

盛春岩, 杨晓霞. “09. 4. 15”渤海和山东强风过程的动力学诊断分析[J]. 气象, 2012, 38(3): 266-273.

“09. 4. 15”渤海和山东强风过程的 动力学诊断分析^{* 1}

盛春岩¹ 杨晓霞²

1 山东省气象科学研究所, 济南 250031

2 山东省气象台, 济南 250031

提 要: 2009 年 4 月 15 日, 渤海和山东大部出现了一次强风天气过程。本次过程具有强度大、持续时间短、强风在渤海及山东附近显著加强等特点。为探讨强风的成因, 根据常规观测资料以及 NCEP 分析资料进行了诊断分析。结果表明, 本次强风过程是在低层冷锋、高层低涡横槽影响下产生的。冷空气向南推进过程中, 冷平流中心由高层向低层传播, 850 hPa 以下冷平流不断加强, 使冷锋不断增强。冷空气到达渤海湾后, 锋前的强暖平流与锋后的强冷平流造成低空锋区进一步增强。冷锋次级环流的下沉运动与地面正变压中心对应, 变压梯度风与大尺度气压梯度风共同造成强风过程, 而强风中的阵风可能与次级环流的强烈脉动有关。

关键词: 强风, 成因, 诊断分析

Dynamic Diagnostic Analysis of the 15 April 2009 Gale Wind over the Bohai Sea and Shandong Province

SHENG Chunyan¹ YANG Xiaoxia²

1 Shandong Provincial Meteorological Institute, Jinan 250031

2 Shandong Provincial Meteorological Observatory, Jinan 250031

Abstract: A gale with wind force scale 8 occurred in the Bohai Sea and Shandong Province on 15 April 2009. The gale is severe strong, but lasts only a half day. Wind speed strengthens significantly near the Bohai Sea and Shandong Province. With the conventional surface data and NCEP analysis data, the causes for this gale event are diagnosed. Results show that the gale is affected by the cold front near the surface and the vortex at the upper level. The cold advection spreads downwards from the upper level during the southward moving of the cold air, as a result, the cold advection and the cold air under the 850 hPa both strengthen. When the cold air arrives at the Bohai Sea, the strong cold advection behind and the strong warm advection in front of the cold air at the low level make the frontal zone further strengthening. The downdraft of the secondary circulation is corresponding to the positive allobaric area near the surface. The strong allobaric wind and the large scale baric gradient wind both lead to the abnormal gale together, and the corresponding severe gust wind is probably related to the impulse of the secondary circulation.

Key words: gale, causes, diagnostic analysis

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106006)、山东省气象局重点课题(2009sdqxz01)和山东省科技发展计划项目(2009GG10008001和2011GSF12002)共同资助

2011年3月28日收稿; 2011年8月12日收修定稿

第一作者: 盛春岩, 主要从事海洋气象和数值模拟研究. Email: shengchunyan@gmail.com

引言

强冷空气是造成我国北方地区冬春季大风的重要灾害性天气。当冷空气影响渤海时,由于渤海下垫面摩擦的减小以及渤海半封闭型内陆浅海,风力会大大增强,造成海上强风天气,对海上交通运输等造成不利影响^[1-2]。长期以来,由于观测资料缺乏,对于海上强风过程的研究难以开展,预报员也多采用沿海测站作为代表站进行海上风的分析及预报^[3-4]。20世纪80年代,中国气象局曾组织环渤海三省一市和中央气象台专业小分队于1979—1981年分五个时段,对春(3月21日至4月30日)、秋(10月11日至11月20日)季黄渤海区大风进行了历时190天的对比观测,获取了宝贵的一手资料。根据这些观测资料,张新玲等^[5]对渤海海面风与沿岸实测风的日变化和季节变化特征进行了对比分析。赵强等^[6]对渤海及天津、大连等陆地测站风力的日变化情况进行了重新统计分析和归纳总结,得出了天津、大连与渤海不同海区在不同天气形势下的风力差异。近几年,沿海及海岛自动站大大增加,预报员对近海及远海大风天气逐渐有了更多的认识^[7-9],这些研究结果对于海上大风预报具有重要的指导意义。

在大风的成因方面,传统的观念一般认为,强风往往与较强的气压梯度^[10]和低压系统^[11-14]有关,这也是台站预报员在强风预报时长期使用的重要指标。诊断分析发现^[15],温度平流与地面风场之间通过变压场相互关联和促进,使地面变压场及变压梯度增强,是导致大风出现的重要原因。对多次强风过程的诊断分析发现^[16-20],动量下传对许多强风过程有重要作用。这些研究成果为预报员进行海上强风预报提供了思路和依据。

2009年4月15日凌晨,渤海及山东出现了一次强风天气。与一般大风过程不同的是,本次强风风力大、持续时间短,大风在渤海和山东一带显著加强。为分析本次强风的成因,本文根据NCEP提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球分析资料,对强风发生前后的温度平流、地面变压、变温场等进行了诊断分析。其中,在进行分析之前,使用ARPS模式的客观分析模块,结合地面常规和探空资料,对NCEP资料进行了客观分析。

