

尹尽勇,曹越男,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.

# 2010 年 4 月 27 日莱州湾大风过程诊断分析<sup>\*</sup>

尹尽勇 曹越男 赵 伟

国家气象中心,北京 100081

**提 要:** 利用 NCEP 资料对 2010 年 4 月 27 日莱州湾大风过程进行了诊断分析。结果表明,气旋的爆发性发展导致气旋冷锋后部的锋生加强引发的变压梯度加大是造成此次莱州湾地区大风过程的直接原因。通过大尺度环境场分析,以及温度平流、涡度平流、高空急流、高层位涡异常的诊断分析,认为强的大气斜压性和其所伴随的冷、暖平流使高空槽发展;高低层涡度平流差异是地面气旋发展初期的主要因子;高空槽前急流轴向极一侧的非地转分量所引起的辐散有助于气旋发展;高层高位涡下传激发了气旋性环流,造成地面气旋爆发性发展。

**关键词:** 莱州湾, 气旋, 大风, 诊断分析

## A Diagnostic Analysis of the Gale Process in Laizhou Gulf on April 27, 2010

YIN Jinyong CAO Yuenan ZHAO Wei

National Meteorological Centre, Beijing 100081

**Abstract:** The gale process which happened in Laizhou Gulf on April 27, 2010 was analyzed diagnostically by using the NCEP data. This study shows that the explosive extratropical cyclone strengthened the frontogenesis behind the cyclonic cold front, thus increased the pressure tendency gradient which was the main reason for this gale process. By analyzing the synopsis environmental field, the temperature advection, the vorticity advection, the high level jet stream and the anomaly of the high level potential vorticity diagnostically, it is concluded that the strong barocline and the accompanied cold and warm advections made the high level trough develop. In the initial stage the vorticity advection difference between the high and low levels played an important role in the surface extratropical cyclone development. Then the cyclone developed further because of the divergence caused by the ageostrophic components to the left of the jet stream in front of the trough. The downward propagation of the potential vorticity on top of the troposphere triggered the surface cyclonic current and thus the cyclone developed explosively.

**Key words:** Laizhou Gulf, cyclone, gale, diagnostic analysis

## 引 言

近年来,我国沿海经济得到快速发展,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。2010 年 4 月 27 日,莱州湾附近海域出现了 10 级大风,烟台、威海、青岛等地区相继

\* 公益性行业(气象)科研专项“黄渤海高影响天气预报中的关键技术研究”(GYHY201106006)资助

2010 年 12 月 3 日收稿; 2011 年 4 月 16 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服务的相关业务技术研究工作. Email: yin\_jinyong@sina.com

发生 8 起船舶险情,造成 42 名船员遇险,其中 9 名遇险人员失踪。根据近 20 年的统计分析,每年 4 月份造成黄海、渤海 8 级以上大风平均为 39 天,引起大风的天气种类较为复杂,其中入海气旋的快速发展是造成黄渤海地区大风天气的主要原因之一<sup>[1]</sup>。因此,研究入海气旋爆发性发生与发展的机理,有助于分析造成此次莱州湾地区大风天气过程的原因。

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<sup>[2-14]</sup>,指出影响温带气旋发展的一些主要因素有温度平流、涡度平流、大气的斜压不稳定性、潜热释放、摩擦作用等等。蔡丽娜等<sup>[2]</sup>针对 2007 年 3 月的一次黄渤海入海气旋的爆发性发展进行了分析研究,赵琳等<sup>[3]</sup>对一次蒙古气旋发展造成我国北方沙尘天气过程进行了研究,总结分析了引起温带气旋发生发展过程的热力和动力机制。从相关研究分析来看,造成气旋快速发展的机制有其共性,但也存在许多差异,这就给预报工作带来了难度。随着科学技术的快速发展,观测资料比以前丰富了许多,特别是近 10 年以来,地面自动站观测网的建设和加强,卫星遥感资料,以及雷达探测资料的丰富利用,使得大气观测资料在时空分布上更加稠密,再加上资料(3 维变分、4 维变分)同化技术的不断提高,使得对大气状况的分析更逼近实际大气特征,所有这些都为研究此次莱州湾地区大风天气过程创造了良好的工作基础。但是,在这样丰富的观测资料基础上,近些年来针对我国近海海上大风成因的分析研究却相对较少,尤其是冬春转换季节针对莱州湾地区的大风过程分析研究几乎没有,为了更好地了解此次莱州湾地区大风天气过程发生发展的原因,本文主要通过大尺度环流分析槽脊发展过程,温度平流、涡度平流在气旋发展中的作用,以及高空急流和高层位涡异常对气旋发展的影响。通过锋生分析和变压梯度分析,研究气旋发展造成的锋后冷空气大风形成的原因。

## 1 资料来源与过程概述

诊断分析所用资料为 2010 年 4 月 26 日 00 时(世界时,下同)至 27 日 12 时,时间分辨率为 6 小时,空间分辨率为  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  的 NCEP 再分析资料,常规气象地面观测资料为每 3 小时一次,自动站观测资

