

梁钊明, 高守亭, 王彦. 2013. 渤海湾地区碰撞型海风锋天气过程的资料诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 607–616, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12002. Liang Zhaoming, Gao Shouting, Wang Yan. 2013. Data analysis of collision-type sea-breeze front in the Bohai Bay region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 607–616.

渤海湾地区碰撞型海风锋天气过程的 资料诊断分析

梁钊明^{1,2} 高守亭^{2,1} 王彦³

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理和强风暴实验室, 北京 100029

3 天津市气象台, 天津 300074

摘 要 利用多普勒雷达资料和地面自动站以及再分析资料对近年来 7 次典型的渤海湾地区碰撞型海风锋天气过程进行了分析。资料分析显示对流系统正面碰撞海风锋时（偏东西向碰撞）得到显著发展，而追赶碰撞海风锋时（偏南北向）则没有明显加强。海风锋移动沿途近地面出现明显的降温和风切变可以帮助判断海风锋的移动位置。高层稳定的偏西风有利于引导对流系统与西进海风锋发生正面碰撞。而低层的风场辐合则有利于碰撞过程中对流运动的发生，同时副高西北侧的水汽输送为降水的形成提供了有利条件。渤海湾地区地形的热力效应形成的低层偏中性层结有利于对流运动的发生，另外，在高空偏西风环境下地形可能对与海风锋碰撞的对流系统的触发或加强有促进作用。

关键词 渤海湾 海风锋 碰撞 资料分析

文章编号 1006-9585 (2013) 05-0607-10

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12002

Data Analysis of Collision-Type Sea-Breeze Front in the Bohai Bay Region

LIANG Zhaoming^{1,2}, GAO Shouting^{2,1}, and WANG Yan³

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Tianjin Meteorological Bureau, Tianjin 300074

Abstract Seven typical cases of collision-type sea-breeze front happened in the Bohai Bay region of China, are analyzed with observational (Doppler radar and surface stations) and reanalysis data. The analysis shows that convective systems significantly develop when they hit the sea-breeze front from its front, rather than its rear. A steady upper level westerly favors steering convective systems to move eastwardly and collide with the sea-breeze front. Lower level wind convergence enhances the occurrence of convective motion during the collision, and the water vapor transportation by the flow at the northwest edge of the subtropical high favors the formation of precipitation. The neutral atmospheric stratification at the lower level, caused by a topographic thermal effect, also promotes the occurrence of convective motion. The dynamical effect of topography may enhance the triggering or intensifying nature of the convective systems colliding with the sea-breeze front under the condition of the upper level westerly.

Keywords Bohai Bay, Sea-breeze front, Collision, Data analysis

收稿日期 2012-01-05 收到, 2012-03-27 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41075043、40975026, 国家科技支撑计划项目 2008BAC37B01, 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开放课题 2011LASW-A01

作者简介 梁钊明, 男, 1984 年出生, 博士, 助理研究员, 主要从事中小尺度气象研究。E-mail: liangzm@cma.cma.gov.cn

1 引言

海风锋是与沿海地区海风环流密切相关的天气系统, Dailey and Fovell (1999)、于希里和闫丽凤 (2001) 具体指出海风锋是由海面向陆地推进的海风前缘平行于海岸线的狭窄辐合区或辐合线, 它有类似锋面的温度场和流场特征, 并会伴有一定的天气。李杰等 (2002) 指出海风锋的尺度 (长度) 要比锋小得多, 平均坡度为 1/100。盛春岩和陈优宽 (2007) 利用各种观测资料对青岛一次强海风过程的“人”字形海风锋结构进行分析发现海风环流在垂直方向比较浅薄, 主要位于 1.5 km 高度以下。海风锋虽然水平尺度小, 厚度浅薄, 但是它与强对流天气有着重要联系。陶诗言 (1980) 早在中国暴雨的研究中提出海陆风可能对沿海暴雨有触发作用。许多气象学者的研究发现沿海地区海风锋对强对流天气有触发或加强作用。沈树勤和钱维宏 (1989) 指出苏北地区的冰雹等强对流天气能够在海风锋环流上升支气流中得到进一步发展。刘运策等 (2001) 对珠江三角洲地区海风锋触发形成强对流天气过程的演变规律分析指出当初期海风锋处于低层急流变形带之下的不稳定状态中, 中层又有波动逼近或迭置时, 海风锋发展北推可能触发产生强对流天气。李斌等 (2009) 对青岛一次局地大暴雨的中尺度环流特征分析则发现, 海风锋区辐合扰动向上传播引发边界层扰动是该暴雨形成的主要抬升因素。尹东屏等 (2010) 对 2009 年 6 月 5 日江苏出现的罕见大范围强对流天气过程的分析指出海风锋是造成这次过程的主要中尺度激发和强化系统, 对流云团进入锋区后在切变线的辐合作用下发展, 并随平均风向向前传播。渤海湾地区是海风锋多发地区之一。于恩洪等 (1987) 和于恩洪 (1997) 早期在 5 次野外观测实验中发现渤海湾海风锋对强对流天气有触发作用。王彦等 (2006, 2011) 对渤海湾海风锋的研究发现当海风锋与弱冷锋相遇时, 在暖湿环境下, 相遇交叉处能够产生强对流天气, 当它们相遇形成的角度在 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时更容易触发强对流天气, 而海风锋与其他系统呈追赶碰撞时, 不能形成雷暴天气。随着近年来高时空分辨率观测手段的业务应用, 渤海湾地区海风锋与其他天气系统碰撞触发或加强对流运动的现象逐渐被揭示和分析, 但是, 目前相关的研究相对较少,

因此, 对该地区碰撞型海风锋天气过程的特点的认识有待加深。鉴于此, 本文选取渤海湾地区近几年来 7 个典型的海风锋与其他天气系统碰撞的个例, 利用高时空分辨率观测资料对碰撞型海风锋天气过程的特点进行简单的分析, 同时, 运用再分析资料对这些个例天气过程的环流场、水汽输送、涡度场和大气层结等特征进行分析。这些分析可以为渤海湾地区碰撞型海风锋天气过程的数值模拟研究提供一些参考依据。

2 个例选取以及资料和分析方法简介

本文选取了近几年渤海湾地区 7 个典型的碰撞型海风锋天气过程个例, 它们的发生时间分别为 2006 年 6 月 24 日 (简称为 060624, 以下类同)、2006 年 6 月 30 日 (060630)、2007 年 8 月 13 日 (070813)、2009 年 7 月 6 日 (090706)、2009 年 9 月 26 日 (090926)、2010 年 7 月 16 日 (100716)、2010 年 8 月 18 日 (100818)。其中, 070813 为追赶碰撞的个例, 其他为偏正面碰撞的个例。

分析用到的高时空分辨率观测资料包括这 7 个个例的天津 CINRAD/SA 多普勒天气雷达资料[包括回波反射率、速度和风廓线, 时间分辨率为 6 min; 雷达位于天津塘沽 (39.044°N , 117.717°E); 其中 070813 个例无回波速度和风廓线资料]和地面自动站资料 (包括温度场和风场, 时间分辨率为 1 h, 其中 060624、060630 和 070813 个例无地面自动站资料)。

