

赵金霞,徐灵芝,卢焕珍,等. 盛夏渤海湾大气边界层辐合线触发对流风暴对比分析[J]. 气象,2012,38(3):336-343.

# 盛夏渤海湾大气边界层辐合线触发 对流风暴对比分析<sup>\*1</sup>

赵金霞<sup>1</sup> 徐灵芝<sup>1</sup> 卢焕珍<sup>1</sup> 范苏丹<sup>2</sup>

1 天津滨海新区气象预警中心,天津 300457

2 南京信息工程大学,南京 210044

**提 要:** 本文对渤海湾 2008—2009 年,由大气边界层辐合线引起的对流风暴进行了分析。结果表明,在高温、高湿不稳定大气层结环境条件下:(1)单一的海风锋在其端点可产生对流性降水。(2)海风锋与弱冷锋相遇,或者两条海风锋相交,或者雷暴单体的出流边界与海风锋相遇均会产生强对流风暴。(3)渤海湾边界层辐合线触发对流风暴大多发生在每年 7—8 月,且在副热带高压控制渤海湾后东退的过程中,此时大气层结处在高温、高湿不稳定状态。辐合线触发的对流风暴是沿辐合线移动,移动方向取决于辐合线两侧的主导风向。(4)边界层辐合线触发对流风暴,具有突发性强,持续时间短等特点,分析渤海湾边界层辐合线的移动与演变能提高强对流风暴的临近预报、预警,减少突发性天气引起的灾害。

**关键词:** 边界层辐合线, 对流风暴, 对比分析

## Comparative Analysis of Boundary Layer Convergence Lines Triggering Convective Storm in Bohai Bay

ZHAO Jinxia<sup>1</sup> XU Lingzhi<sup>1</sup> LU Huanzhen<sup>1</sup> FAN Sudan<sup>2</sup>

1 Binhai Meteorological Office of Tianjin, Tianjin 300457

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Boundary layer convergence lines caused convective storms in Bohai Bay during 2008—2009 were analyzed. The results showed that: (1) In the high-temperature and high humidity environments under instable conditions of atmospheric stratification, a single land-sea breeze convergence line is able to produce a weak convective storm in its endpoint. (2) The three cases that land-sea breeze convergence line intersects the weak cold front, or two land-sea breeze convergence lines intersect, or outflow boundary of thunderstorm meets with the boundary layer convergence line in coastal could produce strong convective storm. (3) Boundary layer convergence line triggering the convective storm in the Bohai Bay often occurs in July—August every year. Meanwhile, in the subtropical high eastward withdrawal process in the Bohai Bay, this atmospheric stratification maintains a high temperature, high humidity and instable condition. And then convergence line triggers convective storm, which moves along the convergence line, and its direction of movement depends on the dominant wind direction on both sides of convergence line. (4) Boundary layer convergence line triggering convective storm has its features of sudden, strong, and short duration. By analyzing the movement and evolution of land-sea breeze convergence line, we may improve the nowcasting and warning of strong convective storm and reduce disasters.

**Key words:** boundary layer convergence lines, convective storm, comparative analysis

\* 天津青年基金项目(Z200915)资助

2011 年 2 月 6 日收稿; 2011 年 6 月 2 日收修定稿

第一作者: 赵金霞,主要从事短期天气预报技术研究工作. Email: zhjx1626@163.com

## 引言

在我国东部沿海地区夏季经常会出现海陆风辐合线即海风锋,国际上对大气边界层内辐合线的研究最早可以追溯到20世纪初。Wilson等<sup>[1]</sup>首先指出,所谓的边界层辐合线,是两种不同温度、湿度的气流辐合线,它包括冷锋、露点锋、海风锋和雷暴的出流边界(阵风锋)等。Jeffreys<sup>[2]</sup>的研究奠定了海陆风定量理论的基础。Estoque<sup>[3]</sup>应用海陆风数值模式模拟了海岸线的变化对海风锋的作用。Wilson等<sup>[4-7]</sup>研究发现大多数风暴都起源于大气边界层辐合线附近,在两条边界层辐合线相交处,如果大气层结有利于对流的发展,则几乎肯定会有对流风暴在此生成。如果边界层辐合线相交处本来就有风暴,则该风暴会迅速发展。国内学者对边界层辐合线也做了大量研究,陶诗言<sup>[8]</sup>从理论上提出海陆风可能对沿海暴雨有触发作用。王彦等<sup>[9]</sup>应用天气雷达和相应的自动气象站资料,研究了渤海湾海风锋雷达回波特征及渤海湾海风锋与弱冷锋碰撞能够产生强对流天气。王令等<sup>[10]</sup>应用雷达资料分析北京地区的强对流天气的演变规律。刁秀广等<sup>[11]</sup>分析了济南地区边界层辐合线在强风暴临近预警中的应用。陶岚等<sup>[12]</sup>分析了一次雷暴冷出流中新生强脉冲风暴。有些学者对不同类型的环境背景下的强对流天气短时临近预报及方法做了分析和研究<sup>[13-14]</sup>,还有不少学者<sup>[15-20]</sup>应用数值模拟或个例分析方法揭示海风锋能够触发强对流天气。文献<sup>[21]</sup>应用自动气象站和雷达回波资料分析珠江三角洲地区由海风锋触发形成强对流天气过程的演变规律等。本文利用天津CINRAD-SA雷达观测资料、MICAPS资料、自动气象站资料及NCEP再分析资料,着重分析边界层辐合线在海面生成移向海岸触发沿海暴雨,及海岸生成的边界层辐合线,在移动过程中相交、叠加触发强对流天气。目的就是通过边界层辐合线的移动、演变与大气对流参数信息相互结合,为强对流天气临近预报、预警提供判断依据。