料每 1 小时一次,高空资料为每 12 小时一次(00 时、12 时)。

从 26 日 00 时高空 500 hPa 实况形势场分析看到(图 1a<sub>1</sub>),在蒙古国乌兰巴托以东有低涡中心存在,长波槽自低涡中心向东南伸至渤海西部沿海,以后转向西南至长江上游地区,同时温度槽明显落后长波槽大约 10 个经距,槽后有很强的冷平流。短波槽自内蒙古中部至河西走廊,温度槽与短波槽近于重合,槽前等高线疏散,长波槽后的冷平流有利于短波槽由横转竖并南压。相应时次的地面分析图上,位于河套地区有中心为 1015 hPa 的低压区(图 1b<sub>1</sub>)。26 日 12 时,低涡中心与冷中心近于重合,温度槽落后长波槽,但与前一阶段相比两者已有所接近;短波槽已由横转竖并南压,536 dagpm 等高线已南压到华北中部地区(图 1a<sub>2</sub>)。原位于河套地区的低压区,此时已经移到渤海湾附近,气旋中心气压为 1010 hPa,12 小时加深了 5 hPa(图 1b<sub>2</sub>)。27 日 00 时,低涡中心与冷中心重合,温度槽仍然落后长波槽近 5 个经距,在槽后冷平流作用下,长波槽进一步加深东移南压;短波槽由竖转为东倾,在槽后冷平流作用下,高空低涡进一步发展,并在黄渤海海域上空形成低涡中心(图 1a<sub>3</sub>)。此时地面气旋中心已经由莱州湾东移至黄海北部海面,中心气压也由原来的 1010 hPa 加深至 1000 hPa(图 1b<sub>3</sub>),12 小时加深了 10 hPa,气旋的加深率为 1.06 B(贝吉龙),此阶段属气旋爆发性发展阶段<sup>[8]</sup>。

通过上面高空 500 hPa 形势场及地面实况分析,26 日 12 时至 27 日 00 时,在高空槽后冷平流作用下,高空低涡发展,莱州湾附近地面气旋得到快速加强。选择东营外海石油平台自动站(站号:054747)、山东防潮坎自动站(站号:682169)、以及山东土山自动站(站号:681057)作为莱州湾南北走向大风实况观测代表站,通过大风随时间演变情况可以看到(图 2),26 日 16 时之后,莱州湾地区出现了明显的转风过程,风向由西南转为西北,风力由 7~8 级加大到 8~9 级。此时段正好对应北京时间 27 日凌晨,与莱州湾出现海难时段相吻合。由地面分析看到,该时段莱州湾地区有气旋快速生成,并向东北方向移动进入黄海北部,表明引起莱州湾地区大风的主要原因与地面气旋的快速发展有直接关系。

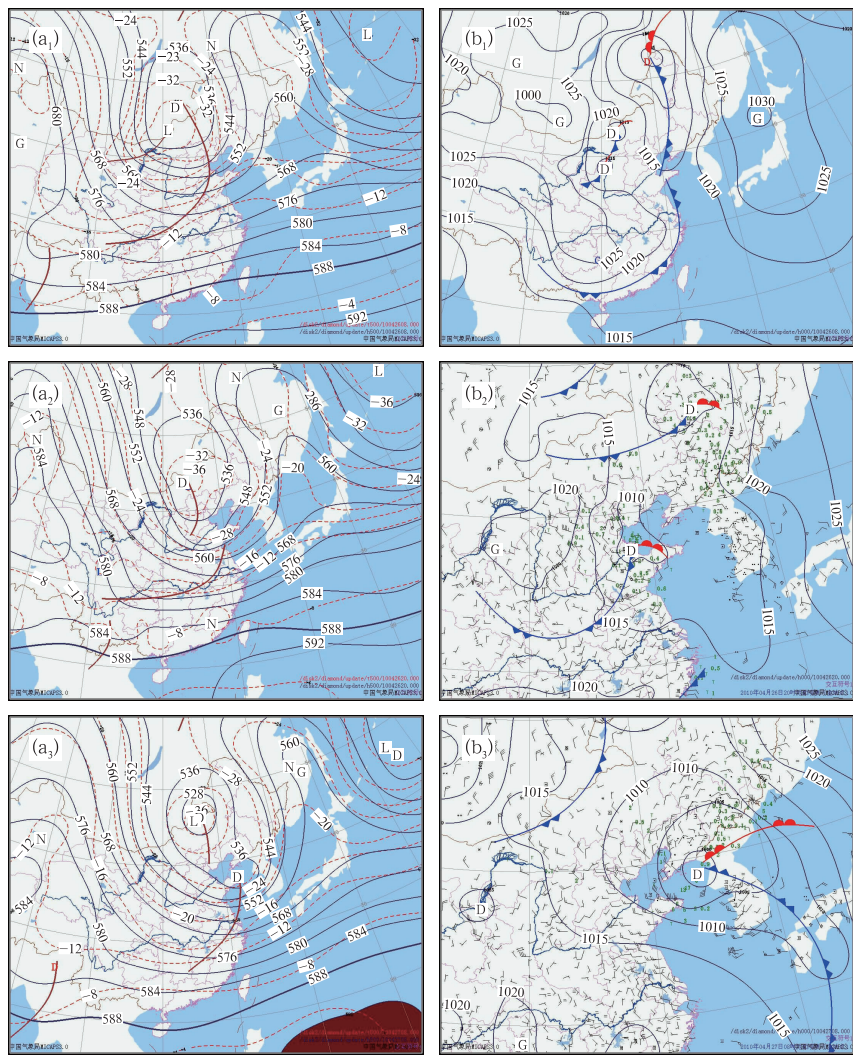


图 1 2010 年 4 月 26 日 00 时 (a<sub>1</sub>)、26 日 12 时(a<sub>2</sub>)和 27 日 00 时(a<sub>3</sub>)三个时刻高空 500 hPa 实况分析图 (实线表示等高线,单位: dagpm, 虚线表示等温线,单位:℃), 2010 年 4 月 26 日 00 时 (b<sub>1</sub>)、26 日 12 时(b<sub>2</sub>)和 27 日 00 时(b<sub>3</sub>)三个时刻地面实况分析图 (实线表示等压线,单位:hPa)