低仰角 (0.5°) 雷达回波反射率和速度资料将用来分析海风锋与其他天气系统碰撞的过程特征, 雷达风廓线的时间演变将用来分析海风开始向内陆推进 (或海风开始变厚) 的大概时刻和垂直的风场结构变化, 以及海风的大概厚度。

地面自动站资料将用来分析海风锋和其他系统碰撞过程中地面的温度场和风场的变化特征。由于获取的地面自动站露点资料时空连续性较差, 本文暂时不分析该过程中地面湿度场的变化。

在观测资料分析的基础上, 利用再分析资料研究这些个例的高、低层环流形势 (500 hPa 和 850 hPa 等压面)、低层水汽输送特征 (850 hPa 等压面)、海平面气压形势和近地面风场 (地面 10 m 风场)、涡度场以及大气层结的特征。其中本文用到的再分析资料为 NCEP 的 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 的再分

析资料 (Kalnay et al., 1996), 时间间隔为 6 h。

3 雷达资料分析

尹东屏等 (2010) 指出海风锋上强温度梯度带造成的折射指数突变为雷达低仰角观测海风锋成为可能。海风锋环流的上升运动有利于水凝物形成, 这可能使得海风锋对雷达回波的反射有所加强。图 1 为选取的部分碰撞型海风锋个例的雷达回

波反射率和速度分布, 另外几个个例 (060630、090706 和 100818) 的雷达回波 (图略) 与 060624 个例相似。海风锋在雷达回波反射率图中表现为弱的狭窄弧形回波带, 雷达回波强度大概在 10~30 dBZ 之间, 宽度约少于 10 km, 弧形形状则主要与凹形的渤海海岸线有关。从雷达回波反射率图上可以大概看出海风锋向内陆推进的位置, 海风锋在 0.5°仰角雷达回波反射率图上的可辨识距离大概在 100 km 以内, 即高度约为 0.87 km 以下。另外, 这

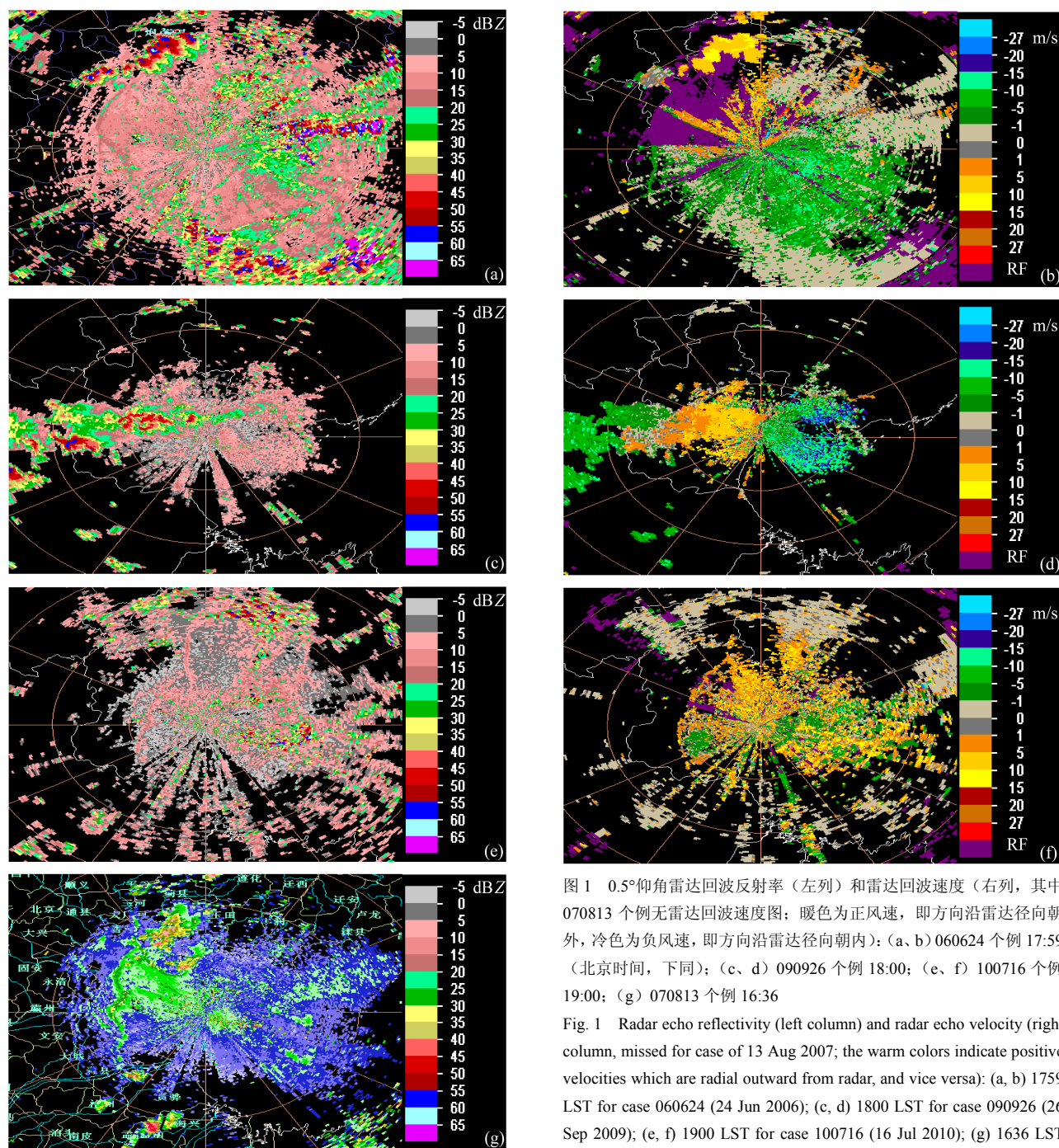


图 1 0.5°仰角雷达回波反射率 (左列) 和雷达回波速度 (右列, 其中 070813 个例无雷达回波速度图; 暖色为正风速, 即方向沿雷达径向朝外, 冷色为负风速, 即方向沿雷达径向朝内): (a、b) 060624 个例 17:59 (北京时间, 下同); (c、d) 090926 个例 18:00; (e、f) 100716 个例 19:00; (g) 070813 个例 16:36

Fig. 1 Radar echo reflectivity (left column) and radar echo velocity (right column, missed for case of 13 Aug 2007; the warm colors indicate positive velocities which are radial outward from radar, and vice versa): (a, b) 1759 LST for case 060624 (24 Jun 2006); (c, d) 1800 LST for case 090926 (26 Sep 2009); (e, f) 1900 LST for case 100716 (16 Jul 2010); (g) 1636 LST for case 070813 (13 Aug 2007)

