

# 冷涡背景下一次阵风锋与海风锋碰撞触发强对流的观测分析

施思<sup>1\*</sup>, 秦婷<sup>2</sup>, 吴福浪<sup>3#</sup>, 徐恩东<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国民用航空厦门空中交通管理站气象台, 福建 厦门

<sup>2</sup>民航华东地区空中交通管理局气象中心, 上海

<sup>3</sup>中国民用航空宁波空中交通管理站气象台, 浙江 宁波

<sup>4</sup>中国民用航空华东地区空中交通管理局江苏分局, 江苏 南京

收稿日期: 2024年8月15日; 录用日期: 2024年9月16日; 发布日期: 2024年9月24日

## 摘要

利用常规观测资料、NCEP/FNL再分析资料、多普勒雷达资料等, 对2023年8月16日厦门市的雷暴天气进行分析, 结果表明: 此次雷暴天气发生在冷涡后部西北气流中, 高低空温度差动平流加强了不稳定层结, 高CAPE值和0~6 km弱垂直风切下, 在阵风锋与海风锋碰撞区域形成脉冲风暴, 具有爆发性强对流的典型特征。触发的新生对流沿着海风锋自东北向西南发展加强给闽南地区带来较大范围、较长时间的强降水天气; 通过此次雷暴个例分析可知, 沿海地区的预报员加强地面辐合线推移和演变的监测, 一定程度上可以提前判断出多条辐合线碰撞触发新生对流, 由此对此类强对流天气提前作出预报决断。

## 关键词

冷涡, 阵风锋, 海风锋, 短时强降水

# Observation and Analysis of a Strong Convection Triggered by a Collision between a Gust Front and a Sea Breeze Front under the Background of a Cold Vortex

Si Shi<sup>1\*</sup>, Ting Qin<sup>2</sup>, Fulang Wu<sup>3#</sup>, Endong Xu<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Meteorological Observatory of Xiamen Air Traffic Management Station of CAAC, Xiamen Fujian

<sup>2</sup>Meteorological Center of East China Air Traffic Management Bureau of CAAC, Shanghai

\*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 施思, 秦婷, 吴福浪, 徐恩东. 冷涡背景下一次阵风锋与海风锋碰撞触发强对流的观测分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(5): 1311-1322. DOI: 10.12677/ccr.2024.135146

<sup>3</sup>Meteorological Observatory of Ningbo Air Traffic Management Station of CAAC, Ningbo Zhejiang

<sup>4</sup>Jiangsu Branch of East China Air Traffic Management Bureau of CAAC, Nanjing Jiangsu

Received: Aug. 15<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 16<sup>th</sup>, 2024; published: Sep. 24<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Using conventional observation data, NCEP/FNL reanalysis data, Doppler radar data, etc., an analysis was conducted on the thunderstorm weather in Xiamen on August 16, 2023. The results showed that the thunderstorm occurred in the northwest airflow behind the cold vortex, and the high and low altitude temperature differential advection strengthened the unstable stratification. Under high CAPE values and weak vertical wind shear of 0~6 km, a pulse storm was formed in the collision area between the gust front and the sea breeze front, with typical characteristics of explosive strong convection. The newly triggered convection develops and strengthens along the sea breeze front from northeast to southwest, bringing large-scale and long-term heavy precipitation weather to the southern Fujian region. Through the analysis of this thunderstorm case, it can be seen that forecasters in coastal areas can strengthen monitoring of the movement and evolution of ground convergence lines, which can, to some extent, predict in advance the collision of multiple convergence lines triggering new convection, and thus make forecast decisions for such severe convective weather in advance.

## Keywords

Cold Vortex, Gust Front, Sea Breeze Front, Short Term Heavy Precipitation

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

雷暴的发生常伴随大风、冰雹或短时强降水等强对流天气出现, 因此它一直受到气象科学家们的高度关注[1] [2]。雷暴的发展依赖于大气的动力、热力和水汽条件, 常由近地面中尺度系统触发[3] [4]。自Wilson 等[5] [6]提出雷暴天气的形成与边界层辐合线密切相关后, 越来越多的气象学者开始关注海风锋、阵风锋等对雷暴影响的研究。Banta 等[7]应用多普勒天气雷达完整而清晰地捕捉海风锋的三维结构特征; 吴福浪等[8]利用高分辨率中尺度数值模式 WRF 对杭州湾地区 2016 年 7 月 28 日一次海风锋触发雷暴天气的发生发展演变特征进行数值模拟, 结果表明海风锋对局地比湿及涡度特征的加强有明显的促进作用, 为雷暴的发生发展提供有利的水汽和动力条件。刘彬贤等[9]对 2007 年 8 月 13 日天津多普勒天气雷达探测的雷暴天气个例进行分析, 结果表明此次雷暴天气是由渤海湾海风锋与阵风锋碰撞形成的, 碰撞后在海风锋前端、阵风锋前部有新的雷暴单体形成; 阵风锋后部的对流回波主体加强。何娜等[10]利用北京地区常规探空观测资料、地面加密自动站、S 波段多普勒天气雷达及多种新型探测资料对北京地区雷暴阵风锋触发对流新生的两种典型个例的环境场特征进行分析, 研究指出碰撞触发型雷暴为多条阵风锋相遇或阵风锋与其他边界层辐合线相遇, 在高对流有效位能 CAPE 和高湿区域触发对流。

虽然目前国内外关于边界层辐合线触发雷暴的研究取得了较多进展, 但国内更多的研究区域着眼于渤海湾、长三角等地, 有关闽东南地区海陆风、阵风锋触发新生雷暴天气过程分析相对较少。本文利用

常规观测资料、NCEP/FNL 再分析资料、多普勒雷达资料等,对 2023 年 8 月 16 日厦门地区阵风锋与海风锋碰撞触发新生对流的天气过程进行观测分析,探讨边界层辐合线在触发新生对流方面的环流背景、探空结构、雷达回波特征以及可预报性,以期为厦门地区特别是厦门机场强对流天气的预报预警提供理论参考。

