暴雨灾害
Torrential Rain and Disasters
中国科技核心期刊
中国科技论文统计源期刊

山东半岛"平行"双支海风锋的中尺度特征分析及对流触发机制初探

刘解明 张勇 房云龙 刘雪映 李可悦

Mesoscale characteristics analysis of "parallel" dual sea breeze fronts and associated convection initiation mechanism in the Shandong Peninsula

LIU Xieming，ZHANG Yong，FANG Yunlong，LIU Xueying，LI Keyue

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12406/byzh.2024-137

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

河南一次伴有龙卷的多阶段强对流天气形成机制分析

Formation mechanism of a multi-stage severe convective weather event accompanied by local tornado in Henan

暴雨灾害. 2024, 43(3): 299-312 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-217

山东省一次罕见强对流天气的环境场及雷达特征分析

Analysis of radar echo features and environmental backgrounds of a rare severe convective weather in Shandong province

暴雨灾害. 2020, 39(5): 477-486 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2020.05.006

一次华南准静止线状对流系统触发维持机制研究

A study on triggering and maintenance mechanism of a linear quasi-stationary convection system in South China

暴雨灾害. 2022, 41(1): 33-41 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2022.01.004

苏南一次梅雨锋大暴雨的环境条件及对流系统演变特征

Analysis of environmental conditions and characteristics of convective system evolution of a Mei-Yu Front heavy rainstorm in southern Jiangsu

暴雨灾害. 2023, 42(5): 532-540 https://doi.org/10.12406/byzh.2023-128

山东省雷暴大风天气学分型与物理诊断量统计特征

Synoptic classification and statistical characteristics of physical diagnoses for thunderstorm gale in Shandong Province

暴雨灾害. 2021, 40(4): 362-373 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2021.04.004

海陆风和地形对一次弱天气背景下暖区特大暴雨的影响分析

Analysis of the influence of sea-land breeze and topography on the extraordinary heavy rain in warm sector under a weak weather background

暴雨灾害. 2019, 38(6): 597-605 https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-9045.2019.06.004

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘解明,张勇,房云龙,等.2025.山东半岛"平行"双支海风锋的中尺度特征分析及对流触发机制初探[J].暴雨灾害,44(1):9−18. LIU Xieming, ZHANG Yong, FANG Yunlong, et al. 2025. Mesoscale characteristics analysis of "parallel" dual sea breeze fronts and associated convection initiation mechanism in the Shandong Peninsula [J]. Torrential Rain and Disasters,44(1):9−18 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2024−137

山东半岛"平行"双支海风锋的中尺度特征分析及对流触发机制初探

刘解明[1], 张勇[1], 房云龙[1], 刘雪映[2], 李可悦[3]

(1. 中国民用航空青岛空中交通管理站, 青岛 266000; 2. 胶州市气象局, 青岛 266300;
3. 中国人民解放军 95605 部队, 重庆 400000)

摘　要: 海风锋是沿海地区触发对流天气的重要系统, 其中双支海风锋的观测和研究极少。利用 2023 年 7 月 9 日常规观测、多普勒雷达、葵花-9 卫星和 ERA5 再分析等资料, 对山东半岛东部导致强对流天气的两条“平行”且相向移动的海风锋进行中尺度特征分析, 初步分析了其触发强对流的机制。结果表明: (1) 触发本次强对流天气的双支海风锋分别位于福山至牟平沿岸 (北岸海风锋) 和海阳至乳山沿岸 (南岸海风锋), 其出现时的地面环境风为西南风。北岸海风锋建立初期呈西北—东南向, 在向南推进过程中逐渐转为与南岸海风锋“平行”的东北—西南向。(2) 极大风可以辅助雷达判断海风锋的位置。海风锋过境时南北岸的地面气象要素变化差异较大, 北岸存在明显的南北风转换, 而南岸相对湿度的激增最显著。(3) 强对流发生前期, 山东半岛东部南北两侧的海域中均伴有低层大气扰动抬升且向内陆推进。随着双支海风锋的建立, 南北两侧低层大气扰动抬升区分别与两支海风锋的抬升区合并且均得以增强, 两个合并的抬升区继续相向移动直至合并成最强上升气流, 随后触发了短时强降水和雷暴大风等强对流天气。

关键词: “平行”双支海风锋; 局地强对流; 触发机制; 山东半岛

中图法分类号: P458.3　　**文献标志码**: A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2024−137

