

尹尽勇,曹越男,赵伟,等. 一次黄渤海入海气旋强烈发展的诊断分析[J]. 气象,2011,37(12):1526-1533.

一次黄渤海入海气旋强烈发展的诊断分析^{* 1}

尹尽勇 曹越男 赵伟 黄奕武

国家气象中心,北京 100081

提 要: 针对 2007 年 3 月造成黄渤海地区特大风暴潮的一次入海气旋发生与发展过程,采用 NCEP 资料并利用涡度倾向方程对其进行诊断分析与研究。结果表明,气旋的发展过程主要分为三个阶段:初期的气旋发展由低层开始,对流层低层具有明显的锋区和斜压性;当气旋入海时,高空槽移动到低层低值系统之上,涡度平流加强,高低层涡度平流差异成为气旋快速发展的主要动力;气旋发展的第三阶段是南北两支西风槽合并加强,使对流层中层的气旋性涡度增加,导致对流层中下层垂直上升运动增强,潜热释放增强,气旋发展达到最强。

关键词: 诊断分析, 气旋, 槽合并

A Diagnostic Study of an Intense Developing Extratropical Cyclone over the Bohai and Yellow Sea

YIN Jinyong CAO Yuenan ZHAO Wei HUANG Yiwu

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: This paper presents a diagnosis of an intense developing extratropical cyclone that occurred in conjunction with a 500 hPa trough merger over the Bohai and Yellow Sea in March 2007. To analyze the dynamics of the cyclone development, the NCEP analysis data and the Zwack-Okossi (Z-O) vorticity tendency equation are employed. Results show that there are three phases during the cyclone development. Firstly the cyclone appeared at the lower troposphere with significant frontogenesis and baroclinity. Secondly the approaching of the 500 hPa trough increased the vorticity advection above the cyclone, and the difference between the upper and lower levels accelerated the cyclone's development after the cyclone entered the Yellow Sea. Finally, the 500 hPa trough merger increased the cyclonic vorticity in the mid-level troposphere which in turn enhanced the ascent movement at the mid and lower-levels, and increased the latent heat release. Thus its central pressure reached the lowest.

Key words: diagnostic analysis, cyclone, trough merger

引 言

近年来,我国沿海经济快速发展,特别是环渤海地区已发展成为中国北方最活跃的海洋经济区域。2007 年,全区域海洋生产总值高达 9542 亿元,占全国海洋生产总值的 38.3%(来自《海洋经济》)。海洋经济增长的同时,海洋灾害性天气引发的海洋灾

害也日益增多。2007 年 3 月 3 日至 6 日,渤海、黄海和东海沿海发生了严重的海洋灾害。辽宁、河北、天津、山东、江苏 4 省 1 市遭受到不同程度的灾害损失,其中山东、辽宁、江苏 3 省出现人员伤亡和严重经济财产损失。据不完全统计,此次海洋灾害共造成沿海 4 省 1 市直接经济损失约 40 亿元,3 人死亡,9 人失踪。分析造成此次海洋灾害的原因,主要是由于强冷空气与发展的入海气旋共同作用,造成

* 行业专项“黄渤海高影响天气预报中的关键技术研究”(GYHY201106006)资助

2011 年 2 月 21 日收稿; 2011 年 5 月 10 日收修定稿

第一作者: 尹尽勇,主要从事海洋气象预报与海洋气象导航业务工作. Email: wanghs@cma.gov.cn

黄渤海海域出现偏东大风,形成严重的风暴潮灾害。因此,分析研究此次黄渤海入海气旋的发生与发展机理,对今后做好上述海域海洋气象预报服务工作就显得尤其重要。

蔡丽娜等^[1]针对此次温带气旋发展造成我国北方辽宁等省大范围的严重暴风雪天气进行了分析研究,闫丽凤等^[2]通过中尺度模式对此次气旋发展引发的风暴潮进行了模拟分析。近些年,中外学者对于爆发性气旋发生、发展的物理原因和机制做了大量的研究工作^[3-20],指出影响温带气旋发展的一些主要因素:对流层下层的斜压不稳定,对流层上层的温度平流和涡度平流;在气旋发展最强盛时期,潜热释放对气旋的发展往往起到重要作用。Strahl 等^[8]利用 1992 年由 Lupo 等^[10]Zwack-Okossi(Z-O) 涡度倾向方程作为诊断工具,对 1999 年 1 月发生在美国大陆的爆发性气旋进行了研究分析,指出 500 hPa 槽合并不是气旋早期爆发的必要条件,但与气旋发展的强度及速率却有着重要联系。2007 年 3 月 3—6 日的黄渤海入海气旋的发展过程与 500 hPa 槽合并过程密切相关,本文通过天气尺度分析,并利用 Zwack-Okossi(Z-O) 涡度倾向方程作为诊断工具着重分析槽合并过程对气旋发生、发展的影响,尤其是温度平流、涡度平流、潜热释放以及绝热温度变化四个影响地转涡度变化的物理因子在槽合并过程中对气旋发展的作用及影响。

1 资料和方法

本文选用 2007 年 3 月 3 日 00 时(世界时,下同)至 7 日 18 时,时间分辨率为 6 小时,空间分辨率为 1°×1°的 NCEP 再分析资料及每 3 小时一次的常规气象地面观测资料作为分析资料,分析区域为 20°~70°N、80°~160°E。利用 1992 年由 Lupo 等^[10]发展的 Z-O 涡度倾向方程(1)作为槽合并分析研究的诊断工具

$$\frac{\partial \zeta_{gl}}{\partial t} = PD \int_{p_l}^{p_t} -\mathbf{v} \cdot \nabla \zeta_a dp - PD \int_{p_l}^{p_t} \times \left[\frac{R}{f} \int_p^{p_t} \nabla^2 \left(-\mathbf{v} \cdot \nabla T + \frac{Q}{c_p} + S\omega \right) \frac{dp}{p} \right] dp \quad (1)$$