## 2. 资料来源

本次强对流过程分析采用的天气雷达产品为厦门市 S 波段双偏振多普勒天气雷达(图 1 红色五角星,经纬度 118.00°E, 24.51°N)的体扫基数据,约 6 min 扫描一次。雷达天线海拔高度 398 m,工作频率 2880 MHz,水平波束宽度为 0.93°,垂直波束宽度为 0.92°,天线增益 45.55 dB,脉冲宽度 1.57  $\mu\text{s}$ ,脉冲重复频率 1181.00 Hz,扫描模式 VCP11D,距离分辨率 0.25 km,最大探测距离 460 km,最大不模糊速度为 30.73  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

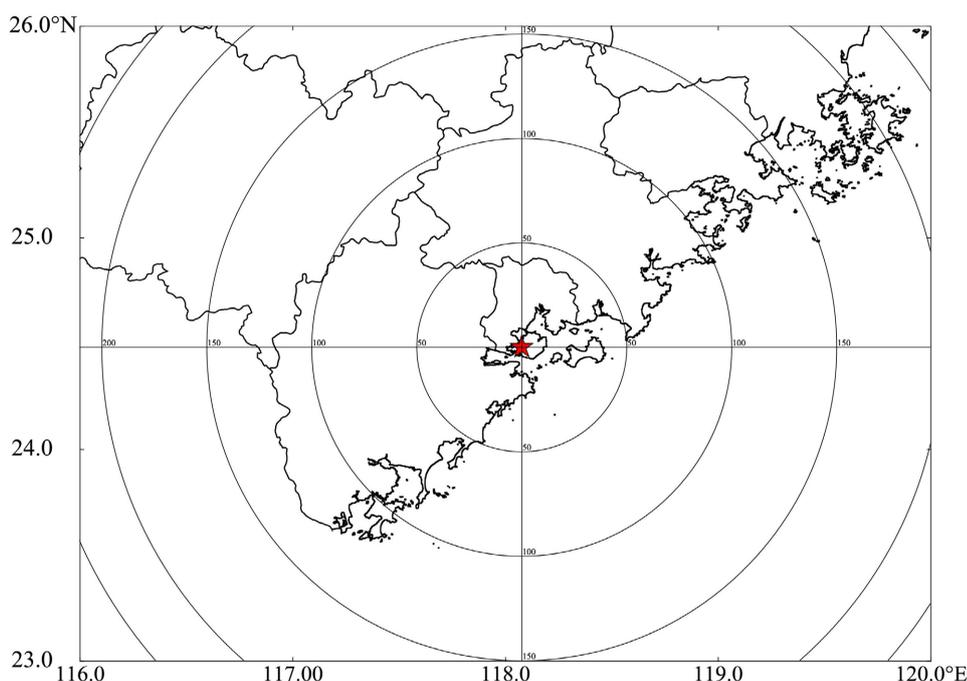


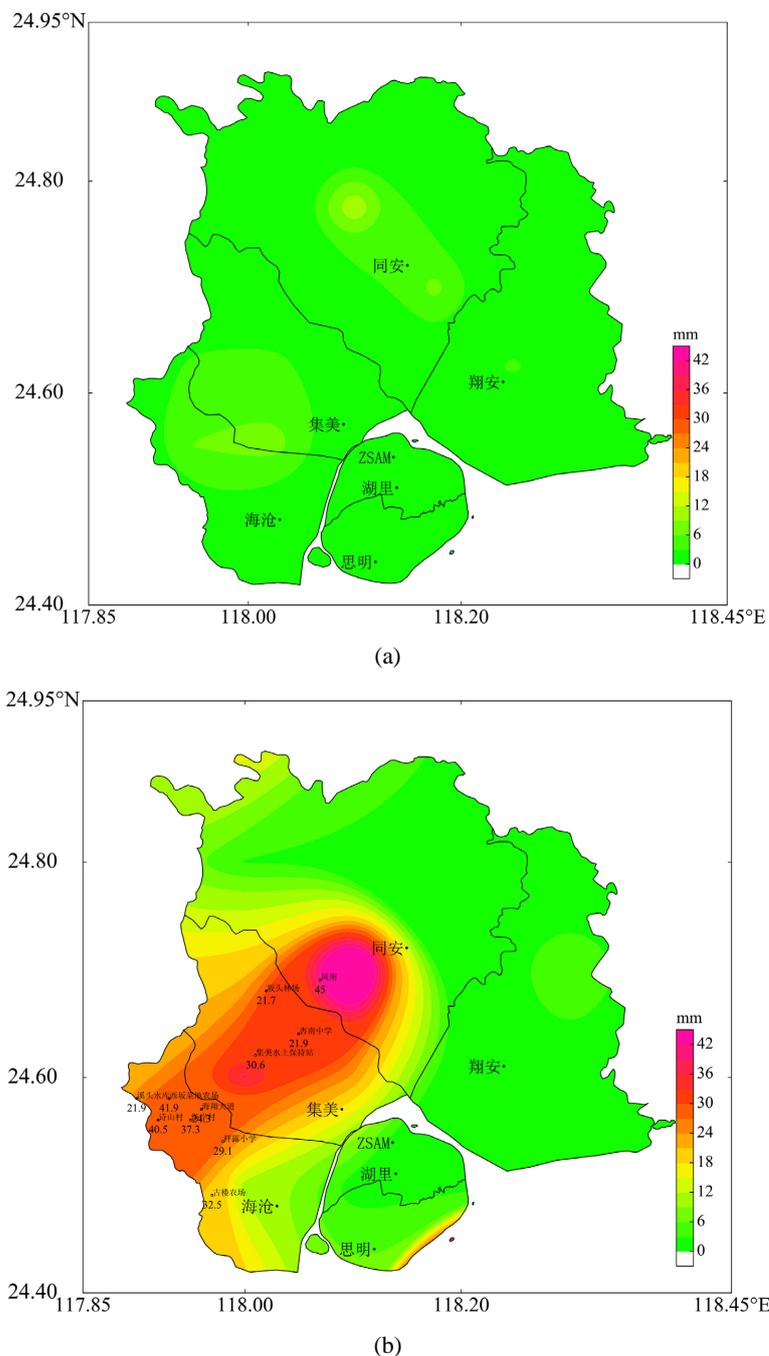
Figure 1. Xiamen radar location  
图 1. 厦门雷达位置