Fig.1 The 500 hPa geopotential heights at 00:00 UTC 26 April (a<sub>1</sub>), 12:00 UTC 26 April (a<sub>2</sub>) and 00:00 UTC 27 April (a<sub>3</sub>) in 2010 (solid lines: geopotential height, unit:dagpm, dashed lines: isotherm line) The surface pressure analysis at 00:00 UTC 26 April (b<sub>1</sub>), 12:00 UTC 26 April (b<sub>2</sub>) and 00:00 UTC 27 April (b<sub>3</sub>), 2010 (solid lines: isobar, unit: hPa)

## 2 气旋发展过程的热力和动力诊断分析

### 2.1 温度平流和涡度平流作用

温度平流是斜压扰动强烈发展最主要的动力条件,槽前的暖平流使槽前高压脊发展,槽后冷平流使槽加深。与此同时,在槽前暖平流作用下,上升运动

产生正的涡度平流。在温度平流与涡度平流的共同作用下,高空槽发展加深并向前移动<sup>[13-14]</sup>。

26 日 00 时,500 hPa 长波槽线附近及槽后有强的冷平流,冷平流中心值为 $-6.0\times10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ;槽前有明显的暖平流使位于其下游的高压脊加强,暖平流中心值为 $4.0\times10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ ;短波槽前有冷平流,槽后有暖平流,其冷暖平流中心值分别为 $-4.0\times10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $6.0\times10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ (图 3a)。经过 12 小时,在长波槽后冷平流作用下,高空槽发展东

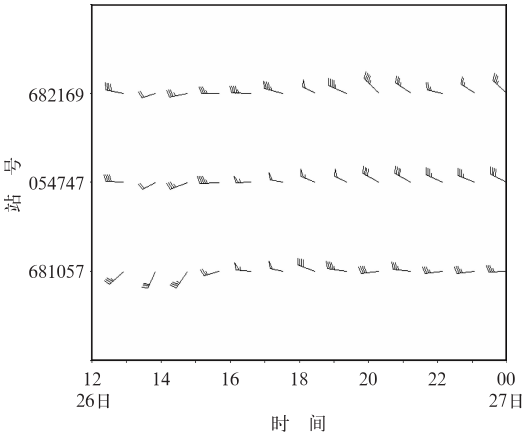


图 2 2010 年 4 月 26 日 12 时至 27 日 00 时  
自动站实测大风时间序列图  
Fig. 2 The AWS observed wind time  
series during 12:00 UTC 26  
April to 00:00 UTC 27 April 2010

移南压,540 dagpm 由 12 小时前的  $40^{\circ}\text{N}$  向南压至  $38^{\circ}\text{N}$  附近。此时莱州湾及整个山东半岛位于长波槽后短波槽前,长波槽后冷平流和短波槽前暖平流使得这一区域上空存在强的斜压结构,为地面气旋的发展提供了有力的动力条件(图 3b)。26 日 18 时,在冷平流作用下,高空槽加深,并在莱州湾附近上空形成了 532 dagpm 闭合环流中心,此时的高空温压场形势表明气旋发展开始进入成熟阶段(图 3c)。27 日 00 时,闭合环流中心在冷暖平流作用下继续发展,其闭合低涡中心为 528 dagpm,而此时地面气旋中心也由莱州湾东移至黄海北部海面,中心气压也由 12 小时前的 1010 hPa 加深至 1000 hPa(图 3d)。

26 日 00 时,低层 850 hPa 槽前脊后冷暖平流较弱,在山东半岛及莱州湾附近地区上空冷暖平流

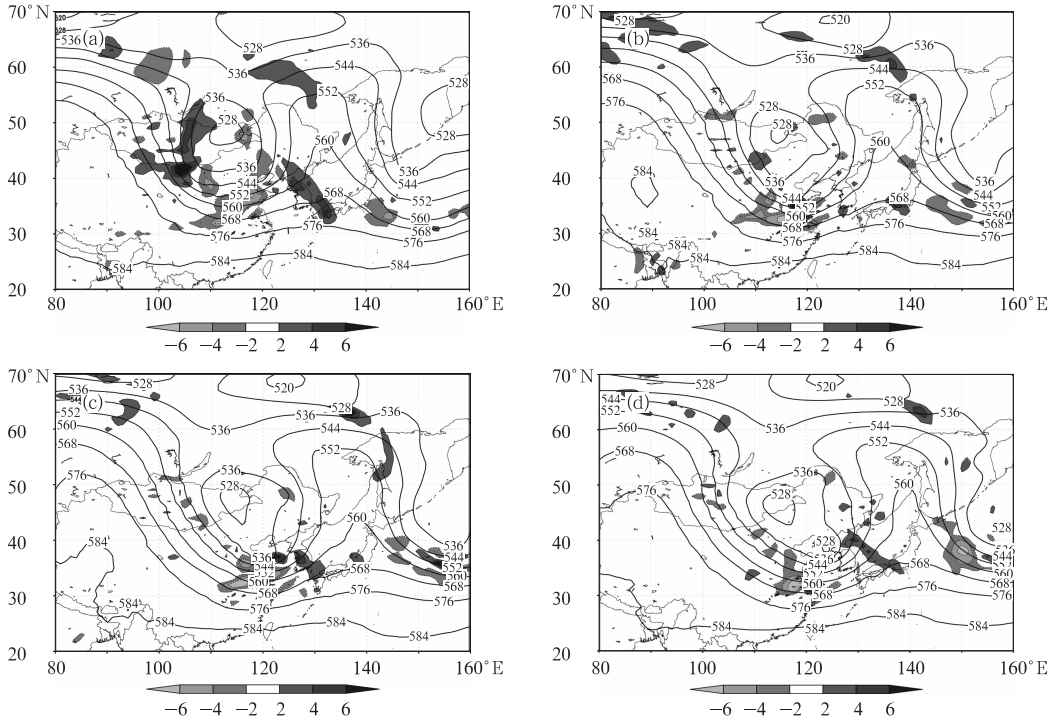


图 3 2010 年 4 月 26 日 00 时(a)、12 时(b)、18 时(c)和 27 日 00 时(d)