1 过程概述

2009年4月15日凌晨开始,受较强冷空气影响,渤海及山东大部地区出现了强风天气过程。强风主要集中在15日03时到上午时段,强风来势凶猛,其中渤海海面风力最大达7~8级,阵风9~11级,较黄海北部风力明显偏大。山东内陆以鲁西北和鲁中北部地区风力最大,平均最大风力达7~8级,阵风9~10级。从15日05时和08时的地面天气图上可以清楚看到(图1a、b),大风区主要位于山东及北部沿海,而河北及以西的内陆地区风力明显偏小。冷锋影响渤海及山东时,地面风速有明显的局地增强特征。本次过程风的强度大、持续时间短。虽提前进行了预警,但由于春季海上作业大大增加,大量的渔船被困海上。莱州湾畔滨州附近海域33名渔民以及在潍坊滩涂海域作业的107名渔民一度遇险,一艘渔船沉没,1名船员失踪。全省受灾人口42.73万人,直接经济损失逾5.6亿元。

根据渤海海面自动站分布情况(见图1b中山东东北部的海上测站),分别选取了位于烟大航线附近及渤海南部海域的砣矶岛、大汶流2个代表站,对渤海海面风及气温等要素的演变过程进行了分析。由图1c、d可以发现,冷空气在15日02时开始影响渤海,气温下降,风速突增,阵风加大,阵风与平均风速之差也加大。15日06时前后风力达最大,海上风力均在8级以上,阵风与平均风速的差值也达到最大,其中位于渤海南部的大汶流站阵风与平均风之差达 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,之后风速逐渐减弱,气温缓慢回升。

2 天气形势分析

根据预报员的分析总结,爆发性南压下冲的冷空气过程往往是由低层到高层倾斜度接近于垂直或前倾槽结构的天气系统引发的,这种形势易造成地面强风天气^[21]。分析本次过程的高空形势发现,14日08时,500 hPa在 59°N 、 127°E 附近为一低涡中心(图略),低涡槽向西南方向伸展,冷槽落后于高度槽,涡后部伴有横槽;700~850 hPa低涡位置偏南,低涡后部伴有横槽,横槽后部有较强的东—西向锋区,850 hPa在 115°E 附近 $45^\circ \sim 55^\circ \text{N}$ 的锋区强度达到 $3^\circ \text{C}/\text{纬度}$ 。这种三层横槽结构的海上强风天气类似于王雷^[22]分析的舟山海域的一次海上强风天

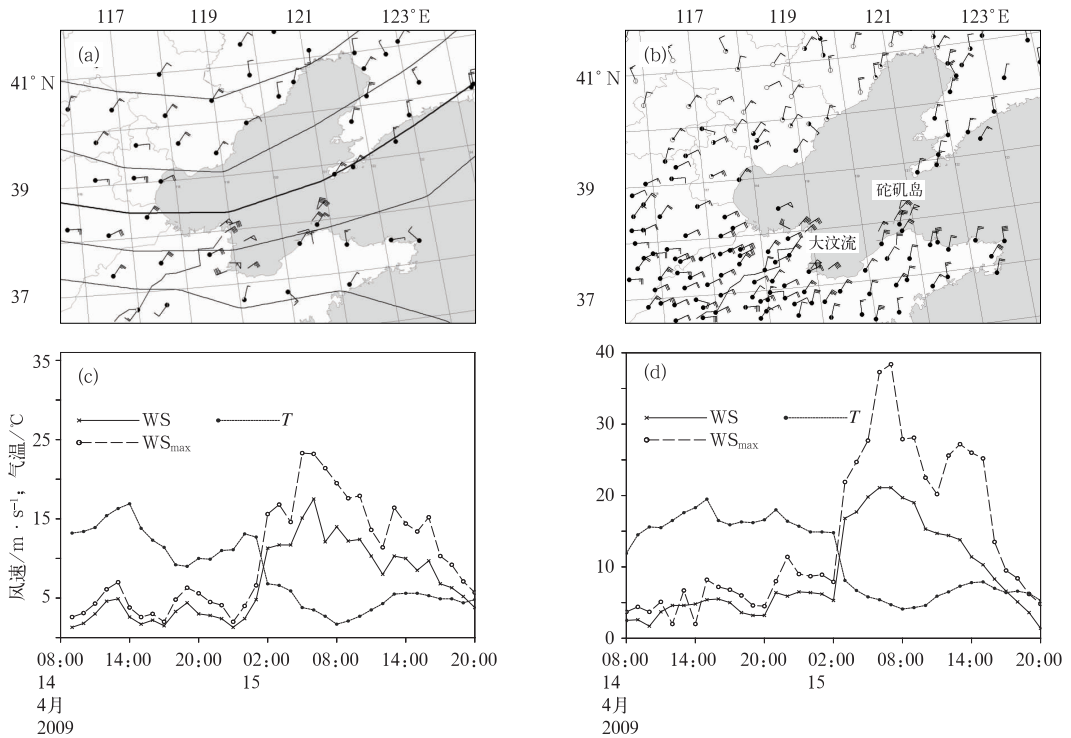


图 1 2009 年 4 月 15 日 05 时(a)和 08 时(b)渤海及周边地面 10 m 风场及海平面气压场以及砣矶岛(c)和大汶流(d)14 日 08 时至 15 日 20 时气象要素演变曲线