Mesoscale characteristics analysis of "parallel" dual sea breeze fronts and associated convection initiation mechanism in the Shandong Peninsula

LIU Xieming[1], ZHANG Yong[1], FANG Yunlong[1], LIU Xueying[2], LI Keyue[3]

(1. *Qingdao Air Traffic Management Station of Civil Aviation of China*, *Qingdao* 266000; 2. *Jiaozhou Meteorological Service*, *Qingdao* 266300; 3. *Troop No.*95605 *of the Chinese People's Liberation Army*, *Chongqing* 400000)

Abstract: The sea breeze front is an important system that triggers convective weather in coastal areas, but few observations and research on the dual sea breeze fronts are reported. This article uses conventional observation data, Doppler radar, Himawari-9 satellite, and ERA5 reanalysis data on July 9, 2023, to analyze the mesoscale characteristics of two "parallel" sea breeze fronts moving towards each other that cause severe convective weather in the eastern part of the Shandong Peninsula. The mechanism that triggers strong convection is preliminarily explored. The results are as follows. (1) The dual sea breeze fronts that triggered this severe convective weather were located along the coast from Fushan to Mouping (northern sea breeze front) and from Haiyang to Rushan (southern sea breeze front). The surface environmental wind at the time of their appearance was the southwest wind. At the initial stage of the northern sea breeze front, it showed a northwest-southeast direction. But it gradually turned into a northeast-southwest direction as it advanced southward, which was parallel to the southern sea breeze front. (2) Peak gusts can assist radar in determining the location of the sea breeze front. When the dual sea breeze fronts passed through, there was a significant difference in the changes of surface meteorological elements between the northern and southern coasts. There was a clear north-south wind transition on the north coast and a significant increase in relative humidity on the south coast. (3) In the early stage of strong convection, there were low-level atmospheric disturbances and uplifts in the sea areas on both the northern and southern sides of the eastern Shandong Peninsula, which advanced inland. With the establishment of the dual sea breeze fronts, the low-level atmospheric disturbance uplift areas on both the northern and southern sides merged with the uplift areas of the dual

收稿日期: 2024−07−15; **定稿日期**: 2024−10−30

第一作者: 刘解明, 主要从事短时临近天气预报及方法研究。E-mail: ouc0627lxm@qq.com

通信作者: 张勇, 主要从事短时临近天气预报及方法研究。E-mail: zyong223@outlook.com

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY−NC−ND 4.0

sea breeze fronts. These two merged uplift areas continued to move towards each other until they merged into the strongest updrafts, which subsequently triggered short-term heavy rainfall and downburst severe convective weather.

Key words: "parallel" dual sea breeze fronts; local strong convection; trigger mechanism; Shandong Peninsula

引　言

海风锋是海风环流向内陆推进过程中与内陆的暖干气团之间形成的类似冷锋性质的中小尺度系统, 其尺度较锋面系统明显偏小, 空间高度在 1.5 km 左右 (Suresh, 2007; Banta et al., 2011; Sai et al., 2022; Li et al., 2023), 是沿海地区触发暴雨、冰雹等中小尺度局地对流天气以及空气污染事件的重要系统之一 (Dias and Machado, 1997; 陈德花等, 2018; 高晓梅等, 2018), 多与其他边界层系统相互作用触发强对流天气 (Lin et al., 2001; Miao et al., 2003; Fovell, 2005; 冯箫和施萧, 2019)。

山东半岛海岸线长度达到 3 290 km, 占中国海岸线总长度的六分之一, 海岸线走向复杂, 因此山东半岛形成的海风锋方向也各不相同, 相关学者已经对其进行了较为深入的研究。于希里和闫丽凤 (2001) 指出山东半岛北部东—西向的海风锋能够为中尺度系统的发展提供有利的下垫面扰动。董海鹰等 (2008) 分析指出当青岛高空受西风带控制, 地面系统性风为偏北风时, 海风锋与中低空切变线叠加易使局地辐合加强出现对流天气。高晓梅等 (2018) 分析了烟台北岸和潍坊北岸两次海风锋参与下引起的强对流天气, 同时强调了地形抬升以及阵风锋在触发强对流过程中的动力抬升作用。万夫敬等 (2021) 分析了山东半岛复杂的海风锋对飑线系统断裂、再组织化的重要作用, 指出当海风锋与飑线系统的阵风锋相交诱发新生对流后, 造成对流系统的移速加快, 从而导致飑线系统的断裂, 断裂后残留风暴的后向传播机制使得飑线完成再组织化。

