid curve for Beijing time; dashed curve for observed precipitation of the process, units: mm; hail-falling site is marked with triangular symbol Δ)

失 16.5 亿元。受发端于鲁北地区另一对流系统的影响,鲁北和山东半岛东部的滨州、潍坊、青岛等地也出现冰雹、大风天气,但强度明显弱于前者。此文主要对影响鲁西北到鲁南地区的强飚线过程进行分析。

2 环流形势分析

利用 MM5 的 regrid 和 rawins 模块,以 2006 年 4 月 28 日 08 时(北京时,下同)至 20 时每 6 h 间隔的 NCEP/NCAR 再分析资料为背景场,同化同期的探空、地面观测资料,插值形成格距为 54 km 的格点化客观分析资料,用于分析飚线发生的环流形势和物理量场。图 2 给出了 4 月 28 日 08 时 500 hPa 和 850 hPa 形势场。可见华北地区中低空为东北冷涡西南侧的弱槽区,山东位于槽前;槽后伴有横槽风

向切变,有明显正涡度平流向槽区补充。华北中部地面存在东北—西南向冷锋(图略)。由 4 月 28 日 14 时对流有效位能(CAPE)和 925 hPa 风场(图 3a)可知,地面冷锋已移到鲁西地区,对流系统在河北境内生成后侵入鲁西北,呈现出明显的气旋性环流风场结构;锋前暖区为 CAPE 大值区,中心位于安徽北部和鲁南地区,鲁中山区北部到鲁南地区 CAPE 值 $>1\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,数值较 08 时增加约 $1\,000\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。此时的下沉对流有效位能(DCAPE)分布(图 3b)显示,风暴未来影响区 DCAPE 数值介于 $700\sim 1\,200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,为风暴下沉运动积累一定的能量。可见,此次强飚线发展的天气条件为横槽沿西北气流向东南方向移动过程中,低层冷锋激发对流产生,不稳定能量使得飚线系统加强;强飚线向东南方向移动,造成鲁南强烈大风和冰雹灾害。

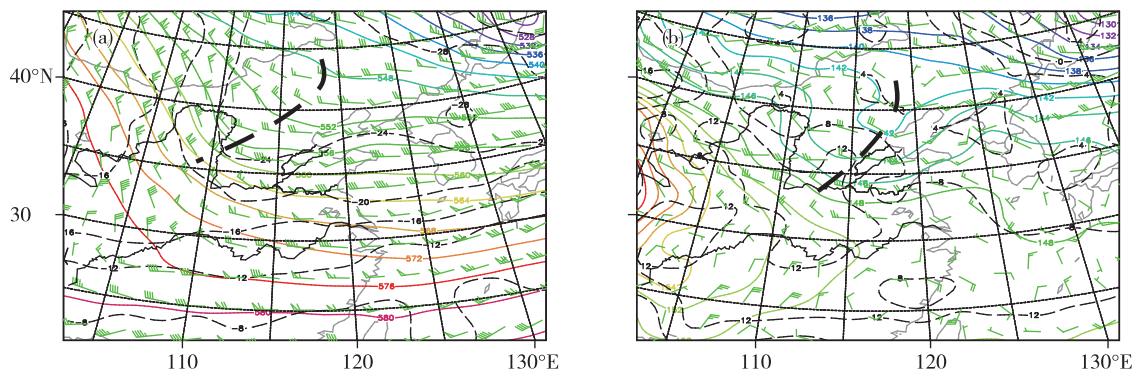


图 2 2006 年 4 月 28 日 08 时 500 hPa(a)、850 hPa(b)形势场(实线为位势高度,单位:dagpm;虚线为温度,单位:℃)

Fig.2 Synoptic situation (solid line for geopotential height, units: dagpm; dashed line for temperature, units: °C) at 500 hPa (a) and 850 hPa (b) at 08:00 BST on 28 April 2006

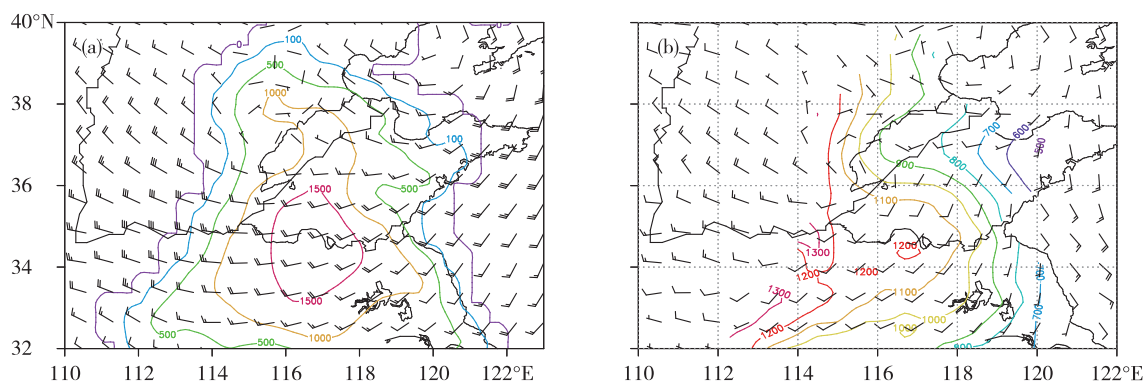


图 3 2006 年 4 月 28 日 14 时 CAPE (实线,单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和 925 hPa 风场 (a)、DCAPE (实线,单位: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和地面风场 (b)