Fig. 1 The 10 m wind field and SLP near the Bohai Sea at (a) 05 BT 15 April 2009, and (b) 08 BT 15 April 2009; the hourly change of the meteorological elements at Tuoji Island (c), and at Dawenliu Island (d) during 08 BT 14 to 20 BT 15 April 2009

气形势^[19]。地面上在贝加尔湖西部形成较强的冷高压中心,中心强度达 1036 hPa,高压南部边缘东—西向的冷锋压在中蒙边境,在冷锋后部强气压梯度区出现 6~7 级的东北和偏北大风。

14 日 20 时,500 hPa 横槽转竖消失,850 hPa 横槽南压至宁夏到内蒙古东南部一带,强度进一步加强。同时,在 40°N 以南低层偏南风增强,内陆地区在 850~700 hPa 形成较强的暖脊向东北方向伸展。地面上东—西向冷锋南移并加强,20 时南压到 40°N 附近,锋后出现 +8.8 hPa 的 3 小时变压中心,冷锋附近的气压梯度加强。14 日夜间至 15 日凌晨,700 hPa 横槽转竖,08 时转竖的低槽压在渤海至黄河下游,冷空气影响渤海及山东西部。同时,850 hPa 槽前的偏南气流和温度脊依然较强,冷暖空气的对比加强,850 hPa 等压线与等温线几乎垂直,强冷平流不断向南输送冷空气。地面在渤海南部和山东北部沿海出现 7~8 级、阵风 9~10 级的偏北大风。15 日 08 时地面冷锋压到山东南部,15 日 14 时移出山东,15 日 20 时后,渤海和山东转为冷高压中心控制,风力明显减小。

由此可见,本次强风出现在高空 700~500 hPa 横槽转竖、850 hPa 横槽南压加强过程中。

3 物理量场诊断分析

通常,由冷锋引起的强风天气往往伴随强的温度梯度和地面变压。由前面的分析可知,冷空气影响渤海及山东北部时,风速增大、气压梯度增强。其增强原因是什么,下面根据 NCEP 客观分析场进行诊断分析。

3.1 温度平流分析

3.1.1 近地层温度平流的演变

分析发现,本次冷空气影响过程中,850 hPa 风几乎沿垂直于等温线的方向吹,近地层冷平流非常强。为了更清楚地分析冷空气的演变过程,基于 NCEP 客观分析资料,对温度平流场进行了诊断分析。这里主要分析 1500 m 高度以下的温度平流,分别取 10、500、1000、1500 m 四个高度层的温度平流之和(累加值)进行分析。由图 2 可以发现,14 日

20 时冷空气影响渤海以前(图 2a),中低层强冷平流位于辽东湾北部及辽东半岛山脉北侧附近,最强温度平流在 $-30 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。15 日 02 时冷空气开始影响渤海海面,最大冷平流中心位于渤海,中心值达 $-20 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,辽东湾海面风速明显增大。同时,在山东与河北之间出现了一个较强的暖平流中心,中心最大值达 $10 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

15 日 08 时,冷空气影响山东内陆地区,冷平流进一步加强,在鲁西与河北之间冷平流最强,达 $-35 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,暖区的暖平流为 $5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。15 日 14 时,强冷平流南移到鲁南及苏皖一带,强度依然较强。随着冷空气的进一步南下,冷暖平流均逐渐减弱。

