

阎琦,温敏,陆井龙,等. 2016. 两次引发辽宁暴雪过程低涡的动力发展机制. 气象, 42(4): 406-414.

## 两次引发辽宁暴雪过程低涡 的动力发展机制<sup>\* 1</sup>

阎 琦<sup>1</sup> 温 敏<sup>2,3</sup> 陆井龙<sup>1</sup> 李 爽<sup>1</sup> 田 莉<sup>1</sup>

1 辽宁省气象台, 沈阳 110166

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

**提 要:** 应用 NCEP FNL 分析资料, 从动力学角度对 2015 年初辽宁地区两次低涡暴雪过程(简称“2. 16”和“2. 25”过程)的形成机制进行分析。结果表明: 两次过程共同特点是 850 hPa 附近有低涡生成或加强, 低涡是暴雪引发的直接原因。两次过程促使低涡生成的正涡度变率增大原因存在差异, “2. 16”、“2. 25”过程中对正涡度变率贡献最大的强迫项分别是散度项和涡度垂直输送项。500 hPa 低涡东移, 冷平流使得涡底部高空槽加深, 槽前正涡度平流加强, 差动涡度平流增大使得上升运动发展, 导致 850 hPa 高度附近辐合增强是“2. 16”过程正涡度变率增长、低涡生成的动力机制。强烈上升运动, 对低层正涡度垂直输送, 则是“2. 25”过程 850 hPa 附近低涡形成和加强的动力机制。

**关键词:** 低涡, 暴雪, 动力机制, 涡度变率, 涡度平流

**中图分类号:** P426.433

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.04.003

## Dynamic Diagnosis on Formation and Developing Mechanism of Two Vortices Causing Snowstorms in Liaoning

YAN Qi<sup>1</sup> WEN Min<sup>2,3</sup> LU Jinglong<sup>1</sup> LI Shuang<sup>1</sup> TIAN Li<sup>1</sup>

1 Shenyang Central Meteorological Observatory, Shenyang 110016

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters,  
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** By using National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Final (FNL) operational global analysis data, the formation and developing mechanisms of the two vortices that caused snowstorms, on 16 and 25 February 2015 are investigated in terms of dynamics diagnosis. The results show that the formation and strengthening of vortices are the direct causes for the snowstorms, but the associated mechanisms are quite different in the two snowstorm cases. Positive tendencies of relative vorticity caused by convergence in lower troposphere and vertical transportation are the mainly forcing items for the formation of vortices in the two cases, respectively. On 16 February, there was a vortex moving eastward at 500 hPa. The cold advection near the bottom of the vortex deepened the trough at 500 hPa and the positive vorticity advection strengthened. Therefore, the increase of differential vorticity advection resulted in the developing of upward motion, and then the enhancement of the convergence at 850 hPa. On the other hand, on 25 February, the vertical vorticity transport by strong upward movement was the major developing mechanism of the vortex

\* 辽宁省科技厅农业攻关及成果产业化项目(2014210003)和国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2012CB417205)共同资助  
2015 年 8 月 20 日收稿; 2015 年 12 月 23 日收修定稿  
第一作者: 阎琦, 主要从事短期天气预报及物理诊断分析研究. Email: yq.mete@163.com  
通信作者: 温敏, 主要从事东亚季风变异机理研究. Email: wenmin@cma.gov.cn

at 850 hPa.

**Key words:** vortex, snowstorm, dynamic mechanism, total vorticity source, vorticity advection

## 引言

近年来辽宁地区暴雪极端事件频发,初春或秋末经常出现湿雪或雨夹雪等高影响天气,对交通、电力和设施农业生产的影响显著。2007年3月4日东北地区出现百年一遇的暴风雪过程,灾害造成的直接经济损失约145.9亿元。2012年冬季辽宁地区共出现32次降雪,仅3月4—6日的大范围雨雪天气过程就造成大连市庄河地区各类设施农业大棚倒塌122栋,4个养猪场温室大棚倒塌。随着经济社会的快速发展,冬季大雪以上降水给城市交通、高速公路运输及国民经济带来的损失也越来越严重,人民生命安全受到严重威胁。对暴雪天气的准确预报能有效降低其带来的不利影响,因此,有必要加强辽宁地区冬半年降雪特别是暴雪天气的预报技术研究,为降雪预报提供基础科技支撑。

我国对于暴雪的研究从传统的天气学分析到非常规资料的应用,已取得了较大进展。众多研究从气候背景、天气系统演变及水汽热力条件方面对暴雪过程进行诊断分析(周倩等,2011;赵桂香,2007;刘建军等,2002;段宇辉等,2013),也有采用数值模拟方法对降雪中小尺度特征进行分析(吴伟等,2011;陶健红等,2008)。张小玲等(2000a;2000b)、赵桂香等(2007)对暴雪中尺度切变线发生发展的动力进行诊断,发现正涡度区的演变与切变线的发展、东移密切相关,涡度和散度场的空间配置极有利于暴雪切变线的发展及暴雪形成与维持。

对流层低层低涡是引起暴雨、雪发生的一个重要天气系统(冀兰芝等,2014;杨晓亮等,2014;李圆圆等,2014;高安宁等,2015),因此人们围绕引发暴雨、雪天气的低涡的形成和发展开展了很多研究。孙兴池等(2015)分析发现低涡是产生暴雨的重要天气系统,但不能简单的按其位置和路径预报暴雨落区,应注意分析影响系统的空间结构、发展阶段和地面形势的演变特征。张元春等(2012)研究指出对流层中层蒙古国西北部浅槽东移、加深及发展导致了对流层低层的中尺度涡旋形成、发展。赵桂香等(2011)从热力平流和湿度诊断入手,得出高层有暖平流输入,而低层形成“湿冷垫”,对低空低涡的发展