4 个时刻高空 500 hPa 高度场和温度平流

实线表示 500 hPa 等高线,单位:dagpm;阴影表示温度平流,单位: $10^{-4}\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 3 The 500 hPa geopotential height and temperature advection fields at 00:00 UTC 26 April (a), 12:00 UTC 26 April (b), 18:00 UTC 26 April (c) and 00:00 UTC 27 April (d) in 2010  
Solid lines: geopotential height, unit: dagpm; dashed lines: temperature advection, unit:  $10^{-4}\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$

低于 $\pm 2.0 \times 10^{-4}\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ (图略)。伴随着高空低涡发展东移南压,26 日 12 时,850 hPa 位于莱州湾附近出现闭合低涡中心 140 dagpm,低涡中心南侧的冷平流开始

明显加强,其冷平流中心值为 $-6.0 \times 10^{-4}\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 4a);以后随高空低涡发展,至 27 日 00 时,850 hPa 槽前出现了值为 $4.0 \times 10^{-4}\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$ 的暖平流,槽后出现了值



为 $-4.0\times 10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ 的冷平流(图 4b),低层斜压性的加强有利于气旋的快速发展。

500 hPa 涡度平流分析表明,26 日 00 时,长波槽前后有正负涡度平流,槽后负涡度平流较弱,槽前正涡度平流较强;短波槽槽前及槽后分别有弱的正负涡度平流(图略)。26 日 12 时,伴随着高空低涡发展东移南压,莱州湾附近的闭合低涡中心高空槽前后有明显的正负涡度平流(图 5a)。27 日 00 时,伴随着高空低涡的东移发展,低涡附近的涡度平流

范围明显减少,仅在低涡中心东西两侧有范围较小且强度较弱的正负涡度平流(图略)。26 日 00 时,850 hPa 几乎看不到涡度平流,26 日 12 时,在低涡中心东西两侧有明显的正负涡度平流生成(图 5b),以后涡度平流的强度及范围明显减小。研究分析表明,该气旋的发展与 Petterssen 等<sup>[10]</sup>的 B 类气旋发展模式较为相似,即气旋发生发展的启动机制在高空,气旋发展时低层不一定有锋面存在,高低空涡度平流的差异对气旋的发展起着重要作用<sup>[13]</sup>。

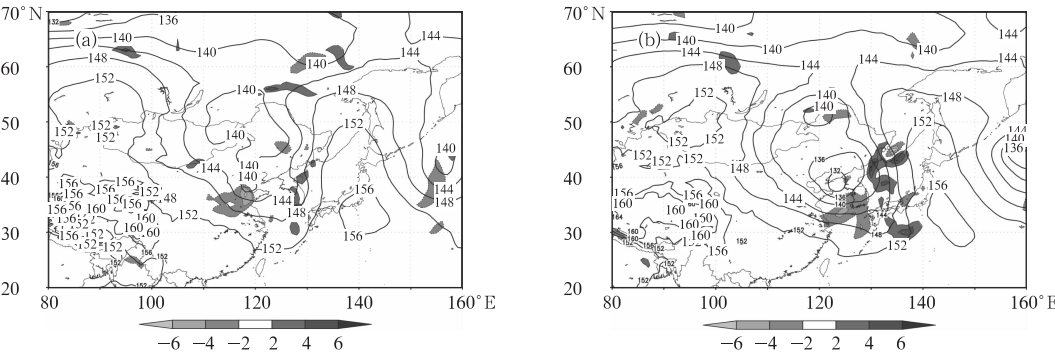


图 4 2010 年 4 月 26 日 12 时(a)和 27 日 00 时(b)两个时刻 850 hPa 高度场和温度平流  
实线表示等高线,单位:dagpm; 阴影表示温度平流,单位: $10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 4 The 850 hPa geopotential height and temperature advection  
at 12:00 UTC 26 April 2010 and 00:00 UTC 27 April 2010

Solid lines: geopotential height, unit:dagpm, dashed lines: temperature advection, unit:  $10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$

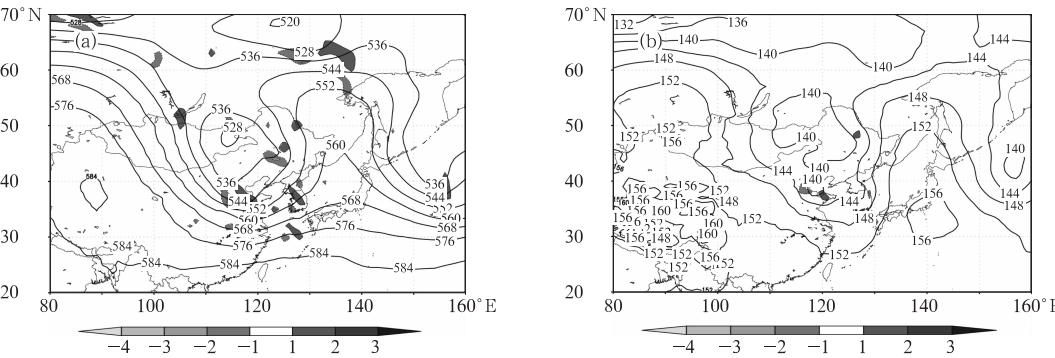


图 5 2010 年 4 月 26 日 12 时(a)500 hPa, (b)850 hPa 高度场和涡度平流  
实线表示等高线,单位:10 gpm; 阴影表示涡度平流,单位: $10^{-8}\text{s}^{-2}$