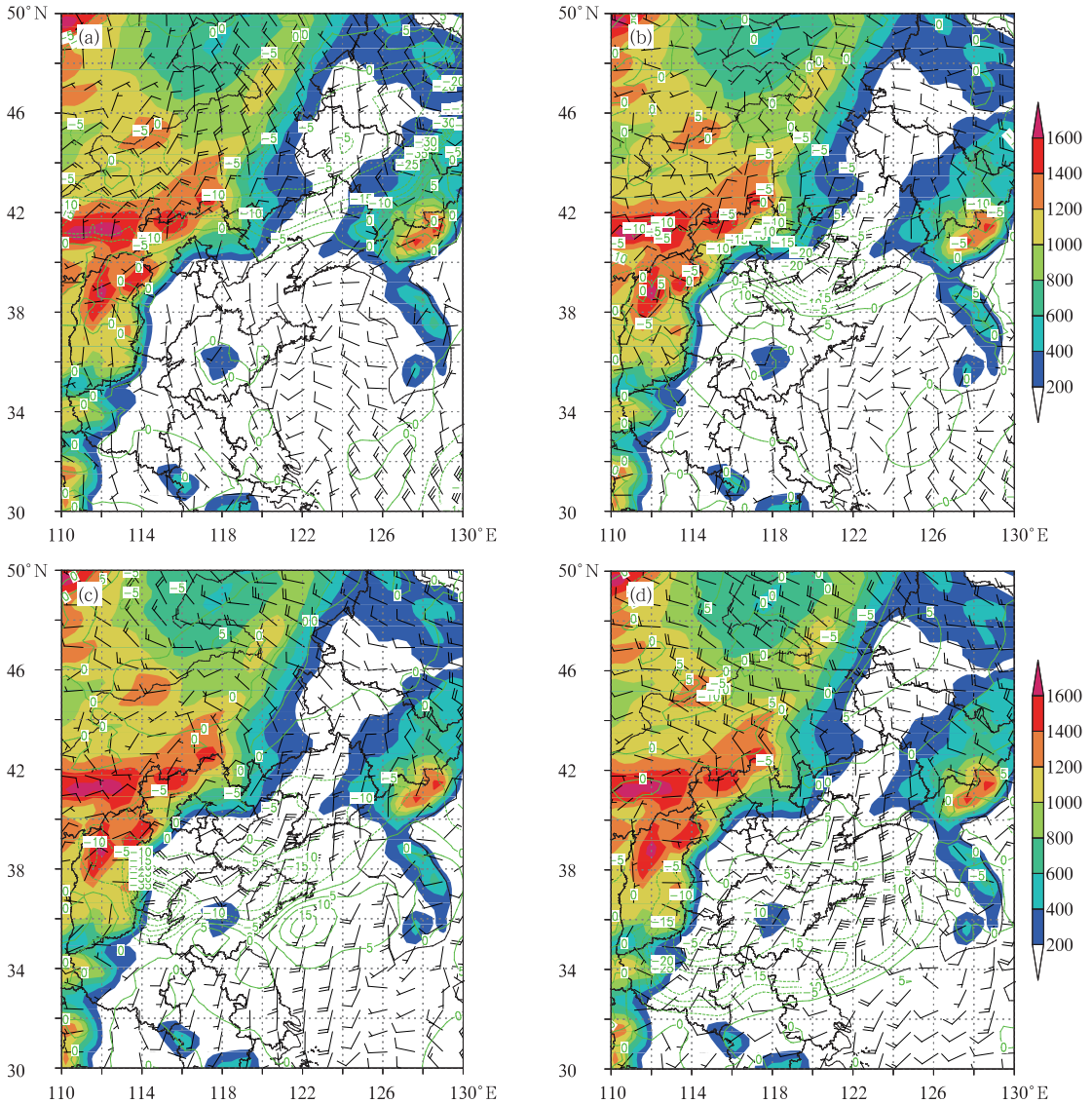


图 2 2009 年 4 月 14—15 日地面风场以及近地面 10、500、1000 和 1500 m 温度平流之和(累加值)的演变 (图中阴影区表示地形高度,单位:m)

(a) 14 日 20 时, (b) 15 日 02 时, (c) 15 日 08 时, (d) 15 日 14 时

Fig. 2 The surface wind and total temperature advection near the surface at 10, 500, 1000 and 1500 m heights (the shaded is the terrain height, unit: m)

(a) 20 BT 14 April, (b) 02 BT 15 April, (c) 08 BT 15 April, (d) 14 BT 15 April 2009

3. 1. 2 温度平流垂直演变

为更好地分析冷空气的演变过程,沿 121°E 作

南北向剖面,对风场和温度平流场的垂直演变进行了分析。由图 3 可以发现,14 日白天,在 46°N 、

121°E上空到 7 km 高度处为一个强大的冷平流中心,对应各层均为较强的西北风。最强冷平流位于 3.5~4 km (约 700 hPa) 高度处,中心达 $-8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,强冷平流中心附近对应强风速区,中心最大风速 $26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。14 日 20 时,冷平流的高度显著下降,最大冷平流出现在 45°N 上空 2~3 km 高度处,中心为 $-6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时,在 42°N 上空近地面层约 1.6 km 高度(约 850 hPa)出现了另一个冷平流中心,中心强度也达 $-6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对应着近地面开始出现东北风,风速加大。冷平流的这一变化表明,在 14 日夜间,近地面冷空气有一个加强的过程。15 日 02 时,强冷平流的高度进一步下降到 1 km 高度以下,中心强度增强到 $-8 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,近地面风速进一步加强,这一变化与图 2b 反映的渤海北部海面风速增大、冷平流增强是一致的。其后的时次,强冷平流主要位于 1 km 以下的边界层内,中高层的冷平流逐渐减弱。冷平流的垂直演变表明,冷空气在南下过程中,冷平流中心由高层向低层传播。冷空气到达渤海后,850

hPa 以下的近地层冷平流有一个显著增强的过程。

同时还发现,随着冷空气南下影响渤海,在近地面冷空气南侧的暖区也存在暖平流不断加强的过程。由图 3a 可以发现,14 日 14 时约 40°N 上空 3~4 km 高度处有一个 $2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的暖平流中心。14 日 20 时,暖平流中心高度南移并下降,约位于 39°N 上空 2 km 高度,中心强度不变,此处偏南风显著增强。15 日 02 时近地层偏南风增大,最大暖平流出现在离地面约 1 km 高度处(图 3c),强度仍然不变。15 日 08 时近地面南风明显加大,近地面暖平流增强到 $5 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。较强的偏南风和暖平流输送使得山东近地面维持较高的气温。