些个例的雷达回波很好地显示了与海风锋碰撞的天气系统类型,主要包括了对流系统(对流单体或对流云团,如个例 060624、060630、090706、090926 和 100818)、局地的天气系统(如个例 100716,可能为切变线,以下分析将进一步验证)以及对流系统前沿出流边界或阵风锋(如个例 070813)。这些个例的雷达回波清晰地显示了对流系统与海风锋正面碰撞时会明显地加强(如个例 090926),分散的对流单体陆续与海风锋碰撞后会沿着海风锋分布发展,从而出现弧形状的强对流中心带(如个例 060624、090706 和 100818),该过程与沈树勤和钱维宏(1989)和尹东屏等(2010)分析的天气过程相类似,可见,在碰撞过程中海风锋本身的辐合或上升运动对对流系统和对流云团的发展有促进作用。070813 个例则为对流系统移动前沿阵风锋追赶南侧向内陆推进的海风锋的天气过程,在这个过程中对流系统没有明显加强的特征,反而有所减弱,王彦等(2011)对较早的一些渤海湾海风锋个例的观测分析中也发现了类似的天气过程,然而其

中的发生发展机理仍然没有被揭示,这需要以后借助一些手段或方法来进行深入探讨(如数值模拟分析)。另外,100716 个例为海风锋向内陆推进过程中,其北端与局地的天气系统碰撞触发强对流,对流运动明显沿着海风锋扫过的路径陆续触发并呈带状分布。雷达回波速度图则清晰地显示出这些个例过程中海风的大概风向和影响的范围以及与其碰撞的天气系统的移动方向,可以看出,060624、060630、090706、090926、100716 和 100818 个例为西进海风锋与向偏东方向移动或局地静止的天气系统的正面碰撞。070813 个例虽然缺失雷达回波速度图,但从回波反射率可以大概看出对流系统移动前沿阵风锋向西南方向移动,追赶碰撞南侧向西推进的海风锋。

图 2 为部分个例的雷达风廓线的时间演变,由于雷达位于天津塘沽,即陆地和海洋的交界线上,因此,低层风转为海风的时刻为海风开始往陆地推进的大概时间。从图中可以看出 060624、060630 和 090926 个例低层 600 m 以上分别从 15:18 (北京

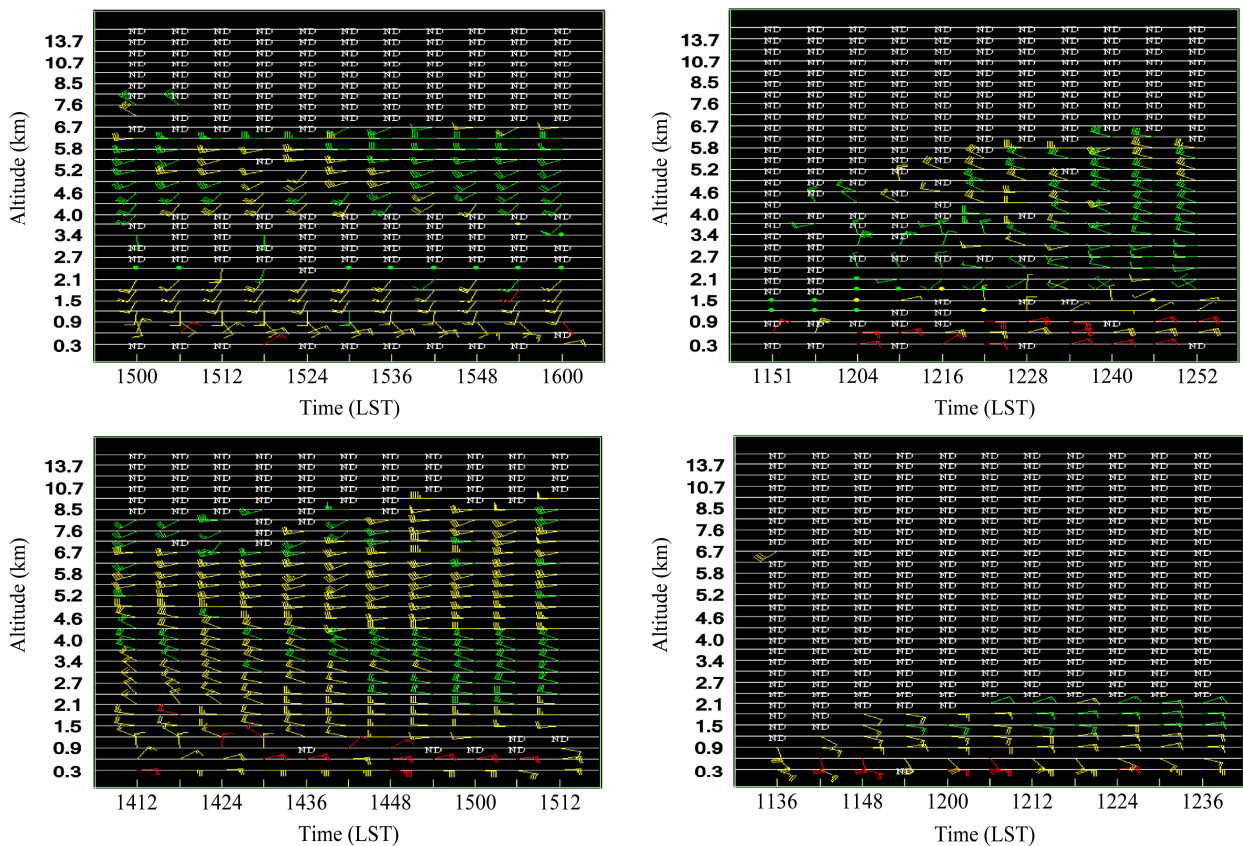


图 2 雷达风廓线的时间演变(“ND”代表无资料): (a) 060624 个例 15:00 至 16:00; (b) 060630 个例 11:51 至 12:52; (c) 090926 个例 14:12 至 15:12; (d) 100818 个例 11:36 至 12:36

Fig. 2 Time series of radar wind profile (“ND” represents no data): (a) 1500 LST to 1600 LST for case 060624; (b) 1151 LST to 1252 LST for case 060630 (30 Jun 2006); (c) 1412 LST to 1512 LST for case 090926; (d) 1136 LST to 1236 LST for case 100818 (18 Aug 2010)

时间,下同)、12:03 和 14:18 附近开始逐渐由偏北风转向偏东风(即海风),100818 个例低层 300~600 m 从 11:48 附近开始由偏东南向海风转为偏东风,而 600 m 以上则一直维持着较深厚的偏东风,没有明显的转向,因此,这可能是较大尺度的环境风。其他个例因某些时刻或高度资料缺乏,不能辨别出低层风转向的大概时刻。但 090706 和 100716 个例在碰撞时段内低层 300 m 附近均为偏南风(图略),与雷达回波速度分布相对应。由于近地面海风的出现,低层会形成明显垂直风切变,如 060624 个例低层为顺时针垂直风切变,而 060630 和 090926 个例低层则为逆时针垂直风切变。另外,雷达风廓线也显示了海风的大概厚度,060624 和 100716 个例海风较为浅薄,厚度大概在 0.6 km 左右,060630 个例海风厚度约为 1.5 km,100818 个例海风较为深厚,大于 2.1 km,这可能与偏东风向环境风场叠加在近地面海风上有关,090926 个例海风厚度则有所变化,大概从 0.9 km 变薄为 0.3 km。