Fig. 5 The 500 hPa (a) and 850 hPa (b) geopotential height and vorticity  
fields at 12:00 UTC 26 April 2010

Solid lines: geopotential height, unit:10 gpm, dashed lines: vorticity advection, unit:  $10^{-8}\text{s}^{-2}$

2.2 高空急流与散度场分析

相关研究<sup>[2-8]</sup>指出,温带气旋的爆发性发展往往与高空急流相联系,Akira Yoshida<sup>[8]</sup>研究西北太平洋爆发性气旋的环境与结构时,分析结果显示,224

个发生在西北太平洋的发展气旋均发生在 300 hPa 高空槽前急流轴北侧。从 300 hPa 的风速分布可以看出(图 6a),26 日 12 时,高空急流轴位于朝鲜半岛北部至山东半岛南部,急流轴中心最大风速达  $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上,急流轴呈东北—西南向,莱州湾及

渤海海域位于高空槽前急流轴向极一侧,向南的非地转风偏差分量使该上空有较强的高空辐散。由 300 hPa 散度场分析(图 6b),此时,在莱州湾附近区域有散度  $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的辐散区,表明了高空槽前急流轴向极一侧有较强的辐散作用。另外,850 hPa

散度场分析表明(图 6c),在莱州湾地区存在较好的低层辐合,最大散度为  $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。由此可以看出,高空急流引起高层辐散和低层辐合说明垂直运动和次级环流非常强,有助于气旋的发展。

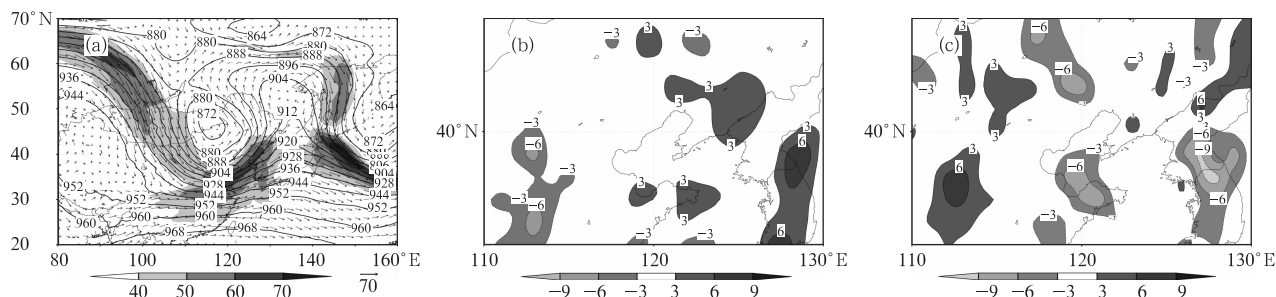


图 6 2010 年 4 月 26 日 12 时(a) 300 hPa 急流(实线表示等高线,单位:80 gpm;阴影表示风速,间隔:  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;箭头表示风矢);(b) 300 hPa 散度(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ );(c) 850 hPa 散度(单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

Fig. 6 The jet stream (a, solid line: geopotential height, unit: 80 gpm. Shaded area: isotach, at intervals:  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and divergence field (b, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) on the 300 hPa level and the divergence field (c, unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) on the 850 hPa level at 12:00 UTC 26 April 2010

## 2.3 高层位涡下传

大气中的位涡守恒性通过伸缩(或压缩)作用引起天气系统的发展,高值位涡的输送影响天气尺度的气流,进而产生垂直运动。从天气预报业务的观点来看,位涡理论提供了非常有利和简洁的大气动力学观点<sup>[15]</sup>。Uccellini 等<sup>[11]</sup>在对爆发性气旋的研究中指出,当平流层的高值位涡下传到对流层,且上下层位涡高值区连通时,最有利于气旋的爆发性发展。蔡丽娜等<sup>[2]</sup>在研究 2007 年黄渤海入海气旋发展时,通过气旋中心做位涡经向剖面研究表明,气旋中心上游高层高值位涡东移至气旋中心上空时,上下层位涡大值区呈相接形势,对应地面气旋强烈发展。

由气旋爆发性发展前 6 小时沿气旋中心东西向剖面分析(图 7a),气旋中心 500 hPa 以下层等位涡线平直,位涡值在 0.5 PVU 单位以下。在气旋中心以西 500 hPa 以上层有密集高位涡等值线,且在  $113^\circ\text{E}$  附近有东西向高位涡区。26 日 12 时(图 7b),气旋中心 750~850 hPa 低层出现 1.0 PVU 单位的高值位涡区,位于气旋中心西部上层高位涡东移加强。至 26 日 18 时(图 7c),气旋中心 750~850 hPa 低层的高值位涡区已加强到了 1.5 PVU 单位,上层高位涡已下传至地面气旋中心上

空,高层高值位涡与低层高值位涡区呈上下连通形势,对应地面气旋强烈发展。27 日 00 时(图 7d),上层高位涡移至气旋中心东部,低层高位涡区减弱至 1.0 PVU 单位,气旋强烈发展阶段宣告结束。

## 3 低层锋生作用及 $Q$ 矢量分析

由于温带气旋的发展往往相伴着锋生,斜压作用是温带气旋发展的主要特征<sup>[3-7]</sup>。2010 年 4 月 27 日凌晨莱州湾地区的海难事件是由于入海气旋后部的西北大风造成的。通过锋生函数和低层  $Q$  矢量计算分析,以考察低层斜压作用对气旋发展的影响。