## 1 渤海湾边界层辐合线的形成与演变

边界层辐合线在雷达 $0.5^\circ$ 仰角基本反射率图上呈现弱窄带回波线,强度一般维持在 $15\sim 30$  dBZ左右。从自动站观测的数据显示可以看出,边界层

辐合线附近表现出明显的锋面特性;长度随温度、湿度和风场的变化而变化,对低层大气有动力抬升作用;它是对流风暴发生、发展的动力条件之一。据雷达资料统计发现,边界层辐合线触发对流风暴大多发生在每年的7—8月,均在副高控制华北地区后东退南压的过程中。在渤海海面形成的边界层辐合线,是渤海湾东北部对流单体产生的出流边界,在海面偏东风的作用下出流边界脱离对流单体缓慢向渤海西海岸移动,在海岸线附近与海风锋相交或叠加,触发沿海暴雨。在渤海西海岸形成的边界层辐合线,大多是由海陆风引起的海风锋;气压场较弱时会出现多条辐合线,当辐合线缓慢向西移动过程中相交、叠加或与弱冷锋相遇触发对流风暴。对流风暴包括普通单体风暴、多单体风暴、线风暴即飚线、超级单体风暴<sup>[22]</sup>。大多数辐合线随对流风暴的结束逐渐消失。

## 2 盛夏渤海湾大气边界层辐合线触发对流风暴的环境条件

边界层辐合线触发对流风暴产生的灾害不尽相同,利用2008和2009年4次边界层辐合线触发对流风暴的天气过程资料及NCEP再分析资料,分析气象要素的不同变化产生不同天气灾害。2008年7月4日和2008年8月29日在08时500 hPa河套附近均有高空槽,渤海湾处在副高后部,副高缓慢东退、南压。蓟县、武清两个代表站气温上升很快,最高气温达到 $33.9$ 和 $31.5^\circ\text{C}$ ;08时露点温度达到 $25$ 和 $22^\circ\text{C}$ (表1和表2)。2008年7月4日08时北京探空站 $0\sim 6$  km风场垂直切变,风向随高度顺时针旋转 $225^\circ$ ,风速垂直切变 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。蓟县地区925 hPa以下相对湿度为 $75\%$ 。08时至14时CAPE值从 $700\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 升至 $1500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;K指数由 $27^\circ\text{C}$ 升至 $36^\circ\text{C}$ 。傍晚前后辐合线与弱冷锋相遇触发了对流风暴,蓟县出现 $12.8\text{ mm}$ 降水和 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 灾害性大风,造成树木折断或连根拔起等严重灾害。2008年8月29日08时北京探空站 $0\sim 6$  km风场垂直切变,风向随高度顺时针旋转 $180^\circ$ ,风速垂直切变 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。武清地区925 hPa以下相对湿度为 $80\%$ ,08时至14时CAPE值从 $500\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ 升至 $1200\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,K指数由 $25^\circ\text{C}$ 升至 $34^\circ\text{C}$ 。午后两条辐合线相交,武清区梅厂镇1小时内出现 $41.9\text{ mm}$ 的强降水和 $19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 灾害性大风。这两次过程都

有较大垂直风切变,CAPE 值和  $K$  指数均很高,且增加速度快,大气层结有很强的对流潜能,因此出现了灾害性大风。

2008 年 8 月 11 日和 2009 年 7 月 6 日在 08 时 500 hPa 渤海湾均处在东北冷涡底部,其南部副高缓慢东退、南压。塘沽、宁河两代表站受偏东风影响,气温上升很慢,最高气温均为  $27^{\circ}\text{C}$ ,露点温度维持在  $22\sim 24^{\circ}\text{C}$ 。2008 年 8 月 11 日 08 时北京探空站  $0\sim 6$  km 风场垂直切变,风向随高度顺时针旋转  $180^{\circ}$ ,风速垂直切变  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。塘沽地区 700 hPa 以下相对湿度为 90%。08 时至 14 时 CAPE 值从  $400\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  升至  $650\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $K$  指数由  $33^{\circ}\text{C}$  升至