4 地面自动站资料分析

本文选取的个例中,只有 2009 年以后的个例(090706、090926、100716 和 100818)有地面自

动站观测,并且地面自动站观测的湿度(露点)资料缺失较多,因此,这里主要对有地面自动站观测的个例的风场和温度场进行分析。图 3 为这些个例接近碰撞的时刻的地面风场分布情况,图中显示海风锋和与之碰撞的天气系统在地面的移动前沿形成相对明显的风切变,同时也可以看出这两个天气系统接近碰撞时的地面形态,其中 100716 个例在雷达回波图上的近零风速带对应了地面的风场切变线,这表明了 100716 个例中与海风锋碰撞的天气系统很有可能是局地切变线。可见,地面自动站风场可以帮助确定海风锋和碰撞的天气系统的位置,以及判断与海风锋碰撞的天气系统的类型,同时,这与雷达回波显示的结果基本一致。从图 4a、4c(部分个例图略)也可以看出,沿碰撞的方向,海风锋和碰撞天气系统经过的地方出现明显的风向转变,并且可以判断在所选取的沿线上,海风锋与另一天气系统碰撞的大概时间段,如 090706 和 090926 个例碰撞的时间段大概为 12:00 至 13:00 和 15:00 至 16:00。

海风锋和碰撞的天气系统的移动不仅会引起地面风向发生改变,同时也改变了地面温度场。图 4b、4d 为温度场分布,由于所选取的站点基本在陆地上,受白天太阳辐射加热影响,各站点气温从早

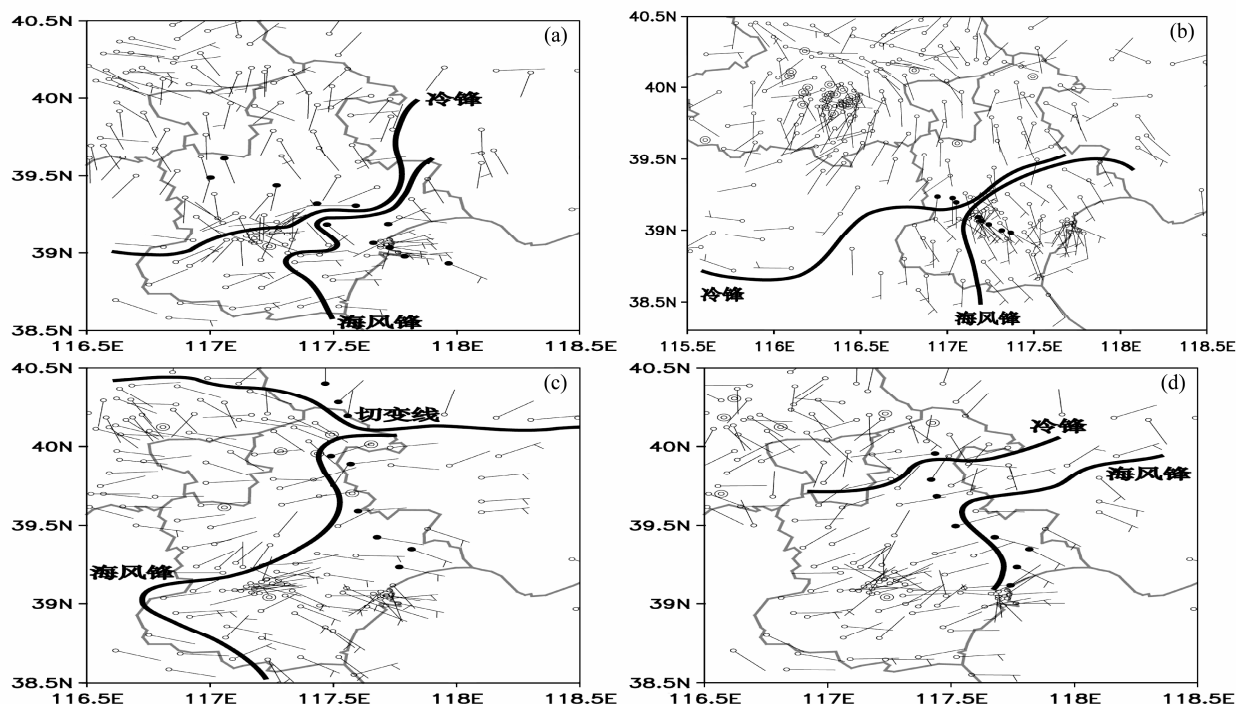


图 3 地面自动站风场分布(粗实线为海风锋和与之碰撞的地面冷锋或切变线的大概位置): (a) 090706 个例 12:00; (b) 090926 个例 17:00; (c) 100716 个例 18:00; (d) 100818 个例 12:00

Fig. 3 Observed surface wind fields (thick solid lines are the locations of the sea-breeze front and the surface cold front or shear line): (a) 1200 LST for case 090706 (6 Jul 2009); (b) 1700 LST for case 090926; (c) 1800 LST for case 100716; (d) 1200 LST for case 100818