非均匀饱和湿大气中的标量锋生函数公式包括非绝热加热项、与垂直运动有关的倾斜项、水平辐合辐散项和形变项<sup>[3]</sup>。考虑到非绝热项计算的精确度问题,仅对 850 hPa 和 925 hPa 锋生函数中的倾斜项、水平辐合辐散项和形变项三项进行了计算。计算结果显示倾斜项和形变项在该区域锋生(消)中所起的作用很小,基本可以忽略。水平辐合辐散项在该区域锋生(消)中所起的作用明显。由 850 hPa 水平辐合辐散锋生计算结果显示,26 日 12 时,在山东半岛及莱州湾地区有明显的锋生出现,其中莱州湾附近地区锋生最大,其强度达到  $10 \times 10^{-10} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,表明该地区有加强的斜压性(图 8a<sub>1</sub>);经历

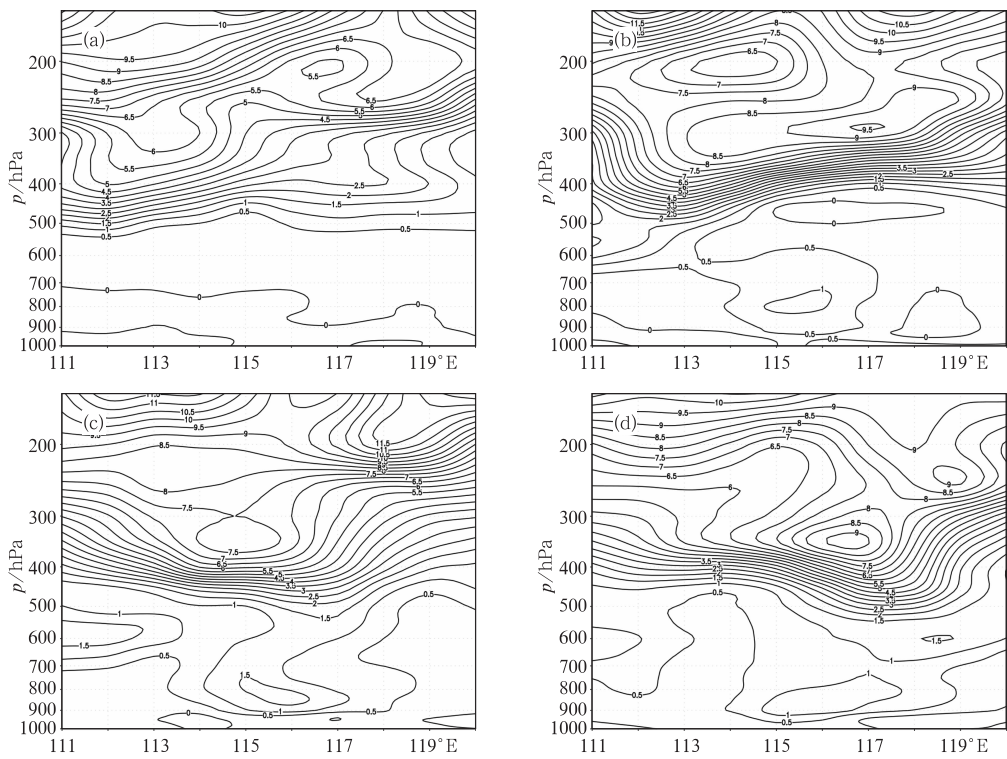


图 7 2010 年 4 月 26 日 06 时(a),12 时(b) ,18 时(c),27 日 00 时(d)经气旋中心东西向位势涡度垂直剖面图(实线表示等位势涡度线,1 PVU 单位: $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Fig. 7 The geopotential vorticity E-W vertical sections passing the center of the cyclone at 06:00 UTC 26 April (a), 12:00 UTC 26 April (b), 18:00 UTC 26 April (c) and 00:00 UTC 27 April (d) in 2010 (unit:  $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