Fig.3 Distribution of CAPE (solid line, units: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) and wind at 925 hPa (a) & DCAPE (solid line, units: $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$) and wind at surface (b) at 14:00 BST on 28 April 2006

3 中尺度结构分析

3.1 垂直动力结构

利用 54 km 格距格点化客观分析资料,分析风暴中尺度动力结构及发生的背景场条件。图 4 给出了 4 月 28 日 14 时、20 时 500 hPa、925 hPa 形势场和散度场。可见,28 日 14 时风暴发展初期(图 4a、b),华北南部 925 hPa 高度场表现为“一槽一脊”特征,槽区为辐合中心,脊区为辐散中心,其上空对应 500 hPa 则为辐散、辐合中心,即槽区低层辐合、中层辐散,而脊区中层辐合、低层辐散,如此中低层垂直环流结构为风暴发展提供了有利的动力条件。

此时,影响鲁西北地区的风暴主体(日本 MTSat 卫星监测云顶辐射亮温 TBB 值 $<-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)位于 500 hPa 槽区,对应 925 hPa 为槽前脊后区域,与地面气旋性风场相对应。20 时(图 4c、d),风暴逐渐自鲁南移出山东,山东大部自低层到高层逐渐被偏北风控制,为一致的辐散场;低层暖区辐合区呈纬向带状控制鲁南、苏北地区,风暴与该辐合区相对应;而促使风暴发展的低层辐合、中层辐散垂直环流结构消失,风暴逐渐减弱。对比图 2 可见,冷涡低槽区的风场、气压场具有明显的中尺度结构特征,并在风暴发展初期发挥重要的动力组织作用。

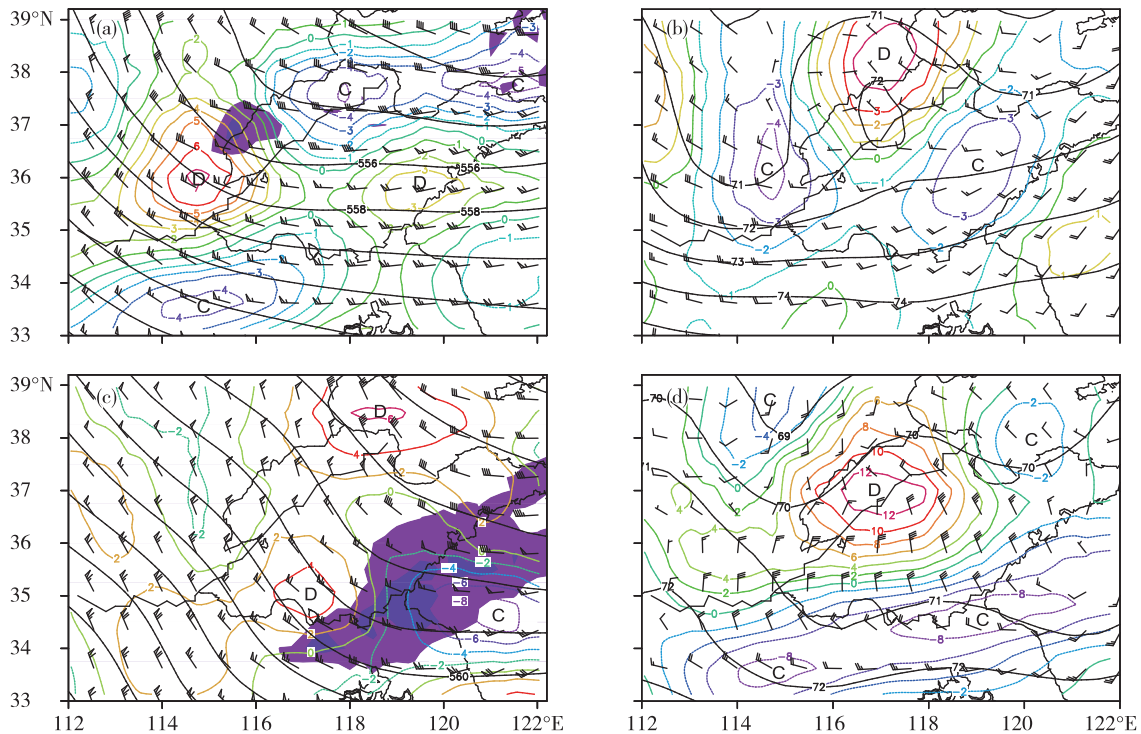


图 4 风暴发展初期、后期中低层环流形势和散度场(a、b 分别为 2006 年 4 月 28 日 14 时 500 hPa、925 hPa 高度场和散度场,c、d 分别为 4 月 28 日 20 时 500 hPa、925 hPa 高度场和散度场;黑实线代表高度场,单位: dagpm;彩色线代表散度场,单位: 10^{-5} s^{-1} ;C、D 分别表示辐合、辐散中心;填色区为 TBB 值 $<-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 风暴中心云区)

Fig.4 Circulation situation and divergence in the early and later period of the storm in the middle and lower layer (Fig.4a/c and Fig.4b/d for geopotential height and divergence at 500 hPa and 925 hPa at 14:00/20:00 BST on 28 April 2006; black solid line for geopotential height, units: dagpm; colored line for divergence, units: 10^{-5} s^{-1} ; C/D for convergence/divergence center; colored area for cloud field in the storm center with TBB lower than $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