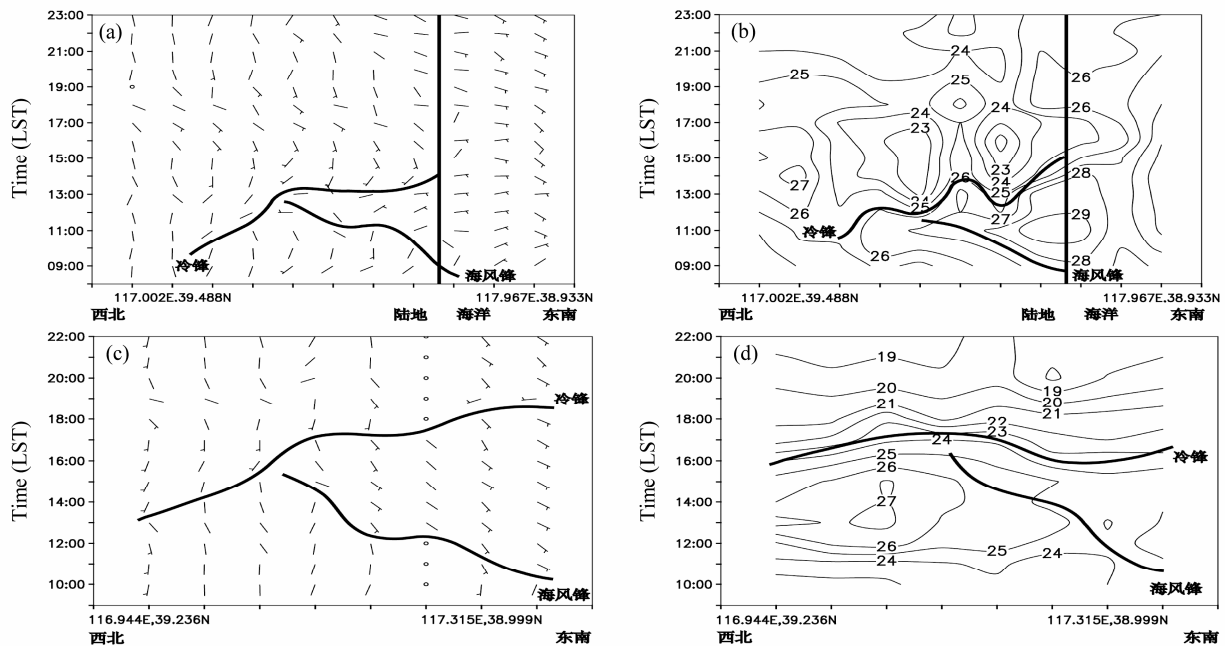


图 4 沿海风锋与其他天气系统碰撞方向上的地面自动站的风向(左列)和温度(右列, 单位: $^{\circ}\text{C}$)的时间演变(横轴为选取的沿海风锋碰撞方向上的地面自动站点, 即图 3 中相应个例的黑圆实心站点): (a、b) 090706 个例; (c、d) 090926 个例

Fig. 4 Time series of observed surface wind directions (left column) and temperatures (right column, units: $^{\circ}\text{C}$) along the direction of collision between sea-breeze front and other weather system (the horizontal axis are the locations of selected surface stations along the direction of collision, which are marked with black solid round points in Fig. 3): (a, b) Case 090706; (c, d) case 090926

上开始随时间升高, 并在午后(12:00 至 15:00)达到最大, 此后则逐渐降低, 但是, 受到海风锋和碰撞的天气系统的影响, 除了 090706 个例, 它们均给经过的站点带来明显的降温, 这是因为午后陆地气温高于海上温度, 海风携带着较冷的空气, 同时, 与海风锋碰撞的对流系统中水凝物降落蒸发吸热, 在近地面形成较冷空气团往前推进形成地面冷锋。对于 090706 个例, 由于海风向陆地推进时间较早, 在中午之前, 海洋温度较陆地偏高, 海风携带着较暖空气, 使得沿岸附近站点气温稍微升高, 而与海风锋碰撞的天气系统则同样地给沿路地区造成明显降温。对比图 4 左列和右列可以看出, 海风锋和与之碰撞的天气系统的移动给沿路的近地面风场和温度场带来的变化基本同步。

5 再分析资料分析

5.1 500 hPa、850 hPa 等压面和地面的要素场

本文选取的 7 各个例中, 060624、060630、090706、090926、100716 和 100818 个例为偏东西方向的碰撞过程, 从这些个例天气过程的 500 hPa 环流形势(图 5)来看, 渤海湾地区北侧为相对稳定的切

断低压(060624)、阻塞高压内孤立低压(060630)或低压槽(090706, 090926、100716、100818), 南边的副热带高压(简称为副高)主体(大于 5880 gpm 线区域)位置基本上偏东偏南, 渤海湾地区为稳定的偏西风气流控制, 无明显的温度平流。偏西气流可能有两方面的作用: 一方面, 弱冷空气下沉增温有利于中低层稳定层结的形成, 而太行山基本为南北走向, 偏西气流翻越太行山在稳定层结下可能产生背风波, 从而加强或触发对流系统; 另一方面, 在西风气流的引导下, 过山触发或加强的对流系统或京津冀地区局地生成的对流系统会向偏东移动, 从而与西进的海风锋发生碰撞。另一个个例(070813)渤海湾地区位于切断低压的中心, 受偏弱的东北气流控制, 在有利的天气条件下, 天津东北侧山地背风坡可能触发局地对流系统, 对流系统在偏东北气流引导下将会向西南方向移动, 从而追赶海风锋发生碰撞过程。850 hPa 的位势高度场、湿度场和风场(图 5)则显示渤海湾地区位于低压或低压槽偏南侧(包括西南侧)以及副高西北侧, 低压东移或减弱造成副高西北端东移或西伸至渤海湾东侧, 使得渤海湾地区低层出现明显的气流辐合和水汽输送, 气流辐合有利于海风锋与其他天气系统碰