式中, p_l 为近地面气压层, p_t 为上层气压层(50 hPa), ζ_{gl} 为近地面地转涡度, ζ_a 为绝对地转涡度($\zeta + f$), f 为科氏参数, R 为干空气常数, \mathbf{v} 为水平风矢量, Q 为绝热加热/冷却率, c_p 为定压比热, S 为稳定度参数 [$S = -(T/\theta)(\partial\theta/\partial p)$], ω 为垂直速度, $PD = 1/(p_t - p_l)$ 。本文主要利用诊断方程中涡度

平流项($-\mathbf{v} \cdot \nabla \zeta_a$)、温度平流项($-\mathbf{v} \cdot \nabla T$)、潜热释放(Q/c_p)以及绝热温度变化项($S\omega$)研究槽合并过程对气旋发展的影响,不针对上述物理量进行整层积分以验证其对近地面地转涡度变化的定量作用。其中,绝热加热/冷却率 Q 采用 Posselt 等^[18]在 2004 年研究暖式锢囚锋时采用的计算公式 $Q = \frac{d\theta}{dt} = \omega \left(\frac{\partial\theta}{\partial p} - \frac{\gamma_m}{\gamma_d} \frac{\theta}{\theta_e} \frac{\partial\theta_e}{\partial p} \right)$; ω 为垂直速度,采用连续方程法求得。

2 气旋发展过程概述

此次气旋生成源自云南经贵州至湖南的辐合低压带,在长江中下游地区开始加强。由图 1 的气旋移动路径和强度变化曲线可以看到,3 月 3 日 12 时,气旋移至江苏中部,中心气压 1006 hPa。以后气旋向东北移动并发展,经山东半岛进入黄海北部海域。4 日 12 时登陆朝鲜半岛,并于 4 日 18 时再次入海进入日本海,气旋中心强度达到 992 hPa。以后气旋继续向东北移动,强度继续加强,至 5 日 06 时达到最强的 985 hPa 之后,气旋逐渐减弱。4 日

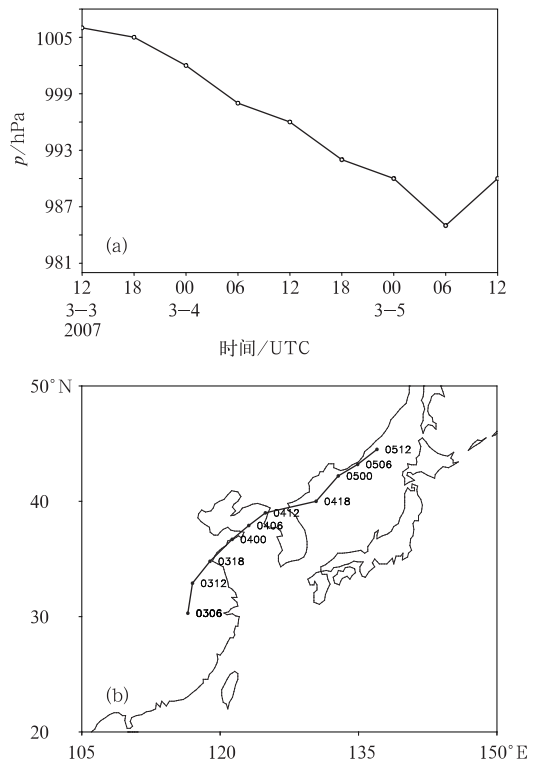


图 1 (a)气旋中心气压-时间变化曲线; (b)气旋中心移动路径(实圆点:气旋中心位置)
Fig. 1 (a)The trend curve of the central pressure of the cyclone;(b)The track of the center of the cyclone (solid circle: positions of the center of the cyclone)

06 时至 5 日 06 时的 24 小时气旋中心气压降低了 13 hPa, 由 Sanders 等(1980)的气旋加深率公式(2)计算, 其气旋加深率为 0.77 B(Bergeron, 贝吉龙), 为气旋快速发展过程。特别注意到, 5 日 00 时至 5 日 06 时的 6 小时, 气旋中心气压降低了 5 hPa, 6 小时的气旋加深率达到了 1.06 B(贝吉龙), 属爆发性发展阶段。

$$\text{气旋加深率(贝吉龙)} = \left[\frac{P_{t-12} - P_{t+12}}{24} \right] \times \left[\frac{\sin 60^\circ}{\sin \frac{\phi_{t-12} + \phi_{t+12}}{2}} \right] \quad (2)$$

式中, t 为分析时间, P 为气旋中心海平面气压, ϕ 为气旋中心所处纬度。

3 气旋发展过程的动力分析

3.1 对流层低层斜压结构

过程发展初期, 贵州至江苏地区对流层下层存在着西南—东北向锋区, 由 925 hPa 等位势场及温度场形势表明这里的变形场有利于锋生, 在变形场的作用下, 4 日 00 时(图 2a)形成明显的冷暖锋面结构, 暖锋由气旋中心向东北伸展到渤海海峡至辽东半岛, 冷锋则由气旋中心向西南经江苏、江西到达湖南南部。同时, 在气旋中心移动前方有大范围暖平流存在(图 2c), 其中心强度超过 $6 \times 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$,