以上研究多为单只或单方向移动的海风锋, 而 Fu 等 (2021) 通过大涡模拟理想试验发现, 双支海风锋碰撞过程中在两者交界处能够随机触发深层对流。观测研究表明, 由于海风锋在雷达低仰角的基本反射率产品上表现为强度较弱且平行于海岸线的窄带回波, 并且向内陆推进的距离为 50~100 km, 因此相邻海岸线有一定夹角且配合适当的环流时可能出现双支海风锋碰撞的情况 (王彦等, 2006; 陆汉城和杨国祥, 2000)。顾问等 (2017) 统计上海夏季海风锋时也发现, 环境风为偏西风和西南风的情况下可能出现西北—东南向海风锋与东北—西南向海风锋碰撞的形势。由于形成双支海风锋碰撞的条件苛刻, 其出现且同时能够被识别的概率极低, 因此对双支海风锋碰撞触发强对流的研究较少。目前发现的双支海风锋的结构多为“人”字形, 单条海风锋的水平尺度在 60 km 左右, 垂直尺度在 1.5 km 左右。在山东地区, 仅盛春岩等 (2007) 在青岛地区发现“人”字形的双支海风锋结构, 但未对其抬升机制进行分析。

山东半岛东部三面环海, 北侧为渤海, 南面直接濒临黄海, 南北两条海岸线近乎平行 (交角 30°以内), 生成的海风锋多为东西向结构; 山东半岛东部的南北两条海岸线的距离相对较近 (60~120 km), 有利于出现南北两支海风锋并且发生碰撞; 丘陵地形有助于海风锋向内陆推进的过程中逐渐增强, 上述地理环境有利于山东半岛出现海风锋甚至双支海风锋。2023 年 7 月, 山东半岛东部出现了一次强对流天气, 本文利用常规观测、多普勒雷达、葵花-9 卫星和 ERA5 再分析等资料观测到两条“平行”结构的海风锋, 两者相向移动, 其特征较前人发现的同向追赶型“人”字形结构更为罕见, 并详细分析其中尺度特征的演变, 最后初步探究双支海风锋触发本次强对流的机理, 以提高对该地区此类强对流天气的认识, 并提升对流天气预警能力。

1　资料介绍

本文在分析环流背景时, 使用了山东省气象局提供的 2023 年 7 月 9 日常规高空、地面气象观测资料和中央气象台强天气诊断分析平台提供的威海荣成站探空图。在分析海风锋的中尺度特征时使用了山东省气象局提供的逐 5 min 加密自动气象站资料、烟台站和威海站的雷达资料以及青岛空管站提供的葵花-9 卫星逐 10 min 的云图资料。在分析海风锋触发强对流的机理时, 使用了欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 网站下载的 ERA5 再分析资料中的高空风场资料, 水平分辨率为 0.25°×0.25 °, 时间分辨率为 1 h。

2　天气实况与环流背景

2.1　天气实况

2023 年 7 月 9 日山东半岛东部地区出现局地暴雨、冰雹和雷暴大风天气, 降水从 16:00 (北京时, 下同) 开始, 与双支海风锋碰撞的时间基本吻合, 持续到 20:00 基本结束。过程最大降水量出现在昆嵛镇, 达 79.5 mm。图 1a 为此次降水过程降水量的分布情况, 图 1b 为图 1a 中 4 个累积降水量最大站点的小时降水量演变, 可见此次过程的主要特点为: (1) 降水局

地性强, 主要位于双支海风锋碰撞区及其下游地区, 其中超过 50 mm 的仅有 3 个站点, 而周边地区则为少量降水; (2) 降水强度大、持续时间短, 强降水主要集中在 17:00 和 18:00 的 2 h 时段内 (图 1b), 其中界石镇的 1 h 最大降水量达到 51.9 mm, 小时雨强最强, 同时伴有 25.9 m·s^{-1} 的雷暴大风天气。