由此可见,暖区近地面较强的偏南风和暖平流输送使得山东大部地区维持较高的气温。因此,当冷空气影响渤海及山东时,冷暖空气对比使低空锋区进一步加强,风力大大增强。分析强风发生前后大气的相当位温场发现,相当位温场由地面向高空是逐渐减小的(图略),表明大气是热力稳定的,因此,强冷空气的动力作用是本次强风天气发生的重要原因。

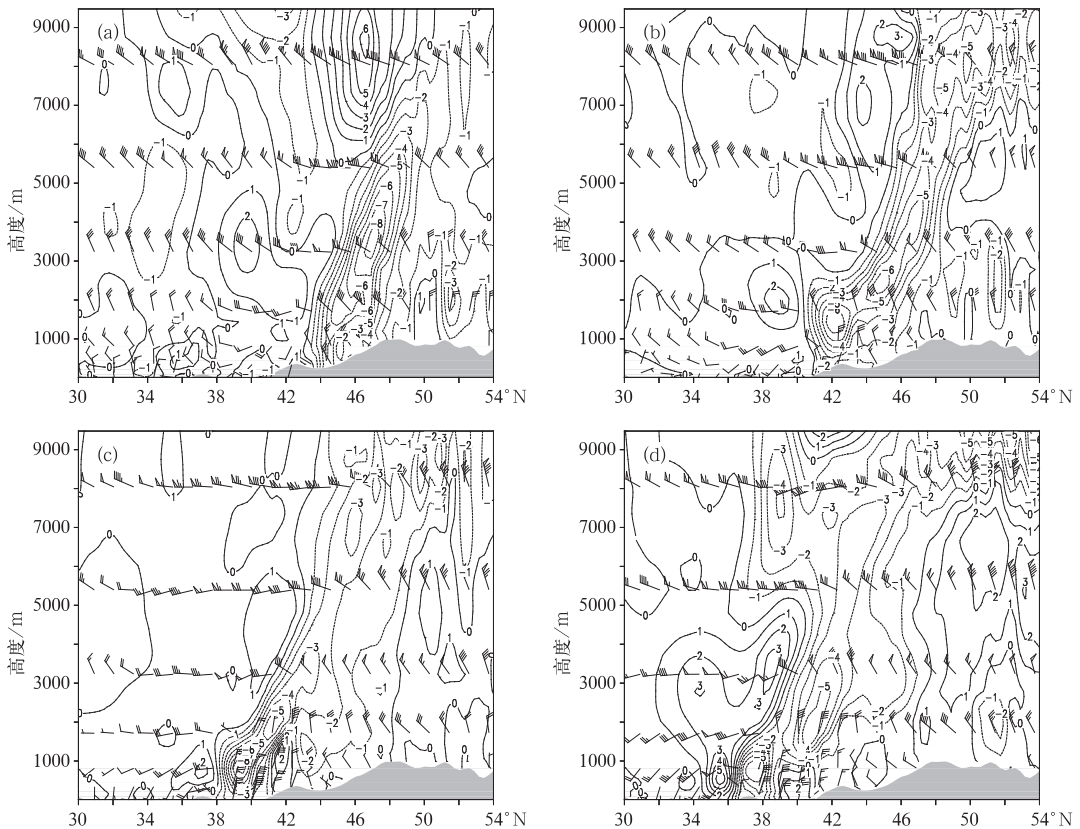


图 3 2009 年 4 月 14—15 日沿 121°E 的风场、温度平流垂直剖面图

(a) 14 日 14 时, (b) 14 日 20 时, (c) 15 日 02 时, (d) 15 日 08 时

Fig. 3 The height-latitude cross-sections of wind field and temperature advection along 121°E

(a) 14 BT 14 April, (b) 20 BT 14 April, (c) 02 BT 15 April, (d) 08 BT 15 April 2009

3.2 变压场和变温场的演变分析

3.2.1 地面变压和气温的演变

根据地面测站观测的 2 m 气温的演变(图略), 冷空气影响之前, 山东大部为偏南风, 气温较高。直到 14 日 20 时后, 在较强的偏南风和暖平流影响下, 山东仍然维持较高的气温。当冷空气影响时, 渤海及山东前期较高的气温使得冷暖空气在该区对比更加强烈, 温度梯度加大, 气压梯度显著增强。

从地面测站的 3 小时变压演变发现(图略), 随着冷空气不断南压加强, 锋后正变压越来越大。15 日 02 时, 冷空气刚刚影响渤海, 锋后 3 小时最大正变压为 5 hPa。15 日 05 时, 渤海湾附近测站的最大 3 小时变压增加到 7.3~8.8 hPa, 15 日 08 时冷空气影响山东时, 由于山东内陆前期气温较高, 造成该区出现更强的正变压, 最大 3 小时变压达 12.9 hPa, 其中鲁西、鲁中地区正变压明显大于山东半岛, 与观测的鲁西、鲁中地区风力大于东部是一致的。显然, 强冷空气影响造成地面强烈的正变压, 促使风力在渤海及山东进一步增强。