3.2 地面风压场结构及波动特征

对流风暴和中尺度重力波过境可引起地面气压、风速、相对湿度的剧烈波动^[6-7]。图 5a 给出了 4 月 28 日 18 时连云港 CINRAD/SA 雷达观测的组合反射率因子和地面风场、风压扰动场分析结果。地面风压扰动量^[13]($p'u'$)由地面气压、风速 1 h 变化数值相乘得到,其大小表征了地面风场、气压波动

的整体强度。18 时,强风暴系统达到强盛阶段,雷达回波表现为强弓状回波特征,并伴有多个中气旋活动^[10];弓状回波前沿抵达临沂市,并在此后的近 1 h 内造成郯城、临沭等地强风、冰雹等灾害;临沂、郯城等气象站地面自记气压曲线显示风暴影响前后,地面气压出现下降、陡升、再下降的波动;临沂站最高和最低的气压差值达到 9.8 hPa,同时气温

剧降 $10.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 相对湿度波动超过 40% 。由图 5a 可见, 从苏北、鲁南到鲁中山区西北部, $p'u'$ 呈现低值(波谷)—高值(波峰)—低值(波谷)相间分布, 大风区与 $p'u'$ 高值区对应, 风场辐合(白虚线)、辐散(白实线)中心线落后波谷、波峰约 $\pi/2$ 位相, 符合简单非倾斜结构重力波系统的特征^[13]。4月28日19时(图5b), 弓状回波中心(大于 45 dBz)呈前后两条平行的带状, 中间为回波强度低值区, 地面辐合中心线大致与该回波强度低值区对应; $p'u'$ 波动结构仍保持前一时次的特征。4月28日20时(图

5c), 地面辐合中心线移速加快, 大致与风暴前沿的出流边界相对应, 地面辐散中心线基本与 $p'u'$ 高值区对应, 表明重力波结构趋于解体, 风暴呈减弱趋势。可见, 本次飚线过程的地面风压场具有明显的波动特征; 依据 $p'u'$ 高低中心和风场辐合、辐散中心线的间距、移速, 估计弓状回波强盛阶段的中尺度重力波水平尺度约 250 km 、移速约 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$; 弓状回波的移动与波动传播方向基本一致, 风暴前部的中尺度低压与高能舌、波谷对应, 对系统未来的移动和强天气的落区预报具有很好的指示作用。

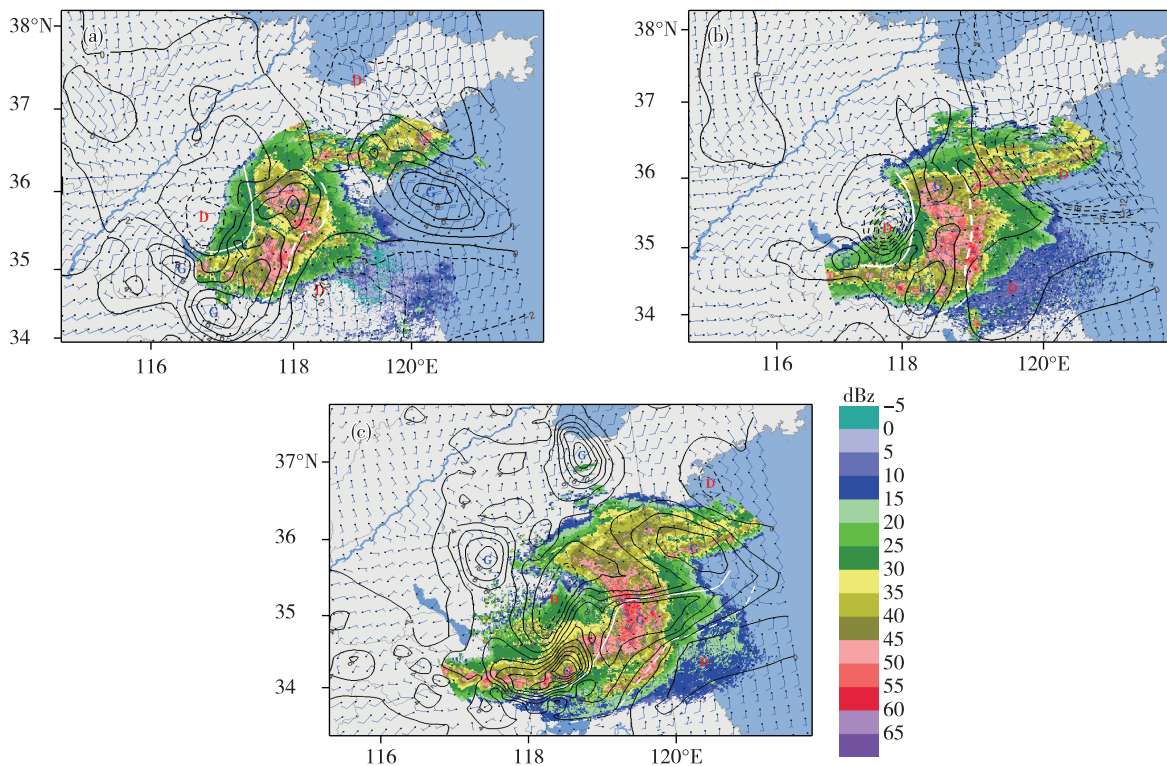


图5 2006年4月28日18时(a)、19时(b)、20时(c)雷达组合反射率因子和地面风场、风压扰动场($p'u'$ 线, 单位: $\text{hPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; 白虚线为风场辐合中心线; 白实线为风场辐散中心线)