环流背景分析资料来自美国气象环境预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合制作的 NCEP/FNL 再分析资料,时间分辨率 6 h,空间分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ ;探空分析采用 MICAPS 提供的常规观测数据,其中探空数据分辨率为 12 h。自动站数据采用福建省加密自动站的风场、温度、气压、降水等数据,时间分辨率 5 min。

## 3. 灾情实况

2023 年 8 月 16 日,厦门市自 12:00 (北京时,下同)开始先后经历了 2 次对流天气过程,第 1 次对流主要发生时段为 14:00~17:00,主要触发系统是海风锋,各个站点 3 h 累计降水量较小,最大 15.3 mm,为小到中雨级别(图 2(a))。第 2 次对流过程主要发生时段为 18:00~21:00,是由第 1 次对流的风暴减弱后前侧的阵风锋向前传播与海风锋碰撞激发出新的强雷暴单体带来的对流过程,3 h 累计降水有 1 个站点超

过 50 mm (同安区凤南站点, 60.5 mm), 达到暴雨级别, 11 个站点累计降水 25~50 mm, 达大雨级别(图 2(b))。其中凤南、杏南中学、西坂菜地农场、诗山村、汤岸村、古楼农场、集美水土保持站、祥露小学、海翔大道、溪头水库、坂头林场共 11 个站点出现短时强降水(雨强  $> 20 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 最大出现在同安区凤南站点(18:00~19:00), 达  $45.0 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。厦门市气象台于 8 月 16 日 18:55 发布暴雨黄色预警信号, 19:40 将暴雨黄色预警信号升级为暴雨橙色预警信号。



**Figure 2.** Cumulative precipitation distribution (in mm) during two convective processes on August 16th (a) from 14:00 to 17:00 and (b) from 18:00 to 21:00

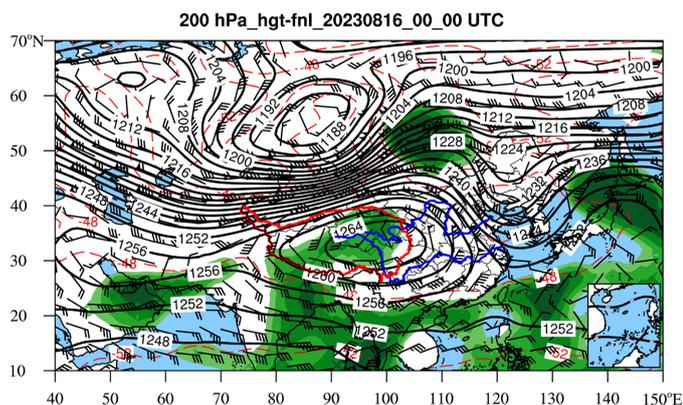
**图 2.** “08.16” 两次对流过程(a) 14:00~17:00、(b) 18:00~21:00 累计降水分布(单位: mm)

受第 2 次对流过程的短时强降水直接影响, 8 月 16 日 18:00~21:00, 厦门机场(图 2 的 ZSAM)备降 3 架次, 并对之后的航班造成较大影响, 全天共改航 15 架次、取消 81 架次、延误 123 架次(占当日航班的 24.36%, 其中延误 1 小时以上 52 架次、延误 2 小时以上 24 架次); 当天上午 6:00~10:00 航班正常率为 85.71% (近厦门机场平均水平), 经过午后到夜间雷雨, 00:01~24:00 航班正常率下降到 57.14%。由于第 2 次对流过程具有触发系统尺度小, 突发性强, 短时雨量大、预报难度大等特点, 下文将着重对第 2 次对流过程的环流场背景、探空结构、雷达回波演变、可预报性等进行分析和探讨。