起着重要作用。应用涡度方程,对低涡形成动力机制进行诊断,屠妮妮等(2010)得出垂直输送项和水平辐合辐散项对两次高原低涡的发展增强都起主要作用。赵宇等(2013)研究结果表明中低层的水平辐合、涡度由低层向高层的垂直输送都有利于中尺度低涡的形成和发展。屠妮妮等(2014)、苗春生等(2014)研究发现在低涡发生发展过程中,对低涡发展起直接作用的是水平辐合辐散项和水平平流项,低涡形成前水平辐合辐散项起主要贡献,低涡形成后水平平流项贡献增大。

在2015年2月中下旬辽宁地区的两次暴雪过程中,均发现暴雪区域850 hPa有低涡形成并加强,但低涡的活动特征和其他环流条件不尽相同。因此,本文拟通过实况资料分析和动力诊断,对两次过程中850 hPa附近促使低涡形成和发展的正涡度变率是如何产生的,以及低涡加强的动力机理是否存在异同进行研究,以期对暴雪预报业务提供参考。

本文使用的降水资料为辽宁省内62个国家级台站观测资料。通过对比NCEP FNL逐6 h业务化全球分析资料( $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ )与实测探空资料的环流场,发现在2015年初辽宁地区的两次暴雪过程中NCEP FNL资料的低涡位置和强度均与实况吻合,而NCEP FNL可以提供更多要素的高分辨率资料,因此本文使用NCEP FNL分析资料分析暴雪过程的环流场变化,并对相关机理进行诊断。2015年2月16日08时(北京时,下同)至17日08时暴雪过程简称“2.16”暴雪过程,2015年2月25日08时至26日08时暴雪过程简称“2.25”暴雪过程。

## 1 降水实况

2015年2月16日08时至17日08时,辽宁省62个国家级气象观测站中,有58个站出现降水(图1a);其中昌图和西丰地区出现暴雪,降水量为11~12 mm;沈阳、鞍山、抚顺、本溪、锦州南部、辽阳、铁岭南部及凤城地区为雨夹雪转大雪,降水量为5~13 mm;其他地区为雨转雨夹雪。2015年2月25日08时至26日08时,辽宁东部地区出现中雪到大雪,丹东地区达到暴雪量级(图1b)。两次暴雪过程中,降水进入辽宁地区后均出现明显增强,且在

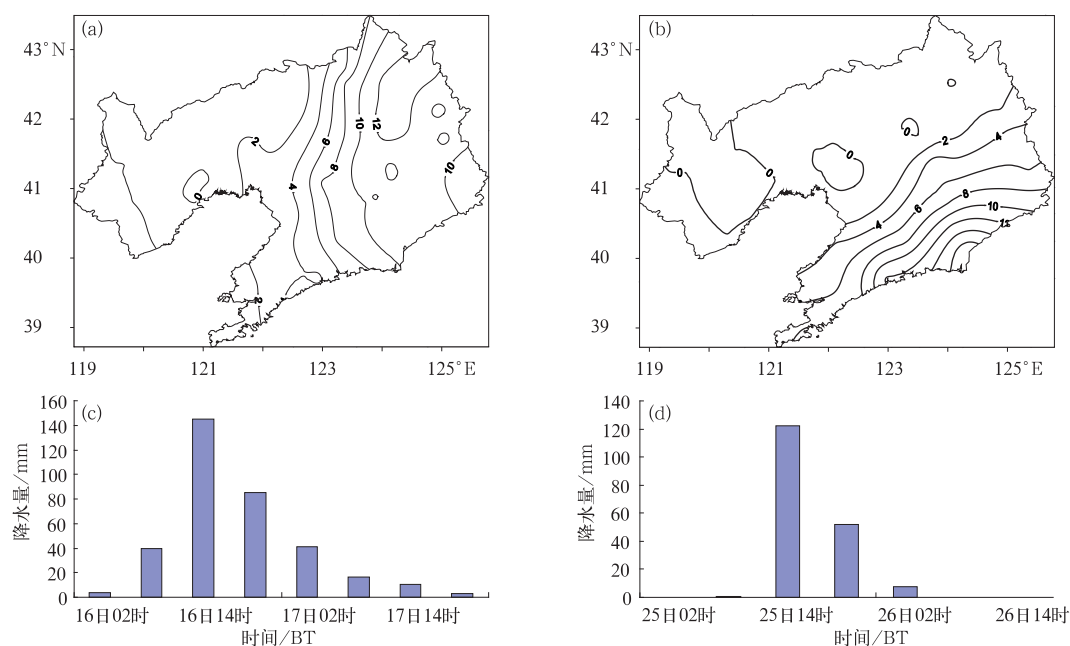


图 1 2015 年 2 月 16 日 08 时至 17 日 08 时(a)和 25 日 08 时至 26 日 08 时(b)辽宁地区  
降水量空间分布及 6 h 降水总量(c)、(d)变化

Fig. 1 The observed precipitation in Liaoning Province from 08:00 BT 16 to 08:00 BT  
17 February (a) and from 08:00 BT 25 to 08:00 BT 26 February (b) and evolution  
of 6 h precipitation (c,d) for the two cases in 2015 (unit: mm)

辽宁区域内最强降雪分别发生在 16 日 08—14 时(图 1c)和 25 日 08—14 时时段(图 1d)。

## 2 暴雪过程的低涡及相关环流演变特征

### 2.1 “2. 16”暴雪过程

2 月 15 日 08 时(图略), 850 hPa 上有高压脊从青藏高原延伸到达贝加尔湖地区, 脊线位于  $100^{\circ}\text{E}$  以西; 我国东北地区有一阻塞高压, 中心位于  $(47^{\circ}\text{N}, 127^{\circ}\text{E})$  附近, 与东海高压脊共同形成东部阻塞(简称东阻)形势; 两脊之间宽广的低槽区内存在两个低值系统, 一个为位于蒙古国东部的冷式切变线, 另一个低涡中心位于  $(34^{\circ}\text{N}, 114^{\circ}\text{E})$ ; 辽宁大部受切变前部和阻塞高压后部的偏南气流控制。15 日 20 时至 16 日 02 时(图略), 东阻形势维持, 但阻塞高压有所减弱并东移至  $130^{\circ}\text{E}$  以东; 北部冷式切变线也随之东移且南伸; 南部低涡强度减弱、中心闭合环流消失, 形成切变线, 该切变线北段延伸至辽宁葫芦岛地区; 辽宁正位于北部冷式切变线底部, 西部转为西北气流控制, 而东部为西南气流, 气旋性涡度加强。16