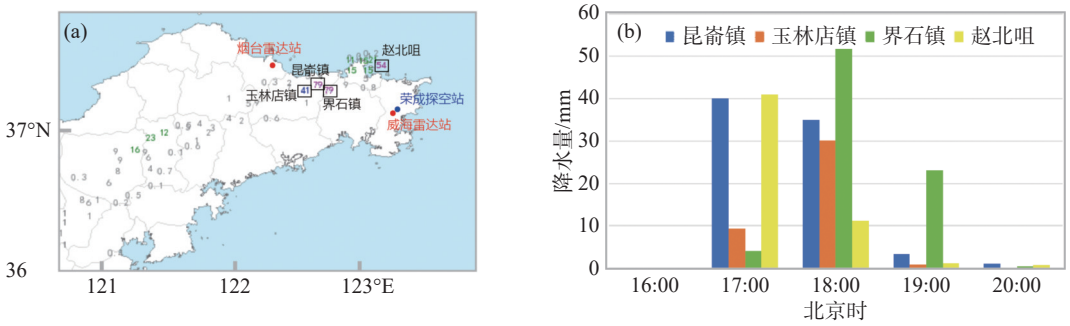


图 1 2023 年 7 月 9 日 16:00—20:00 累计降水量 (a, 数字, 单位:mm) 和 4 个降水量最大站点 (图 a 中方框) 的小时降水量 (b)

Fig. 1 The (a) accumulated precipitation (number, unit:mm) and (b) hourly precipitation at 4 biggest precipitation stations (the framework in Fig. 1a) from 16:00 BT to 20:00 BT 9 July 2023

2.2 环流背景

2023 年 7 月 9 日 08:00 天气形势图 (图 2a) 可见, 121°E、46°N 附近 850—500 hPa 为一深厚的冷涡系统, 高空槽从冷涡中心向南一直延伸到河南至苏皖地区, 温度槽明显落后于高度槽, 槽后有明显的冷平流。高低空槽区相对位置的配置显示, 冷涡槽线分为南北两个区域, 其中北半区 500 hPa 的槽线相对 850 hPa 略有后倾, 主要影响东北南部至渤海北部; 南半区中高层的槽线已经到达黄海海域, 而 850 hPa 的槽线还位于山东中西部地区, 是明显的前倾槽结构, 温度场上显示中层侵入的冷空气正好叠加在低层 850 hPa 的温度脊上, 山东半岛地区的高低空呈典型的"上冷下暖"结构, 层结不稳定明显。荣成站的探空资料 (图 2c) 中高低层的湿度分布显示, 600 hPa 以下的相对湿度在 60 % 以上, 明显较 600—400 hPa 之间的湿度条件好, 形成"上干下湿"的结构。假相当位温 (θ_{se}) 在 800—500 hPa 之间随高度明显降低, 为较强的对流不稳定层结。在 925 hPa 高度以下还有逆温层存在, 能够为强对流的发展不断积累能量。从对流参数可见, 对流有效位能达 2 225.1 J·kg^{-1}, 对流抑制极小, 且自由对流高度极低 (973.3 hPa), 能量平衡高度较高 (231.3 hPa), 同时 K 指数也高达 31.8 ℃。从 10:00 自动气象站物理量分布 (图 2b) 上看, 山东半岛地区的背景环境风以南风为主, 其中西南风居多, 南岸海岸线的温度梯度 (7~9 ℃) 和露点温度梯度 (5 ℃) 偏大, 表明南岸的海陆温差大且存在很强的水汽输送, 北岸的温度露点差偏大 (13 ℃), 湿度条件偏差。前期触发强对流两大因素中的大气层结不稳定条件和水汽条件已经满足, 而双支海风锋的移动发展和碰撞为强对流提供了低层的抬升机制。

3 "平行"双支海风锋演变的中尺度特征

3.1 多普勒雷达回波演变特征

引言指出在低仰角的雷达产品中最容易识别海风锋的位置, 因为雷达探测海风锋的本质在于大气的不均匀性, 其中主要贡献因子是锋区中的鸟类或昆虫和不连续湿度梯度 (Atlas, 1960), 而常规气象资料可以作为辅助工具进行佐证。08:00 的环流背景 (图 2b) 分析表明山东半岛地区的环境背景风以西南风为主, 因此半岛北岸是最容易出现海风锋的位置。烟台站 0.5°仰角的雷达产品资料 (图 3) 显示, 12:01 在半岛北岸开始有海风锋形成 (图 3a 红框内), 窄带弱回波强度在 15~25 dBz, 一段位于福山区附近, 长约 15 km, 一段位于牟平区附近, 长约 25 km, 其中牟平区海风锋的回波要更为明显。13:10 (图 3b) 牟平区的海风锋呈圆弧状向内陆明显推进, 弧顶最远处达到 10 km 左右, 长度发展到 50 km 左右, 而福山区海风锋的推进速度并不明显, 依然在沿岸附近。13:50 (图 3c) 牟平区的海风锋位置变化不大, 但东段的回波强度略有减弱, 整体呈西北—东南向分布, 而福山区的海风锋则向内陆明显推进 10 km, 长度增大到 30 km。与此同时, 在半岛南岸离海岸线 15 km 处也有几条较弱且与海岸线平行的回波带 (图 3c 下侧红框内) 形成, 回波长度较北岸海风锋的明显偏短, 速度图上有对应的弱速度窄带 (图 3h), 形似海风锋 (王彦等, 2006)。15:00 (图 3d) 牟平区的海风锋减弱, 并与福山区海风锋的东段相连接, 整体呈东—西向分布, 而福山区的海风锋则发展成圆弧状, 长度达到 60 km, 此时南岸的弱回波带向北推进 20 km 左右, 长度明显增长。15:35 (图 3e) 北岸海风锋西段的移速大于东段, 整体转为西南—东北向, 与南岸的弱回波