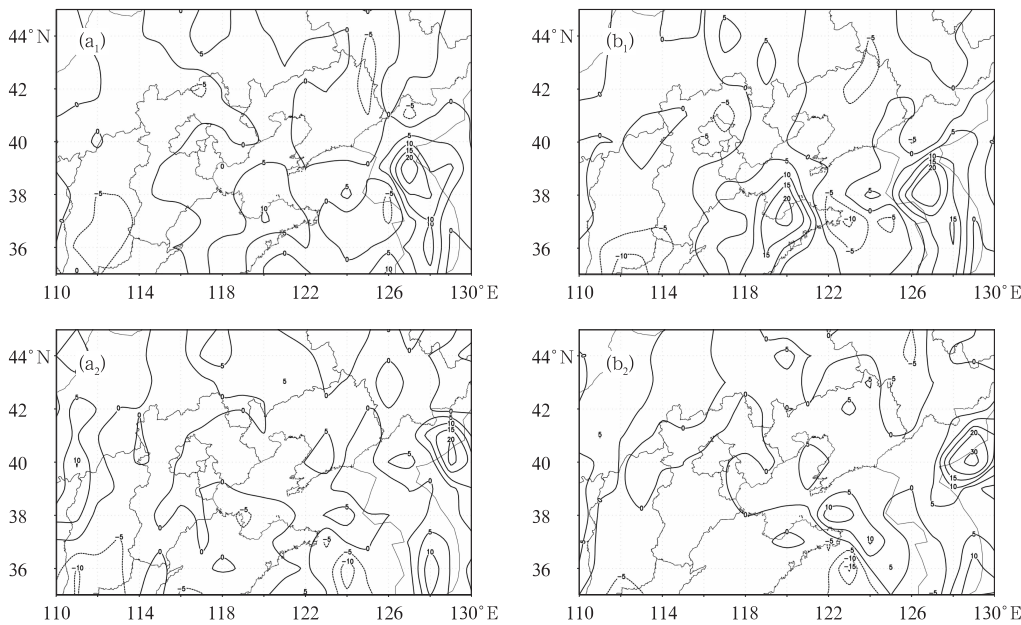


图 8 2010 年 4 月 26 日 12 时(a<sub>1</sub>),18 时(a<sub>2</sub>) 850 hPa 及 26 日 12 时(b<sub>1</sub>),18 时(b<sub>2</sub>) 925 hPa 锋生函数(水平辐合辐散项)(单位: $10^{-10} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 8 The 850 hPa (left panel) and 925 hPa (right panel) frontogenesis functions (the horizontal convergence and divergence components) at 12:00 UTC 26 April (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>) and 18:00 UTC 26 April (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>) in 2010 (unit:  $10^{-10} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )



6 小时后,该地区出现锋消,锋生地区向东移动,黄海北部出现强度为  $5 \times 10^{-10} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  锋生(图 8a<sub>2</sub>)。925 hPa 水平辐合辐散锋生发生在莱州湾地区更为强烈,当 26 日 12 时气旋强烈发展时,莱州湾地区的锋生强度达到了  $20 \times 10^{-10} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (图 8b<sub>1</sub>);6 小时后,最大锋生同样发生在黄海北部,锋生强度为  $10 \times 10^{-10} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ (图 8b<sub>2</sub>)。从以上计算结果分析表明,在气旋开始爆发性发展时,气旋后部有很强的锋生作用,气旋西部的斜压作用相当明显,这种斜压作用对于有效位能的释放、动能的制造是非常有利的,这与莱州湾 27 日凌晨观测到的大风事实相一致。从计算的 850 hPa 和 925 hPa 锋生函数结果来看,低层的 925 hPa 较 850 hPa 的锋生强度更强,表明在气旋爆发性期间,低层有更好的斜压强迫作用。

$Q$  矢量与非地转风存在一定关系, Hoskins 等<sup>[12]</sup>指出,为了维持大气中的地转平衡和静力平衡,这个  $Q$  矢量必定沿着低层非地转风的方向,同时指向上升区,反之,为下沉运动。因而,低层  $Q$  矢量近似与非地转风成比例,由此可以通过考察  $Q$  矢量来估计非地转风的分布。从 850 hPa 计算的  $Q$  矢量分布可以看到,26 日 12 时,莱州湾及以东的山东半岛有  $Q$  矢量辐合区,莱州湾以西为辐散区,气旋中心正处在零线附近(图 9)。结果表明,在气旋中心右侧的暖区有较强的辐合,其左侧冷区有较强的辐散。这一结果与上面 850 hPa 锋生函数计算结果所反映的斜压作用相一致。

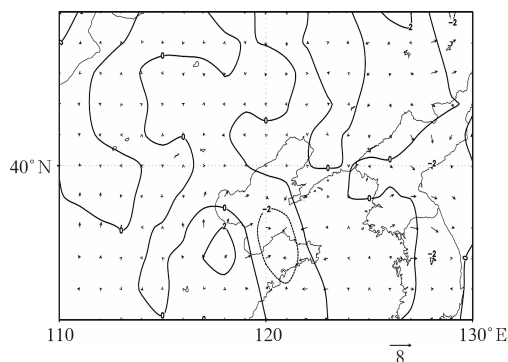


图 9 2010 年 4 月 26 日 12 时 850 hPa  $Q$  矢量

实线表示偏差风散度,单位:  $10^{-14} \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

矢量箭头表示  $Q$  矢量,单位:  $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 9 The 850 hPa  $Q$  vector level at

12:00 UTC 26 April 2010

Solid line: biased wind divergence,

unit:  $10^{-14} \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , arrow:  $Q$  vector,

unit:  $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

## 4 变压风在大风过程中的加强作用

在高纬度,风与气压场基本上符合地转风、梯度风原理。预报员往往习惯于通过气压形势场预报近地面的风向和风力。但是实践表明,在很多情况下,同样的地面气压梯度,由于影响天气系统的不同所表现的风力大小不同,特别是冷锋后的西北大风,其锋后的阵风差异有时是非常大的,这种锋后大风差异往往是由于实际风与地转风的向量偏差引起的变压风造成的<sup>[16]</sup>。上面已通过锋生函数和  $Q$  矢量的分析,表明了 26 日 12 时莱州湾地区低层有较强的锋生和偏西非地转风分量,为了进一步解释 27 日凌晨莱州湾地区的西北大风成因,利用 NCEP 资料每 6 小时地面气压场、通过差分求得的变压场,分析研究变压风对风力加强的作用。

由 26 日 09 时变压风场计算结果可以看出(图 10a),在莱州湾以西地区有大值变压风区,其最大变压风速达到  $18 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。实况分析表明,26 日 06—12 时的 6 小时内,冷锋由河北南部移到了山东西部,其中济南站观测的地面气压由 06 时的 1008 hPa 加强到 12 时的 1014 hPa,6 小时地面加压 6 hPa。26 日 15 时变压风场计算结果显示(图 10b),大值变压风区东移,且最大变压风为  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,较前 6 小时变压风有所减弱。在 12—18 时时段,大值变压风区经过莱州湾地区,风向为西南,变压风力达到 7 级。实际观测 26 日 16—18 时的 2 小时内,莱州湾地区出现了 9 级偏西大风(图 2)。到 26 日 21 时(图 10c),大值变压风区东移入海,莱州湾地区风力明显减弱,变压风速低于  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表明强的变压梯度造成的变压风对莱州湾地区的影响已经结束。实际观测莱州湾地区风力已减弱为 6~7 级西北风,8 级以上大风主要集中在黄海北部海域。

