

一次引发暴雨的东北低涡的涡度和水汽收支分析

乔枫雪^{1,2} 赵思雄¹ 孙建华¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 对2005年7月25~29日引发较大范围持续性暴雨的东北低涡的结构、涡度和水汽收支进行了分析研究, 结果表明: 1) 东北低涡是一个较深厚的冷性涡旋。初期, 气旋性涡度出现在对流层中层, 然后向中低层及高层伸展。而低涡加强阶段, 气旋性涡度在对流层高层增加得最快, 并逐渐向中低层传播, 诱发地面气旋的发展; 由于高低空锋生的相互作用, 在低涡南部形成了深厚的近乎垂直的低层略前倾的“弓形”锋区。2) 对涡度收支的计算表明, 水平涡度平流项和水平辐散项对低涡的发展、加强起到最主要的作用。但在不同阶段, 这两项的作用和大小各不相同。3) 对流层高层涡度大值区在低涡东部向下传播, 有利于低涡的发展加强, 与低涡暴雨的落区位置较为接近。此外对卫星云顶亮度温度(TBB)的分析, 发现低涡暴雨典型的涡旋云带中对流活动旺盛的地区与局地暴雨的位置对应。4) 低涡暴雨的水汽初期主要来自北部, 随着低纬地区西南季风的增强, 沿副高西侧从低纬到中高纬建立起一条较强的水汽输送带, 东北地区水汽收支以南北向的辐合为主。5) 将2005年和1998年夏季6~8月的东北低涡暴雨个例的天气形势配置进行逐月比较, 发现持续的较大范围的低涡暴雨过程与亚洲中高纬的阻塞形势、低涡的维持、西太平洋副热带高压的位置及夏季风和低纬系统的水汽输送有密切的关系。

关键词 东北低涡 暴雨 位涡 涡度收支 水汽收支

文章编号 1006-9585 (2007) 03-0397-16 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

Study of the Vorticity and Moisture Budget of a Northeast Vortex Producing Heavy Rainfall

QIAO Feng-Xue^{1,2}, ZHAO Si-Xiong¹, and SUN Jian-Hua¹

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Detailed analysis are conducted on the structure, the vorticity and moisture budgets of a northeast vortex which caused sustained heavy rainfall in Northeast China on 25 - 29 July 2005. The results show: 1) The northeast vortex was a deeper depression related with cold air. In the early formation stage, the cyclonic vorticity appeared in the middle troposphere and then extended to the lower and upper level, respectively; While in the developing stage of the vortex, the cyclonic vorticity increased most rapidly in the upper troposphere, then extended downwards to the middle and the lower troposphere, which produced the development of surface cyclone with front. Under the interaction of frontogenesis between upper and lower level, there formed a nearly vertical deep "Bow-Shaped" front zone with a little tilted forwards in the low level. 2) The calculation of vorticity budget indicates that both the horizontal advection term and horizontal divergence term contributed most significantly to the strengthening

收稿日期 2007-01-26 收到, 2007-03-20 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40433007 和国家重点基础研究发展规划项目 2004CB418301

作者简介 乔枫雪, 女, 1982年出生, 硕士研究生, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: fengye4166@mail.iap.ac.cn

of vortex, but their values are different during the different stages of the vortex. 3) The maxima of the potential vorticity anomaly were located in the upper troposphere, and then extended downwards in the southeastern part of the vortex which is near the area of heavy rainfall. In addition, the analysis of satellite data TBB shows that there existed the typical spiral cloud band during the period of the heavy rainfall and the area of intense convective activities coincided with that of heavy precipitation. 4) In the early stage of heavy rainfall of the northeast vortex, the moisture budget was mainly from the north boundary; With the reinforcement of southwest monsoon in the low latitude, a moisture transportation from the low to the middle or higher latitude was formed along the west edge of subtropical high and the moisture supply is mainly caused by the convergence of north and south boundary. 5) Finally, comparison has been conducted between the heavy rainfall cases of northeast vortexes during the summer of 2005 and 1998, and it shows that the sustained heavy rainfall in larger area was closely related to the Asian blocking highs in middle or higher latitude, the maintenance of vortex and the position of subtropical high in West Pacific, as well as the moisture supply of summer monsoon coming from low latitude area.

Key words northeast vortex, heavy rainfall, potential vorticity, vorticity budget, moisture budget

1 引言

东北低涡是指在有利的环流形势下,在东北地区发展的冷性涡旋,常被称为东北冷涡。它是影响东北地区夏季降水的一类主要天气系统,一年四季均有出现,但夏季为数不少。对东北冷涡及其天气已做过一些研究,陶诗言^[1]指出:东北冷涡一般在贝加尔湖附近形成,经过我国东北、苏联滨海省南部,向堪察加半岛移去。与我国的西南涡和西北涡相比,东北冷涡的尺度要大些,是较深厚的冷性系统,夏季常造成东北、华北和内蒙古的雷阵雨天气。如果低涡后有冷空气不断补充,地面图上为一条条副冷锋南下,累积雨量有时可达暴雨。郑秀雅等^[2]利用 1956~1989 年的资料,对东北冷涡的统计学特征、形成过程及冷涡暴雨特征等也做了较为完整的介绍。还有学者^[3,4]对华北低涡及相关的强烈天气做了研究,这对于对比华北与东北及强烈天气与暴雨过程的异同很有帮助。

已有的研究表明,南欧、北美和东北亚为北半球切断低压频发区域,而我国东北低涡(或冷涡)中有一部分可能与亚洲地区的切断低压有关。Palm 等^[5]早期研究了高空切断冷涡的发生和结构,指出冷涡对中高纬度地区的天气有着重要的影响。Hsieh^[6]对北美冷涡进行过详细的研究,并得出冷涡的天气概念模型。Qi 等^[7]则研究了澳洲南部的切断低压的气候特征。Hill 等^[8]用等熵面位涡来研究发生在英吉利海峡上空的一次中尺度冷涡

的持续和移动情况。Matsumoto 等^[9,10]和 Miyazawa^[11]则着重研究了产生强雪暴或强降水的次天气尺度的冷涡系统的结构特征。本文研究的东北低涡一部分与切断低压有关,但并非所有东北低涡一定与之有联系。

20 世纪 90 年代以来,东北低涡活动又趋频繁,其中 1998 年的多次低涡过程在中国东北地区的松花江、嫩江流域造成了特大洪水,形成了严重的洪涝灾害。Zhao 和 Sun^[12]对该年夏季东北低涡的活动情况进行了系统的研究,他们从斜压性的影响、水汽和涡度收支等方面分析了东北低涡的形成和演变过程。孙力等^[13,14]和刘宗秀等^[15]着重分析了 1998 年松嫩流域大暴雨的某些个例的大尺度环流特点和天气学条件。姜学恭等^[16]利用 MM5 中尺度模式,对 1998 年 8 月 8~9 日一次典型的东北低涡切变暴雨进行数值模拟,并针对阻塞高压和西北路径冷空气进行了敏感性试验,揭示出其在低涡暴雨过程中的作用。

我国夏季有 3 大雨区,主要集中在东部地区,即华南、江淮流域和北方,包括华北东北等。对前二者已有不少研究^[17~19],但对后者,即北方暴雨,尤其是东北低涡引发的暴雨研究尚不太多,且多集中在 20 世纪 70~80 年代。在 1998 年夏季松嫩流域大范围暴雨以后,东北低涡暴雨的研究重新引起了重视。同时,需要强调 2005 年又是一个东北低涡的多发年,引发了东北地区夏季的暴雨。本文集中对 2005 年 7 月一次持续性的较大范围低涡暴雨过程进行较深入的分析,其中一些科学问题特别值得探讨,包括该次低涡从形成发展

到减弱消亡期间高低层结构和涡度是如何演变的; 涡度收支和位涡的分布状况是如何影响低涡的发生发展的; 此外还有低涡暴雨期间, 其水汽来源及边界水汽收支的变化等。希望通过对该例的分析, 能对东北低涡的认识有一个更清晰的图像。最后, 在此基础上, 将 2005 年夏季 6~8 月的东北低涡暴雨个例的环流特征与 1998 年的情况进行比较, 以弄清不同个例引发暴雨的东北低涡, 它们的大尺度环流特征及其差异。

2 资料和分析方法

本文采用 1998 年全国 730 站的日降水资料和 2005 年的加密站点降水资料, 结合 NCEP 每 6 h 一次的再分析资料对东北低涡暴雨进行研究。东北地区的范围 (图 1) 取为: ($38 \sim 54^{\circ}\text{N}$, $119 \sim 135^{\circ}\text{E}$)。个例选择的条件是: 1) 形势场符合东北冷涡的定义^[2], 在 500 hPa 图上至少能分析出一条闭合等高线, 并有冷中心或明显冷槽配合的低压环流系统; 冷涡出现在 ($35 \sim 60^{\circ}\text{N}$, $115 \sim 145^{\circ}\text{E}$) 范围内; 冷涡在上述区域内至少维持 3 天或 3 天以上; 2) 东北地区出现 24 h 大于 50 mm 降水的站点数 ≥ 3 。本文选取了 2005 年的 7 月 25~29 日一次引发持续性暴雨的东北低涡过程集中进行分析研究, 从其结构特征、涡度和水汽收支等不同角度做了较为深入的探讨, 在此基础上, 与 1998

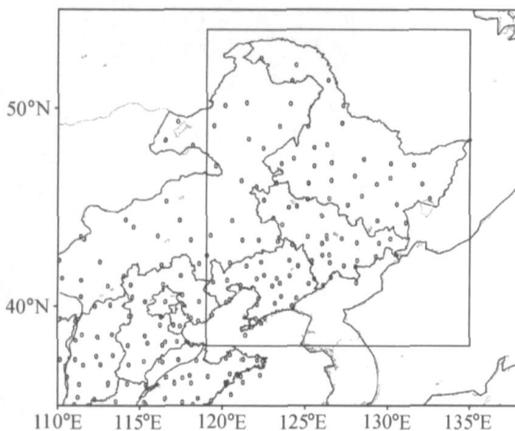


图 1 东北地区的范围和站点分布 (“.”为站点, 框内为东北地区)

Fig 1 The distribution of surface stations and the area of Northeast China (“.” is station and the area inside the rectangle is Northeast China)