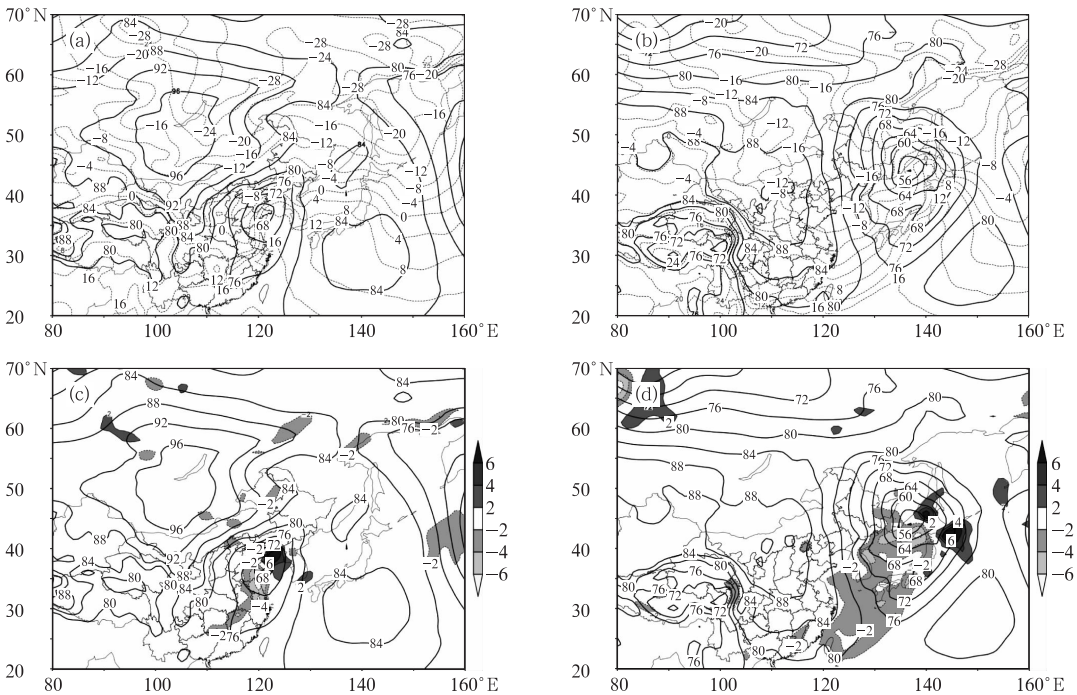


图 2 2007 年 3 月 4 日 00 时(a)、5 日 12 时(b) 925 hPa 等位势高度场(实线, 单位: dagpm)及温度场(点线, 单位: $^{\circ}\text{C}$), 2007 年 3 月 4 日 00 时(c)、5 日 12 时(d) 925 hPa 等位势高度场(实线, 单位: dagpm)及温度平流(阴影, 单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 The 925 hPa geopotential height (solid, unit: dagpm) and temperature fields (dashed, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 00 UTC 4 (a) and at 12 UTC 5 (b) March 2007.

The 925 hPa geopotential height (solid, unit: dagpm) and temperature advection fields (shaded, unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) at 00 UTC 4 (c) and 12 UTC 5 (d) March 2007

冷锋锋面后有明显的冷平流, 表明对流层下层存在着西冷东暖的斜压结构, 使气旋中心地转涡度加强, 气旋发展。这种对流层低层斜压结构持续加强至 5 日 00 时, 此后冷锋前有暖舌发展, 表明气旋开始向锢囚发展。5 日 12 时(图 2b), 暖舌沿冷锋前向北伸展并沿暖锋后向气旋中心卷入, 表明冷暖锋面在此形成锢囚, 气旋发展已进入锢囚阶段。同时, 气

旋前部的暖平流范围开始缩小, 冷平流覆盖了包括气旋中心在内的冷锋后大部区域(图 2d), 表明气旋已经发展到最强阶段并开始减弱, 且移动缓慢。

3.2 500 hPa 温度平流及涡度平流

从 500 hPa 环流形势场看, 过程早期(3 日 12 时)在东亚大陆高空存在南北两支西风槽, 北支位于

贝加尔湖附近,南支位于陕西至贵州西部。两支西风槽前没有明显的暖平流,但南支西风槽后冷平流较明显,两支槽线前后有明显的正负涡度平流(图略)。在槽后冷平流和涡度平流作用下,两支西风槽均加深并东移,至 4 日 12 时,北支西风槽已经移到我国黑龙江境内,其振幅向南扩展到 45°N 附近,南支西风槽位于环渤海地区,南北两支西风槽线前后的涡度平流此时得到加强,尤其是南支西风槽前正涡度平流区位于地面气旋中心上空,有利于低层的辐合上升运动的加强和气旋发展(图 3a);两支西风槽后均有较强的冷平流,槽前暖平流依然不显著,表明槽的发展动力主要来自槽后冷平流(图 3d)。

随着北支西风槽的振幅继续向南扩展,南支西风槽向东北移动并加深,5 日 00 时,南北两支西风槽有合并趋势,这时两槽后依然保持较强的冷平流,槽前出现明显的暖平流,冷暖平流使两槽进一步加深(图 3e),两槽前后正负涡度平流使北支西风槽向东移动,南支西风槽向东北移动(图 3b)。5 日 12 时,随着北支西风槽振幅向南的继续伸展,南支西风槽完全嵌入到北支西风槽环流中,两槽合并形成 512 dagpm 的闭合环流中心,合并后的西风槽趋于南北走向,冷中心与闭合中心几乎重合,槽后冷平流以及槽线附近的涡度平流较以前有明显减弱;由 3.1 节分析表明,此时气旋发展进入到了锢囚阶段。