$34^{\circ}\text{C}$ 。中午两条辐合线相交时,塘沽站 1 小时出现了  $41.0\text{ mm}$  的短时暴雨。2009 年 7 月 6 日 08 时北京探空站  $0\sim 6$  km 风场垂直切变,风向随高度顺时针旋转  $225^{\circ}$ ,风速垂直切变  $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。宁河地区 700 hPa 以下相对湿度为 85%。08 时至 14 时 CAPE 值从  $450\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$  升至  $700\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $K$  指数由  $32^{\circ}\text{C}$  升至  $35^{\circ}\text{C}$ 。中午两条辐合线叠加,宁河 4 小时出现了  $97\text{ mm}$  暴雨及大范围的积水。这两次过程 CAPE 值均较低,  $K$  指数维持很高;且湿层高、湿度大,风场垂直切变大,  $3\sim 6$  km 没有风向切变;当辐合线相交或叠加时只出现局地暴雨,无灾害性大风。

表 1 辐合线触发对流风暴形势和天气实况

Table 1 Weather situations of convergence line triggering convective storm

日期	代表站	灾害性天气	最高气温/ $^{\circ}\text{C}$	降水量/mm	08 时垂直风切变		500 hPa 形势
					( $0\sim 3$ km)	( $3\sim 6$ km)	
20080704	蓟县	雷暴大风	$33.9^{\circ}\text{C}$	12.8 mm	NE2-S4	S4-W10	副高脊后
20080811	塘沽	雷暴暴雨	$27.0^{\circ}\text{C}$	41.0 mm	NE2-SW6	SW6-SW10	冷涡底部
20080829	武清	雷暴大风	$31.5^{\circ}\text{C}$	41.9 mm	E2-SW8	SW8-W14	副高脊后
20090706	宁河	雷暴暴雨	$27.0^{\circ}\text{C}$	97.0 mm	NE2-W4	W4-W14	冷涡底部

表 2 大气稳定度及水汽对比

Table 2 Comparison of atmospheric stability and moisture

日期	代表站	CAPE 值/ $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$		K 指数/ $^{\circ}\text{C}$		1000 hPa 相对湿度/%		露点温度/ $^{\circ}\text{C}$	
		08 时	14 时	08 时	14 时	08 时	08 时	14 时	
20080704	蓟县	700	1500	27	36	75	25	25	
20080811	塘沽	400	650	33	34	91	24	24	
20080829	武清	500	1200	25	34	80	22	19	
20090706	宁河	450	700	32	35	85	22	23	

由分析可以看出,渤海湾在边界层风辐合线触发对流风暴的过程中  $K$  指数均较高,产生灾害性大风时风场垂直风切变和 CAPE 值均大,但湿层低、湿度偏小;产生暴雨时湿度大、湿层高,风场垂直风切变大,但 CAPE 值小。

### 3 盛夏渤海湾大气边界层辐合线触发对流风暴的雷达回波特征

#### 3.1 海风锋与弱冷锋相遇触发对流风暴雷达回波特征

2008 年 7 月 4 日从图 1 上可以看出,在雷达  $0.5^{\circ}$  仰角基本反射率因子图上,11:42 时雷达测站的西南方配合海风锋产生一条弱窄带回波(图 1a 中箭头所指),强度小于  $20\text{ dBz}$  并缓慢向西移动。14

时大港地区海风锋两侧温差达  $4^{\circ}\text{C}$ ,14:24 时窄带回波的南端在大港地区触发对流单体,强度达到  $48\text{ dBz}$ (图 1b 中的箭头所指),产生雷阵雨天气;之后对流单体在辐合线南端不断生消,均有雷阵雨生消与之对应。16:24 时辐合线的中部在武清与另一条弱辐合线相交,产生多单体对流风暴(图 1d 中的圈处),强度达到  $55\text{ dBz}$ ,出现强雷阵雨。之后对流单体沿辐合线向东北移动。17:00 时地面自动站观测图上在京津相交处有一条弱冷锋 a 迅速东移与海风锋 b 相遇,在宝坻、蓟县辐合加强(图 1c 中 a、b 线)。18:06 时宝坻产生多单体对流风暴,强度达到  $55\text{ dBz}$ , (图 1e 中箭头所指),并在宝坻出现弱中气旋(图略)。同时蓟县也出现多单体强对流风暴(图 1e 中的圈处),强度达到  $65\text{ dBz}$ 。在其移动的右前方出现下击暴流缺口,最大回波顶高度  $17\text{ km}$ 。在  $2.4^{\circ}$  仰角基本速度图上,18:12 时蓟县出现强中气