年夏季的东北低涡及欧洲冷涡做了一些比较。

3 2005 年 7 月 25~29 日东北低涡暴雨的研究

3.1 低涡的发生发展过程及天气

500 hPa 上 (图 2), 乌拉尔山高压脊东伸, 在巴尔喀什湖以北至贝加尔湖东侧维持着一个大范围的冷性涡旋, 2005 年 7 月 23 日 1200 UTC 在贝加尔湖南端切断出一个小的闭合低涡, 中心强度为 5 740 gpm, 对应 -14 的冷中心。随着贝加尔湖北部高压脊的增强, 低涡从贝加尔湖向东南方向移动, 24~26 日, 副热带高压西伸至内陆地区, 低涡南移缓慢, 且强度变化不大。27 日 1200 UTC 大陆高压减弱, 低涡中心强度为 5 700 gpm, 对应 -12 的冷中心, 此后低涡开始迅速加强成熟。28 日 1200 UTC 低涡中心达到 5 640 gpm, 温度槽与高度槽趋于重合, 涡旋南侧伸至 35°N 附近, 基本控制整个东北地区。29 日 0000 UTC 后, 温度槽超前于高度槽, 低涡减弱东移; 30 日 1200 UTC 后低涡减弱为低槽移出东北。此次低涡从 7 月 25~30 日影响东北地区长达 6 天, 500 hPa 低涡中心的强度演变见图 3。

对流层低层 850 hPa 上 (图 4), 24 日 1800 UTC 在蒙古以东形成一个弱低压, 中心值为 1 450 gpm, 闭合低压出现时间较中层晚 1 天左右。低压由蒙古国向东移入东北地区, 强度变化不大。27 日 1200 UTC 有河套低压向北移入东北地区, 低压加强至 1 400 gpm。此后低压迅速加强成熟, 28 日 1200 UTC 低压发展达到最强, 中心值为 1 360 gpm。29 日 0000 UTC 开始减弱东移, 低层减弱是与中层基本同步的。

200 hPa (图 5) 上, 低涡的闭合中心出现时间最晚, 25 日 1200 UTC 贝加尔湖东部低槽加强, 切断出一个闭合低涡。此后, 随着贝加尔湖西部高压脊的加强东伸, 低涡不断向南伸展, 低涡南部对应暖中心。27 日 1200 UTC 后, 贝加尔湖西部高压脊西伸, 涡底部的槽区开始加深发展。28 日低涡前部暖平流的输送有利于鄂霍次克海高压脊发展, 使得低涡在东北地区上空滞留。29 日鄂霍次克海高压脊减弱, 低涡东移减弱; 30 日 0000 UTC 低涡闭合中心消失。

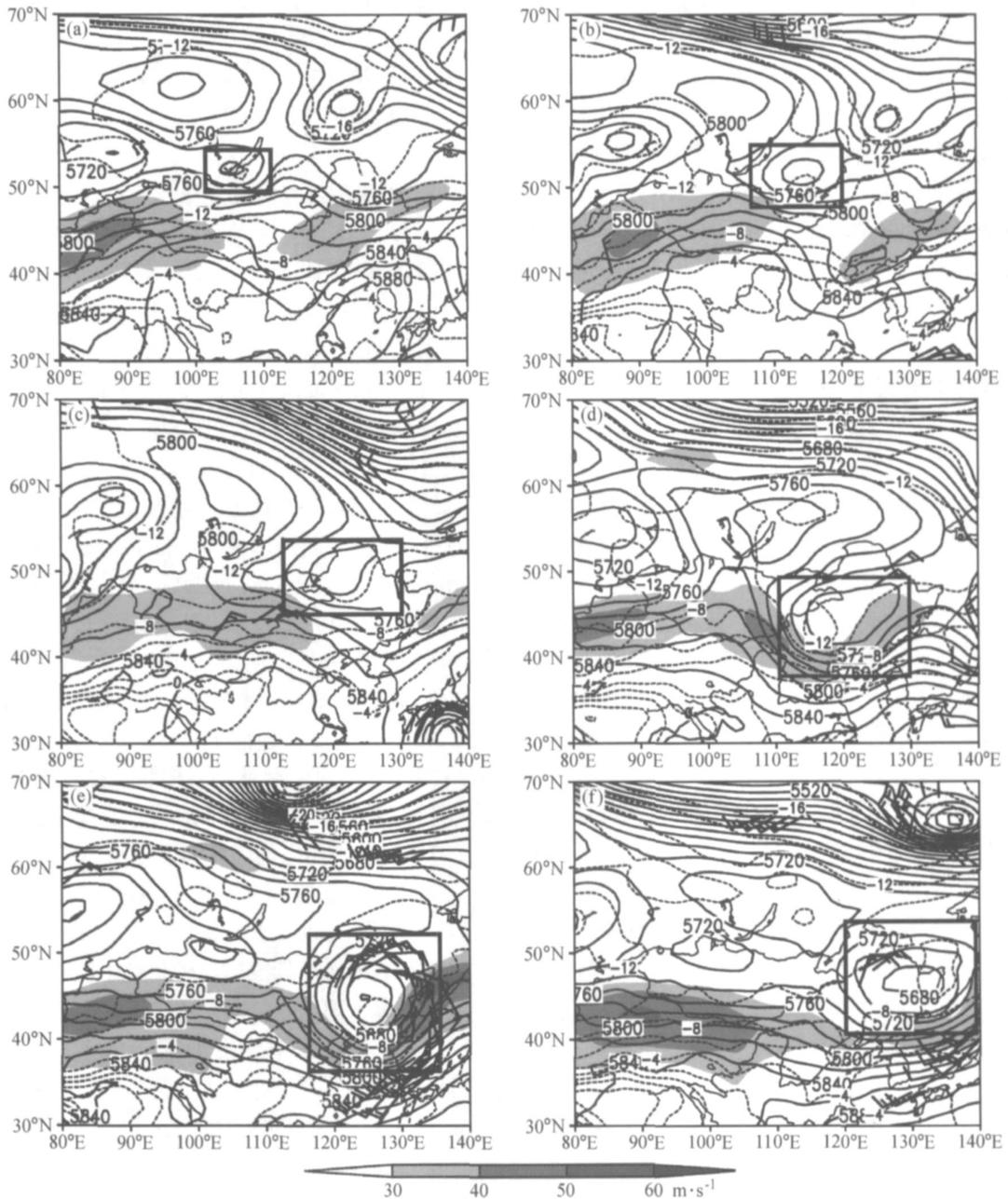


图2 500 hPa 位势高度场 (实线, 单位: gpm), 温度场 (短虚线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和高、低空急流的分布 (风向杆表示 850 hPa 上风速 $> 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 阴影区表示 200 hPa 上风速 $> 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 矩形方框表示低涡涡区的范围): (a) 7月23日 1200 UTC; (b) 7月24日 1200 UTC; (c) 7月25日 1200 UTC; (d) 7月27日 1200 UTC; (e) 7月28日 1200 UTC; (f) 7月29日 1200 UTC

Fig. 2 The geopotential height (solid lines, units: gpm), the temperature at 500 hPa (short dashed lines, units: $^{\circ}\text{C}$), wind speed at 200 hPa (shaded area, larger than $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) and wind field at 850 hPa (vector, larger than $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$): (a) 1200 UTC 23 Jul; (b) 1200 UTC 24 Jul; (c) 1200 UTC 25 Jul; (d) 1200 UTC 27 Jul; (e) 1200 UTC 28 Jul; (f) 1200 UTC 29 Jul. The rectangles are the vortex areas at 500 hPa

地面图上 (图略), 对应于低涡从贝加尔湖向东南方向移动, 一冷锋和锋后高压不断南压。地面气旋性环流较弱, 直到 27 日 1200 UTC 后, 河套低压移

入东北地区, 地面气旋开始快速发展加强。28 日达到最强; 29 日 0000 UTC 气旋开始减弱移出。

由上可见, 中层的低涡闭合中心比高层和低

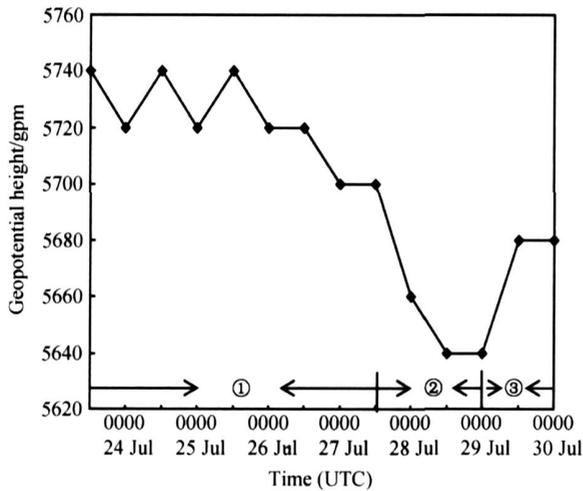


图3 7月23~30日500 hPa冷涡中心的强度演变(①②③表示低涡发展的三个阶段)
 Fig. 3 Intensity of the vortex (close center value at 500 hPa) from 23 to 30 Jul (①②③ represent the three development stages of the vortex)

层出现的早, 高层最后出现闭合中心, 中低层低涡的减弱几乎是同步的, 高层低涡闭合中心消失得最早。因此切断低涡或东北低压较早出现在对流层中层, 而后向下及向上伸展的特点与我国1998年的个例^[12]及欧洲的个例^[20]有一定的相似之处。

受此次低涡影响, 东北地区从25~29日产生了持续降雨过程(图6)。其中27~28日, 即在低涡最强盛的阶段, 东北地区出现了大范围的中到大雨, 暴雨区主要集中在黑龙江东部和辽宁东南部。27和28日的暴雨站点数也分别达到了9和10个, 此外, 7月25和29日, 分别在内蒙古北部和吉林省中部出现局地暴雨。