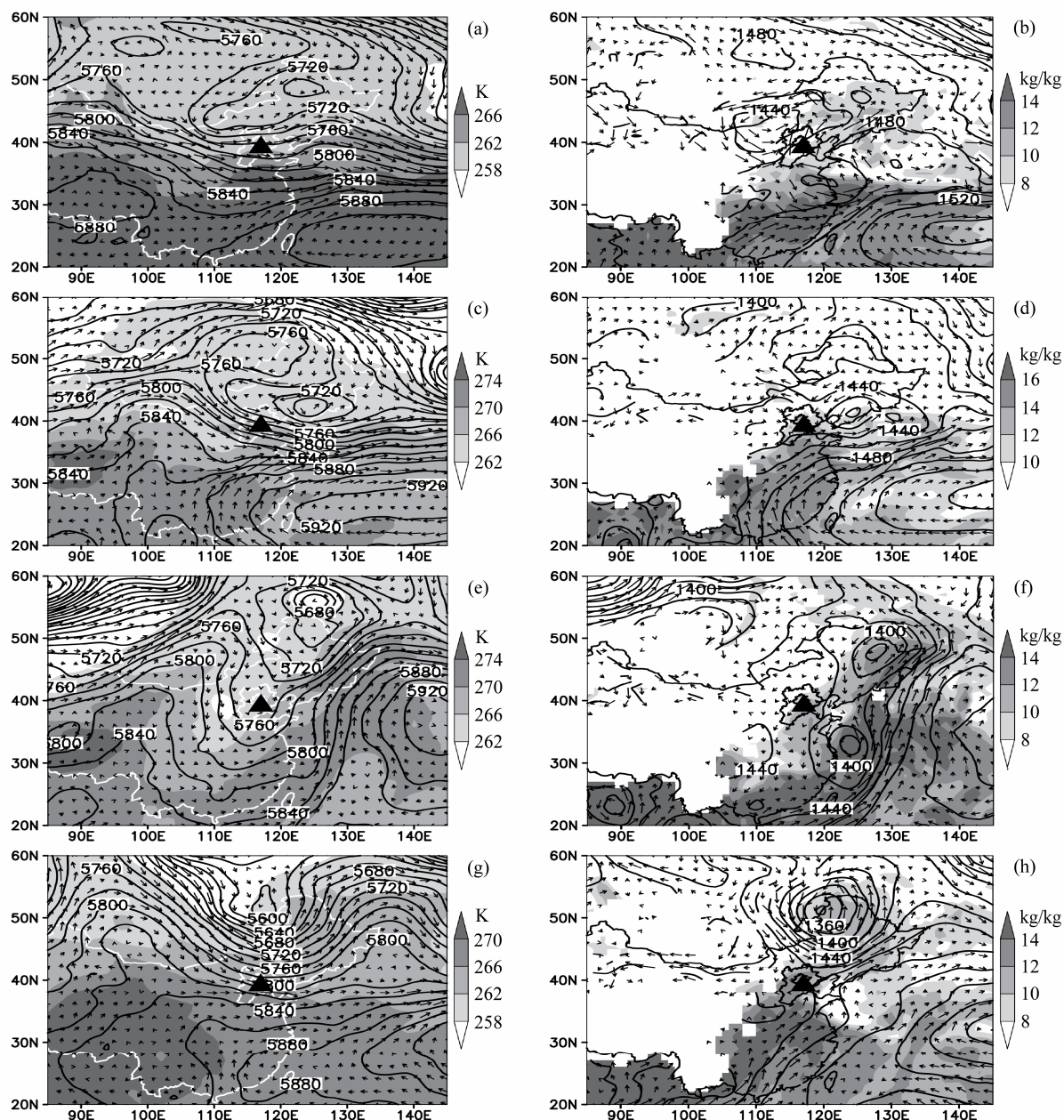


图5 500 hPa (左列) 和 850 hPa (右列) 等压面上的位势高度场 (等值线, 单位: gpm)、风矢量、温度场 (左列填色) 和比湿场 (右列填色) 的分布 (实心三角形标记为渤海湾地区, 空缺部分为嵌入地形区域): (a, b) 060624 个例 14:00; (c, d) 060630 个例 14:00; (e, f) 070813 个例 14:00; (g, h) 090706 个例 08:00

Fig. 5 Distributions of geopotential height (contours, unit: gpm), wind vectors, temperature (colour in the left column), and specific humidity (colour in the right column) fields at 500 hPa (left column) and 850 hPa (right column) (the Bohai Bay region is marked with black filled triangle): (a, b) 1400 LST for case 060624; (c, d) 1400 LST for case 060630; (e, f) 1400 LST for case 070813; (g, h) 0800 LST for case 090706

撞过程中对流运动的形成, 水汽的输送则为对流运动提供了水汽条件。地面形势 (图略) 则显示渤海湾地区基本为海平面高低压之间的相对均压区或弱气压梯度区, 碰撞过程发生前近地面出现较为明显的偏东或偏东南风的转向或加强, 这对应了海风的形成, 预示着海风锋的出现, 另外, 近地面出现的风场辐合为上升运动的触发提供了有利条件。

5.2 涡度场

上面的分析表明雷达资料是反映与海风锋碰撞过程前后对流系统强度变化的一个有利手段, 而在天气分析中涡度也是示踪对流系统强度变化的一个很好的参量, 因此, 结合观测对再分析资料的涡度场进行分析可以研究与海风锋碰撞过程中对流系统的强度变化。上面对选取的 7 个个例的天气

过程分析显示有 5 个个例(060624、060630、090706、090926 和 100818)为海风锋与从西边东移而来的对流系统相向碰撞, 1 个个例(100716)为海风锋与相对静止的切变线相向碰撞, 另一个个例(070813)则为从偏东北方向来的对流系统追赶碰撞海风锋。从这些个例的涡度场变化(图 6, 部分个例图略)来看, 碰撞过程发生后, 对流系统或切变线与海风锋发生相向碰撞的区域的涡度出现了明显的增加, 而对流系统追赶碰撞海风锋的区域的涡度没有明显的加强, 同时, 涡度场增加的趋向很好地对应了这些天气系统的移动方向(向偏东方向移动)或来源。可见, 涡度场不仅可以示踪与海风锋碰撞过程的天气系统的强度变化, 而且可以帮助了解这些天气系统的移动方向或来源。

5.3 大气层结特征

沿着碰撞方向(偏东西向或南北向)取位温和非均匀饱和湿空气位温(即广义位温)(Gao et al., 2004)的垂直剖面可以研究这些个例天气过程的大气层结特征。对于干空气, 在碰撞过程期间, 总体大气层结是稳定的, 但在 14:00(图 7), 山地接收太阳短波辐射达到最大, 热力效应使得在等气压面上山地区域的位温偏高, 山坡地区附近低层(低于

700 hPa)位温垂直梯度接近于零, 为中性层结, 这有利于低层上升运动的出现, 而渤海湾地区正位于太行山东坡和燕山南坡, 同时, 海风锋往往在该时刻附近开始往内陆推进, 因此, 地形热力效应造成的低层大气层结条件有利于该地区碰撞型海风锋对流运动的形成。对于非均匀饱和湿空气, 7 个个例中, 有 5 个个例(060630、090706、090926、100818 和 070813)在渤海湾地区上风方向出现了明显的湿不稳定区(对应广义位温高值区)(图 8, 部分个例图略), 当这些湿不稳定区移出山地背风坡进入渤海湾地区时, 得到了加强或向低层延伸, 而湿不稳定区在某种程度上对应了向东或向南移动并与海风锋碰撞的对流系统, 因此, 地形可能对这些对流系统的触发或加强有一定的促进作用(如背风坡等动力效应), 另外, 与观测对比, 湿不稳定区的演变较好地对应了这些个例天气过程中对流系统的发展, 因此, 广义位温对碰撞型海风锋天气过程中对流系统的发生发展的示踪具有潜在的应用价值。