日 08 时(图 2a), 东部高压脊继续东移, 北部冷式切变线快速向东南方向移动, 南部切变线北段维持, 南段减弱, 南北切变线在辽宁西部地区结合形成低涡  $(41^{\circ}\text{N}, 121^{\circ}\text{E})$ 。16 日 14 时(图 2e), 低涡缓慢东移, 闭合风场加强, 中心正涡度增大(超过  $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), 辽宁地区受低涡控制。16 日 08—14 时正是辽宁中、东部地区降雪最强阶段, 降雪区主要位于低涡前部和中心附近, 6 h 最大降水量达 8 mm(图 2f), 由此可见降雪天气与低涡有直接关系。16 日 14 时至 17 日 02 时(图略), 低涡沿铁岭—抚顺一线缓慢移出辽宁, 辽宁地区暴雪过程逐渐减弱停止。

为了更清楚地显示低涡的三维结构及与其他高度上环流系统的关系, 我们沿 850 hPa 上低涡中心制作了相对涡度经度-气压垂直剖面图(图 2c 和 2g)。可以看到辽宁上空在 800 hPa 附近有一强的正涡度中心, 即为上面指出的与暴雪过程直接相关的低层低涡系统, 该系统位于 700 hPa 以下的对流层低层。在此低涡后部有一深厚的低压系统从对流层低层一直延伸至对流层顶, 其强中心位于  $500 \sim 400 \text{ hPa}$ , 表现为高层有低涡发展。值得注意的是, 从高层强正涡度中心有一正涡度舌伸向低层, 与辽宁上空的低层低涡相连。那么高层低涡的发展是否

与低层低涡的发展有直接关系,我们将在下一节中对此进行讨论。

另外,与低层低涡系统配合的偏东风将水汽从

辽宁以南的高湿中心向东输送,在辽宁东部及以南的海上形成强的水汽辐合中心(图2d和2h),为强降雪提供充足水汽条件。

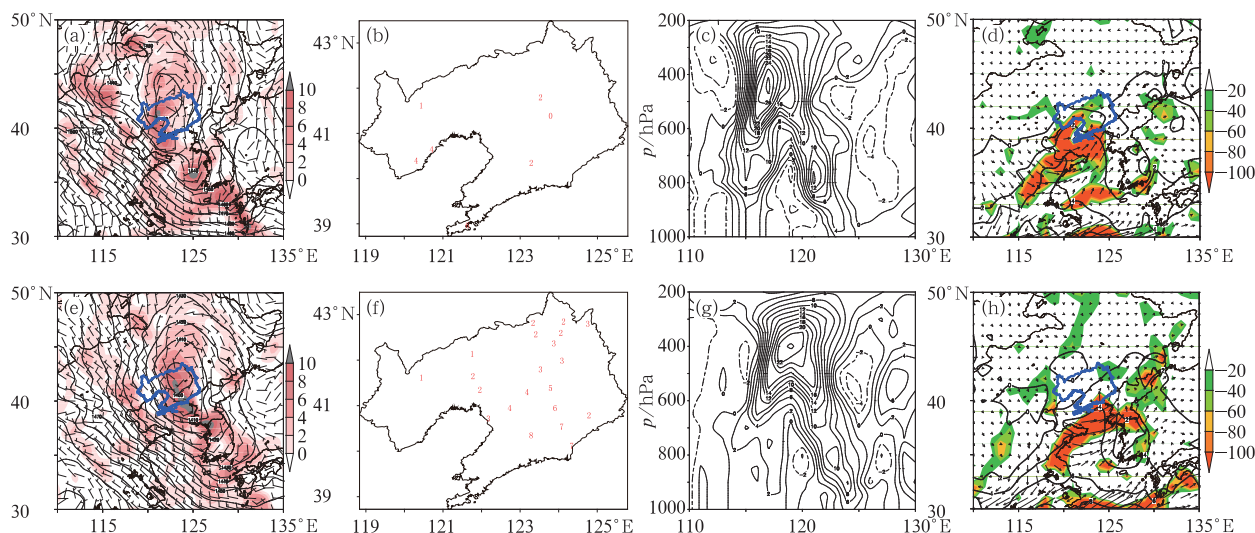


图2 2015年2月16日08时(a, b, c, d)和14时(e, f, g, h)850 hPa高度(实线,单位: dagpm)、相对涡度(填色,单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )、风场(a, e)和6 h降水量(单位: mm)(b, f)、相对涡度(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )沿42°N空间剖面(c, g)以及850 hPa比湿(实线,单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、水汽通量散度(填色,单位:  $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、水汽通量(单位:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (d, h) 演变

Fig. 2 The geopotential height (solid line, unit: dagpm) and relative vorticity (shaded, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and winds at 850 hPa (a, e), 6 h precipitation (b, f), cross-section of relative vorticity (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) along 42°N (c, g) and the specific humidity (solid line, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), the water vapor flux divergence (shaded, unit:  $10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and the water vapor flux vector (unit:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa (d, h) at 08:00 BT (a, b, c, d) and 14:00 BT (e, f, g, h) 16 February 2015