由卫星云顶亮温(TBB)的分布(图7), 发现: 冷涡暴雨初期, 冷涡东到东南部有孤立的对流云团(图7中“ A ”), TBB为230 K(大体相

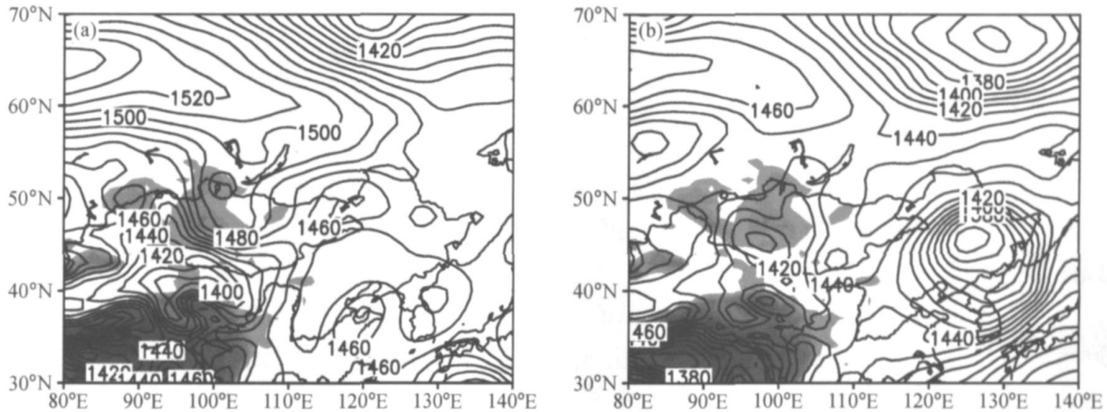


图4 850 hPa位势高度场(实线, 单位: gpm; 阴影表示地形高度大于1500 m); (a) 7月24日1800 UTC; (b) 7月28日1200 UTC
 Fig. 4 The geopotential height at 850 hPa (solid lines, units: gpm; the shaded area represents the area which topography is higher than 1500 m); (a) 1800 UTC 24 Jul; (b) 1200 UTC 28 Jul

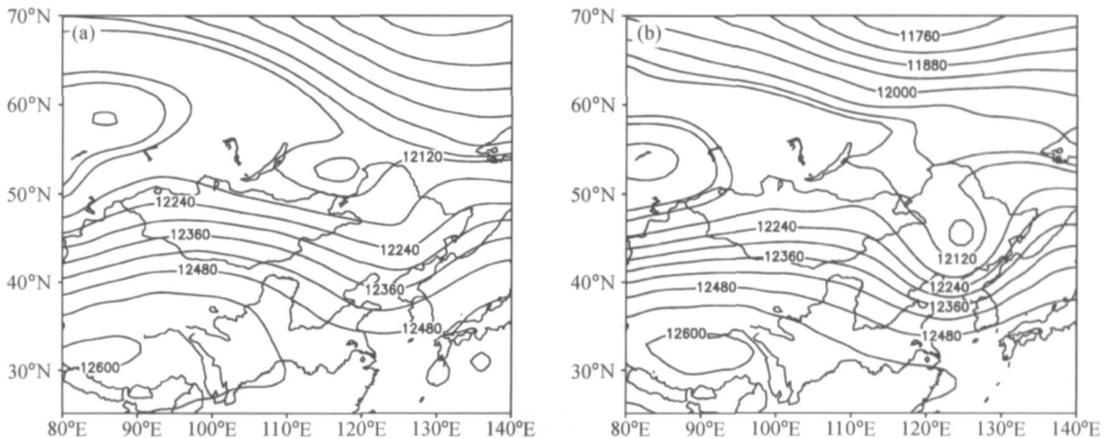


图5 200 hPa位势高度场(实线, 单位: gpm); (a) 7月25日1200 UTC; (b) 7月28日1200 UTC
 Fig. 5 The geopotential height at 200 hPa (solid lines, units: gpm); (a) 1200 UTC 25 Jul; (b) 1200 UTC 28 Jul

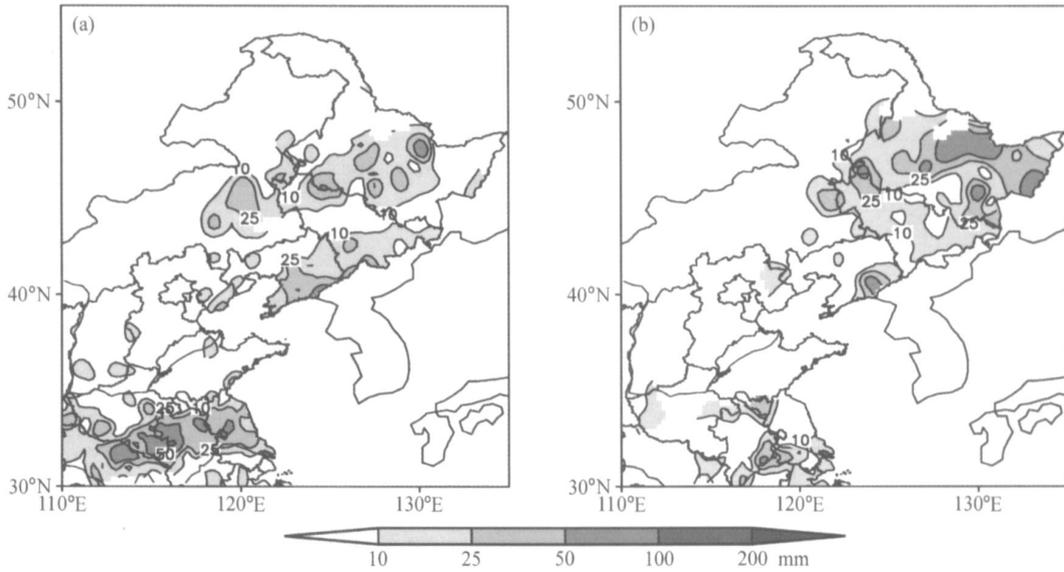


图 6 24 h 降雨量 (单位: mm): (a) 7 月 27 日 0000 UTC~28 日 0000 UTC; (b) 7 月 28 日 0000 UTC~29 日 0000 UTC
Fig. 6 The 24 h precipitation (units: mm): (a) 0000 UTC 27 - 0000 UTC 28 Jul; (b) 0000 UTC 28 - 0000 UTC 29 Jul

当于 300 hPa), 局部地区云顶温度达到 220 K, 与 25 日内蒙古北部的局地降水雨团的位置较为接近。上述对流云团随着冷涡的移动, 逐渐东移减弱; 此后随着上游方向贝加尔湖高压的加强, 脊前冷空气南下, 伴随着冷锋或副冷锋从蒙古国南下, 锋面云带 (图 7 中“B”) 移入东北造成带状降水。27 日, 河套低压东移, 对应有对流云团逆时针旋转移入东北, 由于冷涡东部位于高空急流出口区的左侧辐散区, 加强了对流云团的发展, 在东北地区形成了椭圆形的对流云团 (图 7 中“C”)。28 日, 副高西北部的西南低空急流加强, 水汽源源不断地向北输送, 从副高后部向东北方向形成典型的螺旋型云带 (图 7 中“D”), 其中东北地区对流活动旺盛的地区, TBB 达到 230 K, 与 27~28 日的暴雨位置对应。由此更进一步说明, 冷涡东部或东南部的中尺度对流系统活动与东北地区局地强降水有着直接的关系。对于该中尺度对流系统的结构及机理研究, 将另文分析。

3.2 低涡的结构特征

根据低涡强度的变化, 将其分为 3 个阶段 (见图 3): 初期发展阶段 (23 日 1200 UTC~27 日 1200 UTC), 加强成熟阶段 (27 日 1200 UTC~29 日 0000 UTC) 和减弱消亡阶段 (29 日 0000 UTC~30 日 0000 UTC)。下面将选取代表性时刻

分析低涡的结构特征, 尤其是加强成熟阶段的特征。

3.2.1 高低空风场的结构和散度的分布

初期发展阶段 (图 2a~e), 200 hPa 高空急流主要位于低涡西南侧, 急流出口区呈反气旋式弯曲, 低涡的强度较弱; 此时, 850 hPa 上低空急流尚未出现。由过 500 hPa 的低涡中心的经向和纬向的垂直剖面 (图略) 可以发现, 此阶段对流层内低涡北部的偏东气流和西部的偏北气流均较弱。随着低涡的南压加强 (图 2d~e), 中纬度高空急流位置也向南移动。在低涡南部出现连续的气旋式弯曲的急流带, 有利于东北低涡的维持和发展。此时, 在低涡加强成熟阶段, 850 hPa 上, 在低涡东北和东南侧先后出现了低空偏东和偏南急流。低空的偏东急流是由两支气流汇合而成的 (图 8a), 一支是低涡北侧东伸的贝加尔湖高压南部的偏东气流; 另一支来自偏南急流沿低涡前部气旋性弯曲转向后形成的偏东气流; 两支气流汇合产生低涡东北侧的辐合区。而低空偏南急流来自副高西北侧的暖湿空气, 与偏东气流形成切变辐合。

由过 500 hPa 的低涡中心的经向和纬向的垂直剖面 (图 9) 可以发现, 低涡加强成熟阶段, 西部对流层中高层的偏北气流显著增加, 使得低涡东西两侧的经向风分布趋于对称, 这与北美高空