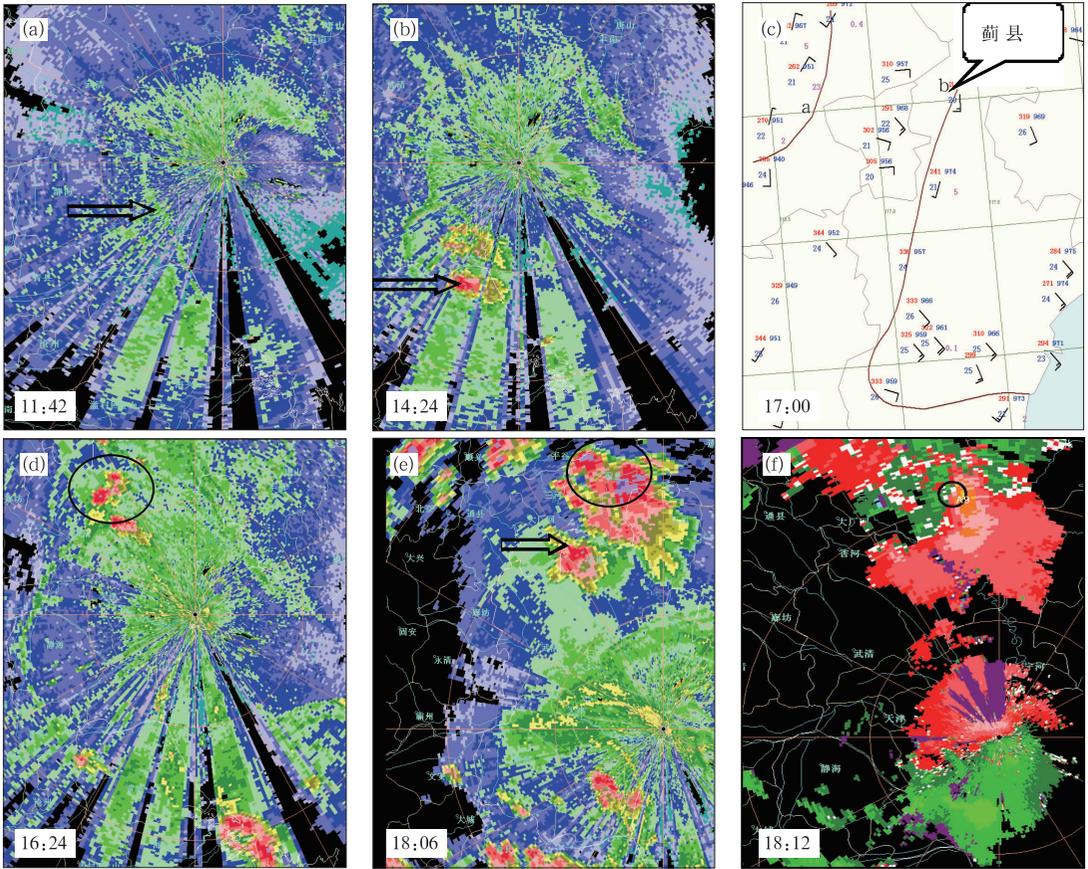


图 1 2008 年 7 月 4 日不同时间基本反射率因子图(a,b,d,e, 0.5°仰角);  
(c) 地面图; (f) 基本速度图(2.4°仰角)

Fig. 1 Fundamental reflectivity factors (0.5° elevation) at different times (a,b,d,e) on 4 July, 2008, surface chart (c), and basic velocity chart (f, 2.4° elevation)

旋,最大入流  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,出流  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , (图 1f 中的圈处),三个体扫后减弱消失,在宝坻、蓟县出现强雷阵雨和灾害性大风。

由分析可以看出,在高温、高湿的条件下,辐合线两侧温差足够大,单一的辐合线的端点也能触发对流天气,由于辐合抬升较弱,降水强度和降水量不大。当两条辐合线相遇时由于辐合抬升增强,会触发强对流天气,出现雷阵雨和短时大风。当辐合线遇到弱冷锋时,辐合抬升迅速加强,触发强对流风暴,产生中气旋,出现强雷阵雨和灾害性大风。由于海风锋辐合线右侧的偏南风较大,对流单体形成后沿辐合线向北移动,因此北部地区可以及时发布预警信息。

### 3.2 渤海湾海岸辐合线与海面雷暴出流边界相交触发对流风暴雷达回波特征

从图 2 上可以看出,2008 年 8 月 11 日 11 时地

面自动站观测图上经过雷达测站(塘沽)到武清有一条弱辐合线(图 2c 中箭头所指);在雷达 0.5°仰角基本反射率因子图上,11:00 时在塘沽的东北方 50 km 海岸附近有对流单体发展,产生的出流边界在渤海湾海面受海上东南风的影响,呈东北—西南走向,并逐渐向渤海西海岸移动(图 2a 中的箭头所示),其南端在塘沽与海岸辐合线相遇;11:36 时海岸辐合线回波加强,在辐合线的北端和塘沽站附近触发对流单体(图 2b 中的箭头所指);12:12 时辐合线北部的对流单体减弱东移,陆地风向转为西北;渤海湾海面雷暴出流边界加强,对流单体在塘沽地区迅速发展到 45 dBz(图 2d 中的箭头所指),出现雷阵雨;12:36 时 1.5°仰角基本速度图上有  $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  入流速度区经过雷达测站(图 2f 中的箭头所指),13:12 时塘沽站对流单体强度达到 55 dBz(图 2e 中的箭头所指),从海面到塘沽的雷暴出流边界回波也迅速加强。12:00 时到 13:00 时塘沽站出现了 41.0