## 2.2 “2.25”暴雪过程

2月24日08时的850 hPa上(图略),中国东北地区被一个大范围低压环流后部控制,低压西南部有一横切变线沿中蒙边界一直西伸至100°E附近,另在110°E附近还有一短波槽;辽宁大部为低压环流底部的偏东气流控制,风速在  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下。24日14时至25日02时,位于中国东北的低压逐渐减弱,但环流少动,中蒙边界的横切变逐渐东移转竖。25日08时(图3a),低压后部环流在黑龙江中北部地区再次加强为一个低涡(中心位置47°N、127°E),其后部横切变转竖,底部位于辽宁中部;短波槽东移北上至辽宁西南部地区;辽宁中部已有闭合气旋性环流出现,中心位于(42°N、122°E)附近。25日14时(图3e),南北两个切变线合并加强,闭合低涡中心也加强移至辽宁东南部的丹东地区。25日08—14时,辽宁东部降雪基本位于低涡中心附近,6 h雪

量达到10 mm以上(图3b和3f),尤其丹东地区降雪强度达  $4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。随后,低涡快速东移出省,辽宁地区降雪过程结束。

同样,沿850 hPa上的低涡中心给出了相对涡度的经度-气压垂直剖面图。与“2.16”过程有清晰垂直结构不同,此次过程中高层(500 hPa以上)均为正涡度区,尤其是在500 hPa没有明显的低涡中心,环流图上显示基本为平直西风气流(图略),而是首先在地面附近出现了低压系统。地面图上(图略)2015年2月24日河套地区有倒槽东移,25日08时强度增强,有低压中心出现(37°N、122°E)(图3c),至14时在辽宁东部形成具有明显垂直伸展结构的对流层低层的低涡系统(图3g)。由此可以推测,此次暴雪过程中低层低涡的发展机制与“2.16”过程可能有明显不同,我们也将在下节中做进一步讨论。

另外“2.25”暴雪过程中,高湿中心同样位于辽

宁南测的海上,与 850 hPa 低涡几乎完全一致的水汽输送使得低涡中心及以南形成了水汽辐合中心

(图 3h),强降雪时降雪中心比湿均在  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  以上,达到辽宁出现大雪到暴雪的阈值。

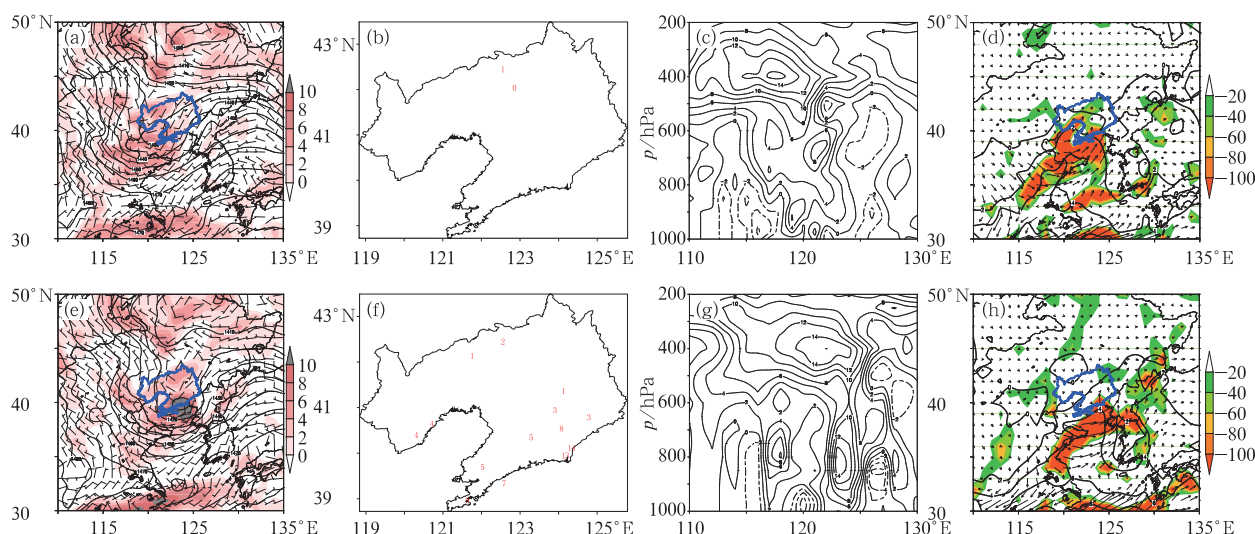


图 3 同图 2, 但为 2015 年 2 月 25 日

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for 08:00 BT 25 February 2015

综上所述,虽然 2015 年初辽宁地区两次暴雪过程降水实况分布和环流背景不完全相同,但两次暴雪过程的降水主要时段,在 850 hPa 均有低涡生成或加强,低涡位置与强降雪落区有较好对应关系,低涡的生成与加强是两次暴雪产生的直接原因。从 850 hPa 环流的演变来看,低涡的形成均与南北切变线的合并加强有关。然而,进一步分析发现,伴随 850 hPa 低涡形成发展的其他高度上的环流演变却有很大不同,因此需要对两次低涡形成和发展的动力机制分别进行诊断。

### 3 两次暴雪过程低涡形成和发展的动力诊断

上节已经指出,两次暴雪过程中均有低涡发展增强,与暴雪的发生有直接关系,但两次过程的大尺度环流又存在不同,因此低涡的发展机制可能存在差异。下面,我们就利用涡度方程对两次低涡过程进行诊断。 $p$  坐标系中的涡度方程(朱乾根等, 2000)可写为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = & -(u \frac{\partial \zeta_a}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta_a}{\partial y}) - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - \\ & \zeta_a D - (\frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p}) \\ = & \zeta_h + \zeta_v + \zeta_d + \zeta_c = \zeta_s \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $\zeta_h$ 、 $\zeta_v$ 、 $\zeta_d$ 、 $\zeta_c$  分别表示绝对涡度平流输送项、涡度垂直输送项、散度项和扭转项,  $\zeta_s$  为涡度变率。根据图 2 和图 3 显示的低涡形成和加强过程,分别取  $(40^\circ \sim 43^\circ \text{N}, 120^\circ \sim 124^\circ \text{E})$ 、 $(39^\circ \sim 42^\circ \text{N}, 122^\circ \sim 126^\circ \text{E})$  进行区域平均,计算了两次暴雪过程涡度方程中各项的演变情况,计算使用的空间格距水平方向为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,垂直方向 900 hPa 以下等压面间距为 25 hPa, 900 hPa 以上为 50 hPa,时间步长 6 h。下面就分别讨论两次过程低涡形成和发展的动力机制。