6 小结

随着近年来多普勒雷达和地面自动站等高时

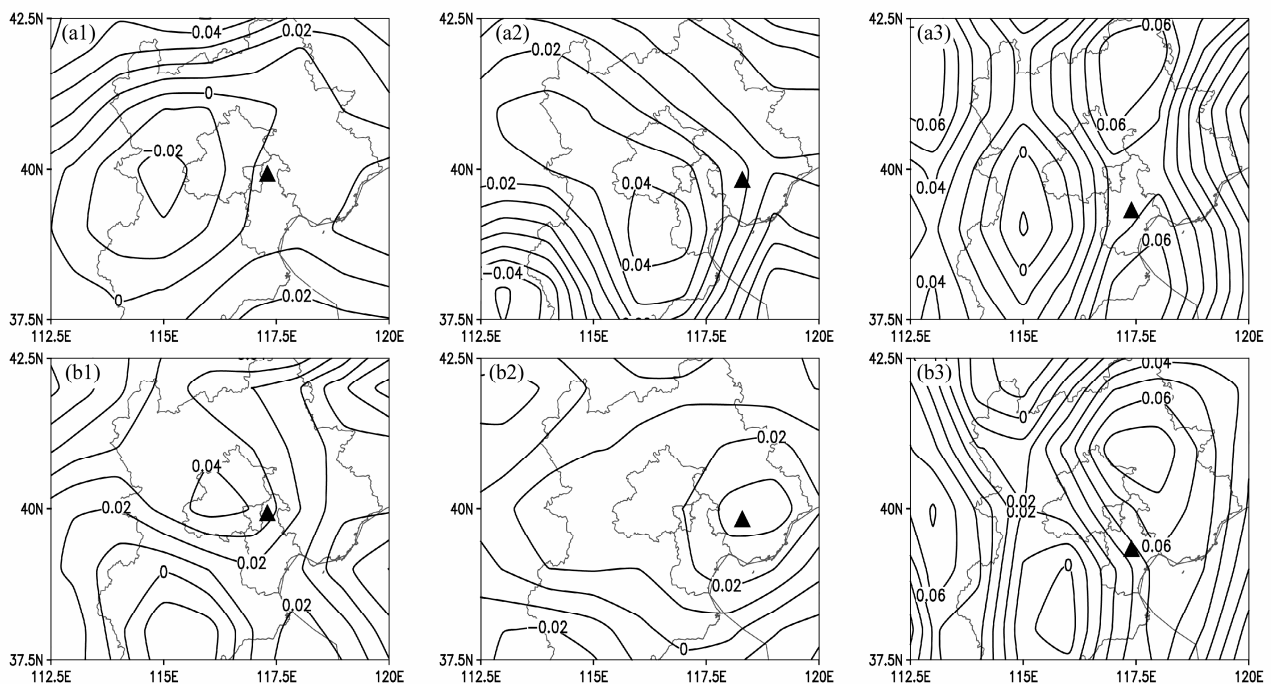


图 6 海风锋与其他天气系统碰撞前后 500 hPa 等压面上的涡度变化(单位: 10^{-3} s^{-1})(三角形标记为海风锋与其他天气系统碰撞的大概位置): 060624 个例 (a1) 14:00 和 (b1) 20:00; 090706 个例 (a2) 08:00 和 (b2) 14:00; 070813 个例 (a3) 14:00 和 (b3) 20:00

Fig. 6 Distributions of 500-hPa vorticity (10^{-3} s^{-1}) before and after the collision between sea-breeze front and other weather system (the location of the collision between sea-breeze front and other weather system is marked with black filled triangle): (a1) 1400 LST and (b1) 2000 LST for case 060624; (a2) 0800 LST and (b2) 1400 LST for case 090706; (a3) 1400 LST and (b3) 2000 LST for case 070813

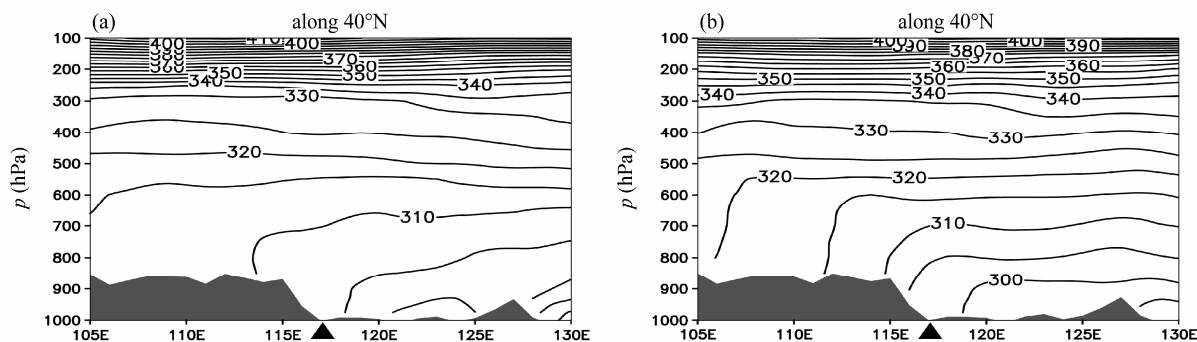


图 7 14:00 沿海风锋与其他天气系统碰撞方向上位温(单位: K)的垂直剖面(灰色填色区为山地, 黑三角形为渤海湾地区大概的位置): (a) 060624 个例; (b) 060630 个例

Fig. 7 Vertical cross sections of potential temperature (K) along the direction of collision between sea-breeze front and other weather system at 1400 LST (the gray shaded regions are mountains, and the location of the Bohai Bay region is marked with black filled triangle): (a) Case 060624; (b) case 060630

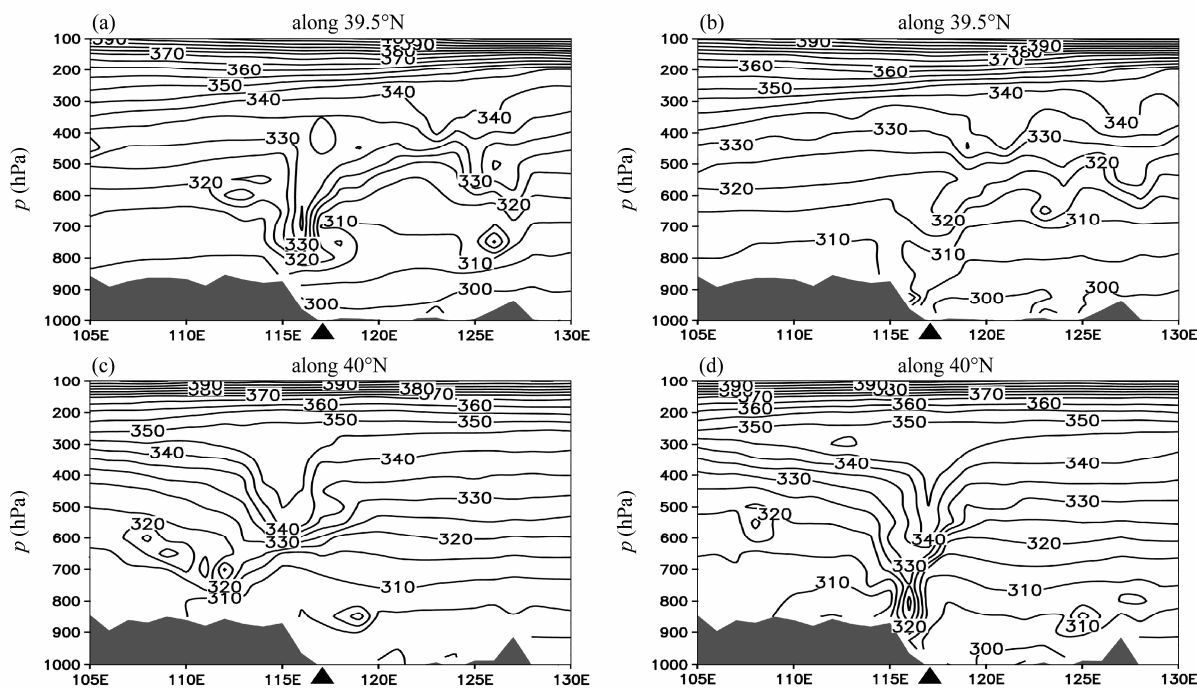


图 8 沿海风锋与其他天气系统碰撞方向上非均匀饱和湿空气位温(单位: K)的垂直剖面(灰色填色区为山地, 黑三角形为渤海湾地区大概的位置): 090706 个例 (a) 02:00 和 (b) 08:00; 100818 个例 (c) 14:00 和 (d) 20:00

Fig. 8 Vertical cross sections of generalized potential temperature (K) along the direction of collision between sea-breeze front and other weather system (the gray shaded regions are mountains, and the location of the Bohai Bay region is marked with black filled triangle): (a) 0200 LST and (b) 0800 LST for case 090706; (c) 1400 LST and (d) 2000 LST for case 100818