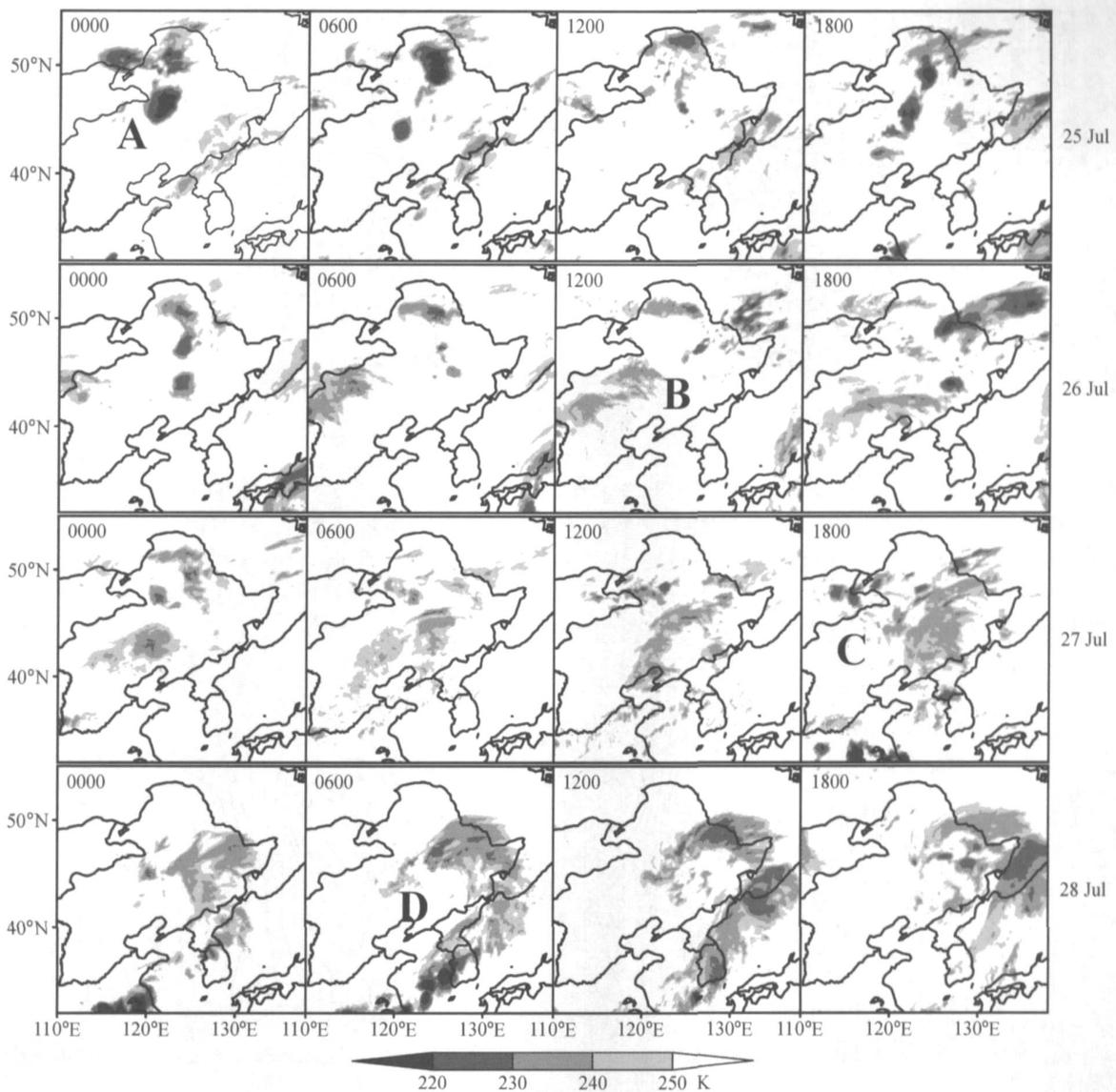


图 7 7月25日0000 UTC~28日2400 UTC的每隔6 h的TBB分布(A、B、C、D为云团)

Fig. 7 The distribution of TBB from FY-2 satellite per 6 hours from 25 to 28 Jul (A, B, C, D represent cloud cluster)

冷涡的结构相似^[6]；而且低涡北部的偏东急流区是从中层向下伸展到850 hPa附近的中低空急流。

由此可见，在发展期，东北低涡东部存在着高、低空系统的相互作用；低空西南暖湿气流与中低层东北冷干气流在低涡的东部或东部偏北产生切变辐合，同时，高空西风急流的强辐散区的迭加(图8b)，使得对流运动得以维持和发展。

低涡减弱阶段(图2f)，200 hPa高空急流带断裂减弱；低空偏南急流也东移减弱。低涡位于高空急流入口区左侧的辐合区，上升运动受到抑制，不利于大范围暴雨的发生，而且对流层内低

涡北部的偏东气流和西部的偏北气流最先减弱，其中西部的偏北气流减弱最快，低涡加强成熟期形成的经向风对称结构迅速瓦解。这表明对流层中低层的冷空气(东北气流)的侵入，对低涡的维持和加强起到了重要作用。

3. 2. 2 涡度的分布

各个时刻沿低涡中心所在纬度的相对涡度的垂直剖面显示：低涡在初始发展阶段(图10a~c)，气旋性涡度首先出现在对流层中层，随着低涡的发展，向中低层伸展，稍后伸展到高层；这与低涡高低层闭合中心的出现顺序一致。到了开

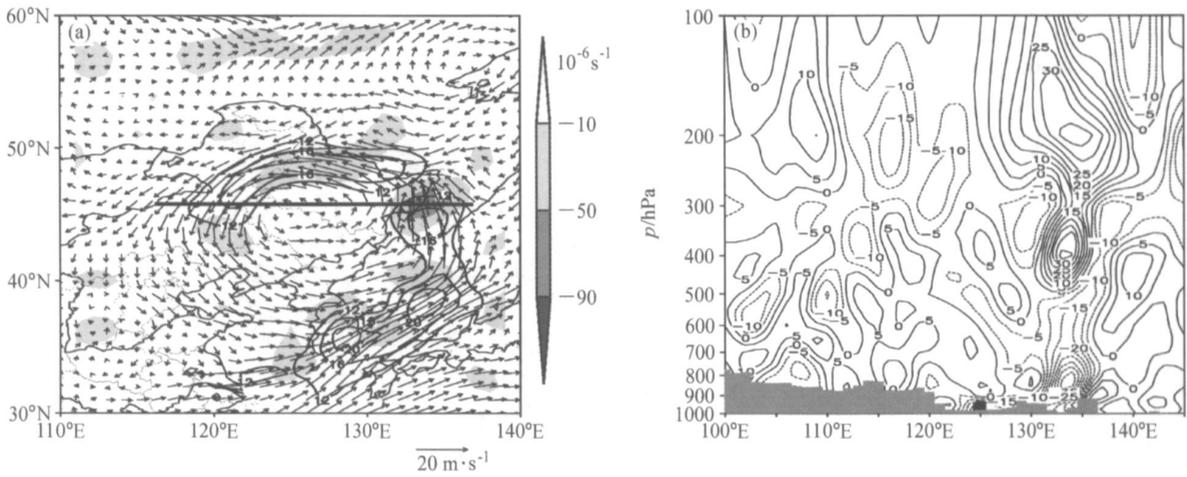


图8 7月28日1200 UTC (a) 850 hPa 风场和辐合区 (箭头表示风场; 等值线表示 $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的等风速线; 阴影区为散度 < 0 的辐合区, 单位: 10^{-6} s^{-1}) 和 (b) 沿 45°N (a) 中的粗直线) 的散度的垂直剖面 (●表示低涡中心位置)
Fig. 8 (a) Wind fields and convergence at 850 hPa at 1200 UTC 28 Jul (vectors are wind fields, contours represent the wind speed $\geq 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, shaded is divergence < 0 , units; 10^{-6} s^{-1}); (b) vertical cross section of the divergence along 45°N [the thick solid line in (a)] at 1200 UTC 28 Jul (units; 10^{-6} s^{-1} , ● represents the center of vortex)

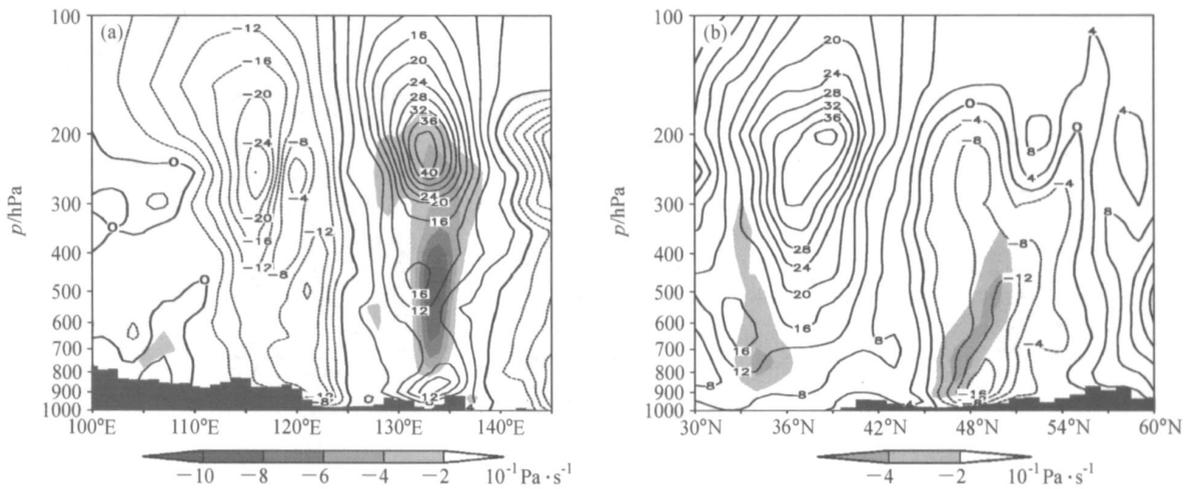


图9 7月28日1200 UTC 沿低涡中心的经纬向风和垂直速度的垂直剖面: (a) 沿 45°N 经向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和垂直速度 (阴影); (b) 沿 125°E 纬向风 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 和垂直速度 (阴影)
Fig. 9 Vertical cross sections of meridional, zonal wind and the vertical velocity at 1200 UTC 28 Jul: (a) along 45°N , meridional wind (units; $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and vertical velocity (shaded areas); (b) along 125°E , zonal wind (units; $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and vertical velocity (shaded areas)

始加强阶段 (图 10d), 对流层高层的气旋性涡度增加最快, 并逐渐向中低层传播, 在对流层高层和中低层各有一个正涡度大值区, 大值区的垂直轴线从低层到高层向西倾斜, 从一定程度上反映了低涡在开始加强发展时具有很强的斜压性。28日低涡发展到成熟 (图 10e), 正涡度大值区从高层伸展至地面, 轴线接近垂直, 对应于低涡与其地面气旋的加强成熟。随后 29日 (图 10f) 对流

层高层的正涡度中心减弱, 轴线向前倾, 低涡开始减弱。

3. 2. 3 假相当位温和锋生函数的分布

东北低涡 (冷涡) 是对流层中较深厚的涡旋系统, 且并不是所有的低涡都会诱发地面锋面气旋的产生^[12]。该例中 27日 1200 UTC 后低涡快速加强, 地面锋面气旋也随之迅速发展。由 850 hPa 假相当位温的分布 (图略) 发现, 27日 1200