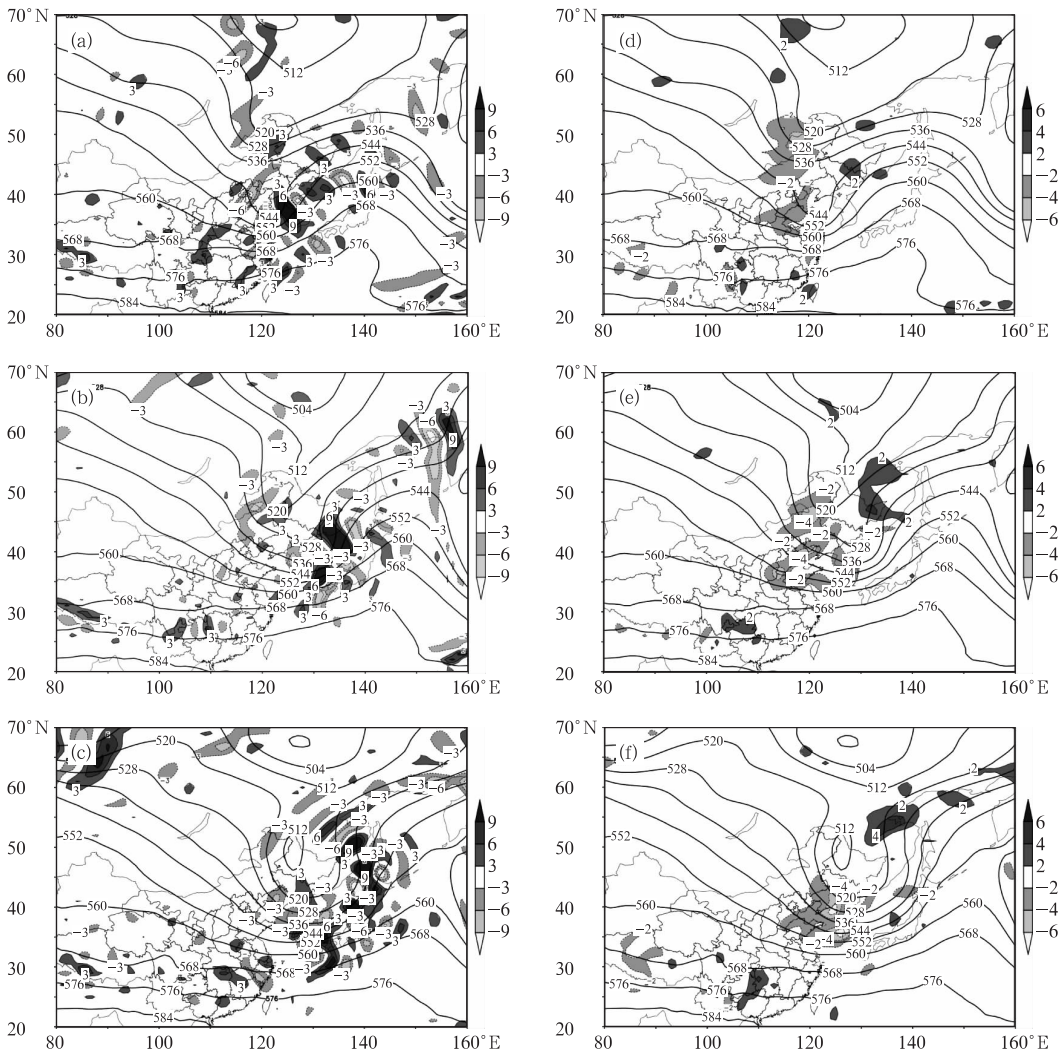


图 3 2007 年 3 月 4 日 12 时(a)、5 日 00 时(b)、5 日 12 时(c)500 hPa 等位势高度场(实线,单位:dagpm)及涡度平流(阴影,单位: 10^{-9} s^{-2}),2007 年 3 月 4 日 12 时(d)、5 日 00 时(e)、5 日 12 时(f) 500 hPa 等位势高度场(实线,单位:dagpm)及温度平流(阴影,单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height (solid, unit:dagpm) and vorticity advection fields (shaded, unit: 10^{-9} s^{-2}) at 12 UTC 4 (a), 00 UTC 5 (b), and 12 UTC 5 (c) March 2007.

The 500 hPa geopotential height (solid, unit:dagpm) and temperature advection fields (shaded, unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$) at 12 UTC 4 (d), 00 UTC 5 (e), and 12 UTC 5 (f) March 2007

3.3 500 hPa 涡度场分析

通过上面 500 hPa 温度平流及涡度平流对气旋发展过程的动力学分析,已经注意到 4 日 12 时至 5 日 12 时的 24 小时内,在温度平流和涡度平流的作用下,北支西风槽在东移过程中,其振幅逐渐向南扩展,南支西风槽向东北移动并加强,最终南支西风槽逐渐并入北支西风槽的南侧环流,形成一个中心为 512 dagpm 的闭合中心。尤其在 5 日 00 时至 5 日 06 时期间,气旋得到爆发性发展。由此可见,槽合并过程加大了气旋加深率,并使气旋的发展达到最强。为了更清楚地表明此次槽合并过程,利用地转绝对涡度场分析诊断槽合并的演变过程^[8]。