Fig.5 Composite reflectivity, wind at surface, and pressure fluctuation and wind perturbation $p'u'$ (black line, units: $\text{hPa}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) at 18:00 BST (a), 19:00 BST (b), and 20:00 BST (c) on 28 April 2006 (white dashed/solid line for convergence/divergence center line in the wind field)

4 飚线发展机制分析

4.1 高空急流触发中尺度重力波

由上述分析可见, 风暴发生过程中, 地面具有明显的中尺度重力波动特征。那么, 重力波是如何被激发的? 与飚线的发展又有怎样的关系呢? KOCH and O'HANDLEY^[13]总结了美国中东部有利于重力波发展的环流模型(KO97), 认为产生中尺度重力波的共同天气条件应存在低层锋面逆温和高空急流出口的强非地转运动, 地转调整和切变不稳

定是中尺度重力波产生的重要波源机制。非线性平衡方程 NBE (Nonlinear Balance Equation) 可以用于对运动不平衡的定量诊断, 其余差项 (ΔNBE) 表达式如下^[6]:

$$\Delta NBE = -\nabla^2\varphi + 2J(u, v) + f\zeta - \beta u \quad (1)$$

方程右侧4项分别为 Laplacian 位势高度、风的 Jacobian 算子、涡度项和 β 效应项。如果非线性平衡方程不满足, 即 ΔNBE 为非零值时, 表明气流出现在不平衡。强烈辐散的高空急流出口区, ΔNBE 为一个非零值 ($\sim 10^{-8}\text{ s}^{-2}$)。

图6为4月28日08时300 hPa高空急流与 ΔNBE 诊断场。图6a显示,300 hPa横槽呈东北—西南向,其后部有偏北急流,急流中心风速超过 $50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并有穿过等高线指向高压的非地转运动;横槽区为小于 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低风速区;横槽前为偏西急流,急流中心风速超过 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,并有穿过等高线指向低压的非地转运动。图6b显示, ΔNBE 大值区

(大于 $4 \times 10^{-8} \text{ s}^{-2}$)位于北支急流左前方的横槽区,该区域等高线疏散,风速梯度最大。可见,北支急流穿过横槽区转入南支急流时,气块存在由减速到加速的调整,大气质量和动量出现失衡,处于强的非平衡运动状态,为中尺度重力波的产生提供了有利的环流条件。

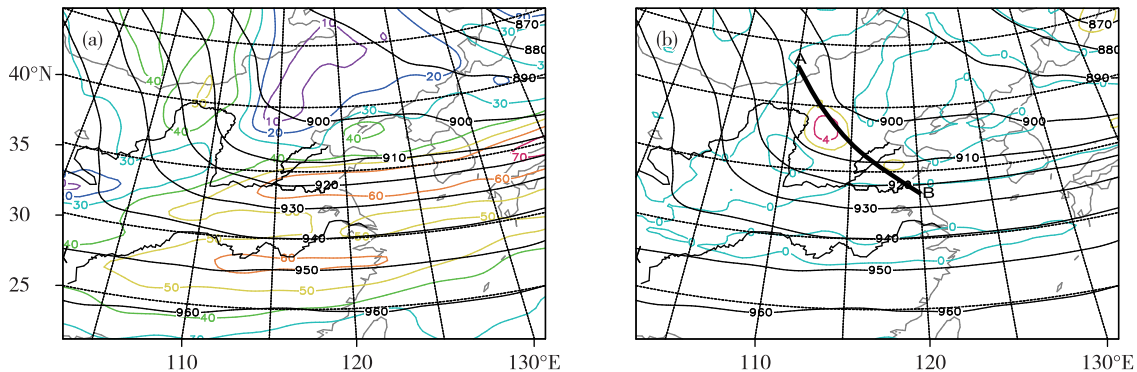


图6 2006年4月28日08时300 hPa高空急流诊断场(a.风速:彩色线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; b. ΔNBE :彩色线,单位: 10^{-8} s^{-2} ; 细黑实线为位势高度,单位:dagpm;粗黑实线AB:沿风暴移动路径的剖面)

Fig.6 Diagnosis of upper-level jet stream at 300 hPa at 08:00 BST on 28 April 2006 (a. colored line for wind velocity, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; b. colored line for nonlinear balance equation— ΔNBE , units: 10^{-8} s^{-2} ; black thin solid line for geopotential height, units: dagpm; black thick solid line AB in Fig.6b for the cross section along the transversal trough and storm track)

由东北冷涡横槽引发的华北强飚线过程大多存在高空急流。李伟和易帆^[14]利用探空资料计算重力波能量,分析发现重力波能量与急流切变存在明显的对应关系。WEI and ZHANG^[15]利用WRF模式研究了湿过程和斜压性在中尺度重力波产生和传播中的作用,分析了湿斜压急流-锋系统的中尺度重力波特征和波源机制。本次过程中冷涡横槽作为连接南北两支急流的过渡区,易出现气流不平衡并引发地转调整运动,从而激发中尺度重力波,这与KO97模型及相关研究^[15-16]揭示的重力波发生动力机制是一致的,只是KO97模型针对的是经向度较大的西风槽,由于槽前高空急流穿过高度场拐点轴时,因地转调整而激发重力波动。