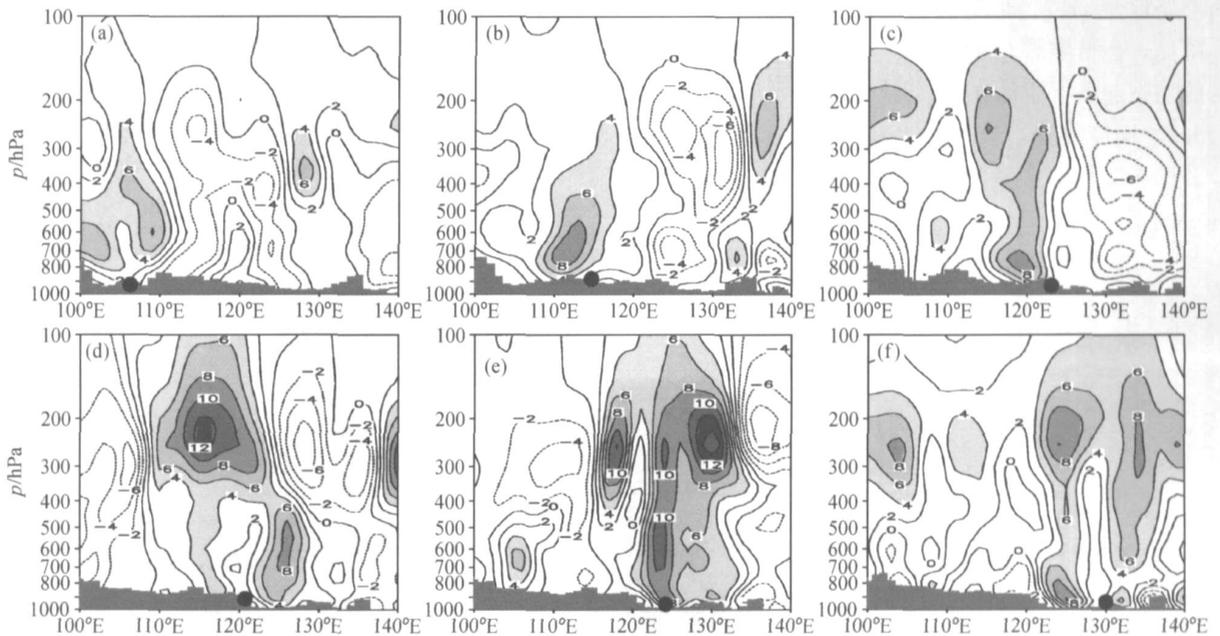


图 10 7 月 23~29 日沿 500 hPa 低涡中心的相对涡度的纬向垂直剖面 (●表示低涡中心位置, 单位: $10^{-5} s^{-1}$): (a) 23 日 1200 UTC; (b) 24 日 1200 UTC; (c) 25 日 1200 UTC; (d) 27 日 1200 UTC; (e) 28 日 1200 UTC; (f) 29 日 1200 UTC

Fig. 10 Vertical cross sections of relative vorticity along the center of vortex at 500 hPa during 23-29 Jul (●represents the center of vortex, units: $10^{-5} s^{-1}$): (a) 1200 UTC 23 Jul; (b) 1200 UTC 24 Jul; (c) 1200 UTC 25 Jul; (d) 1200 UTC 27 Jul; (e) 1200 UTC 28 Jul; (f) 1200 UTC 29 Jul

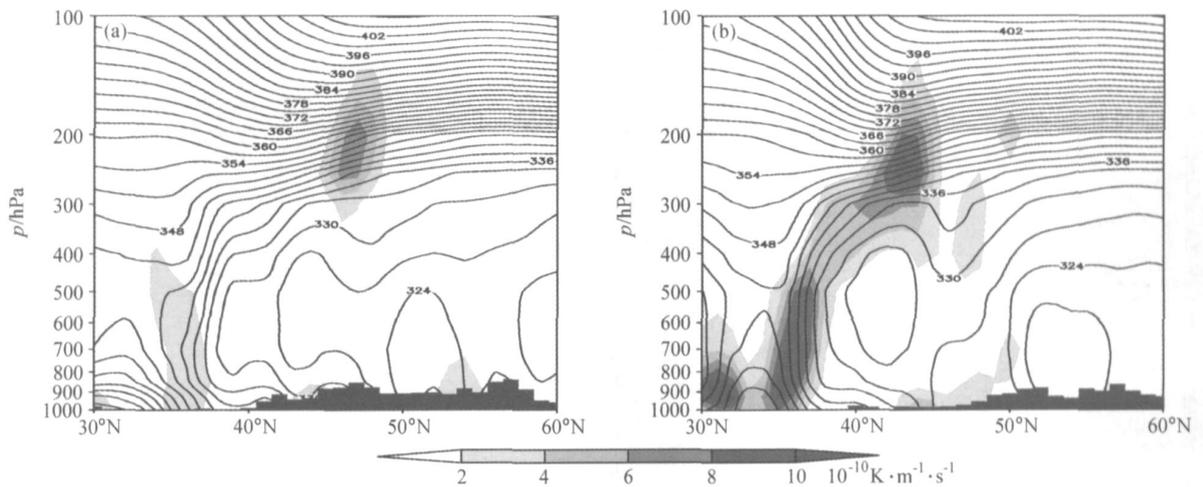


图 11 垂直于锋区的假相当位温 (实线, 单位: K) 和锋生函数 (阴影表示正值区) 的经向垂直剖面: (a) 7 月 27 日 1200 UTC 沿 120° E; (b) 7 月 28 日 0000 UTC 沿 123° E

Fig. 11 Vertical cross section of pseudo-equivalent potential temperature (solid lines, units: K) and the frontogenesis function (shaded areas represent the positive value): (a) along 120°E at 1200 UTC 27 Jul; (b) along 123°E at 0000 UTC 28 Jul

UTC 从东北到河套为一条明显的密集带, 与地面冷锋的锋区相对应; 到 28 日 0000 UTC, 锋区位置略向南移。垂直于锋区的假相当位温和锋生函数的经向垂直剖面 (图 11) 得出, 27 日 1200 UTC 低涡开始加强时, 低涡中心上方对流层中高

层出现锋生函数正的大值区, 对应后倾的斜压锋区; 低层偏南侧有锋生函数的正值区, 对应前倾的斜压锋区, 二者是断开的。到了 28 日 0000 UTC, 高低空锋生均增强, 而且高低空两个锋生函数的大值区相连, 对应于深厚的近乎垂直的低

层略前倾的“弓形”假相当位温的密集区。由此可见，高低空锋生的相互作用，对地面锋面气旋的加强起到一定的作用。

3.3 涡度收支

涡度收支方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} = A + B + C + D + E,$$

$$A = - \left[u \frac{\partial}{\partial x} + v \left(\frac{\partial}{\partial y} \right) \right],$$

$$B = - \frac{\partial}{\partial p},$$

$$C = - (f +) \nabla \cdot V,$$

$$D = - \left(\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} \right),$$

A、B、C和D分别是水平平流项、垂直平流项、水平辐合辐散项和扭转项，E是摩擦项，在讨论中忽略摩擦的影响。其中u是纬向水平风速，v是经向水平风速，是垂直运动速度，是涡度，f为科里奥利参数，= ∂f/∂y。

低涡初期发展阶段（图 12a 和 12b），正的涡度收支首先出现在对流层中低层（800 ~ 400 hPa），高层出现较晚，这与等高线在不同高度闭合中心的出现顺序基本一致。水平涡度平流项(A)

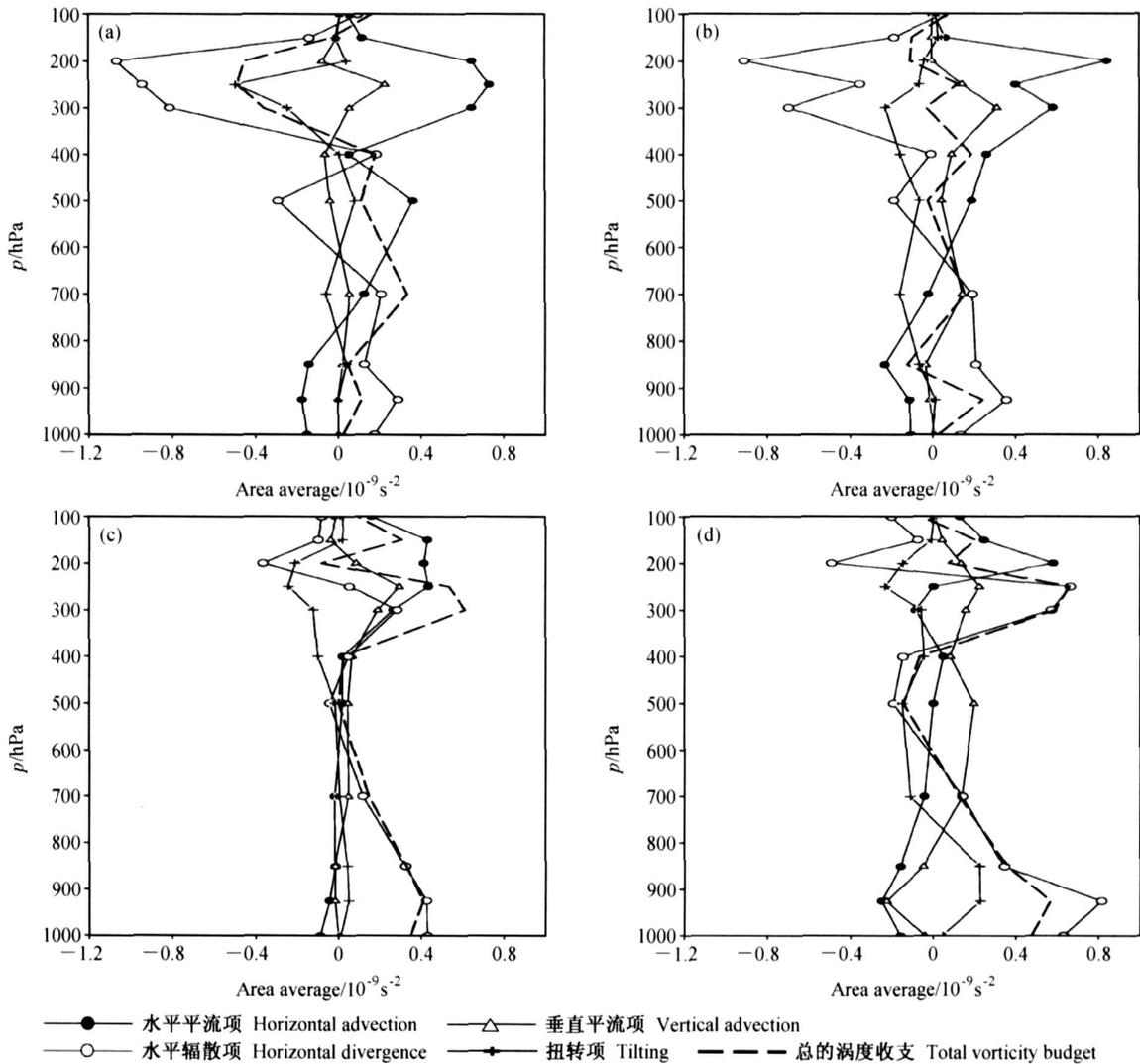


图 12 低涡区内各项及总涡度收支的区域平均的垂直分布（区域为图 2 中的矩形框）：(a) 7 月 24 日 1200 UTC；(b) 7 月 25 日 1200 UTC；(c) 7 月 27 日 1200 UTC；(d) 7 月 28 日 1200 UTC