由 4 日 12 时 500 hPa 地转绝对涡度场看(图 4a),所关注的南北两支西风槽存在三个涡度大值中心,它们分别位于北支西风槽中心、北支西风槽底和南支西风槽中心。取 10^{-5} s^{-1} 为一个地转绝对涡度单位(用 GAV 表示),则上述三个涡度中心分别为 3 GAV、2 GAV 和 2.5 GAV。位于北支西风槽底的大值涡度区(2 GAV)呈现“√”形式的“凹”型曲率

弯曲,而南支西风槽中心附近的大值涡度区(1.5 GAV)则呈现“˙”逗点形式的“凸”型曲率弯曲。经过 12 小时发展(图 4b),位于北支西风槽底的大值涡度区(2 GAV)随槽的向南扩展呈现东北—西南走向,且由原“凹”型曲率弯曲形式转变为“凸”型曲率弯曲;相反,南支西风槽中心的大值涡度区(2.5 GAV)由早期的“凸”型转变成为“凹”型曲率弯曲,北支西风槽底的涡度大值区(2 GAV)与南支西风槽底的涡度大值区(2.5 GAV)以中间点为中心作气旋式旋转。5 日 12 时(图 4c),北支西风槽底的大值涡度区(2 GAV)沿 520 dagpm 线与南支西风槽底的涡度大值区(2 GAV)共同组成了一个气旋式环流。而早期北支西风槽底的涡度大值中心位于环流西侧,并加强到 2.5 GAV;南支西风槽底的涡度大值中心位于环流东侧,强度没有变化。不难看出,12 小时之前南北两支西风槽涡度大值区各自独立,经过北支西风槽的向南伸展和南支西风槽的东北向移动,南北两支西风槽的涡度大值区最终形成了一个气旋式的涡度大值区环流,这一结果较为清晰地表明了南北两支西风槽合并的完成。

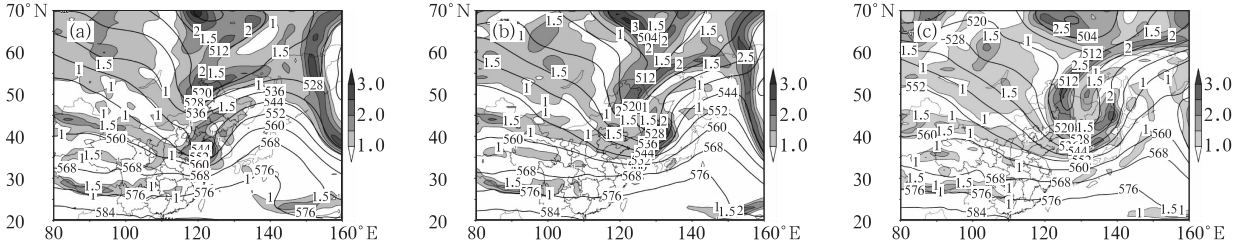


图 4 2007 年 3 月 4 日 12 时 (a)、5 日 00 时 (b)、5 日 12 时 (c) 三个时刻的 500 hPa 等位势高度场 (实线,单位:dagpm)及绝对涡度场(阴影,单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 4 The 500hPa geopotential height (solid,unit:dagpm) and absolute vorticity fields (shaded, unit: 10^{-5} s^{-1})

at 12 UTC 4 (a), 00 UTC 5 (b), and 12 UTC 5 (c) March 2007

3.4 高层急流与辐散作用

从风速分布看,气旋发展初期的 200 hPa 高度场与 500 hPa 高度场均存在南北两支高空急流带,一支位于北支西风槽前,另一支位于 35°N 纬度带。在 200 hPa 高度场,两支急流中心风速最大值都超过 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;早期气旋生成源地的辐合低压带正位于 200 hPa 高度场南支急流的下方(图略)。随着地面气旋向东北移动,4 日 00 时(图 5a,5c),气旋中心逐渐移到南支急流大值中心出口的左侧下方,由于急流出口减速区有指向其右侧的非地转分量,引起质量向南输送,这种质量调整使出口区左下方减

压,有利于地面气旋发展;同时 200 hPa 槽前的正涡度平流也表明地面气旋对流层上层有强的高空辐散,导致对流层下层出现补偿性的辐合,增加了气旋内部的上升运动。4 日 12 时(图 5b,5d),由于地面气旋中心此时刚好位于北支急流最大急流核入口区的右侧及南支急流最大急流核出口区的左侧,由于非地转分量所引起质量南北输送,加强了气旋中心对流层上层的空气质量辐散,而正涡度平流也反映了此处强的辐散场,使地面气旋发展进一步加强。过程后期,随着北支急流的向北移动和减弱,正涡度平流区所带的强辐散场逐渐偏离地面气旋中心,这种高空急流辐散作用带给地面气旋发展的动力作用