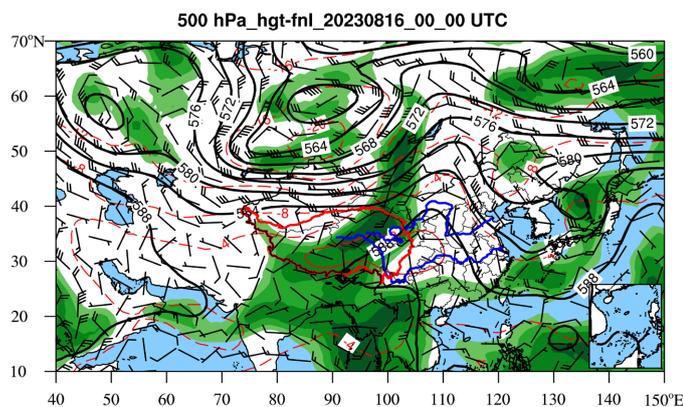
## 4. 环流背景及对流潜势分析

### 4.1. 环流背景

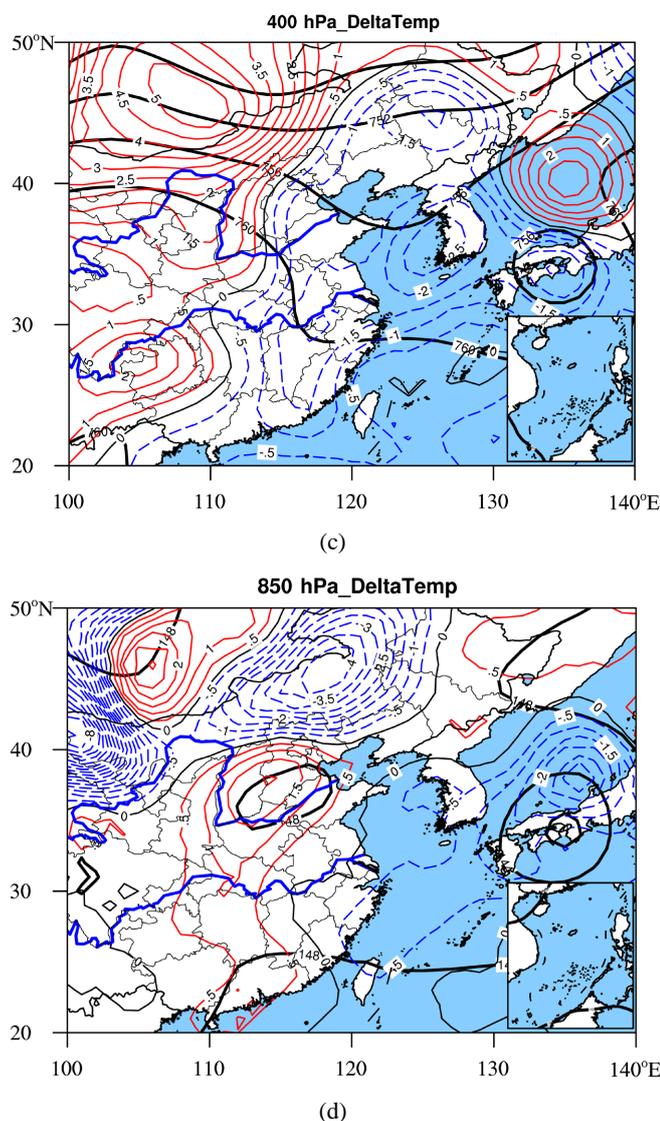
厦门地区高空 200 hPa 处在南亚高压脊线东侧, 高空有较好的辐散条件(图 3(a))。500 hPa 欧亚大陆中高纬地区为两脊一槽: 西伯利亚为大低压, 乌拉尔山到贝加尔湖东侧为高压脊、北上变性的台风残涡已并入东亚大槽, 呈现为东北冷涡, 其南侧冷槽伸展至浙闽交界, 厦门处在 588 dagpm 线控制范围, 为高压东北西北风(图 3(b))。700 hPa 处在东北冷涡后部的西北气流中, 但 850 hPa 表现为西南风, 且上游华南沿海有短槽波动, 低层易有正涡度平流(图 3(d))。400 hPa 和 850 hPa 温度平流分布(2023.08.16 08 时~2023.08.15 08 时)显示,  $T_{24(400\text{ hPa})}$  厦门地区为冷平流( $-1.5^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{24(850\text{ hPa})}$  厦门地区为弱暖平流(图 3(c)、图 3(d)), 连续多日处在副高边缘, 水汽得到一定积累, 外加上冷下暖的配置使得当天大气层结趋于不稳定。综合环流形势分析可知, “8.16” 对流过程为冷涡后部高层辐散、低层辐合, 外加高低空温度差动平流差异引起的对流过程。



(a)



(b)



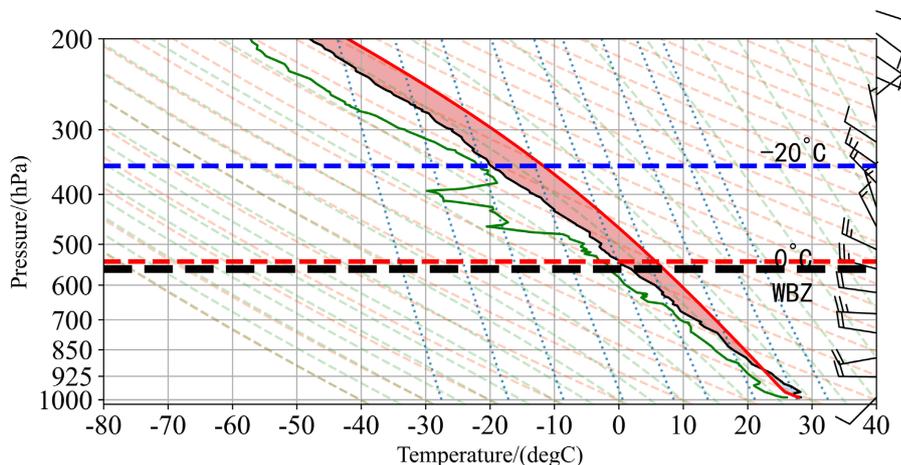
**Figure 3.** On August 16, 2023 at 08:00, the distribution of high-altitude potential height (contour line, black, unit: dagpm), wind field (wind plume), relative humidity (shaded, unit:%): (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, and  $\Delta T_{24}$  temperature advection (contour line, red: warm advection, blue: cold advection, black: 0 change, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ): (c) 400 hPa, (d) 850 hPa

**图 3.** 2023 年 8 月 16 日 08 时高空位势高度(等值线, 黑色, 单位: dagpm)、风场(风羽)、相对湿度(阴影, 单位: %)分布: (a) 200 hPa、(b) 500 hPa, 以及  $\Delta T_{24}$  温度平流(等值线, 红色: 暖平流, 蓝色: 冷平流, 黑色: 0 变化, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )分布: (c) 400 hPa、(d) 850 hPa

## 4.2. 对流潜势分析

$T-\ln P$  图能反映探空站及其上空一定范围内各种气象要素的垂直分布特征, 对预报短时强降雨等强对流天气有较好的指导作用。选取 MICAPS 探空资料绘制厦门站点探空曲线来估测大气层结状况。

16 日 08 时探空图上(图 4) 500 hPa 以下温度露点差  $< 3^{\circ}\text{C}$ , 表明湿层深厚, 400 hPa 左右温度露点差较大, 最大超过  $15^{\circ}\text{C}$ , 探空曲线呈现“上干下湿”配置。400 hPa 以上风随高度逆转, 有冷平流, 400 hPa 以下风随高度顺转, 有暖平流。这种明显的上冷下暖的高低空配置有利于热力强迫作用加强, 使得大气层结愈加不稳定, 有利于强对流天气的发生和发展, 形成雷雨大风[11]或者冰雹天气。但是由于  $0^{\circ}\text{C}$ 、 $-20^{\circ}\text{C}$  以及 WBZ (湿球温度  $0^{\circ}\text{C}$  层) 高度都较高, 不利于产生冰雹。



**Figure 4.** T-lnP sounding map of Xiamen Station at 08:00 on August 16, 2023 (green, red, and black solid lines represent dew point, state, and stratification curves, respectively)