4.2 中尺度重力波对飚线的组织作用

图7a给出了4月28日08时沿风暴移动路径(图6b中AB线段)的垂直速度、相对湿度剖面图。可见,自底层到高层,高空横槽呈后倾状,槽前为倾斜上升运动区,槽后为倾斜下沉运动区;边界层和中高层上升区相对湿度多大于80%,而下沉区的相对湿度多小于80%(700 hPa以下小于40%);最大下沉、上升速度中心位于850~500 hPa。由同时刻散度场剖面(图7b)看,300 hPa横槽区对应强辐合

中心,并倾斜向下伸展到700 hPa横槽前鲁西北(37°N,116°E)附近;该辐合层以下850~500 hPa出现辐散,低层又出现辐合,即横槽底的下沉气流区自高层到低层依次出现辐合—辐散—辐合相间的波动特征。WANG et al.^[17]通过数值模拟揭示,由对流层上层急流激发的重力波动,具有明显的倾斜向上和向下传播的特征。本次风暴的这种散度场垂直结构有利于高空急流动量向对流层中下部传输,也是造成地面大风灾害的一个重要动力来源。

图7c给出了4月28日14时风暴发生后的散度垂直剖面。可见,风暴发生区上空水平方向散度场呈现辐散、辐合相间分布,具有中尺度重力波基本特征。可以推断,波动的水平辐合、辐散流场结构使重力波与对流风暴耦合在一起,WAVE-CISK机制使两者共同发展加强,中尺度重力波在风暴组织过程中发挥着重要作用。

4.3 倾斜湿位涡发展机制分析

根据倾斜湿位涡发展理论^[18],在湿绝热无摩擦大气中,系统涡度的发展由大气层结稳定度、斜压性和风的垂直切变等因素所决定,对流稳定度减少,水平风垂直切变或湿斜压度的增长($\partial \theta_e / \partial z < 0$)都可引起气旋性涡度的增加,这种特征主要是由

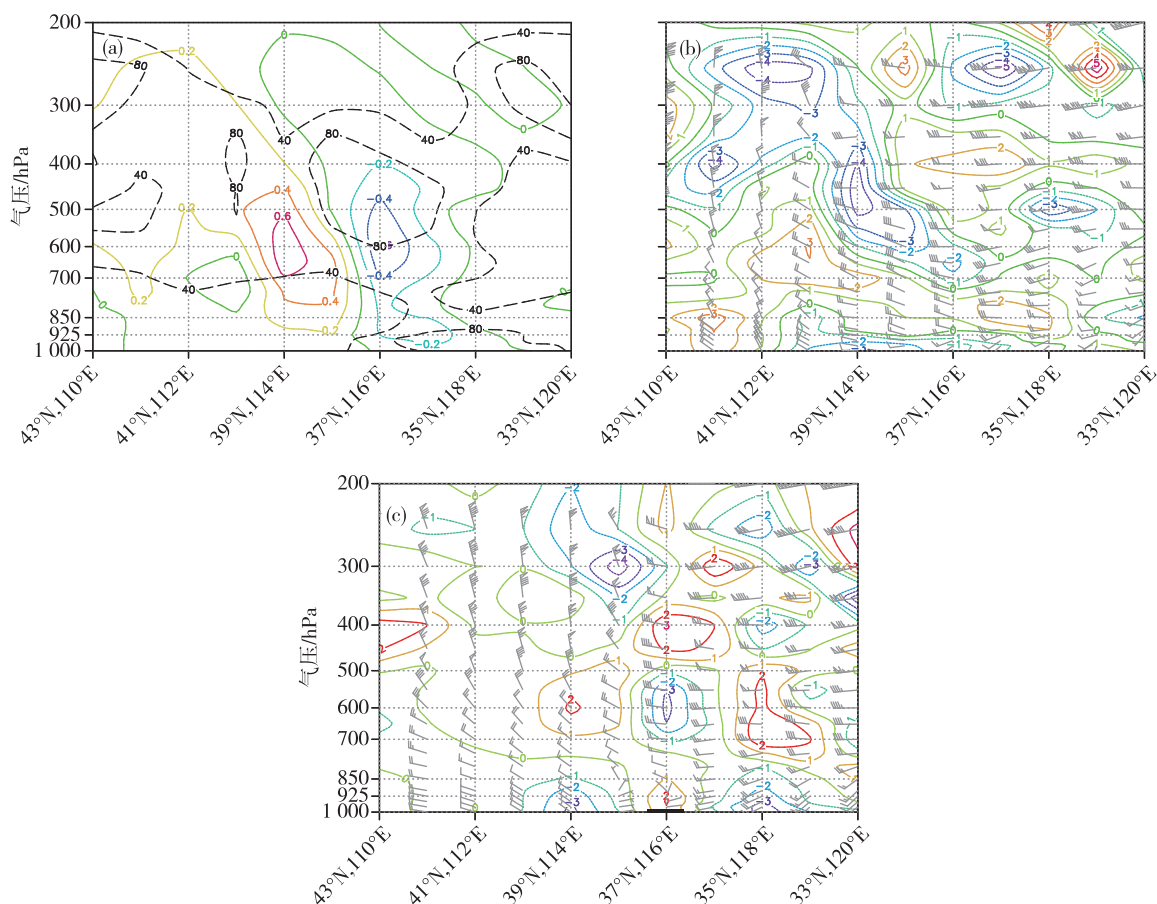


图7 2006年4月28日08时沿风暴移动路径的垂直速度(彩色等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)和相对湿度(虚线,单位:%)(a)、散度(彩色等值线,单位: 10^{-5}s^{-1})和风场(风矢; \mathbf{u}, \mathbf{v} 合成风)(b)及28日14时散度(彩色等值线,单位: 10^{-5}s^{-1})和风场(风矢; \mathbf{u}, \mathbf{v} 合成风)(c;粗黑线为风暴发生区域)剖面