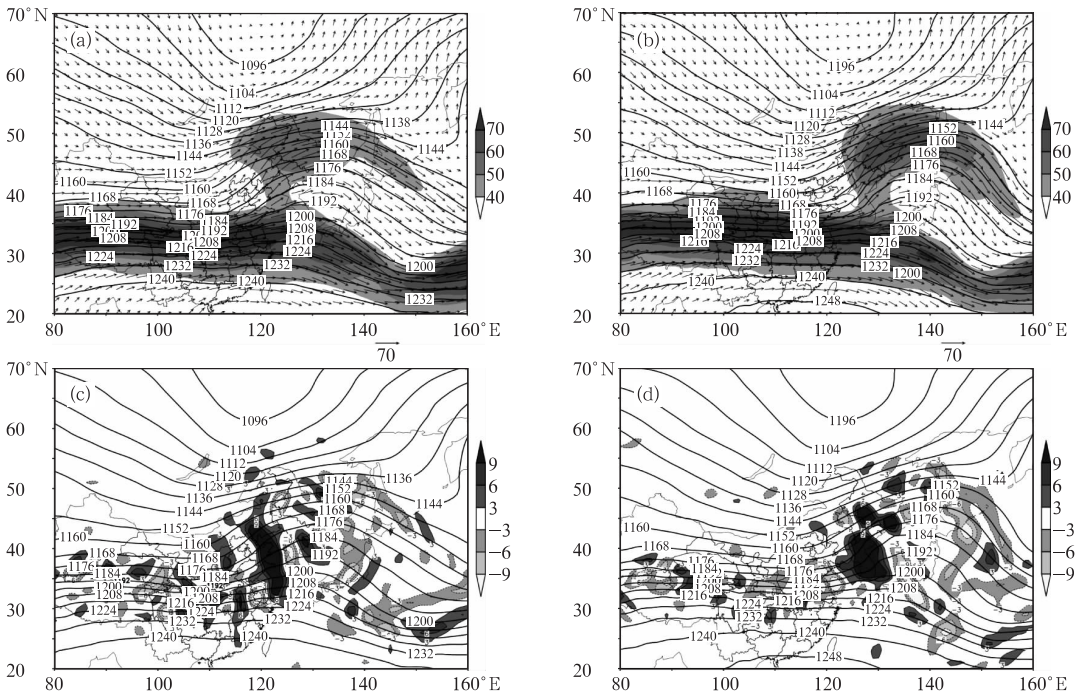


图 5 2007 年 3 月 4 日 00 时(a)、4 日 12 时(b) 200 hPa 等势高度场

(实线,单位:dagpm)及风速(阴影,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),

2007 年 3 月 4 日 00 时(c)、4 日 12 时(d) 200 hPa 等势高度场

(实线,单位:dagpm)及涡度平流(阴影,单位: 10^{-9} s^{-2})

Fig. 5 The 200 hPa geopotential height (solid, unit:dagpm) and wind speed fields (shaded, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 00 UTC 4 (a), 12 UTC 4 (b) March 2007.

The 200 hPa geopotential height field (solid, unit:dagpm) and vorticity advection fields (shaded, unit: 10^{-9} s^{-2}) at 00 UTC 4 (c) and 12 UTC 4 (d) March 2007

也逐渐减弱。

4 气旋中心动力诊断

由 Lupo 等^[10]发展的 Z-O 涡度倾向方程, 诊断分析地面气旋中心的涡度平流项($-\mathbf{V} \cdot \nabla \zeta_a$)、温度平流项($-\mathbf{V} \cdot \nabla T$)、潜热释放($\frac{Q}{C_p}$)以及绝热温度变化项(S_ω)在气旋的发生与发展中的作用, 尤其关注槽合并期间及合并前 12 小时的变化情况。分别作地面气旋中心上方涡度平流项、温度平流项、潜热释放、垂直运动、绝热温度变化五项物理因子的时间序列—气压垂直剖面分析(图 6)。

由图 6a 可以看到, 自 3 日 18 时至 5 日 00 时, 地面气旋中心对流层上层始终存在着正的涡度平流, 并且随着气旋的发展, 对流层中层的涡度平流也开始增加, 至 4 日 18 时, 最大的正涡度平流($25 \times 10^{-9} \text{ s}^{-2}$)位于 250 hPa 层附近, 同时 700 hPa 至 200 hPa 对流层中上层均保持正的涡度平流, 而 750 hPa 以下为负涡度平流, 这种涡度平流随高度增加表明

了气旋中心上方有上升运动, 有利于气旋发展。这个结果与 3.2 节的分析一致, 当高空槽逐渐接近地面气旋中心时, 槽前对流层中上层正涡度区逼近下层一个气旋性辐合性系统时, 由于高层辐散, 导致对流层下部出现补偿性的辐合, 增强了气旋内部上升运动, 使气旋得到发展^[16]。

在研究时段, 在气旋中心对流层上部均存在暖平流(图 6b), 同涡度平流一样, 其最强时刻发生在 4 日 18 时位于 200 hPa 高度层附近。对流层中下层温度平流较小, 尤其是 4 日 18 时在对流层中下层有冷平流。上述结果表明, 地面气旋中心一直位于对流层上部高槽前, 槽前的暖平流有利于气旋的发展。当气旋发展进入成熟阶段, 由 3.1 和 3.2 节分析表明, 当高空槽移至地面气旋中心上空时, 槽后冷平流开始进入气旋中心内部, 冷平流抑制气旋的进一步发展。

一些早期研究表明^[6-16], 潜热释放可使上升运动加强, 使气旋低层辐合和高层辐散, 导致气旋加强。尽管潜热释放与温度平流和涡度平流相比其强

迫作用较小,但强对流所引发的潜热释放仍然能使其下层等压面高度降低,上部增高,使气旋加强。从图 6c 和 6d 可以看出,2 次最强垂直运动与其相对应的潜热释放分别发生在 4 日 12 时和 5 日 00 时,4 日 12 时,正值南支西风槽前正涡度平流区移到地面气旋中心上空(图 3a),同时地面气旋中心此时刚好位于 200 hPa 北支急流最大急流核入口区的右侧及南支急流最大急流核出口区的左侧(图 5b 和 5d),由 3.2 节和 3.3 节分析的这种形势表明了对流层中上层有利的辐散形势,加强了对流层中下层的辐合上升运动,上升运动的加强增加了对流层中下层的潜热释放,同时释放的潜热进一步加强了上升运动,