3.2.2 变压和变温的垂直演变分析

为更好地分析冷空气南下过程中温压场的垂直演变情况, 对 NCEP 客观分析场提供的 6 小时变压和变温进行了分析。图 4 是 6 小时变压和变温场沿 121°E(渤海中部)的垂直剖面, 可以发现, 14 日 14 时以前(图 4a), 在冷锋附近 1~6 km 高度均有较明显的负变温, 最大负变温位于 700~500 hPa, 结合高空天气形势的演变可知, 中高层首先有冷空气沿低涡后部滑下, 造成中高层降温最明显。同时, 在 36°~38°N 附近的山东内陆地区近地面升温明显, 6 小时最大升温达 8℃。14 日 20 时(图 4b), 冷锋附近负变温主要位于 700 hPa 以下, 最大负变温出现在 850 hPa。此时 500 hPa 低涡后部的横槽已在 14 日 14 时之前转竖, 冷空气主力位于 700 hPa 以下, 其中 850 hPa 以下的冷空气最强, 正变压区也主要位于 850 hPa 以下, 地面正变压显著增强。而在 37°N 以南的内陆地区 700 hPa 以下风向均转为偏南风, 风速增大, 500 m 以上高度均出现升温现象。15 日 02 时, 冷空气影响渤海, 海面风速大大增强, 850 hPa 附近继续维持较强的负变温。近地层正变

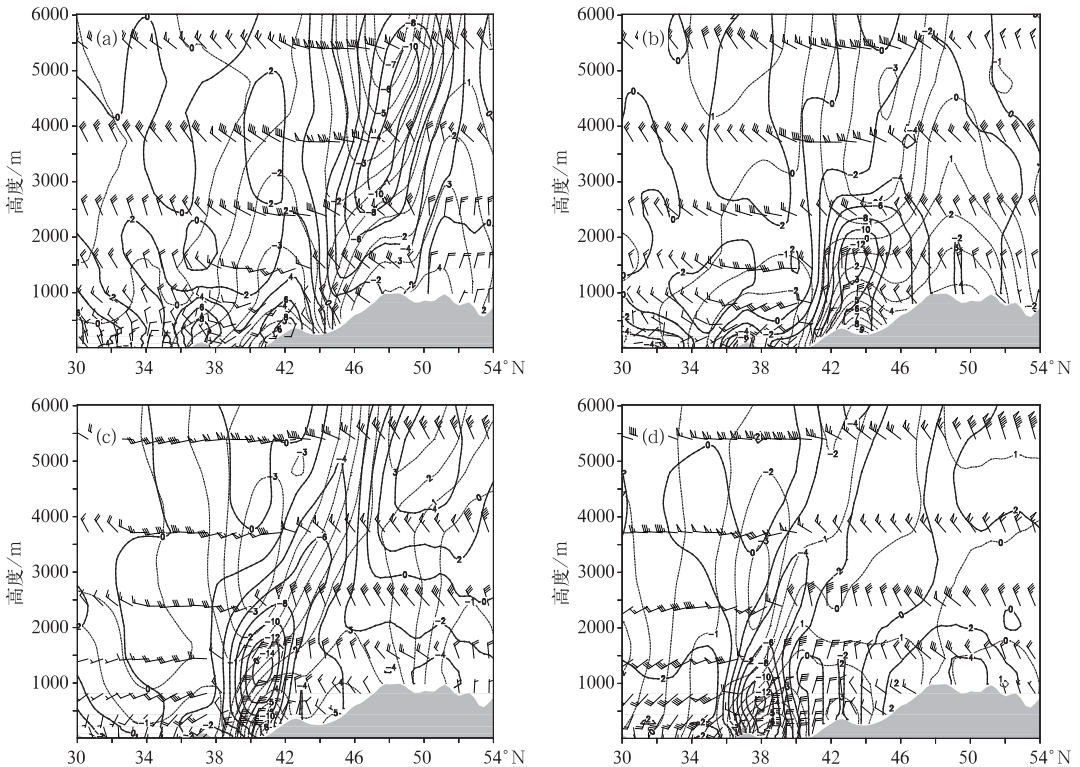


图 4 2009 年 4 月 14—15 日沿 121°E 的风场、变温(粗实线)和变压场(细点线)垂直剖面图
 (a) 14 日 14 时, (b) 14 日 20 时, (c) 15 日 02 时, (d) 15 日 08 时
 Fig. 4 The height-latitude cross-sections of the wind, temperature change (the thick solid lines) and pressure change (the thin dotted lines) along 121°E
 (a) 14 BT 14 April, (b) 20 BT 14 April, (c) 02 BT 15 April, (d) 08 BT 15 April 2009

压依然较强,冷锋前沿伴有很强的变压梯度。此时虽然为夜间,但 38°N 以南的内陆地区并没有明显的降温现象。15 日 08 时,冷空气南压时依然维持较强的强度,但冷空气的高度进一步下降,主要集中在 1 km 以下的近地层。冷空气进一步南下,其高度越来越低,强度逐渐减弱。

由此可见,冷空气由高层向低层传播,在影响渤海、山东时,冷暖空气对比加强,锋区强度增强。

3.3 垂直运动场分析

在本次过程中,除了较强的气压梯度、较强的变压等动力条件外,是否也存在着高层冷空气的动量下传?为此,对冷空气影响过程中的风场和垂直运动场进行了分析。可以发现,14 日白天(图 5a、b),与中高层冷空气(冷平流区和温度冷舌)相对应的是一个弱的下沉气流区,其南部为上升运动区。15 日 02 时,近地面风速显著增大、冷平流增强(图 4c)的同时,近地面冷空气前沿也出现了下沉运动(图