Fig.7 Cross section of vertical velocity (colored isoline, units: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and relative humidity (dashed line, units: %) at 08:00 BST on 28 (a) & divergence (colored isoline, units: 10^{-5}s^{-1}) and wind field (wind barb; resultant wind field of \mathbf{u} and \mathbf{v}) at 08:00 BST on 28 (b) & divergence (colored isoline, units: 10^{-5}s^{-1}) and wind field (wind barb; resultant wind field of \mathbf{u} and \mathbf{v}) (c; thick black line for the storm area) along the storm track at 14:00 BST on 28 April 2006

于等熵面的水平倾斜造成的,倾斜越大,气旋性涡度增长越激烈。赵平和孙淑清^[19]通过对非均匀大气层结中惯性重力波不稳定发展问题的研究,指出当惯性重力波向稳定性减弱或不稳定性加强的方向移动时,波动能量增大,垂直运动加强。WEI and ZHANG^[15]研究指出,在对流不稳定条件下,即使弱对流也可使重力波波动加强,增强湿斜压性可导致强对流不稳定和湿对流的强烈发展。上述研究共同揭示了有利于对流和重力波发展的背景场热力、动力条件。

图8a给出了4月28日08时沿风暴移动路径的 ΔNBE 、相当位温 θ_e 和湿位涡(MPV)、风速剖面分析图。剖面 AB 起止点经纬度为: $A(43^\circ \text{N}, 110^\circ \text{E})$ 、 $B(33^\circ \text{N}, 120^\circ \text{E})$ 。可见,300 hPa横槽区对应 ΔNBE 最大值区,且正值区向下抵达700 hPa,表

明横槽区具有深厚的不平衡气流。横槽底及风暴发生区中低层 $\theta_e < 305 \text{ K}$,对应相对湿度大多小于40%,大气呈现干冷状态。

4月28日08时,对流层高层冷涡横槽区的MPV明显向下延伸,2 PVU等值线下伸到350 hPa以下(图8b),显示对流层顶折叠^[20]明显,即平流层的干冷空气向下侵入对流层高层,这也必然造成不平衡气流的出现。另一方面,源于冷涡横槽的干侵入运动增强了大气的位势不稳定,是风暴发生区位势不稳定能量积累的重要机制^[21]。吴志彦等^[2]、张琴等^[3]分析的2016年6月13—14日影响山东的冷涡强对流过程,吴志彦等^[22]分析的一次冷涡强寒潮过程,均可看到对流层顶下降,高位涡下传的特征,这可视为冷涡天气系统的重要高空动力特征。此时,山东西部强对流发生区低层湿位涡MPV值 < 0 ,

且 $\partial\theta_e/\partial z < 0$, 表明大气是湿对称不稳定和对流不稳定的; θ_e 在横槽区域向西北方向倾斜, 满足下滑倾斜涡度发展的条件。4月28日下午, 强对流系统