**图 4.** 2023 年 8 月 16 日厦门站 08 时探空图 T-lnP (绿色、红色和黑色实线分别代表露点、状态、层结曲线)

通常用 0~6 km 高度的风矢量差表示深层垂直风切变[12]: 若该风矢量差  $< 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 则判定为较弱垂直风切变; 若  $\geq 15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  且  $> 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 则判定为中等以上垂直风切变; 若  $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 则判定为强垂直风切变。16 日 08 时 0~6 km 深层垂直风切变为  $7.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 为弱环境风垂直切变, 但是 CAPE 值超过  $2500 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 弱的 0~6 km 垂直风切配合高 CAPE 值有利于脉冲风暴的维持和发展, 850 与 500 hPa 的  $\theta_{se}$  差值  $< 0$  表明大气为对流不稳定层结, 同时 K、SI、LI 指数都指示了较好的热力对流条件(表 1), 在触发条件下较易激发新生对流的发生发展。

**Table 1.** Distribution of sounding map parameters

**表 1.** 探空图参数分布

CAPE/( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$\theta_{se}(850-500 \text{ hPa})/(\text{°C})$	0~6 km 风矢量差/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	K/( $\text{°C}$ )	SI/( $\text{°C}$ )	LI/( $\text{°C}$ )	0°C/(km)	-20°C/(km)
2688.7	9.6	7.4	39.5	-2.2	-5.6	5.3	8.5

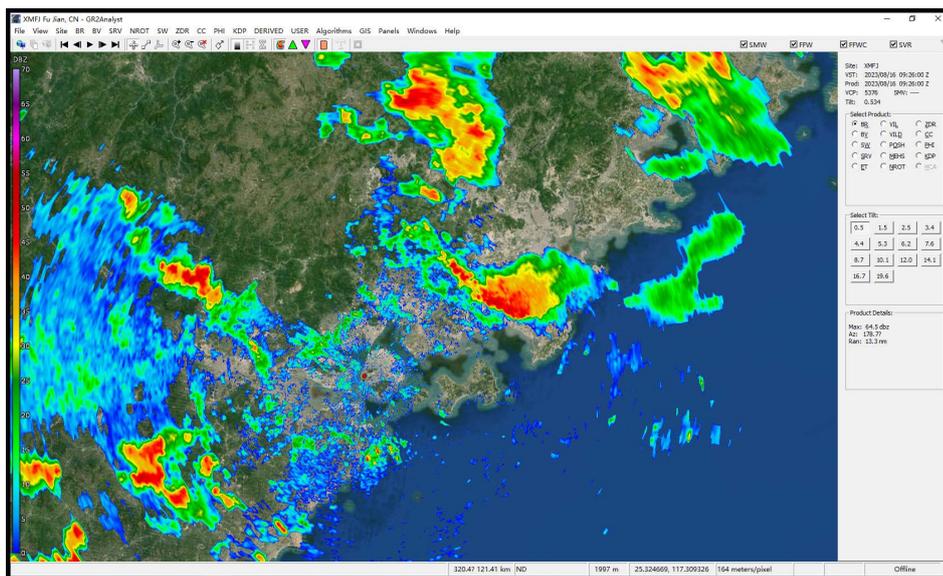
综上环流以及探空结构分析可知, 此次对流过程发生在冷涡后部西北气流中, 高层辐散提供了较好的动力上升作用, 探空结构表明当日厦门地区有利于强对流维持和发展。闽南地区中午前后对流开始发生发展, 但时近傍晚, 第 1 次发展的对流减弱后不但未结束, 反而触发了第 2 次对流过程, 甚至表现更强, 造成闽南更多地区受强对流影响, 且大大延长了影响时间。第 2 次对流如何触发、主要触发系统是哪些? 下文将进一步借助高时空分辨率的多普勒天气雷达产品对第 2 次对流的发展演变进行分析。

## 5. 雷达回波特征分析

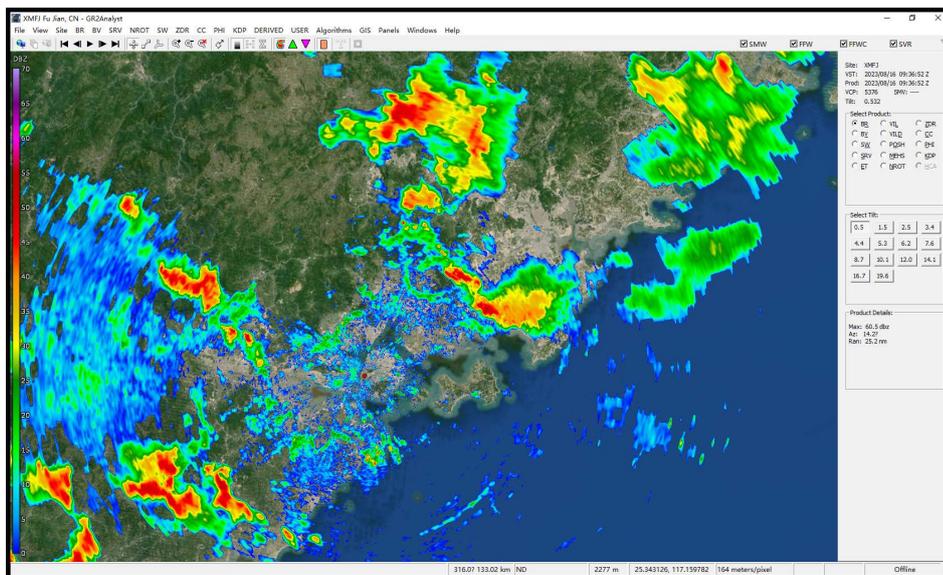
### 5.1. 水平回波特征

由于海陆温度差异, 8 月 16 日上午厦门沿海有海风锋向内陆不断推进, 多普勒雷达上低层  $0.5^\circ$  仰角基本反射率图表现为一条弱的窄带回波(强度 10~20 dBz), 12:00 海风锋位于厦门北站至前场站的东北西南方向位置, 并且稳定少动(图略)。17:26 由于第 1 波对流过程已经趋于结束, 翔安区风暴 A 不断减弱(图 5(a)), 风暴 A 西南侧出现了冷池密度流, 即阵风锋(图 5(a)红色虚线, Gust Front), 它是由风暴 A 的冷性下沉气流在近地面低层向外扩展, 与风暴运动前方的低层暖湿空气交汇而形成的; 同时刻图上海风锋稳定少动(图 5(a)白色虚线, Sea Breeze Front)。17:36 风暴 A 强度继续减弱、范围减小, 阵风锋向西南方向