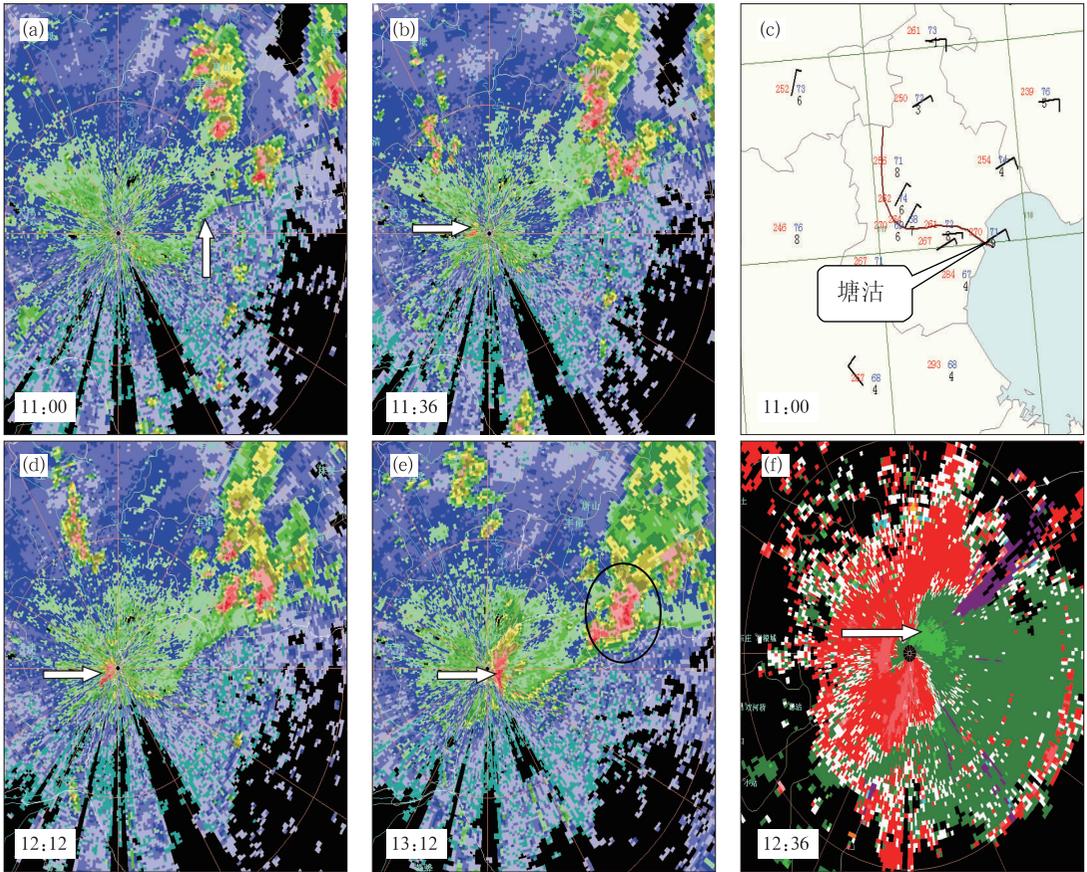


图 2 2008 年 8 月 11 日不同时间基本反射率图(a,b,d,e,  $0.5^\circ$  仰角);  
(c) 地面图; (f) 基本速度图( $1.5^\circ$  仰角)

Fig. 2 Fundamental reflectivity factors ( $0.5^\circ$  elevation) at different times (a, b, d, e) on 11 August 2008, surface chart (c), and basic velocity chart (f,  $1.5^\circ$  elevation)

mm 短时暴雨和瞬时大风;同时雷暴出流边界东北端的对流单体也在加强(图 2e 中的圈处);14:00 时海岸上的对流单体受偏西风的推动作用沿辐合线逐渐向东部海面移动,塘沽站降水迅速结束。

由分析可以看出,海岸辐合线与海上雷暴出流边界相交的地区会触发对流风暴。由于雷暴的出流边界经过渤海海面,有大量的水汽输送。在温度较低,湿度较大的条件下,产生短时局地暴雨。

### 3.3 两条海风锋相交触发对流风暴雷达回波特征

2008 年 8 月 29 日由于海风锋较弱,13:00 时地面风场有两条弱辐合线(见图 3c 中 a、b 线所示),在雷达  $0.5^\circ$  仰角基本反射率因子图上 13:30 时出现两条辐合线弱窄带回波(图 3a 中 1、2 箭头所示);辐合线 1、2,相交于武清地区,强度小于 20 dBz,在 1 辐合线北端宝坻及两条辐合线的交界处武清各有对流单体生成;14:00 时武清地区辐合线相交处的对