使气旋发展加强。5 日 00 时正是南北两支西风槽合并的开始(图 5b),槽的合并使地面气旋中心对流层中层气旋性涡度增加,加强了对流层中下层的上升运动,潜热释放增加,释放的潜热使地面进一步减压,气旋发展进一步加强。

图 6e 给出了绝热温度变化项(S_ω)在气旋发展过程中的变化,由于大气处于稳定层结($S > 0$),因此,绝热温度变化项 S_ω 与垂直运动项(ω)基本一致,强的上升运动使气柱绝热冷却,以保持对流层中下层的静力平衡。由 Z-O 涡度倾向方程表明, $S_\omega < 0$ 表示抑制气旋过快发展。

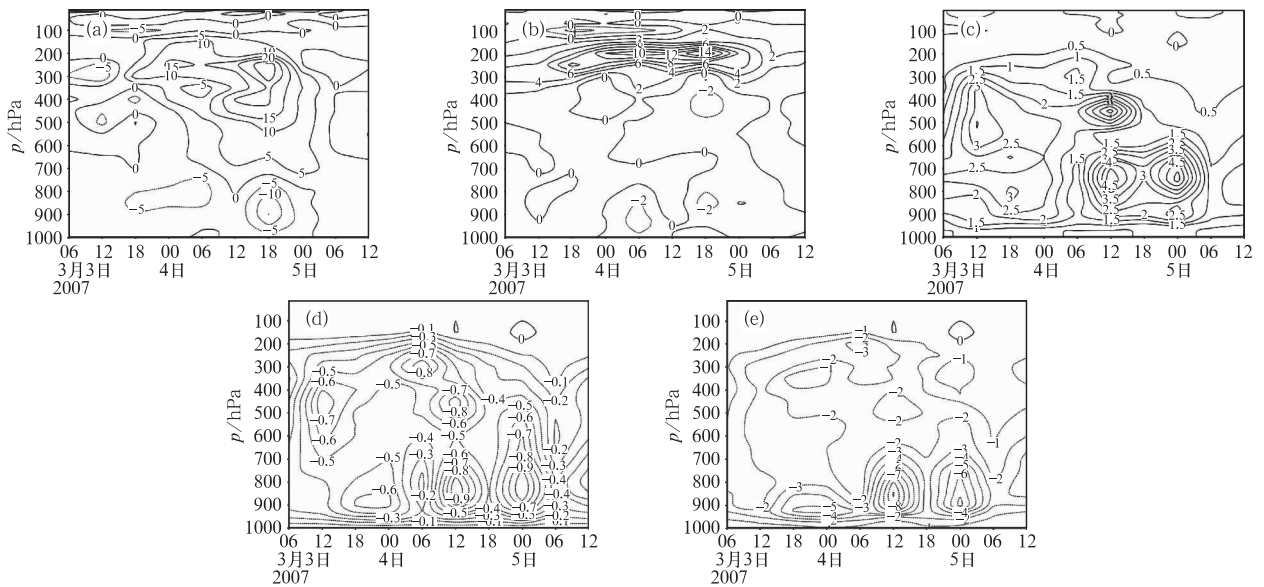


图 6 气旋中心各要素时间序列—气压垂直剖面

(a) 水平涡度平流(单位: 10^{-9} s^{-2}), (b) 水平温度平流(单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$),
(c) 潜热释放(单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$), (d) 垂直运动(单位: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$), (e) 绝热温度变化(单位: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 Time-pressure cross sections of cyclones for (a) horizontal vorticity advection (10^{-9} s^{-2}),

(b) horizontal temperature advection (unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$), (c) latent heat release (unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$),

(d) vertical movement (unit: $10^{-2} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$), and (e) adiabatic temperature variation (unit: $10^{-4} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)

综合分析地面气旋中心上层的涡度平流、温度平流、潜热释放、垂直运动以及绝热温度变化对地转涡度变化的影响,可以看出,在气旋的发展过程中,处在高空槽前的地面气旋中心对流层上层一直保持着正的温度平流,有利于高空槽的发展。涡度平流在气旋发展过程初期较小,当地面气旋发展,且高空槽逐渐接近发展的地面气旋中心时,对流层上层涡度平流开始加大,并在气旋发展最强之前的 12 小时为最强,正的涡度平流从对流层上层一直延伸到中层,对流层低层则为负的涡度平流,这种高低层涡度

平流差异在气旋快速发展阶段起了重要作用。垂直运动与潜热释放贯穿整个气旋发展过程,地面气旋中心对流层中上层有利的辐散形势加强了对流层中下层的垂直运动,潜热释放增加,释放的潜热进一步增强了上升运动,使地面减压更快。因此,当高空正的涡度平流移动到低层低值系统上空并与其相互作用时,垂直运动与潜热释放得到加强,对气旋的发展起到增强作用。为保持静力平衡,对流层中下层上升运动造成的绝热冷却,对气旋的发展起到抑制作用。

5 总结与讨论

通过上面对 2007 年 3 月发生在我国黄渤海的一次入海气旋发生与发展过程的动力学分析和气旋中心上层 Z-O 涡度倾向影响因子的诊断分析,得到以下结论。

(1)气旋启动机制主要来自低层锋区和斜压性;在气旋的发展过程中,处在高空槽前的地面气旋中心对流层上层一直保持着正的温度平流,有利于高空槽的发展;高层涡度平流在气旋发展初期时小,随着气旋发展,当高空槽逐渐接近低层低值系统时,高层涡度平流开始加大,高低层涡度平流差异成为气旋快速发展的主要动力。特别注意到,在气旋发展最强的 12 小时之前,高层的正温度平流和正涡度平流达到最大。