5c)。15 日 08 时(图 5d),近地面冷空气前沿依然有下沉运动,而在冷暖空气交汇处有明显的上升运动,强上升运动出现在 700~500 hPa 高度,最强上升运动达 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,反映了冷空气影响渤海及山东时锋区加强后强大的动力抬升作用的影响。相比之下,冷空气前沿的弱的下沉运动则很可能是由强的地面正变压引起的^[23]。由此可见,冷锋次级环流的下沉运动与地面正变压中心对应,变压梯度风与大尺度气压梯度风共同造成地面强风过程,而强风中的阵风可能与次级环流的强烈脉动有关。

为进一步分析本次冷空气过程中高低空风的垂直交换情况,选取冷空气影响路径上的大连站(54662)做高空风时间剖面图进行分析。由图 6 可以发现,大连站在本次冷空气影响前后 700 hPa 以上均为西北风,风力较大。850 hPa 以下风速较小。受冷空气影响,15 日 08—20 时,850 hPa 以下转为偏北风,且低层风速大于高层,16 日 08 时近地层又转回弱的偏南风。而 700 hPa 以上风几乎不变。大

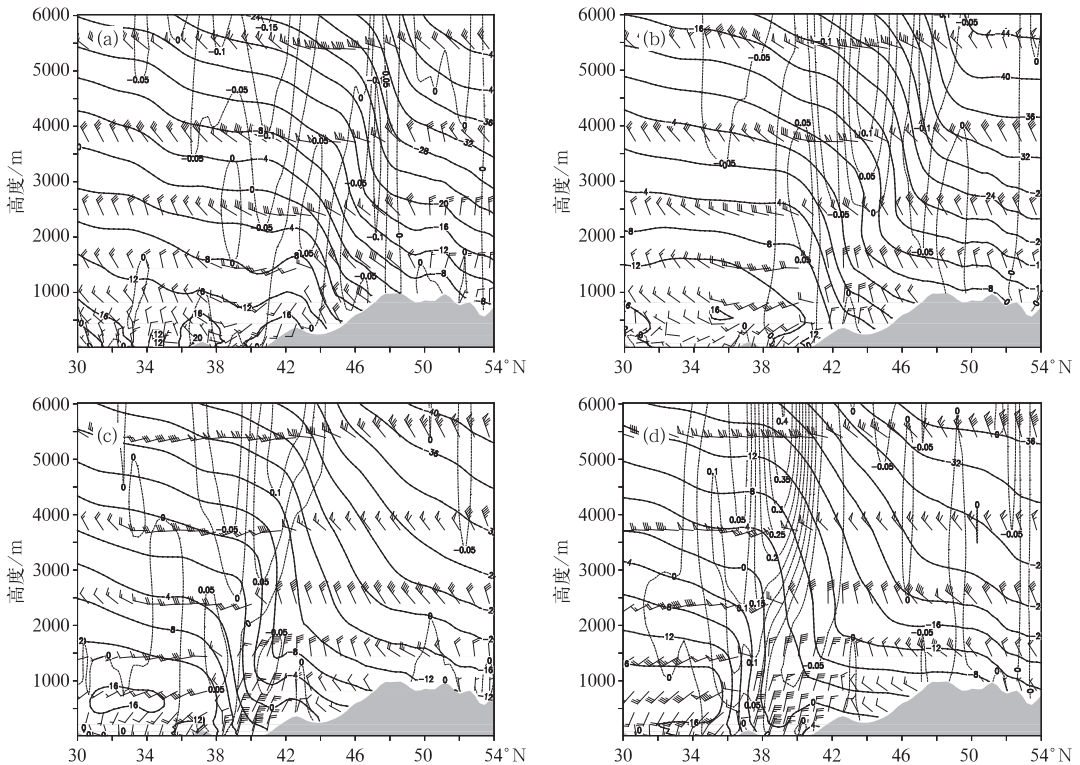


图 5 2009 年 4 月 14—15 日沿 121°E 的水平风场、气温(粗实线, $^{\circ}\text{C}$)和垂直速度场(细点线, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)垂直剖面图

(a) 14 日 14 时, (b) 14 日 20 时, (c) 15 日 02 时, (d) 15 日 08 时

Fig. 5 The height-latitude cross-sections along 121°E of the horizontal wind, temperature (the thick solid lines, $^{\circ}\text{C}$) and the vertical velocity field (the thin dotted lines, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (a) 14 BT 14 April, (b) 20 BT 14 April, (c) 02 BT 15 April, (d) 08 BT 15 April 2009