流单体迅速加强到 58 dBz(图 3b 中圈处),在武清地区出现强雷阵雨,对流单体外围产生圆形出流边界;14:30 时对流单体达到最强,回波强度为 60 dBz(图 3d 中圈处),14:36 时基本速度图上在武清有大风核配合,圆形的入流速度包围着出流,与强对流单体形成的圆形出流边界相一致(图 3f 中圈处),武清地区出现短时暴雨和灾害性大风。15:00 时雷暴单体的出流边界与宝坻对流单体相遇(图 3e 中 a 箭头所指),对流单体迅速加强,同时辐合线的北端蓟县对流单体也迅速加强(图 3e 中 b 箭头所指),强度均达到 55 dBz;宝坻、蓟县出现雷阵雨和短时大风天气。

由分析可以看出两条辐合线相交触发对流风暴,在高温、高湿条件下产生强雷阵雨和灾害性大风天气。此类辐合线触发对流风暴的特点是,突发性强,持续时间短;对流单体生成后在局地迅速加强,产生强降水和短时大风,而雷暴的出流边界又会在

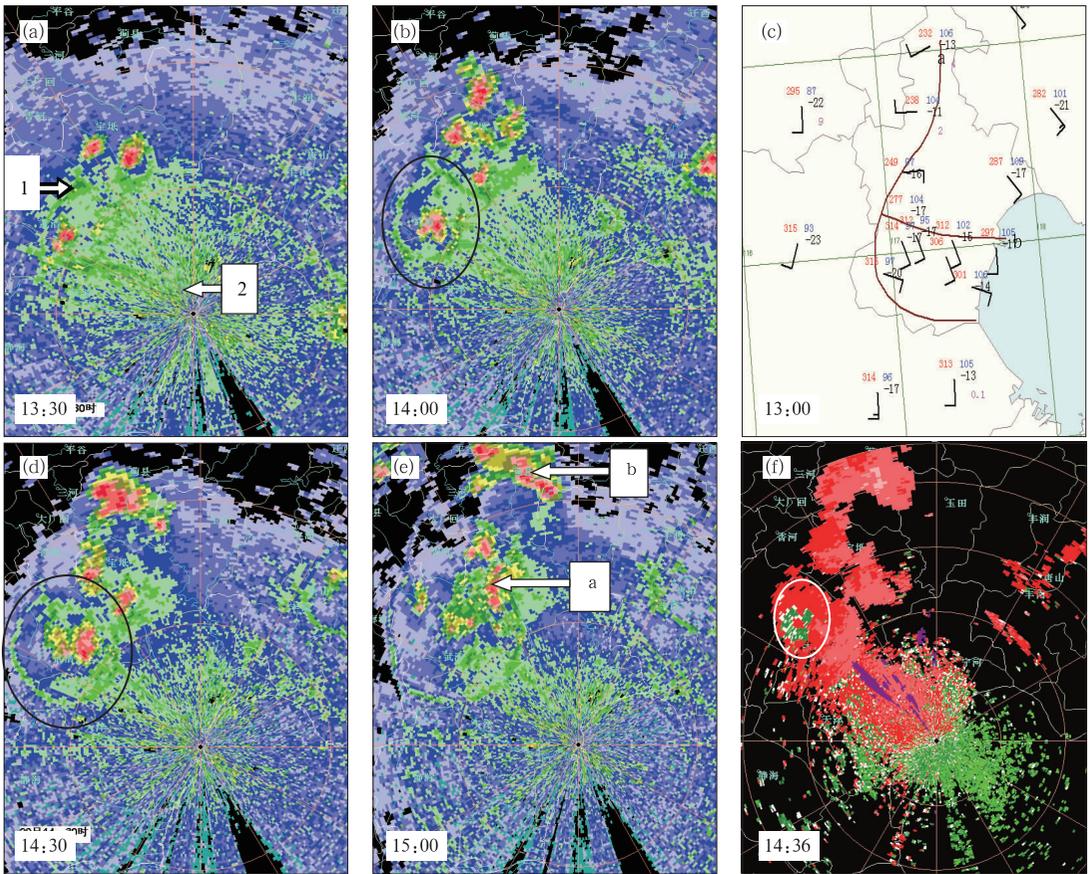


图 3 2008 年 8 月 29 日不同时间基本反射率图(a, b, d, e, 0.5°仰角);  
(c) 地面图; (f) 基本速度图(1.5°仰角)

Fig. 3 Fundamental reflectivity factors (0.5° elevation) at different times (a, b, d, e) on 29 August 2008, surface chart (c), and basic velocity chart (f, 1.5° elevation)

辐合线上触发新的对流风暴,在偏南风的作用下沿辐合线向北传播。

### 3.4 海锋与两条雷暴出流边界依次叠加触发对流风暴雷达回波特征

2009 年 7 月 6 日 10:00 时在渤海湾东北部海岸线附近,对流单体产生的两条出流边界在渤海湾海面上,呈东北—西南走向;出流边界回波受偏东风的影响缓慢向渤海西海岸移动;由图 4 可以看出 11:00 时在渤海湾沿岸的宁河到大港之间有一条海陆风辐合线(图 4d 中 11:00 时箭头所指),在雷达 0.5°仰角基本反射率因子图上 11:12 时第一条雷暴出流边界回波与海锋在海岸线附近相遇,加强稳定少动(图 4a 中 1 箭头所指),第二条雷暴出流边界回波继续西移(图 4a 中 2 箭头所指),12:06 时在辐合线的北部触发产生对单体(图 4b 中 1 箭头所指),出现雷阵雨;12:48 时第二条雷暴出流边界回波与