#### 3.1 “2.16”暴雪过程

“2.16”暴雪过程,2015 年 2 月 16 日 02 时涡度变率为  $-0.16 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$ (图略),从 16 日 08 时开始到 20 时区域均为正涡度变率,即对应低涡的形成和加强,其中 16 日 14 时正涡度变率最大(图 4),与图 2 显示的低涡最强一致。图 4 中还显示,在 3 个时次中,散度项对正涡度变率贡献最大,其次为绝对涡度平流输送项,垂直输送项直到 16 日 20 时才变为正贡献,而扭转项则一直为负贡献,抵消其他项对低涡形成的作用。由此可见,水平辐合导致的正涡度增长是低涡形成和发展的主要原因,尤其是在低涡形成阶段。那么是什么造成了 850 hPa 强辐合的形成呢?

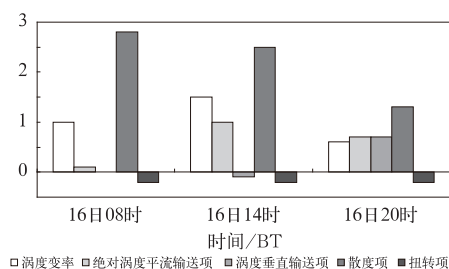


图4 “2.16”过程 850 hPa 区域( $40^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 124^{\circ}\text{E}$ )平均涡度变率及各强迫项(单位:  $10^{-9} \text{ s}^{-2}$ )的演变

Fig. 4 The 850 hPa total vorticity source and its forcing terms (unit:  $10^{-9} \text{ s}^{-2}$ ) averaged over ( $40^{\circ}-43^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}-124^{\circ}\text{E}$ ) for the case on 16 February

前面我们已经指出,高空有深厚的低压系统在低层低涡系统后部发展。在 500 hPa 上,表现为有低涡从蒙古以西快速东移,且在 850 hPa 低涡形成后一直紧随其后(图 5)。由 2015 年 2 月 16 日 08 时

500 hPa 温度平流、高度和风场的空间配置(图 5b)可见,500 hPa 高空槽中有明显的冷平流,有利于高空槽发展,而高空槽加强将导致槽前涡度平流增强。根据  $\omega$  方程,上升运动的变化与差动涡度平流成正比,因此涡度平流增强将进一步使得垂直运动发展。从涡度平流区域平均(平均区域如图 5 红框所示)垂直廓线图上可以清楚发现,16 日 02—14 时,500 hPa 高度附近涡度平流明显增大,而 500 hPa 高度以下各层正涡度平流变化不明显,且正涡度平流也呈现一致性的向下递减的垂直分布特征,有利于上升运动的加强(图 6b<sub>1</sub>~6b<sub>4</sub>),平均区域为图 5 红框所示区域。由连续方程可得,垂直上升运动的加强将促使低层辐合加强,最终导致 850 hPa 附近正涡度变率产生、低涡形成。由此可见,500 hPa 低涡东移及发展是“2.16”暴雪过程中 850 hPa 低涡形成和发展的主要原因。

从图 2 中可知,14—20 时在辽宁上游存在正涡度扰动区。当 850 hPa 低涡形成后,低涡环流加强

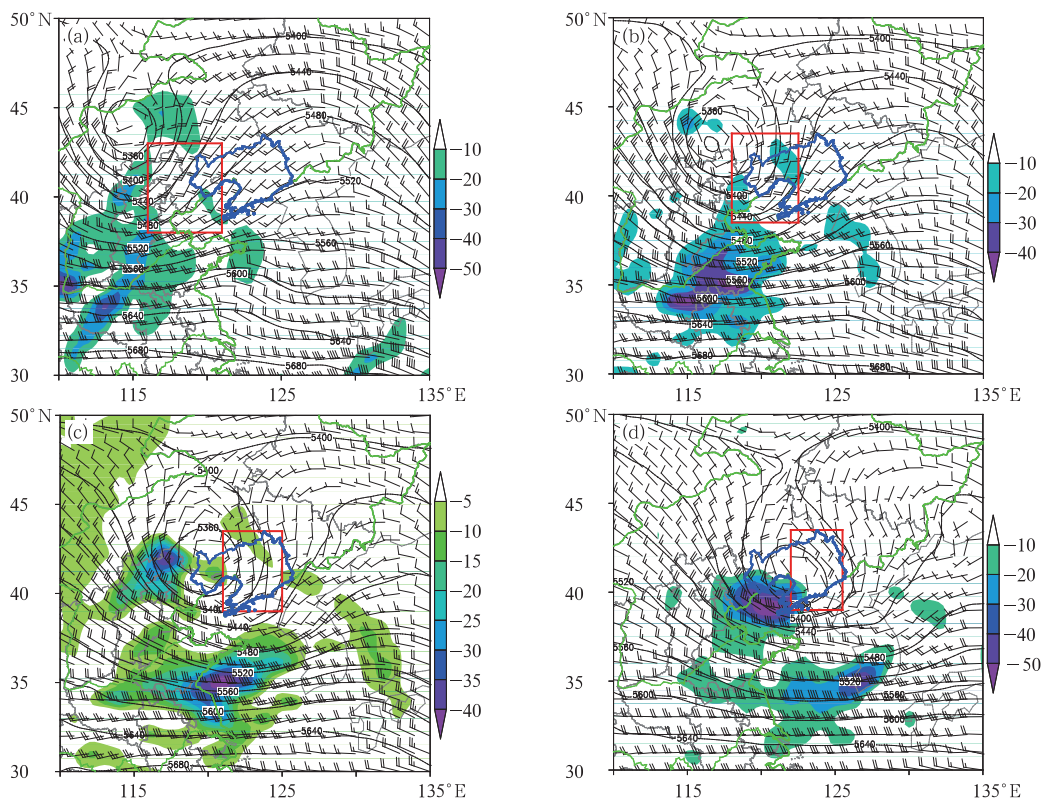


图5 2015 年 2 月 16 日 02 时(a)、08 时(b)、14 时(c)、20 时(d)500 hPa 高度场(实线,单位: dagpm)、温度平流(填色,单位:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )和风场分布