Fig. 12 Vertical distribution of the area mean of the various terms and the total vorticity budget (area is taken from the rectangle region in the Fig. 2) : (a) 1200 UTC 24 Jul ; (b) 1200 UTC 25 Jul ; (c) 1200 UTC 27 Jul ; (d) 1200 UTC 28 Jul

和水平辐合辐散项 (C) 在不同高度上对正涡度的贡献相反, 其中 A 使得中层正涡度增加, 低层正涡度减小; 而 C 的作用和 A 恰恰相反。25 日 1200 UTC, 对流层高层开始出现正的涡度收支, 主要是 A 使得正涡度增加, 超过了 C 对正涡度的削弱。同时, 对流层中低层到高层, 垂直平流项 (B) 基本上为正值, 量值不大, 峰值位于高层 300 hPa 附近, 说明垂直平流项对正涡度由中低层向高层的输送也有一定的贡献。

低涡加强成熟阶段 (图 12c 和 12d), 对流层高层和中低层均为正的涡度收支, A 和 C 的作用在对流层中低层仍相反, 但在高层转为一致。值得注意的是, 虽然低层水平涡度平流项使低层气旋性涡度减弱, 但由于水平涡度平流下负上正的垂直分布, 根据垂直运动方程, 当涡度平流随高度增加时, 将产生上升运动, 导致低层辐合的加强, 从而促进地面气旋的发展, 因此下负上正的涡度平流分布间接地促进了低涡涡区地面气旋的发展, 一定程度上解释了 27~28 日地面气旋的迅速发展加强的过程。低涡减弱阶段 (图略), 对流层中低层和高层均变为负的涡度收支, C 对正涡度的削弱超过了 A 对正涡度的增加作用。

总的来说, A 和 C 对低涡的发展加强起最主要的作用。但在低涡不同发展阶段, 这两项的作用及大小各不相同。在低涡初始发展阶段和减弱

阶段, 这两项的作用从中低层到高层均为相反的。但在低涡加强成熟阶段, 在对流层高层这两项的作用则是一致的, 为高层气旋性涡度的增加有正的贡献; 而且 A 在对流层内下负上正的分布间接地有利于地面气旋的发展。

3.4 位涡分析

暴雨的发生发展一般都是由多尺度系统相互作用的结果^[1], 形成机理比较复杂, 单一的诊断量如涡度、垂直速度和水汽通量等均难以全面诊断暴雨发生发展的物理机制。然而位涡 ($P = -\frac{1}{\sigma} \rho \cdot \nabla$, 其中 ρ 是等压面上的相对涡度, σ 是位温, ρ 是密度) 对许多中高纬天气系统的移动和发展有较好的指示意义。

图 13 是沿低涡中心纬向的位涡剖面 (单位: PVU, $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$)。在冷涡初始发展阶段, 对流层高层的大值位涡一直位于 300 hPa 以上, 对流层中层存在大于 1 PVU 的位涡大值区, 对应于起始时刻位于中层的气旋性涡度大值区, 直到 26 日 1200 UTC 高层大值位涡才向下伸展至 400 hPa 附近 (图略)。27 日 1200 UTC, 冷涡东侧的高层大值位涡迅速向下伸展至 700 hPa 附近, 对应于此时冷涡开始明显加强 (图 13a)。冷涡成熟期, 位涡大值区伸至对流层低层 800 hPa 附近 (图 13b); 随后冷涡东移减弱, 29 日 1200 UTC 高层位涡东传, 对流层中低层的位

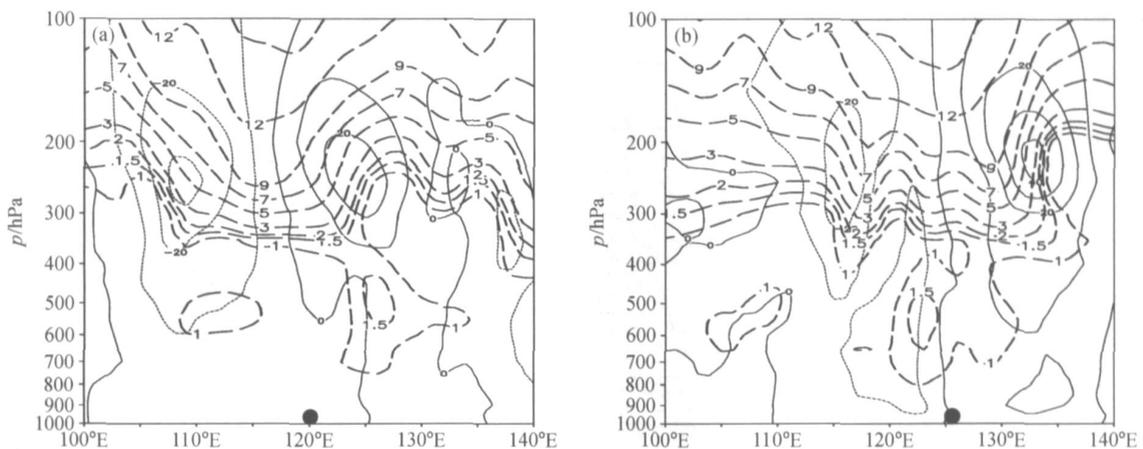


图 13 过低涡中心所在位置的位涡和经向风垂直剖面 (实线为南风, 细虚线为北风, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 粗虚线是位涡, 单位: PVU, $1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$, 表示 500 hPa 上低涡的中心位置): (a) 7 月 27 日 1200 UTC; (b) 7 月 28 日 1200 UTC

Fig. 13 Vertical cross sections of the potential vorticity and the zonal wind along the vortex center (solid lines are south wind, thin dashed lines are north wind, units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; thick dashed lines are potential vorticity, units: PVU, represents the vortex center at 500 hPa): (a) 1200 UTC 27 Jul; (b) 1200 UTC 28 Jul

涡大值区与高层位涡分离, 并减弱 (图略)。

由此可见, 冷涡的发展加强, 主要受到高层位涡向下传播的影响, 高层位涡大值区下传的区域位于冷涡区的东部, 与冷涡暴雨的落区有很好的对应。应当指出的是, 此例中对流层上层位涡大值区的下传, 与欧洲的个例相似^[8], 但本例中的位涡大值区达到了 15 PVU (见图 13b), 而欧洲个例的大值区, 都仅有 4 PVU, 表明了高层位涡扰动的影响在我国东北更为明显。

3.5 水汽来源及收支分析

水汽是暴雨形成的一个重要条件, 东北低涡暴雨期间, 水汽的供应和输送对暴雨的产生和增强有着重要的影响。7月25~29日的850 hPa水平水汽通量图 (图 14a) 和沿 125°E 的 850 hPa 水汽通量随时间的演变 (图 14b) 表明, 低涡刚进入东北地区时, 水汽主要来源于低涡北部 50°N 附近的中高纬度地区, 水汽输送较弱。随着 27日 1200 UTC 后低涡的加强成熟, 低涡北部的水汽输送增强的同时, 低纬地区西南季风加强, 中低纬之间水汽的输送也显著增强, 沿副高西侧从低纬到中高纬建立起一条较强的水汽输送带, 对 27~28日的较大范围的低涡暴雨的出现起到主要的作用。

为了分析低涡影响期间东北地区水汽收支的变化, 计算了 25 日低涡系统进入东北地区发展加强达到成熟, 29 日减弱后移出的整个过程中东北

地区 4 个边界 (按图 1 中的矩形框) 整层的水汽输送 (图 15), 结果表明: 7月25~29日北边界一直为输入, 但从 7月27日输入量开始减少; 同时, 南边界由输出转为输入, 并逐渐增加, 在 27日 1800 UTC 和 28日 0600 UTC 先后达到两个峰值, 南北向的水汽由辐散转为辐合。西边界基本上一直为输入, 但水汽量较小; 而东边界在 25 日为输出, 26 日变为输入, 27 日后输出开始明显增加, 东西向的水汽是由辐合转为辐散。总之, 东北地区 27~28 日较大范围低涡暴雨期间, 水汽以南北向的辐合为主。

4 1998 年和 2005 年夏季的东北低涡暴雨环流形势的比较

以上仅对 2005 年 7 月的一例东北低涡进行了研究, 为了了解该例的环流特征与其他个例的异同, 根据第 2 部分给出的标准, 分别从 1998 年和 2005 年夏季选出 5 个典型东北低涡暴雨过程进行讨论 (见表 1)。1998 年的 5 个个例中 6 月发生 1 例, 7、8 月各 2 例, 而 2005 年 6、8 月各 1 例, 7 月有 3 例。

Zhao 等^[12]曾将 1998 年东北低涡按其路径分为 3 类: (A) 从贝加尔湖向东南移; (B) 从蒙古或内蒙古向东移; (C) 从河套地区或江淮地区向东北方向移动。如表 1 所示, 1998 年 7 月的两次