(2)200 hPa 层北支急流核入口区的右侧与南支急流核出口区的左侧的辐散叠加作用,加强了气旋中心对流层中下层的辐合上升运动,上升运动的加强增加了对流层中下层的潜热释放;同时释放的潜热又进一步加强了上升运动,使气旋发展加强。

(3)南北两支西风槽合并是这次气旋发展过程中的特殊环流形势。采用 500 hPa 地转绝对涡度场分析认为,从 5 日 00 时槽合并开始到 5 日 12 时槽合并结束,合并过程共经历了 12 小时。在槽合并过程开始后的 6 小时,气旋发展达到最强。在槽合并过程中,对流层上层正的温度平流和涡度平流均逐渐减少,对流层下层的垂直上升运动与潜热释放在过程开始时增强,表明槽合并期间对流层中高层的温度平流和涡度平流已经不是气旋发展的主要动力。槽合并过程使对流层中层的气旋性涡度增加,导致中下层的垂直上升运动加强,造成潜热释放增加,释放的潜热使地面进一步减压,气旋发展得到加强。可以认为,槽合并过程对气旋发展速率的提高有重要作用^[8]。

总体概括这次入海气旋的发生与发展过程,其启动机制与 Petterssen 等^[9]总结的第一类气旋发展过程较为相似,即气旋由低层开始,具有明显的锋区和斜压性;其发展机制又与第二类气旋发展过程较为相似,即高空槽移动到低层低值系统之上时,涡度平流增加,高低层涡度平流差异成为气旋快速发展的主要动力。而槽合并作为此次入海气旋发展的一个特点,即槽合并过程造成对流层中层的气旋性涡度增加使垂直上升运动增强,潜热释放增强,使气旋

快速发展达到最强。

参考文献

- [1] 蔡丽娜,隋迎玖,刘大庆,等. 一次爆发性气旋引发的罕见暴风雪过程分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(4): 693-700.
- [2] 闫丽凤,江文胜,周淑玲,等. 0703 温带气旋特大风暴潮数值模拟对比分析[J]. 应用气象学报, 2008, 19(5): 595-600.
- [3] 马雷鸣,秦曾灏,端义宏,等. 大气斜压性与入海江淮气旋发展的个例研究[J]. 海洋学报, 2002, 24(增 1): 95-104.
- [4] 仪清菊,丁一汇. 黄、渤海气旋爆发性发展的个例分析[J]. 应用气象学报, 1996, 7(4): 484-490.
- [5] 黄立文, 仪清菊, 秦曾灏等. 西北太平洋温带气旋爆发性发展的热力-动力学分析[J]. 气象学报, 1999, 57(5): 581-592.
- [6] 徐祥德, 丁一汇, 解以杨. 不同垂直加热率对爆发性气旋发展的影响[J]. 气象学报, 1996, 54(1): 73-81.
- [7] 李长青, 丁一汇. 西北太平洋爆发性气旋的诊断分析[J]. 气象学报, 1989, 47(2): 180-190.
- [8] Strahl J L S and Smith P J. A diagnostic study of an explosively developing extratropical cyclone and an associated 500-hPa trough merger[J]. *Mon Wea Rev.* 2001, 129: 2310-2328.
- [9] Petterssen S and Smebye S J. On development of extratropical cyclones[J]. *Quart J Roy Meteor Soc.* 1971, 97: 457-482.
- [10] Lupo A R and Smith P J. A diagnosis of the explosive development of two extratropical cyclones[J]. *Mon Wea Rev.* 1992, 120: 1490-1523.
- [11] Akira Yoshida and Yoshio Asuma. Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the northwestern Pacific Region[J]. *Mon Wea Rev.* 2004, 132: 1121-1142.
- [12] Elsberry R L, Kirchoffer P J. Anthony upper-level forcing of explosive cyclogenesis over the ocean based on operationally analyzed fields[J]. *Wea Forecasting*, 1988, 3: 205-216.
- [13] Tsou Chih-Hua, Smith P J and Pauley P M. A comparison of adiabatic and diabatic forcing in an intense extratropical cyclone system[J]. *Mon Wea Rev.* 1987, 115: 763-786.
- [14] Smith P J and Tsou Chih-Hua. Static stability variations during the development of an intense extratropical cyclone[J]. *Mon Wea Rev.* 1988, 116: 1245-1250.
- [15] Rolfson D M and Smith P J. A composite diagnosis of synoptic-scale extratropical cyclone development over the United States[J]. *Mon Wea Rev.* 1996, 124: 1084-1099.
- [16] 丁一汇. 高等天气学(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2005: 111-193.
- [17] Posselt D J and Martin J E. The effect of latent heat release on the evolution of a warm occluded thermal structure[J]. *Mon Wea Rev.* 2004, 132: 578-598.
- [18] 尹尽勇, 刘涛, 张增海, 等. 冬季黄渤海大风天气与渔船风损估计分析[J]. 气象, 2009, 35(6): 90-95.
- [19] 郭丽霞, 张婉莹, 郑艳萍, 等. 夏季陆地爆发性气旋的模拟与诊断分析[J]. 气象, 2007, 33(6): 59-66.
- [20] 尹尽勇, 曹越勇, 赵伟. 2010 年 4 月 27 日莱州湾大风过程诊断分析[J]. 气象, 2011, 37(7): 897-905.