Fig. 5 The 500 hPa geopotential height (solid line, unit: dagpm), temperature advection (shaded, unit:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and winds at 02:00 (a), 08:00 (b), 14:00 (c) and 20:00 (d) BT 16 February 2015

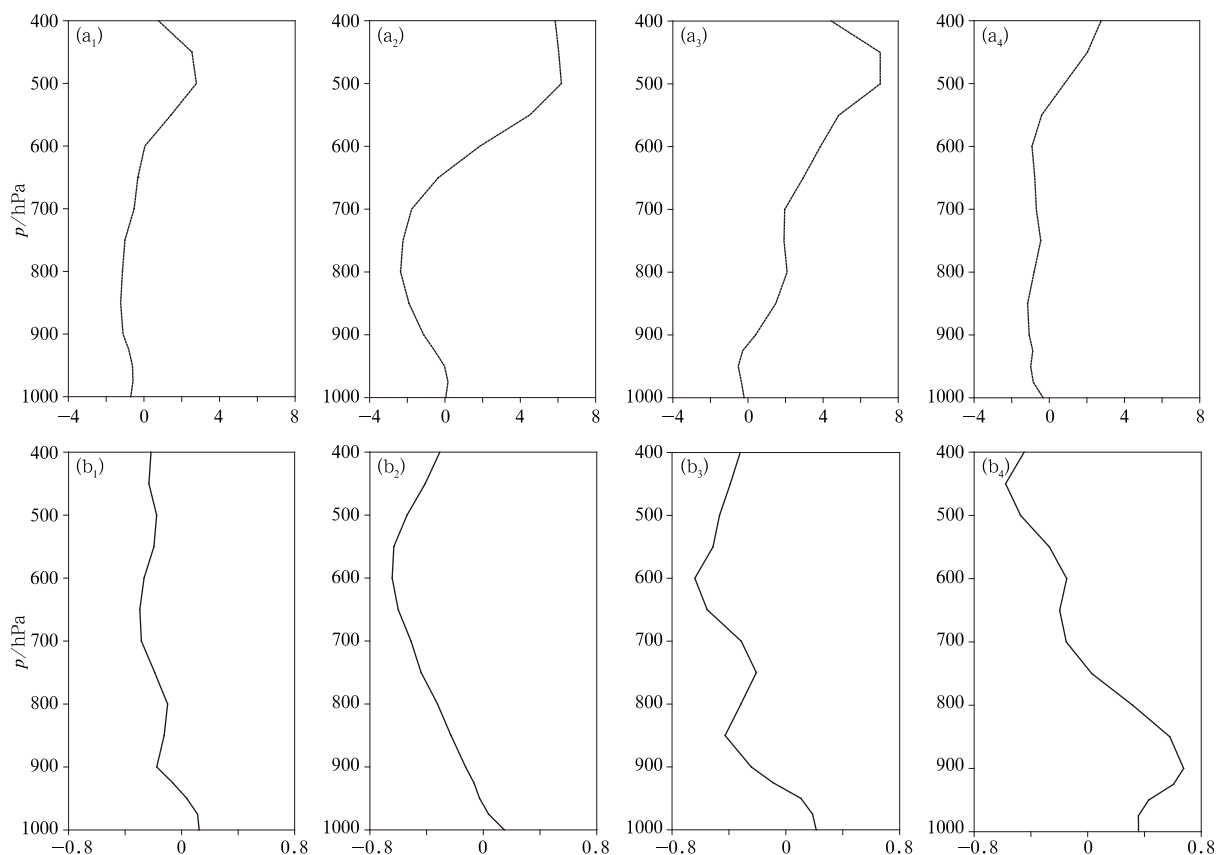


图 6 2015 年 2 月 16 日 02 时( $a_1, b_1$ )、08 时( $a_2, b_2$ )、14 时( $a_3, b_3$ )和 20 时( $a_4, b_4$ )

涡度平流( $a_1 \sim a_4$ , 单位:  $10^{-9} \text{ s}^{-2}$ )、上升速度( $b_1 \sim b_4$ , 单位:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

区域平均(平均区域如图 5 红框所示)垂直廓线

Fig. 6 Vertical profiles of vorticity advection ( $a_1 - a_4$ , unit:  $10^{-9} \text{ s}^{-2}$ ) and vertical velocity ( $b_1 - b_4$ , unit:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 02:00 ( $a_1, b_1$ ), 08:00 ( $a_2, b_2$ ), 14:00 ( $a_3, b_3$ ) and 20:00 ( $a_4, b_4$ ) BT 16 February 2015

引起的西北风加强将引起了明显的正涡度平流,即图 4 中显示的绝对涡度平流加强,有利于辽宁地区的低涡继续发展。当高层低涡加强,垂直上升运动也逐渐增强扩展到低层,850 hPa 以下也出现低涡环流后,垂直运动对相对涡度的输送才对 850 hPa 低涡的发展起到正贡献。

### 3.2 “2.25”暴雪过程

“2.25”暴雪过程中从 25 日 02 时辽宁地区开始出现正涡度变率,08—14 时正涡度变率明显增大(图 7),20 时涡度变率转为负值(图略)。从前面的环流分析中已知,该过程中 25 日 08 时出现闭合低涡环流,因此我们将 25 日 08 时作为低涡形成时刻,而 08—14 时为低涡发展时刻。