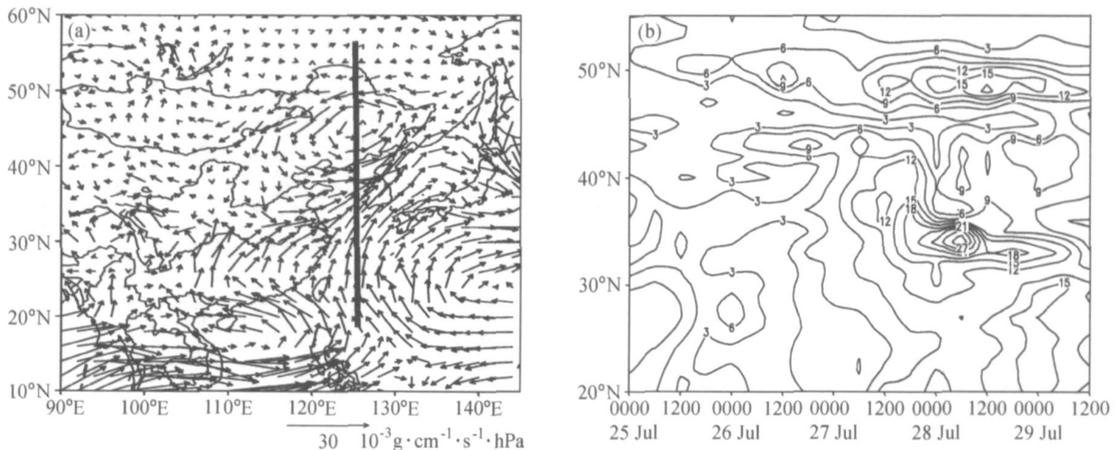


图 14 (a) 7月27日 1800 UTC 850 hPa 水平水汽通量和 (b) 7月25~29日沿 125°E [(a) 中的粗实线] 的 850 hPa 水汽通量的时间-纬度剖面 (单位: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

Fig. 14 (a) Moisture flux at 850 hPa at 1800 UTC 27 Jul and (b) the time-latitude cross section of moisture flux at 850 hPa along 125°E [the thick solid line in (a)] from 25 to 29 Jul (units: $10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$)

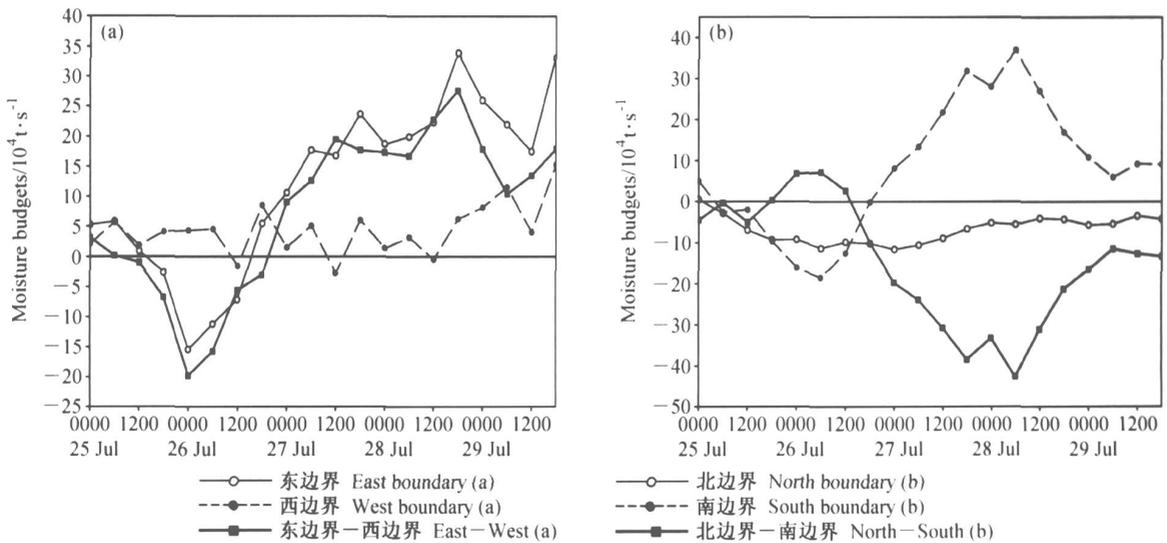


图 15 7 月 25 ~ 29 日 (a) 东、西边界及东边界-西边界水汽收支随时间的变化和 (b) 南、北边界及北边界-南边界的整层水汽收支随时间的变化 (以向东和向北方向为正值)

Fig. 15 Moisture budgets in the whole layer during 25 - 27 Jul: (a) from the east, west boundary and the sum (east-west); (b) from the south, north boundary and the sum (north-south) (positive value means towards the east and north)

表 1 1998 年和 2005 年夏季 (6 ~ 8 月) 的东北低涡暴雨两个例简况

Table 1 The heavy rainfall cases caused by northeast vortex in the summer of 1998 and 2005

序号	1998 年			2005 年		
	日期	暴雨站点数	低涡路径类型	日期	暴雨站点数	低涡路径类型
1	6 月 15 日	4	B	6 月 29 日 6 月 30 日	65	B
2	7 月 6 日 7 月 7 日	411	C	7 月 4 日	5	A
3	7 月 13 日 7 月 14 日	714	C	7 月 08 日 7 月 09 日	35	A
4	8 月 4 日 8 月 5 日 8 月 6 日	3 22 4	B	7 月 25 日 7 月 27 日 7 月 28 日 7 月 29 日	5 9 10 3	A
5	8 月 10 日 8 月 11 日	7 5	C	8 月 01 日	6	B

低涡大暴雨过程均属于 (C) 类, 该类低涡是由于地面低压从河套地区向东北地区移动, 高空槽不断加深而切断形成的; 对 1998 年的个例已经有了一些研究^[12,14], 而 2005 年的低涡暴雨个例有所不同, 多属于 (A) 型, 该类低涡是由于极地冷空气在贝加尔湖附近切断成低涡后, 向东南方向移入东北地区, 其中 7 月 25 ~ 27 日的低涡个例维持时间较长, 且造成较大范围的持续性暴雨, 因而它成为了本文的重点研究对象。

另外, 尽管 1998 年和 2005 年东北地区夏季 6

~ 8 月均出现多次的低涡过程, 但有些低涡却并没有产生区域性或较大范围的降水, 这与大范围环流形势的配置有很大的关系, 为此, 本文还就上述两年不同月份的低涡暴雨个例的环流形势特点做了具体的对比。

6 月 (图 16): 中高纬的环流经向度均较大, 伴有鄂霍次克海阻高的维持, 多是低槽在蒙古发展加深, 东移影响东北地区。不同的是: 1998 年 6 月中旬副高偏南, 5 880 gpm 线位于 30°N 以南, 并西伸至我国大陆内部, 低涡维持时间较短;

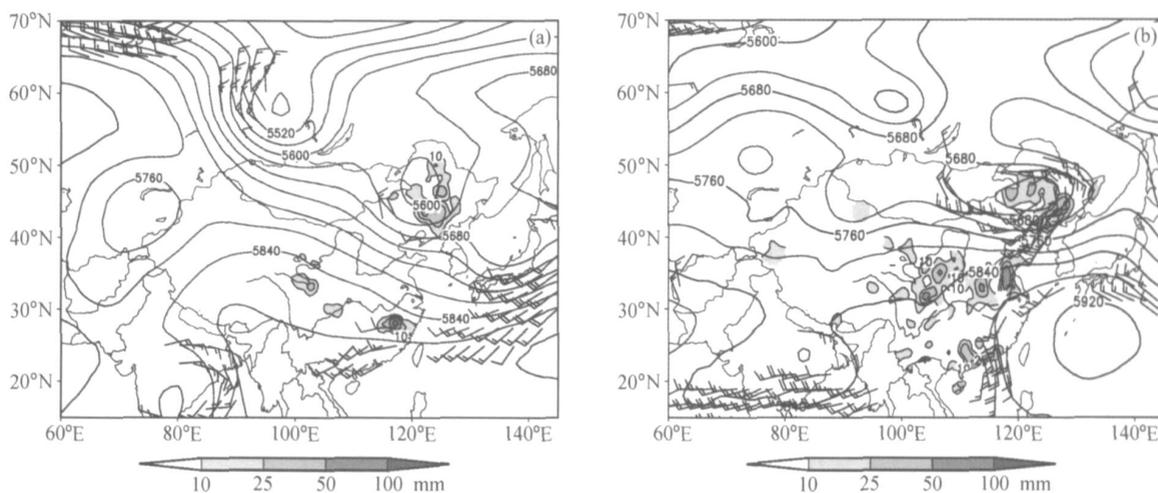


图 16 (a) 1998 年 6 月 15 日和 (b) 2005 年 6 月 30 日东北低涡暴雨的天气形势配置 (阴影表示 24 h 降雨量; 风标表示 850 hPa 上风速 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低空急流; 粗实线为 500 hPa 等高线 (单位: gpm))

Fig. 16 The composite synoptic weather pattern of heavy rainfall caused by northeast vortex: (a) 15 Jun 1998; (b) 30 Jun 2005 (The shaded is 24 h precipitation; The barbs are wind speed at 850 hPa $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and thick solid lines are geopotential height in gpm at 500 hPa)

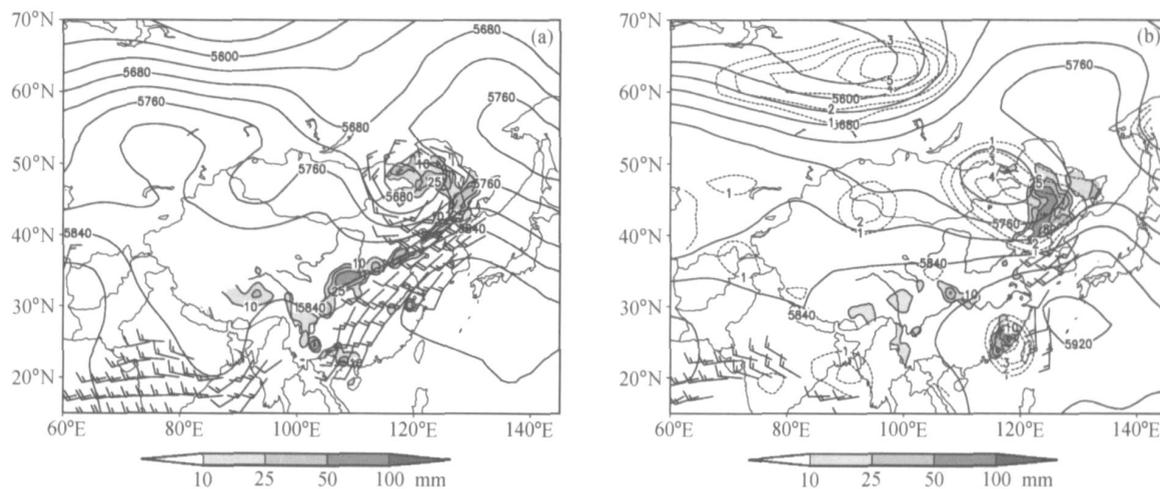


图 17 1998 年 (a) 7 月 7 日和 (b) 8 月 5 日东北低涡暴雨的天气形势配置 (短虚线为 500 hPa 上的等涡度线, 单位: 10^{-5} s^{-1} , 其他图例同图 16)