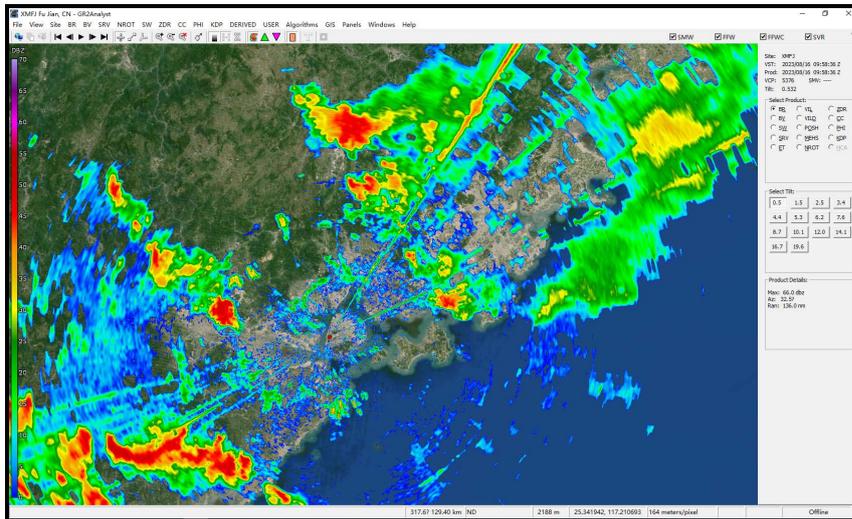
移动(图 5(b)红色虚线)并不断远离风暴 A。对应时刻的福建省闽南地区附近的地面加密自动站具有气压陡升、温度骤降、风向变化、风速增大、湿度增加等气象要素的演变特征(图略)。17:58 阵风锋向西南移动至厦门北站附近, 与海风锋东北侧相互碰撞(图 5(c))。仅约 10 min 后, 18:09 在两条边界层辐合线碰撞区域东南侧激发出新的对流单体(图 5(d)黑色虚线), 此时 PPI 图上看新激发的对流单位范围以及强度都较小。但是仅仅 5 min 后的 18:14 时刻图上(图 5(e)), 新激发的对流范围和强度迅速加强(>55 dBz), 单体短时间和加强给实际业务中预报和预警工作带来较大挑战。18:36 新激发的对流范围进一步增大并且与北侧风暴 B 合并为带状对流(图 5(f)), 后续在环境气流引导下, 对流自东北向西南发展与移动并在海风锋区域进一步加强(>60 dBz)。阵风锋与海风锋碰撞激发出新的对流给厦门和漳州带来局地强降水天气, 扩大了强降水影响范围, 延长了影响时间, 厦门市 3 h 内累计降水有 1 个站点超过 50 mm, 达到暴雨级别, 有 11 个站点累计降水 25~50 mm, 达大雨级别。



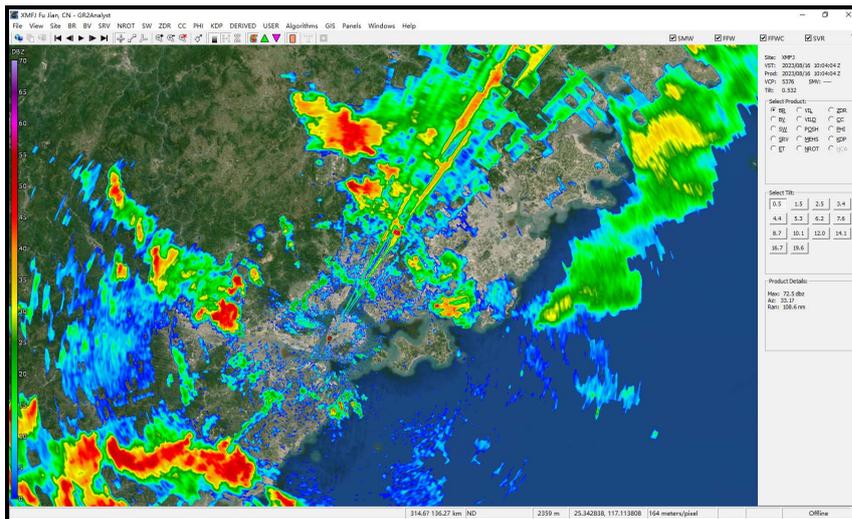
(a)



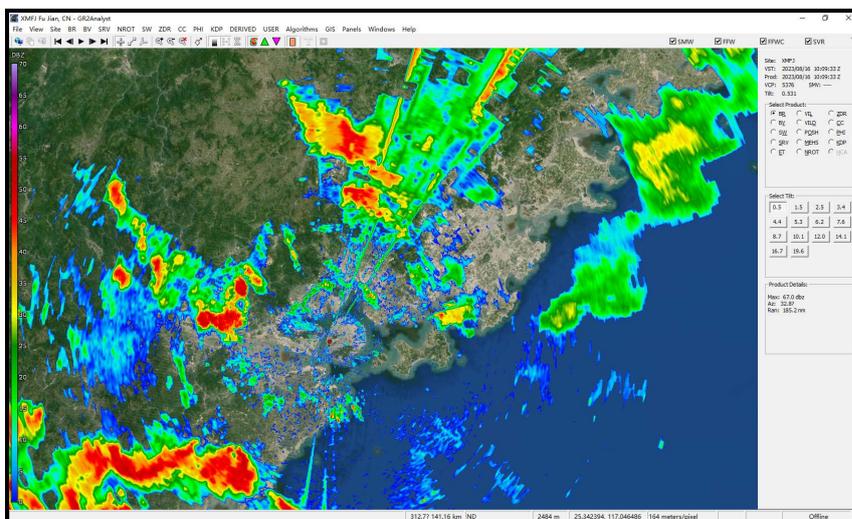
(b)