与“2.16”过程类似,此次过程中散度项一直为正,即水平辐合有利于低涡的形成和发展。前面已经指出,此次过程中 500 hPa 上并没有低涡环流位

于 850 hPa 低涡后部。相反,辽宁地区一直为较平直的西风气流控制。因此 850 hPa 辐合的出现与上层环流的变化没有明显关系,而是由于 850 hPa 上横切变逐渐东移转竖,使得辽宁地区水平辐合加强,由此产生了正涡度变率,有利于低涡的生成和发展。

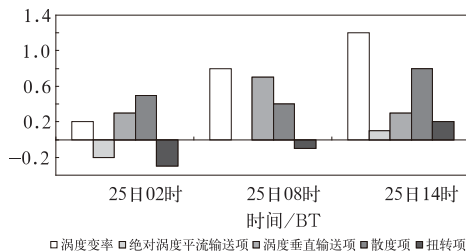


图 7 同图 4, 但为 2015 年 2 月 25 日

Fig. 7 Same as Fig. 4, but for 25 February 2015

然而值得注意的是,在这次过程中,涡度的垂直输送项也一直为正,在低涡形成阶段(25 日 08 时)达到最强,产生的正涡度变率超过了散度项的作用,

对低涡的形成起到了主要作用。我们发现整个过程辽宁东南部都维持着上升运动(图8),且强度明显增强。图3中已经发现,首先有正涡度中心在地面

附近发展,而后对流层低涡结构完全建立。可见,正是垂直运动对低层正涡度的向上输送产生了正的垂直输送项,进而使得其上低涡发展。

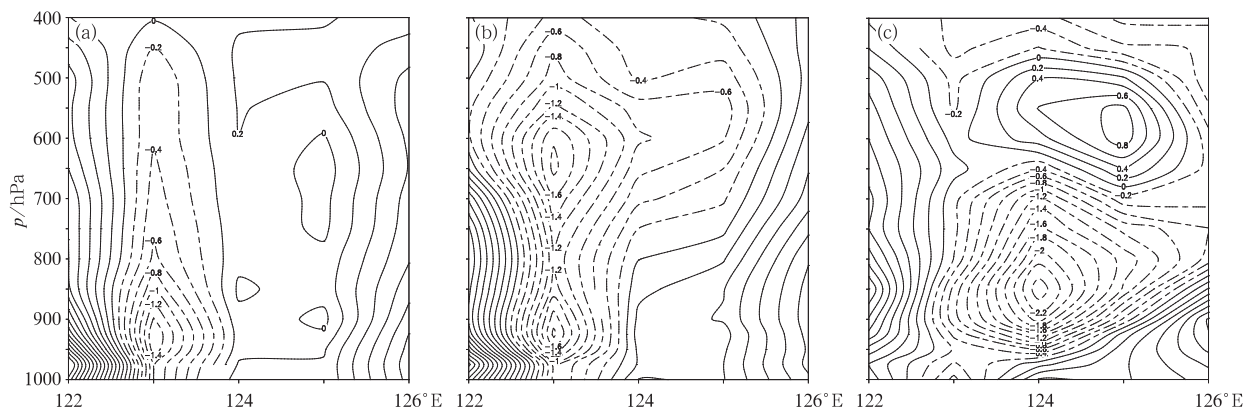


图8 2015年2月25日02时(a)、08时(b)、14时(c)垂直速度(单位:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )沿  $40^\circ\text{N}$  空间剖面

Fig. 8 Vertical cross-section of vertical velocity (unit:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along  $40^\circ\text{N}$  at 02:00 (a), 08:00 (b) and 14:00 (c) BT 25 February 2015

那么,上升运动是如何产生的?与降水的关系如何?即是降水导致低涡发展,还是低涡发展引发降水?实际上,从图3中已经看出,首先在地面附近出现了低涡系统。低涡造成的水平辐合由于受到地面刚界的限制而只能产生上升运动,图8a显示25日02时边界层附近出现了上升运动,中心位于925 hPa附近。此时,由于低涡系统的浅薄,并没有形成明显的水汽辐合,因此02—08时没有明显降水产生(图1d和图3b)。此后,上升运动逐渐加强(图8b和8c),配合低层低涡系统逐渐加强使得有明显水汽辐合(图3h),08—14时才出现明显降水,对应上升运动高度达到对流层高层。由此可见,对流层低

层的低涡系统是导致暴雪产生的重要因素。

进一步分析发现,低层的环流配置有利于开始出现在低层的垂直上升运动发展加强,这也是低层低涡系统发展加强的关键。图9给出了2月25日02和14时950 hPa涡度、温度平流和风场(图9)。可以看出,黄海北部为低压环流控制,为正涡度区。该正涡度区与河套倒槽东移入海加强成的低压中心( $37^\circ\text{N}$ 、 $122^\circ\text{E}$ )相对应。同时,辽宁东南部地区有较强暖平流,根据 $\omega$ 方程,暖平流区有上升运动,配合东南部的风速和风向辐合作用,导致低层上升运动加强。

因此,在“2.25”暴雪过程中,地面附近低涡发展

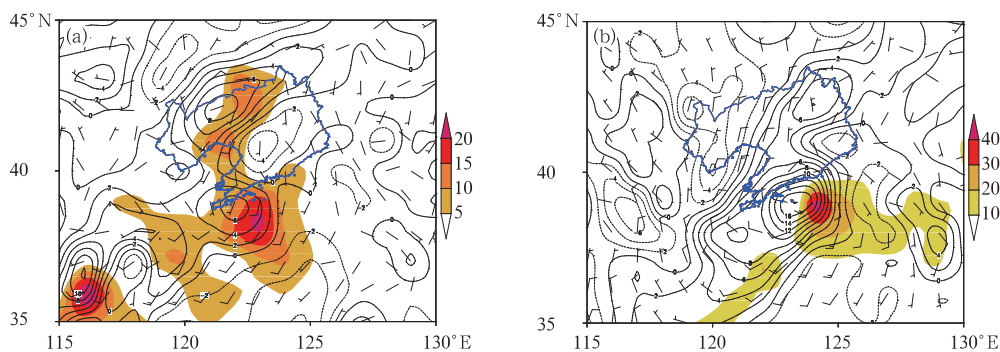


图9 2015年2月25日02时(a)、14时(b)950 hPa涡度场(实线,单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )、温度平流(填色,单位:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )和风场分布