Fig. 17 The composite synoptic weather pattern of heavy rainfall caused by northeast vortex: (a) 7 Jul 1998; (b) 5 Aug 1998 (The short dashed lines are relative vorticity at 500 hPa, units: 10^{-5} s^{-1} , other legends are the same as Fig. 16)

2005 年 6 月底副高位置偏北, 5 880 gpm 线位于 35°N 以北, 与鄂霍次克海阻高形成明显的高压坝, 低涡维持时间较长。两次暴雨过程均是单纯的低涡降水, 低纬系统影响较小, 所以多为局地降水。

7 月: 中高纬阻塞形势和低涡的形成发展不同。1998 年上中旬鄂霍次克海高压在东亚沿岸维持, 在西西伯利亚高压位于贝加尔湖的西部, 贝

加尔湖冷空气东移分裂, 南支河套低槽不断东移加深形成低涡; 副高位置偏北, 和鄂霍次克海高压形成南北向的高压坝, 有利于东北低涡的维持 (图 17a)。而 2005 年 7 月的阻高开始主要位于乌拉尔山地区, 随着乌拉尔山阻高的东扩, 贝加尔湖北部的高压脊发展, 冷空气在其东部或东南堆积形成低涡, 并随着贝加尔湖高压的东伸, 低涡从贝加尔湖向东南方向移动 (图 2)。

8月：两年的差异较大。1998年8月上旬中高纬度由于鄂霍次克海阻高的维持，从乌拉尔山阻高脊前南下的冷空气分裂，南支在蒙古或是河套地区形成低槽，并东移加深形成低涡；同时伴有南来系统（如河套低压）的移入。副高南侧若有台风远距离的水汽输送，东北地区会产生大范围的暴雨，1998年8月5日（图17b）的大范围暴雨就属于此种情况，图中南面副高西侧的正涡度中心表示登陆台风，在副高与登陆台风之间存在明显的低空偏南风急流输送。而2005年8月（图略）鄂霍次克海阻塞形势明显较1998年弱，仅在8月1~2日有长波脊存在，低涡维持时间较短，后期东北地区为高压脊控制，低涡很少出现。

5 结论与讨论

对2005年7月25~29日较大范围持续性东北低涡暴雨个例的研究及对2005年和1998年夏季东北低涡暴雨环流特征的对比分析后，得出以下结论：

(1) 东北低涡的发展阶段，与梅雨锋上气旋（低涡、扰动）不同^[18]，且与西南低涡^[1]的情况也不同，气旋性涡度大值区最初出现在对流层中层，而后向中低层伸展，同时或稍后伸展到高层，这与各个等压面上闭合中心出现的顺序基本一致。而低涡加强阶段，气旋性涡度在对流层高层增加的最快，并逐渐向中低层传播，有时可能诱发地面锋面气旋的发展，但并非每次一定有地面气旋系统出现，这与北美的温带气旋发展不同^[21]。高低空锋生的相互作用，在低涡南部形成了深厚的近乎垂直的低层略前倾的“弓形”锋生区，表明东北低涡具有明显的受中纬度西风带系统影响的特点。另外，东北低涡一开始多见于中层，然后向上及向下伸展，这与欧洲冷涡有一定相似之处，但东亚冷涡区对流层上层位涡扰动的影响更为明显。

(2) 对流层中低层的冷空气（东北气流）的侵入对低涡的维持和加强起到了重要作用。低空西南暖湿气流与中低层东北冷干气流在低涡的东部产生切变辐合，同时，在低涡的东部存在着高、低空系统的相互作用，高空西风急流的强辐散区的迭加，使得对流运动得以维持和发展。低涡暴

雨初期水汽主要来自北部，随着低纬地区西南季风增强，沿副高西侧从低纬到中高纬形成一条较强的水汽输送带，东北地区水汽收支以南北向的辐合为主。

(3) 对卫星 TBB 资料的分析发现低涡区存在大量的暴雨对流云团，在切变线或锋面的组织下发展为对流云带。随着副高西北侧水汽输送的增强，常有典型的涡旋状云带形成，其中对流活动旺盛的地区与东北暴雨区的位置有较好的对应关系。这表明中尺度对流系统对此次东北低涡暴雨有重要的贡献。

(4) 涡度收支的计算表明，水平涡度平流项和水平辐散项对低涡的发展加强起主要的作用。但在低涡的不同发展阶段，这两项的作用及大小各不相同。位涡演变分析表明，对流层高层位涡大值区在低涡东部向下传播，有利于低涡的发展加强，与低涡暴雨的落区较一致。

(5) 通过对2005年和1998年夏季东北低涡暴雨期间天气形势配置的比较，发现它们之间有一些重要的差别：中高纬阻塞形势，特别是乌拉尔山阻高东伸在西伯利亚或贝加尔湖以北形成高压，以及鄂霍次克海地区的阻塞高压对东北低涡的形成和维持有重要的作用。如果鄂霍次克海阻高与北抬的副高相迭加形成高压坝，就更有利于低涡的维持。然而要产生区域性或较大范围的低涡暴雨，不仅与亚洲中高纬的阻塞形势、低涡的维持及西太平洋副高的位置有关，还与夏季风和低纬系统（如台风等）的水汽输送有很大的关系。这也许是尽管2005年东北低涡频发，但是未能像1998年的低涡能稳定维持并获得丰富的水汽供应，维持较长时间降水的原因。

需要指出的是，本文的研究是初步的，还有待于今后更多的工作来加以补充和修正。

参考文献 (References)

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 225pp
Tao Shiyuan. *Heavy Rainstorm in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 225pp
- [2] 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 东北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992. 219pp
Zheng Xiuya, Zhang Tingzhi, Bai Renhai. *Heavy Rainfall in Northeastern China* (in Chinese). Beijing: China

- Meteorological Press, 1992. 219pp
- [3] 赵思雄, 刘苏红, 周名扬. 夏季北京冷涡强对流天气的中尺度分析. 中国科学院大气物理研究所集刊, 第9号, 北京: 科学出版社, 1980. 151~160
Zhao Sixiong, Liu Suhong, Zhou Mingyang. Mesoscale analysis of strong convective weather system caused by cold vortex over Beijing during summer. *Collected Papers of Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences*, No. 9 (in Chinese), Beijing: Science Press, 1980. 151~160
- [4] Zhao Linna, Zhao Sixiong. Diagnosis and simulation of a rapidly developing cyclone related to a severe dust storm in East Asia. *Global and Planetary Change*, 2006, **52**: 105~120
- [5] Palm E. On the origin and structure of high-level cyclones south of the maximum westerlies. *Tellus*, 1949, **1** (1): 22~31
- [6] Hsieh Yi-Ping. An investigation of a selected cold vortex over north America. *J. Meteor.*, 1949, **6**: 401~410
- [7] Qi L, Leslie L M, Zhao S X. Cut-off low pressure systems over southern Australia: Climatology and case study. *International Journal of Climatology*, 1999, **19**: 1633~1649
- [8] Hill F F, Browning K A. Case study of a persistent mesoscale cold pool. *The Meteorological Magazine*, 1987, **116**: 279~307
- [9] Mastumoto S, Asai T, Ninomiya K, et al. Behavior of the extratropical cold vortex over the Far East Coastal area observed during the period from 22 Jan to 24 Jan 1963. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1965, **43**: 100~115
- [10] Matsumoto S, K Ninomiya, R Hasegawa, et al. The structure and the role of a subsynoptic-scale cold vortex on the heavy precipitation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60** (1): 339~354
- [11] Miyazawa S. A mesoclimatological study on heavy snowfall - A synoptic study on the mesoscale disturbance. *Pap. Meteor. Geophys.*, 1967, **19**: 487~550
- [12] Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Study on cut-off low pressure systems causing flood in northeast Asia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, **96**: 159~180
- [13] 孙力. 东北冷涡持续活动的分析研究. 大气科学, 1997, **21** (3): 297~307
Sun Li. A study of the persistence activity of northeast cold vortex in China. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **21** (3): 297~307
- [14] 孙力, 安刚. 1998年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断分析. 大气科学, 2001, **25** (3): 342~354
Sun Li, An Gang. A diagnostic study of northeast cold vortex heavy rain over the Songhuajiang-Nenjiang basin in the summer of 1998. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (3): 342~354
- [15] 刘宗秀, 廉毅, 高枳亭, 等. 东北冷涡持续活动时期的北半球500 hPa环流特征分析. 大气科学, 2002, **26** (3): 361~372
Liu Zongxiu, Lian Yi, Gao Zongting, et al. Analysis of the northern hemisphere circulation characters during northeast cold vortex persistence. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (3): 361~372
- [16] 姜学恭, 孙永刚, 沈建国. 一次东北冷涡暴雨过程的数值模拟试验. 气象, 2001, **27** (1): 25~30
Jiang Xuegong, Sun Yonggang, Shen Jianguo. A numerical simulation and contrast test on a northeastern vortex rainstorm. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2001, **27** (1): 25~30
- [17] 丁一汇. 1991年江淮流域持续性特大暴雨的研究. 北京: 气象出版社, 1993. 255pp
Ding Yihui. *Study on the Lasting Heavy Rainfalls over the Yangtze-Huaihe River Basin in 1991* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 255pp
- [18] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的研究. 北京: 气象出版社, 2004. 281pp
Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. *Study on Mechanism of Formation and Development of Heavy Rainfalls on Meiyu Front in Yangtze River* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 281pp
- [19] 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 98华南暴雨科学试验研究. 北京: 气象出版社, 2003. 220pp
Zhou Xiujie, Xue Jishan, Tao Zuyu, et al. *Study of Experiment of Heavy Rainfall in South China during Pre-Rainy Season* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 220pp
- [20] Neito R, Gimeno L, Torre L D L, et al. Climatological features of Cut-off Low systems in the Northern Hemisphere. *J. Climate*, 2005, **18**: 3085~3103
- [21] Petterssen S, Smebye S J. On the development of extratropical cyclones. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 1971, **97**: 457~482