向鲁南移动时, 由于鲁南地区对流不稳定度、垂直风切变更强, 这极有利于气旋性涡度增大和低层空气的辐合上升, 从而促使风暴不断发展成为强飚线。

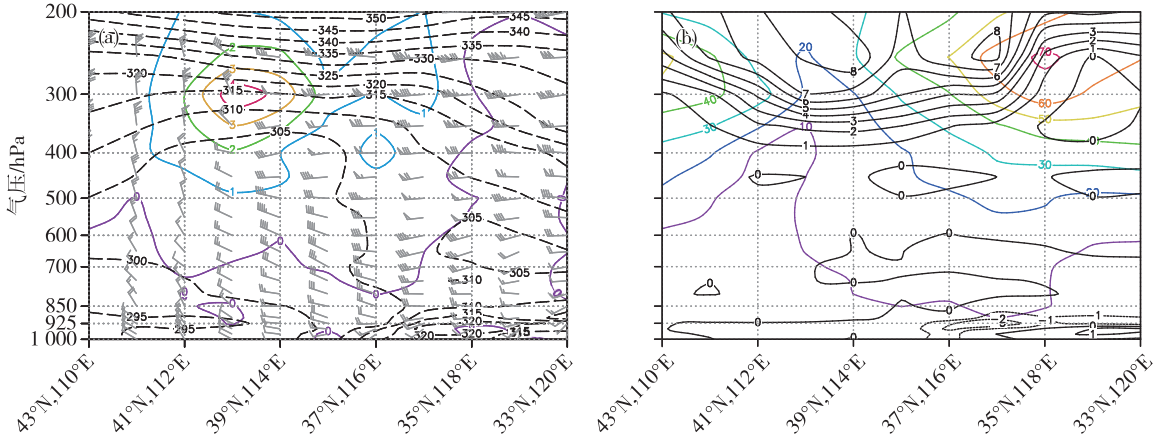


图8 2006年4月28日08时沿风暴移动路径的 ΔNBE 、 θ_e 和 wind 场 (a; ΔNBE : 彩色实线, 单位: $10^{-8} s^{-2}$; θ_e : 黑虚线, 单位: K; 风矢: u, v 合成风) 及 MPV 和 wind 速度 (b; MPV: 黑色线, 单位: PVU; 风速: 彩色线, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 剖面
 Fig.8 Vertical cross section of ΔNBE , θ_e , and wind field (a; ΔNBE : colored line, units: $10^{-8} s^{-2}$; θ_e : black dashed line, units: K; wind barb: resultant wind field of u and v) & MPV and wind velocity (b; MPV: black line, units: PVU; wind velocity: colored line, units: $m \cdot s^{-1}$) along the storm track at 08:00 BST on 28 April 2006

综上所述, 4月28日08时冷涡横槽就已出现, 并且低层重力波动也具有明显的上升、下沉速度对结构, 但对应08时、11时地面天气实况, 并未出现强对流系统, 只是在锋线附近观测到积云存在。当中尺度重力波移动到具有明显倾斜涡度发展条件的河北、山东两省交界区域时, 对流被激发并加强形成强飚线, 造成大风、冰雹等强天气。因此, 风暴

发生首先需要一定的对流不稳定能量积累和倾斜涡度发展条件, 在此基础上, 中尺度重力波可有效发挥其在对流触发、组织中的作用。

4.4 对流-重力波发生的环流形势及垂直结构

图9a是根据28日08时高低空系统绘制的环流形势示意图, 反映了风暴发生前的天气条件。风暴发生于南支高空急流左后方、低层暖输送带前

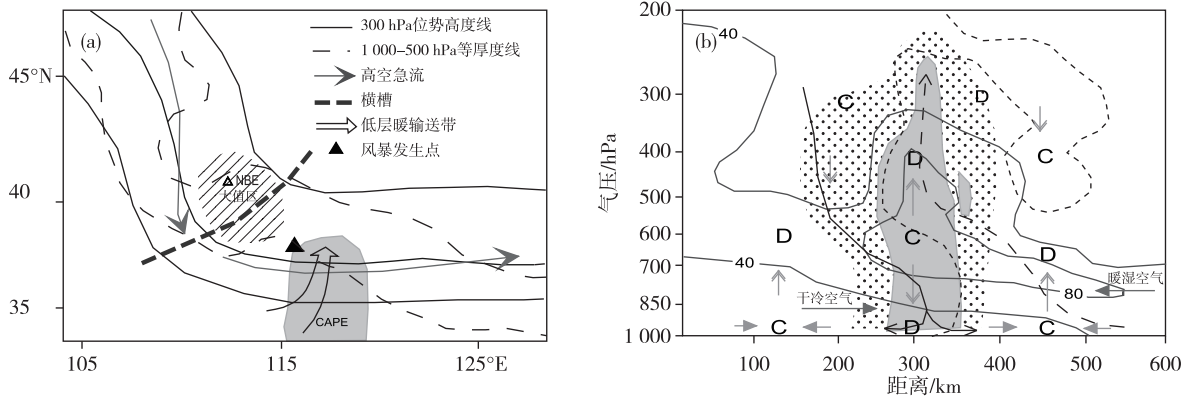


图9 2006年4月28日08时风暴发生前天气形势 (a) 和14时的对流-重力波结构示意图 (b; 阴影区为风暴云体剖面; 深阴影区为强对流云体, 回波反射率因子 > 35 dBz; 短虚线为垂直速度零线; 带箭头曲线为上升、下沉速度轴线; C、D为辐合、辐散中心; 直线箭头表示因辐合、辐散引发的气流运动; 细线为相对湿度等值线, 单位: %)
 Fig.9 Synoptic situation (a) at 08:00 BST before occurrence of the storm and structure of convection and mesoscale gravity wave (b; shaded area for the vertical structure of the storm base from satellite and radar observation; deeply shaded area for strong convective cloud, echo reflectivity greater than 35 dBz; short dashed line for vertical velocity of $0 Pa \cdot s^{-1}$; curve line with arrowhead for axis of upward or downward vertical motion; C and D for convergence center and divergence center; straight line with arrowhead for air motion due to convergence and divergence; thin line for relative humidity, units: %) at 14:00 BST on 28 April 2006

部,风暴移动方向基本上沿 1 000~500 hPa 等厚度线走向。图 9b 则是根据 28 日 14 时散度、垂直速度等物理量诊断场和日本 MTSat 气象卫星、济南多普勒天气雷达(CINRAD/SA)观测,绘制的风暴对流-重力波结构示意图。可见,风暴发生初期,对流和重力波形成一个耦合系统,中尺度重力波的辐合、辐散场及其对应的垂直环流促使对流加强,并形成强飚线,而对流引发的垂直运动和质量通量的辐散又提供波动能量,使对流和重力波得以较长时间的维持。这一机制可由地面风压场波动及大风、冰雹等强天气现象等事实得到验证。

5 结论与讨论

1)本次强飚线是在东北冷涡天气背景下,冷涡横槽沿西北气流下滑激发对流发展形成的。冷涡横槽底部为后倾的干冷下沉气流区,横槽前为倾斜的暖湿上升运动区,对流层高层干侵入特征明显,是位势不稳定能量积累的主要机制。