Fig. 9 Vorticity (solid line, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) and temperature advection (shaded, unit:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and wind at 950 hPa at 02:00 (a) and 14:00 (b) BT 25 February 2015

导致的垂直上升运动对低层正涡度的向上输送是“2. 25”过程低涡形成和发展的重要原因。

## 4 结 论

2015 年 2 月 16 和 25 日辽宁地区出现两次暴雪过程,共同特点是低涡的生成与加强是产生暴雪的直接原因。本文利用 NCEP FNL 资料对两次低涡过程进行分析,并利用涡度方程对低涡形成和发展的机制进行动力诊断。

两次过程低涡的形成均与南北切变线的合并加强有关,但伴随 850 hPa 低涡形成发展的其他高度上的环流演变却有很大不同。“2. 16”过程,500 hPa 上有低涡从蒙古以西快速东移,且在 850 hPa 低涡形成后一直紧随其后。“2. 25”过程,500 hPa 上并没有低涡环流位于 850 hPa 低涡后部,辽宁地区一直为较平直西风气流控制,而在低层 950 hPa 有低压环流。

应用  $p$  坐标系中的涡度方程的各项变化分析两次暴雪过程低涡动力发展特征发现,两次过程正涡度变率增大的原因存在差异。“2. 16”过程散度项对正涡度变率贡献最大,其次为绝对涡度平流输送项,垂直输送项直到 16 日 20 时才变为正贡献,而扭转项则一直为负贡献,抵销其他项对低涡形成的作用。“2. 25”过程在低涡形成阶段,涡度的垂直输送最强,产生的正涡度变率超过了散度项的作用,对 850 hPa 低涡的形成起到了主要作用。

因此,通过进一步分析,认为“2. 16”过程低涡形成存在下述动力机制:500 hPa 高空冷平流有利于高空槽加深,导致槽前涡度平流增强;差动涡度平流增大有利于上升运动的发展,促使低层辐合加强,最终导致的正涡度增长是低涡形成和发展的重要原因。而“2. 25”过程低涡形成的动力机制则不同:辽宁东南部地区低层有较强暖平流,配合东南部的风速和风向辐合作用,导致低层上升运动加强;垂直上升运动对黄海北部附近低层低压环流正涡度的向上输送是 850 hPa 低涡形成和发展的重要原因。两次过程,低涡的形成使得水汽辐合、动力抬升作用增强导致暴雪的发生。

## 参考文献

- 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. 干旱气象, 31(4):784-789.
- 高安宁,赖珍权,张瑞波,等. 2015. 不同环境风场条件下两次华南西部低涡暴雨两个例对比分析. 气象, 39(1):11-19.
- 冀兰芝,全志伟,宋琳琳,等. 2014. 甘肃东部一次暴雪过程的诊断分析和数值模拟. 干旱气象, 32(5):845-850.
- 李圆圆,肖开提·多莱特,杨莲梅,等. 2014. 一次中亚低涡造成的新疆暴雪天气过程分析. 气象科学, 34(3):299-304.
- 刘建军,程麟生. 2002. “97. 2”高原暴雪过程中尺度热量和水汽收支诊断. 气象, 28(3):16-22.
- 苗春生,吴旻,王坚红,等. 2014. 一次浅薄低涡暴雨过程数值模拟及发展机制分析. 气象, 40(1):28-37.
- 孙兴池,郭俊建,王业宏,等. 2015. 低涡和副热带高压共同影响下的暴雨落区分析. 气象, 41(4):401-408.
- 陶健红,张新荣,张铁军,等. 2008. WRF 模式对一次河西暴雪的数值模拟分析. 高原气象, 27(1):68-75.
- 屠妮妮,何光碧. 2010. 两次高原切变线诱发低涡活动的个例分析. 高原气象, 29(1):90-98.
- 屠妮妮,李跃清. 2014. 一次引发川东暴雨的西南涡特征分析. 干旱气象, 32(6):962-971.
- 吴伟,邓莲唐,王式功. 2011. “0911”华北暴雪数值模拟及云微物理特征分析. 气象, 37(8):991-998.
- 杨晓亮,王咏青,杨敏,等. 2014. 次暴雨与特大暴雪并存的华北强降雨过程分析. 气象, 40(12):1446-1454.
- 张小玲,程麟生. 2000a. “96. 1”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断 I: 涡度和涡度变率诊断. 高原气象, 27(1):285-294.
- 张小玲,程麟生. 2000b. “96. 1”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断 II: 散度和散度变率诊断. 高原气象, 19(4):495-466.
- 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. 高原气象, 31(2):387-399.
- 赵桂香. 2007. 一次回流与倒槽共同作用产生的暴雪天气分析. 气象, 33(11):41-48.
- 赵桂香,程麟生,李新生. 2007. “04. 12”华北大到暴雪过程切变线的动力诊断. 高原气象, 26(3):615-623.
- 赵桂香,杜莉,范卫东,等. 2011. 一次冷锋倒槽暴风雪过程特征及其成因分析. 高原气象, 30(6):1516-1525.
- 赵宇,李媛,赵光平. 2013. 引发暴雨天气的中尺度低涡的数值研究. 南京气象学院学报, 36(6):751-763.
- 周倩,程一帆,周甘霖,等. 2011. 2008 年 10 月青藏高原东部一次区域暴雪过程及气候背景分析. 高原气象, 30(1):22-29.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 2000. 天气学原理和方法(第三版). 北京:气象出版社:112-115.