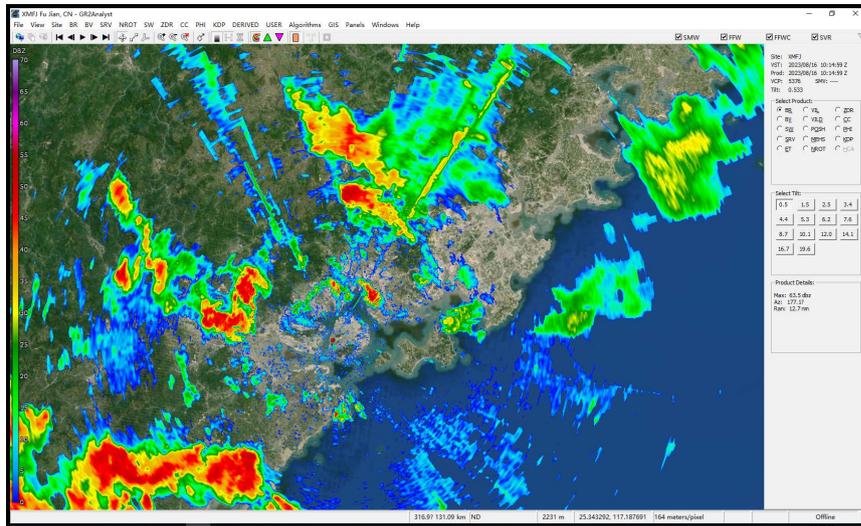
(c)



(d)



(e)

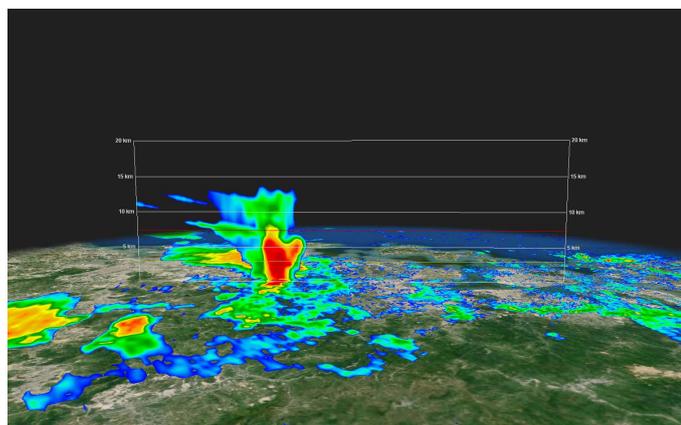


(f)

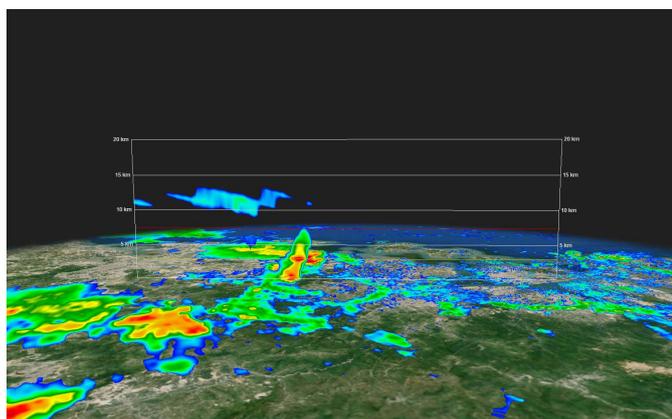
**Figure 5.** Time series chart of 0.5° elevation PPI triggered by collision between gust front and sea breeze front for convective process (unit: dBz)  
**图 5.** 阵风锋与海风锋碰撞触发对流过程的 0.5°仰角 PPI 时间序列图(单位: dBz)

### 5.2. 垂直演变特征

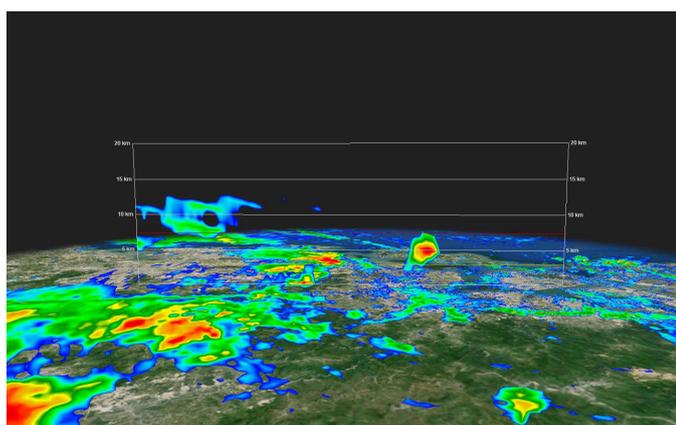
图 6 为通过 17:26 时刻(图 6(a)右上角)从风暴 A 至雷达中心作垂直剖面的时间序列图。分析图 6(a)可知, 17:26 时刻风暴 A 强回波(>50 dBz)高度伸展至约 7.5 km, 风暴 A 近地面西侧约 10 km 出现阵风锋(图 6(a)红色虚线), 阵风锋西侧约 20 km 为海风锋(图 6(a)白色虚线)。17:42 时刻海风锋稳定少动, 风暴 A 不断减弱, 强回波(>50 dBz)高度降低至 3 km 左右(图 6(b)), 其西侧阵风锋逐渐远离风暴 A (距离约 20 km), 阵风锋此时呈明显弓形并与海风锋碰撞(图 6(b)黑色虚线)。17:53 时刻在阵风锋与海风锋碰撞区域激发出新生对流单体, 出生对流高度较高, 强回波高度超过 6 km, 结合前侧探空图分析的环流背景(高 CAPE 配合低的 0~6 km 垂直风切), 可以大致判断该新生对流为脉冲风暴, 后续应该注意雷暴大风的出现, 并且与图 5(d)对比可知, 连续跟踪垂直剖面图可以更早地发现新生对流的出现(图 6(c), 早于 PPI 图约 16 min), 实际业务工作中可以更早地为预警发布做准备。18:14 时刻新生对流不断发展加强, 强回波高度(>50 dBz)超过-20°C (图 6(d)红色线), 并在后续过程中不断沿着海风锋方向移动和发展, 给闽南地区带来较大范围长时间的强降水天气。