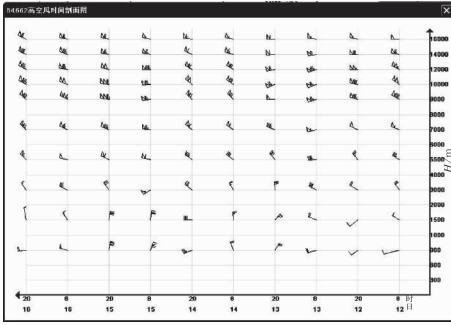


图6 2009年4月12日08时至16日20时
大连站垂直风时间剖面图

Fig. 6 The height-time cross-section
of the wind profile at Dalian Station
(abscissa: the upper line is the Beijing
time (BT), the lower line is the data)

连站的高空风时间剖面图表明,本次强冷空气主要来自850 hPa以下的近地面层,冷空气影响时间短、高度浅,无明显高空风动量下传。

4 结 论

本文根据常规地面观测资料及NCEP分析资料,对2009年4月15日渤海强风过程的影响系统及物理场进行了诊断分析,可以得出以下结论。

(1) 2009年4月15日渤海强风过程是在低层冷锋、高层低涡横槽影响下产生的。冷空气主体位于850 hPa以下,伴有很强的冷平流。

(2) 冷空气向南推进过程中,冷平流中心由高层向低层传播,850 hPa以下冷平流不断加强,使冷锋增强。冷空气到达渤海湾后,由于锋前的强暖平流与锋后的强冷平流造成低空锋区进一步增强。

(3) 冷锋次级环流的下沉运动与地面正变压中心对应,变压梯度风与大尺度气压梯度风共同造成强风过程,而强风中的阵风可能与次级环流的强烈脉动有关。

另外,由于本次冷空气属地面冷锋东移后从东北地区回流影响渤海及山东,因此,地面冷空气恰好经过东北平原进入渤海,渤海北部复杂的地形对于强风的产生有怎样的影响,冷空气进入渤海后风力增强的原因是否仅仅是由于海洋下垫面的作用等,这些均需要借助中尺度数值模拟和对比试验进一步研究。

致谢:本刊的审稿专家提出了非常细致的宝贵修改意见,作者在此表示衷心感谢!

参考文献

- [1] 薛龔波,张新立,于炳礼. 烟台市海上渔业生产大风灾害分析及预报服务对策探讨[J]. 齐鲁渔业,2003,20(8):47-48.
- [2] 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.
- [3] 辛吉武,翁小芳,许向春,等. 琼州海峡南北海岸带大风的天气气候特征[J]. 气象,2009,35(11):71-77.
- [4] 高瑞华,王式功,张孝峰,等. 渤海海峡大风的气候特征分析[J]. 海洋预报,2008,25(3):7-15.
- [5] 张新玲,吴增茂. 渤海海上测风与沿岸实测风的对比分析[J]. 海洋预报,2005,15(4):24-31.
- [6] 赵强,刘大刚,李杰. 渤海秋冬季偏北大风海陆风力差异的研究[J]. 中国航海,2008,31(2):197-201.
- [7] 黄少军,薛龔波,王家芬,等. 一次渤海海峡大风过程天气分析[J]. 山东气象,2006,26(2):15-16.
- [8] 宋丽莉,毛慧琴,汤海燕,等. 广东沿海近地层大风特性的观测分析[J]. 热带气象学报,2004,20(6):731-736.
- [9] 孙燕,吴海英,沈树勤,等. 冬春季江苏沿海大风的特征[J]. 南京气象学院学报,2007,30(5):699-704.
- [10] Streten N A. Some characteristics of strong wind periods in coastal east Antarctica[J]. J Applied Meteorol, 1967, 7:46-52.
- [11] Streten N A. Some observations of Antarctic katabatic winds[J]. Aust Meteor Mag, 1963, 42:1-23.
- [12] Streten N A. A review of the climate of Mawson-A representative strong wind site in East Antarctica[J]. Antarct Sci, 1990, 2:79-89.
- [13] Loewe F. Considerations concerning the winds of Adelie Land[J]. Z Gletscherkd Glazialgeol, 1974, 10:189-197.
- [14] 郭冬艳,姜涛,陈有龙,等. 琼州海峡沿岸大风分布规律及影响系统分析[J]. 气象,2011,37(11):1372-1379.
- [15] 吴海英,孙燕,曾明剑,等. 冷空气引发江苏近海强风形成和发展的物理过程探讨[J]. 热带气象学报,2007,23(4):388-394.
- [16] 陈淑琴,黄辉. 舟山群岛一次低压大风过程的诊断分析[J]. 气象,2006,32(1):68-73.
- [17] 项素清,邱洪芳,林伟. 2004年末浙北沿海10~12级冷空气大风过程诊断分析[J]. 海洋预报,2006,23(增刊):79-83.
- [18] 苏百兴,段朝霞. 广东一次寒潮8级大风物理过程分析[J]. 海洋预报,2009,26(1):14-18.
- [19] 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.
- [20] 黄彬,钱传海,聂高臻,等. 干侵入在黄河气旋爆发性发展中的作用[J]. 气象,2011,37(12):1534-1543.
- [21] 李秀连. 首都机场寒潮强风极值出现条件的分析[J]. 气象,2002,28(11):42-44.
- [22] 王雷. 一次冷空气强风的成因分析[J]. 海洋预报,2005,22(4):96-101.
- [23] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等. 天气学原理和方法(修订本)[J]. 北京:气象出版社,1992:80.