第一条合并,(图 4c 中 箭头所指),在宁河地区回波强度迅速加强到 58 dBz,产生强雷阵雨,1 小时降水量达 55 mm。13:00 时 1.5°仰角基本速度图上,宁河地区有 12 m · s<sup>-1</sup> 的逆风区与强对流单体配合(图 4h 中箭头所指),出现短时大风。13:36 时东移的对流单体减弱,宁和地区辐合线上又有新的对流单体生成(图 4e 中圈处),并且沿辐合线向南传播,14:36 时塘沽地区对流单体加强,宁河地区不断有 55 dBz 对流单体生成(图 4f 中圈处),15:48 时对流单体减弱东移(图 4g 中圈处),宁和降水总量为 97 mm。

由分析可以看出此次强降水是由雷暴出流边界与海锋依次叠加所致,第二条雷暴出流边界的并入使辐合上升运动迅速加强;强对流单体在宁河地区不断生、消产生暴雨。此次过程之所以在宁河地区产生强降水,是因为在宁河地区辐合线两侧温差大,辐合抬升强;由于冷暖空气势力相当,辐合线稳

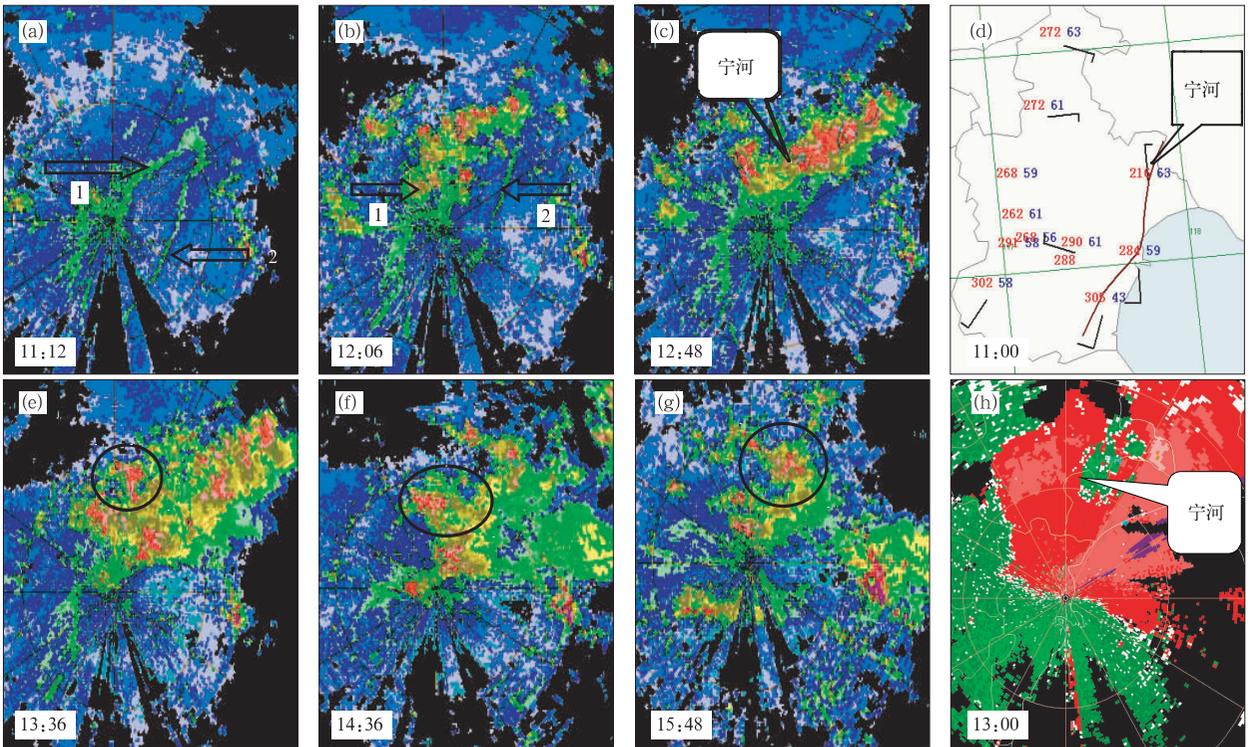


图4 2009年7月6日不同时间基本反射率因子图(a, b, c, e, f, g, 0.5°仰角);

(d) 地面图; (h) 基本速度图(1.5°仰角)

Fig. 4 Fundamental reflectivity factors (0.5° elevation) at different times (a, b, c, e, f, g) on 6 July 2009, surface chart (d) and basic velocity chart (h, 1.5° elevation)