由第 3 节的锋生函数分析也同样表明(图 8b<sub>1</sub>和 8b<sub>2</sub>),在 26 日 12 时莱州湾地区有强烈的锋生,至 18 时,最大锋生位于黄海北部海域,而莱州湾锋生函数为零,这与变压风场分析结果完全一致。由以上分析结果可知,由于地面气旋的迅速加深,造成气旋后部的锋生加强,变压梯度加大,气压场的这种急剧变化,破坏了地转平衡,产生了非地转运动,使得气流由正变高中心流向负变高中心,因而造成了莱州湾地区的大风天气过程。特别是 27 日凌晨,偏西瞬时大风造成莱州湾多起船只遇险。



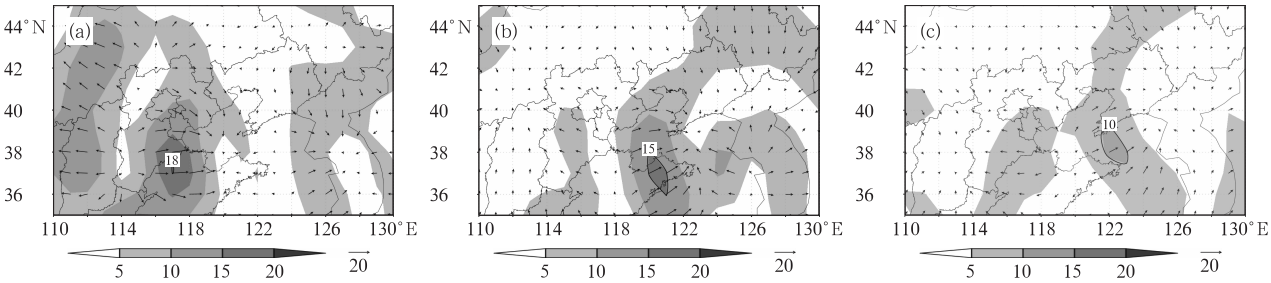


图 10 2010 年 4 月 26 日 09 时(a),15 时(b) ,21 时(c)地面变压风场

箭头表示风矢量,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;阴影表示等风速区,间隔: $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Fig. 10 The surface wind fields due to pressure tendency at 09:00 UTC 26 April (a), 15:00 UTC 26 April (b) and 21:00 UTC 26 April (c) in 2010  
Shaded area: isotach, at intervals:  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

5 总结与讨论

采用 NCEP 资料、常规气象观测资料、1 小时自动站观测资料、以及中央气象台分析产品,对 2010 年 4 月 27 日凌晨发生在我国山东莱州湾地区的大风天气过程进行了分析研究认为,由于地面气旋的爆发性发展所引起的气旋后部的锋生加强,使得变压梯度加大,变压风是造成莱州湾地区的大风过程的直接原因。同时得到以下诊断结果供讨论:

(1) 26 日 00 时至 27 日 00 时,高空 500 hPa 温度槽始终落后高度槽,强烈的斜压作用使高空槽发展。在槽后强冷平流作用下,高空槽加深并东移南压,在莱州湾附近区域上空形成闭合低涡中心,高空低涡的发展导致高低空涡度平流差异使地面气旋生成与发展。

(2) 26 日 12 时,地面气旋位于高空急流轴向极一侧,非地转分量引起的高层辐散和低层辐合有助于气旋的发展。

(3) 26 日 12—18 时,气旋中心上部高层的高位涡向下平流到对流层中部,高层高值位涡与低层高值位涡区呈上下连通形势,激发了气旋性环流,造成地面气旋爆发性发展。

(4) 由于地面气旋的爆发性发展,造成气旋后部锋生加强,变压梯度加大,由此引发的变压风是造成莱州湾地区的偏西大风的直接原因。

参考文献

[1] 尹尽勇,刘涛,张增海,等. 冬季黄渤海大风天气与渔船风损统计分析[J]. 气象,2009,35(6):90-95.  
[2] 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.  
[3] 赵琳娜,赵思雄. 一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究[J]. 大气科学,2004,28(5):722-735.  
[4] 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.  
[5] 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.  
[6] 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.  
[7] 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.  
[8] Yoshida A, Asuma Y. Structures and environment of explosively developing extratropical cyclones in the Northwestern Pacific Region[J]. Mon Wea Rev, 2004,132:1121-1142.  
[9] Strahl J L S,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.  
[10] Petterssen S, Smebye S J. On development of extratropical cyclones[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1971,97:457-482.  
[11] Uccellini L W, Keyser K F, Brill K F, et al. The President' Day cycle of 18—19 February 1979: Influence of upstream trough implication and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis[J]. Mon Wea Rev,1985,113:962-988.  
[12] Hoskins B J, Draghici I, Davies H C. A new look at the  $\omega$ -equation[J]. Quart. J Roy Meteor Soc,1978,104:31-38.  
[13] 丁一汇. 高等天气学(第二版)[M]. 北京:气象出版社,2005:111-193.  
[14] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文. 天气学原理和方法[M]. 北京:气象出版社,1981:168-207.  
[15] 帕特里克·桑特里特,克里斯托·G. 乔治夫著. 卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用[M]. 方翔,译. 北京:科学出版社,2008:1-12.  
[16] 辛宝恒. 黄海渤海大风概论[M]. 北京:气象出版社,1991:34-37.