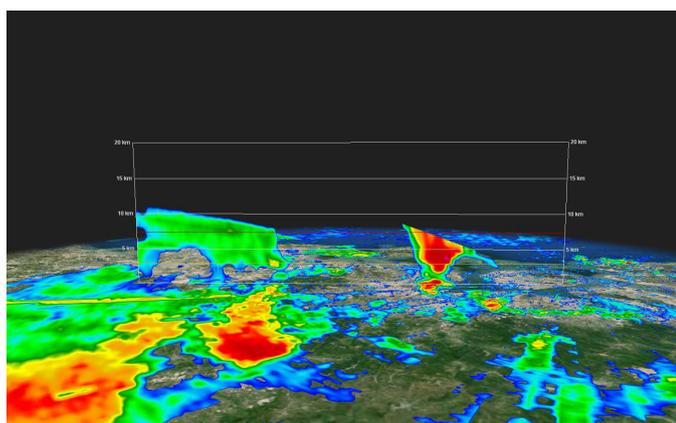
(a)



(b)



(c)



(d)

**Figure 6.** Time series diagram of vertical profile of convective process triggered by collision between gust front and sea breeze front (unit: dBz). (a) 17:26; (b) 17:42; (c) 17:53; (d) 18:14

**图 6.** 阵风锋与海风锋碰撞触发对流过程的垂直剖面时间序列图(单位: dBz)。 (a) 17:26; (b) 17:42; (c) 17:53; (d) 18:14

## 6. 结论与讨论

本文利用常规观测资料、NCEP/FNL 再分析资料、多普勒雷达资料等,对 2023 年 8 月 16 日厦门地区阵风锋与海风锋碰撞触发新生对流的天气过程进行观测分析,探讨边界层辐合线在触发新生对流方面

的环流背景、探空结构、雷达回波特征以及可预报性，主要结论如下：

1) 此次雷暴天气发生在冷涡后部西北气流中，高低空温度差动平流加强了不稳定层结，在阵风锋与海风锋碰撞区域触发新生对流，对流自东北向西南发展加强给厦门市带来较大范围短时强降水天气。

2) 探空图中，深厚湿层的存在以及“上干冷下暖湿”的高低空配置决定了大气层结具有较强的不稳定性，弱的 0~6 km 环境风垂直切变配合高 CAPE 值，有利于脉冲风暴维持和发展，K、SI、LI 指数均指示了较好的热力对流条件，较易触发强对流。

3) 通过本次雷达演变过程研究发现，在第 1 波强对流减弱的过程中，风暴外围形成了明显的阵风锋，它在行进过程中与稳定少动的海风锋碰撞，使得新的对流以极快的速度沿碰撞方向发展，带来第 2 波大风、雷电、强降水等灾害性天气。

4) 强对流的爆发式发展给气象预报预警带来极大挑战，给社会生产和人民生活带来较大影响，这类冷涡背景下的阵风锋与海风锋的碰撞造成的爆发性强对流在发生前并不是完全无迹可寻，沿海地区的预报员加强地面辐合线推移和演变的监测，一定程度上可以提前判断出多条辐合线碰撞触发新生对流，增强此类爆发性强对流天气的可预报性。但如何准确预报该类型强对流的具体强度、类型、落区及次生衍生灾害还有很大的研究空间。

## 参考文献

- [1] Dickerson, R.R., Huffman, G.J., Luke, W.T., *et al.* (1987) Thunderstorms: An Important Mechanism in the Transport of Air Pollutants. *Science*, **235**, 460-465. <https://doi.org/10.1126/science.235.4787.460>
- [2] 徐蓉, 苗峻峰, 谈哲敏. 南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟[J]. 大气科学, 2013, 37(6): 1235-1246.
- [3] Colby Jr., F.P. (1984) Convective Inhibition as a Predictor of Convection during AVE-SESAME II. *Monthly Weather Review*, **112**, 2239-2252. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112<2239:CIAAPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112<2239:CIAAPO>2.0.CO;2)
- [4] 汪雅, 苗峻峰, 谈哲敏. 宁波地区海-陆下垫面差异对雷暴过程影响的数值模拟[J]. 气象学报, 2013, 71(6): 1146-1159.
- [5] Wilson, J.W. and Schreiber, W.E. (1986) Initiation of Convective Storms at Radar-Observed Boundary Layer Convergent Lines. *Monthly Weather Review*, **114**, 2516-2536. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114<2516:IOCSAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114<2516:IOCSAR>2.0.CO;2)
- [6] Wilson, J.W. and Megenhardt, D.L. (1997) Thunderstorm Initiation Organization and Lifetime Associated with Florida Boundary Layer Convergence Lines. *Monthly Weather Review*, **125**, 1507-1525. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1997\)125<1507:TIOALA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1997)125<1507:TIOALA>2.0.CO;2)
- [7] Banta, R.M., Dollvier, L. and Leviason, D.H. (1993) Evolution of the Monterey Sea Breeze Layer as Observed by Pulsed Doppler Radar. *American Meteorological Society*, **50**, 3959-3982. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<3959:EOTMBS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<3959:EOTMBS>2.0.CO;2)
- [8] 吴福浪, 李晓丽, 於敏佳, 等. 盛夏杭州湾一次海风锋触发雷暴的数值模拟分析[J]. 大气科学学报, 2019, 42(4): 581-590.
- [9] 刘彬贤, 王彦, 刘一玮. 渤海湾海风锋与阵风锋碰撞形成雷暴天气的诊断特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(1): 132-136.
- [10] 何娜, 俞小鼎, 丁青兰, 等. 北京地区雷暴阵风锋触发对流新生的环境场特征分析[J]. 高原气象, 2023, 42(5): 1285-1297.
- [11] 樊李苗, 俞小鼎. 中国短时强对流天气的若干环境参数特征分析[J]. 高原气象, 2013, 32(1): 156-165.
- [12] 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, 2007.