定少动,降水持续时间长。

## 4 小结

(1) 渤海湾大气边界层辐合线触发对流风暴的天气形势,大多在河套东部有高空槽,海上副高缓慢东退、南压;渤海湾处在高压西部弱气压场里。产生雷阵雨和灾害性大风的两次过程,14时 $K$ 指数和 $CAPE$ 值均较高,风场垂直风切变大,湿层厚度小。两次暴雨过程的 $K$ 指数较高,湿层厚度大,但 $CAPE$ 值较低。因此 $CAPE$ 值和0~6 km垂直风切变的大小可以作为能否产生灾害性大风的预报指标,湿度大小及湿层的高低可以判断能否产生暴雨和短时大风的指标。

(2) 在高温、高湿大气层结不稳定的条件下,只要辐合线两侧温差足够大,单一的海陆风辐合线也能触发对流单体,产生雷阵雨天气;由于辐合抬升较弱,降水强度和降水量不大。当两条海风锋相交或与弱冷锋相碰时,由于辐合抬升加强会产多单体强对流风暴,出现雷阵雨和灾害性大风。当大气层结

不稳定且温度较低、湿度大时,雷暴单体的流出边界与海岸辐合线相遇导致辐合上升运动加强,触发对流风暴,在渤海湾地区会产生短时暴雨或局地大暴雨天气。

(3) 边界层辐合线触发对流风暴,具有突发性强,持续时间短等特点。对流风暴沿辐合线移动,其方向取决于辐合线两侧的主导风向。高时空分辨率的多普勒雷达能获得近地层辐合线信息,为强对流天气临近预报、预警提供了判断依据。但是边界层辐合线触发对流风暴的初始位置、初始时间常有不确定性,因此密切跟踪强对流天气发展与演变,及时发布预警信息是减少突发性天气引起灾害的关键。

## 参考文献

- [1] Wilson J W, Weckwerth T M, Vivekanandan J, et al. Boundary layer clear air echoes: Origins of echoes and accuracy of derived winds[J]. Atmos Ocean Tech, 1994, 11: 1184-1206.
- [2] Jeffreys H. On the dynamics of wind[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1922, 48: 29-46.
- [3] Estoque M A. A Theoretical Investigation of the Sea Breeze [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1961, 87: 136-146.

- [4] Wilson J W, Schreiber W E. Initiation of convective storms by radar observed boundary layer convergence lines[J]. *Mon Wea Rev*, 1986, 114: 2516-2536.
- [5] Wilson J W, Foote GB, Fankhauser J C, et al. The role of boundary layer convergence zones and horizontal rolls in the initiation of thunderstorms: a case study[J]. *Mon Wea Rev*, 1992, 120: 1758-1815.
- [6] Wilson J W, Mueller C K. Nowcast of thunderstorm initiation and evolution[J]. *Weather and Forecasting*, 1993, 8: 113-131.
- [7] Wilson J W, Megenhardt D L. Thunderstorm initiation, organization and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines[J]. *Mon Wea Rev*, 1997, 125: 1507-1525.
- [8] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 107-111.
- [9] 王彦, 李胜山, 郭立, 等. 渤海湾海风锋雷达回波特征分析[J]. *气象*, 2006, 32(12): 23-28.
- [10] 王令, 康玉霞, 焦热光, 等. 北京地区强对流天气雷达回波特征分析[J]. *气象*, 2004, 30(7): 31-35.
- [11] 刁秀广, 车军辉, 李静, 等. 边界层辐合线在局地强风暴临近预警中的应用[J]. *气象*, 2009, 35(2): 29-33.
- [12] 陶岚, 戴建华, 陈雷, 等. 一次雷暴冷流出流中新生强脉冲风暴的分析[J]. *气象*, 2009, 35(3): 29-35.
- [13] 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气孤短临时临近预报预警研究[J]. *气象*, 2011, 37(7): 795-801.
- [14] 谌志刚, 王婷, 汪瑛, 等. 广东省后汛期强对流天气潜势预报方法研究[J]. *气象*, 2011, 37(8): 936-942.
- [15] 金浩, 王彦昌. 三维海陆风的数值模拟[J]. *大气科学*, 1991, 15(5): 25-32.
- [16] 刘黎平, 邵爱梅, 葛润生, 等. 一次混合云暴雨过程风场中尺度结构的双多普勒雷达观测研究[J]. *大气科学*, 2004, 28(2): 278-283.
- [17] 付秀华, 李兴生, 吕乃平, 等. 复杂地形条件下三维海陆风数值模拟[J]. *应用气象学报*, 1991, 2(2): 113-119.
- [18] 常志清, 吴增茂, 高山红. 青岛海陆风三维结构的数值模拟[J]. *青岛海洋大学学报*, 2002, 32(6): 877-883.
- [19] 何群英, 解以扬, 东高红, 等. 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*, 2011, 37(3): 291-297.
- [20] 孙贞, 高荣珍, 张进, 等. 青岛地区 8 月一次海风环流实例分析和 WRF 模拟[J]. *气象*, 2009, 35(8): 76-84.
- [21] 刘运策, 庄旭东, 李献洲. 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*, 2001, 12(4): 433-441.
- [22] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 90-129.