空分辨率观测手段的业务应用, 渤海湾地区碰撞型海风锋的天气过程逐渐被揭示和受到关注, 相关的分析(王彦等, 2006, 2011; 何群英等, 2011)也陆续展开。然而, 目前对渤海湾地区碰撞型海风锋天气过程的特点的认识仍有不足的地方, 需要进一步分析加深。鉴于此, 本文利用观测资料(多普勒雷达资料和地面自动站资料)和再分析资料对近年来 7 次(6 个为正面碰撞过程, 1 个为追赶碰撞过程)典型的渤海湾地区碰撞型海风锋的天气过程的

一些特点进行了诊断分析。同时, 该分析结果可以为渤海湾地区碰撞型海风锋的数值模拟研究提供一些参考依据。资料分析的结果显示:

(1) 在所选取的个例中, 与海风锋碰撞的天气系统主要为对流系统, 其他天气系统包括切变线和阵风锋(或出流边界)。雷达回波和涡度场变化均显示与海风锋正面碰撞时(偏东西向)天气系统(对流系统或切变线)有显著的发展, 而与海风锋追赶碰撞时(偏南北向)天气系统(阵风锋)没有明显

的加强。海风锋和与之碰撞的天气系统的移动会给途经的地区的近地面带来明显的降温和风向转向,地面自动站观测是示踪它们位置的有利手段。

(2) 在偏东西向正面碰撞的海风锋天气过程中,渤海湾地区位于高层(500 hPa)稳定的低压系统偏南侧,副高位置偏东偏南,渤海湾地区高空盛行偏西风气流,对流系统在高空偏西风气流引导下东移与西进海风锋发生正面碰撞。渤海湾地区低层的风场辐合则有利于对流运动的发生,同时较为明显的水汽输送为降水的形成提供了有利条件。另外,碰撞过程发生前伴随着海风锋的形成和推进渤海湾地区近地面会出现明显的偏东或偏东南风的转向或加强,同时近地面的风场辐合为上升运动的触发提供了有利条件。

(3) 地形的热力效应造成的低层大气层结条件有利于渤海湾地区碰撞型海风锋过程中对流运动的形成,另外,在高空西风环境下,地形可能对与海风锋碰撞的对流系统(向偏东移动)的触发或加强有促进作用(如背风波等动力效应),而广义位温对对流系统发生发展的示踪具有潜在的应用价值。

参考文献 (References)

- Dailey P S, Fovell R G. 1999. Numerical simulation of the interaction between the sea-breeze front and horizontal convective rolls. Part I: Offshore ambient flow [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 127: 858–878.
- Gao S T, Wang X, Zhou Y. 2004. Generation of generalized moist potential vorticity in a frictionless and moist adiabatic flow [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L12113.
- 何群英, 解以扬, 东高红, 等. 2011. 海陆风环流在天津 2009 年 9 月 26 日局地暴雨过程中的作用 [J]. *气象*, 37 (3): 291–297. He Qunying, Xie Yiyang, Dong Gaohong, et al. 2011. The role of sea-land breeze circulation in local convective torrential rain happening in Tianjin on 26 September 2009 [J]. *Meteorology Monthly (in Chinese)*, 37 (3): 291–297.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- 李斌, 孙即霖, 杨晓霞, 等. 2009. 青岛一次局地大暴雨的中尺度环流特征分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 39 (6): 1171–1180. Li Bin, Sun Jilin, Yang Xiaoxia, et al. 2009. Analysis of mesoscale circulation characteristic on a local torrential rain event [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 39 (6): 1171–1180.
- 李杰, 吴增茂, 何敏, 等. 2002. 奥运青岛帆船赛的有碍天气的基本特征分析 [J]. *海岸工程*, 21 (4): 26–33. Li Jie, Wu Zengmao, He Min, et al. 2002. Basic characteristic analysis of weather unfavourable to Qindao Olympic Games sail boat racing [J]. *Coastal Engineering (in Chinese)*, 21 (4): 26–33.
- 刘运策, 庄旭东, 李献洲. 2001. 珠江三角洲地区由海风锋触发形成的强对流天气过程分析 [J]. *应用气象学报*, 12 (4): 433–441. Liu Yunce, Zhuang Xudong, Li Xianzhou. 2001. Severe local storms initiated by the sea breeze front in the Pearl River Delta during the late spring and summer [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 12 (4): 433–441.
- 沈树勤, 钱维宏. 1989. 海州湾的海风锋对强对流天气作用的数值试验 [J]. *气象科学*, 9 (1): 86–92. Shen Shuqin, Qian Weihong. 1989. A numerical experiment of the effect of the sea breeze front of Haizhou Bay on heavy convective precipitation [J]. *Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 9 (1): 86–92.
- 盛春岩, 陈优宽. 2007. 2006 年 8 月青岛一次强海风过程“人”字形结构分析 [J]. *气象*, 33 (8): 35–40. Sheng Chunyan, Chen Youkuan. 2007. Analysis of the special “人” character structure of a strong sea-breeze event near Qingdao coast [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 33 (8): 35–40.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 107–111. Tao Shiyan. 1980. Rainstorms in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 107–111.
- 尹东屏, 吴海英, 张备, 等. 2010. 一次海风锋触发的强对流天气分析 [J]. *高原气象*, 29 (5): 1261–1269. Yin Dongping, Wu Haiying, Zhang Bei, et al. 2010. Analysis on a severe convective weather triggered sea breeze front [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 29 (5): 1261–1269.
- 王彦, 李胜山, 郭立, 等. 2006. 渤海湾海风锋雷达回波特征分析 [J]. *气象*, 32 (12): 23–29. Wang Yan, Li Shengshan, Guo Li, et al. 2006. Doppler radar echo features of sea breeze front in Bohai Bay [J]. *Meteorological (in Chinese)*, 32 (12): 23–29.
- 王彦, 于莉莉, 朱男男, 等. 2011. 渤海湾海风锋与雷暴天气 [J]. *高原气象*, 30 (1): 245–251. Wang Yan, Yu Lili, Zhu Nannan, et al. 2011. Sea breeze front in Bohai Bay and thunderstorm weather [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (1): 245–251.
- 于恩洪. 1997. 海陆风及其应用 [M]. 北京: 气象出版社, 1–146. Yu Enhong. 1997. Sea-Land Breeze and Its Application (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–146.
- 于恩洪, 陈彬, 白玉荣. 1987. 渤海湾西部海陆风的空间结构 [J]. *气象学报*, 45 (3): 379–381. Yu Enhong, Chen Bin, Bai Yurong. 1987. Land and sea breeze in the western Bohai Bay [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 45 (3): 379–381.
- 于希里, 闫丽凤. 2001. 山东半岛北部沿海强对流云团与局地暴雨 [J]. *气象科技*, (1): 39–41. Yu Xili, Yan Lifeng. 2001. Severe convective cloud cluster and local storms in the north coast of Shandong Peninsula [J]. *Meteorological Technology (in Chinese)*, (1): 39–41.