2)冷涡横槽在 300 hPa 最强盛,横槽后部为偏北急流,前部为偏西急流,气流穿过横槽区域时,由于减速-加速运动,导致气流不平衡和地转调整运动,从而引发高层重力波动。高层重力波在横槽底部下沉区向下传播,加强了高空急流动量向对流层中下部的传输,加剧了地面大风灾害。

3)风暴发生区地面风压扰动场和中低层散度场、垂直速度场均具有典型中尺度重力波的结构特征,估计其水平尺度约 250 km,移速约 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。强对流风暴的移动与中尺度重力波传播方向基本一致,系统前部的中尺度低压与高能舌、波谷对应,对系统未来的移动和强天气的落区预报具有一定的指示作用。

4)应用倾斜湿位涡发展理论分析风暴发展机制表明,风暴发生区具有明显的等熵面倾斜、对流不稳定和垂直风切变,具有倾斜涡度剧烈发展的条件。高空冷涡横槽激发的中尺度重力波移动到具有明显倾斜涡度发展条件的区域时,可促使对流发展加强,并与对流风暴相互耦合促进,成为本次强飚线发展维持的重要动力机制。

5)利用探空、地面自动气象站、多普勒天气雷达、气象卫星等实测和 NCEP/NCAR 再分析资料,通过客观分析方法,可以很好地分析飚线发生的中尺度环境场条件,清晰地揭示出风暴的中尺度动力结构和对流层顶折叠、中尺度重力波等特征,体现了综合观测资料及客观分析方法在飚线监测预警中

的作用。由此可见,重视实测资料的客观分析十分重要。

参考文献:

- [1] 郁珍艳,何立富,李泽椿.一次华北冷涡动力热力结构及发展机制分析[J].气象科学,2011,31(6):667-676.
- [2] 吴志彦,闵锦忠,赵海军.冷涡背景下一次强对流过程的卫星水汽图像特征[J].海洋气象学报,2017,37(3):54-61.
- [3] 张琴,孟伟,朱敏,等.2016年6月13—14日山东强对流天气过程的中尺度特征及成因分析[J].海洋气象学报,2017,37(4):101-112.
- [4] 李爽,丁治英,戴萍,等.东北冷涡的最新研究进展[J].干旱气象,2016,34(1):13-19.
- [5] 陈炜,李跃清.对流层重力波的主要研究进展[J].干旱气象,2018,36(5):717-724.
- [6] LIU L, RAN L K, SUN X G. Analysis of the structure and propagation of a simulated squall line on 14 June 2009 [J]. Adv Atmos Sci, 2015, 32(8): 1049-1062.
- [7] RUPPERT J H Jr, BOSART L F. A case study of the interaction of a mesoscale gravity wave with a mesoscale convective system [J]. Mon Wea Rev, 2014, 142(4): 1403-1429.
- [8] 李驰钦,左群杰,高守亭,等.青藏高原上空一次重力波过程的识别与天气影响分析[J].气象学报,2018,76(6):904-919.
- [9] 孙艳辉,李泽椿,寿绍文.一次暴风雪过程中的中尺度重力波特征及其影响[J].气象学报,2015,73(4):697-710.
- [10] 朱君鉴,刁秀广,曲军,等.4.28 临沂强对流灾害性大风多普勒天气雷达产品分析[J].气象,2008,34(12):21-26.
- [11] 徐小红,余兴,朱延年,等.一次强飚线云结构特征的卫星反演分析[J].高原气象,2012,31(1):258-268.
- [12] 朱磊磊,吴增茂,邵庆国,等.山东 04.28 强飚线过程重力波结构的分析[J].热带气象学报,2009,25(4):465-474.
- [13] KOCH S E, O'HANDLEY C. Operational forecasting and detection of mesoscale gravity waves [J]. Wea Forecasting, 1997, 12(2): 253-281.
- [14] 李伟,易帆.急流与低层大气重力波能量的相关性研究[J].空间科学学报,2011,31(3):311-317.
- [15] WEI J H, ZHANG F Q. Mesoscale gravity waves in moist baroclinic jet-front systems [J]. J Atmos Sci, 2014, 71(3): 929-952.
- [16] DU Y, ZHANG F Q. Banded convective activity associated with mesoscale gravity waves over Southern China [J]. J Geophys Res, 2019, 124(4): 1912-1930.

- [17] WANG S G, ZHANG F Q, SNYDER C. Generation and propagation of inertia-gravity waves from vortex dipoles and jets[J]. *J Atmos Sci*, 2009, 66(5):1294-1314.
- [18] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓簪. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. *气象学报*, 1995, 53(4):387-405.
- [19] 赵平, 孙淑清. 非均匀大气层结中大气惯性重力波的发展[J]. *气象学报*, 1990, 48(4):397-403.
- [20] 寿亦萱, 陆风, 寿绍文, 等. 对流层顶折叠检测新方法及其在中纬度灾害性天气预报中的应用[J]. *大气科学*, 2014, 38(6):1109-1123.
- [21] 曾勇, 杨莲梅, 张迎新. 中亚低涡背景下新疆阿克苏地区一次强对流天气形成的干侵入机制[J]. *干旱气象*, 2018, 36(1):34-43.
- [22] 吴志彦, 李宏江, 赵海军, 等. 等熵位涡揭示的一次强寒潮过程中高层扰动特征[J]. *海洋气象学报*, 2017, 37(1):84-91.