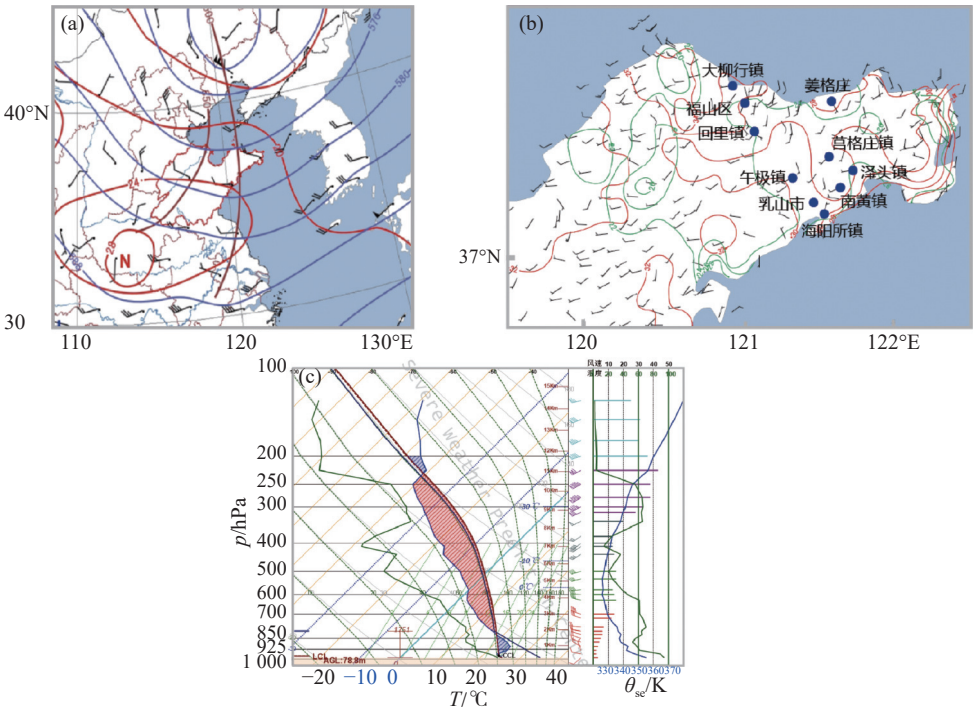


图 2 2023 年 7 月 9 日 08:00 500 hPa 位势高度 (蓝色等值线, 单位: dagpm)、850 hPa 温度 (红色等值线, 单位: ℃) 和 850 hPa 风场 (风向标, 单位: m·s^{-1}) 天气图 (a, 棕线为 500 和 850 hPa 槽线)、10:00 自动气象站风场 (风向标, 单位: m·s^{-1})、温度 (红色等值线, 单位: ℃) 和露点 (绿色等值线, 单位: ℃) 分布图 (b) 和 08:00 荣成站 *T*-ln*p* 探空图 (c)

Fig. 2 The (a) weather map of 500 hPa geopotential height (blue line, unit: dagpm), 850 hPa isotherm (red line, unit: ℃) and 850 hPa wind (barb, unit: m·s^{-1}) at 08:00 BT (brown line indicates 500 hPa and 850 hPa trough-line), (b) distribution of automatic weather station wind field (barb, unit: m·s^{-1}), temperature (red line, unit: ℃) and dew temperature (green line, unit: ℃) at 10:00 BT and (c) the sounding chart at Rongcheng at 08:00 BT 9 July 2023

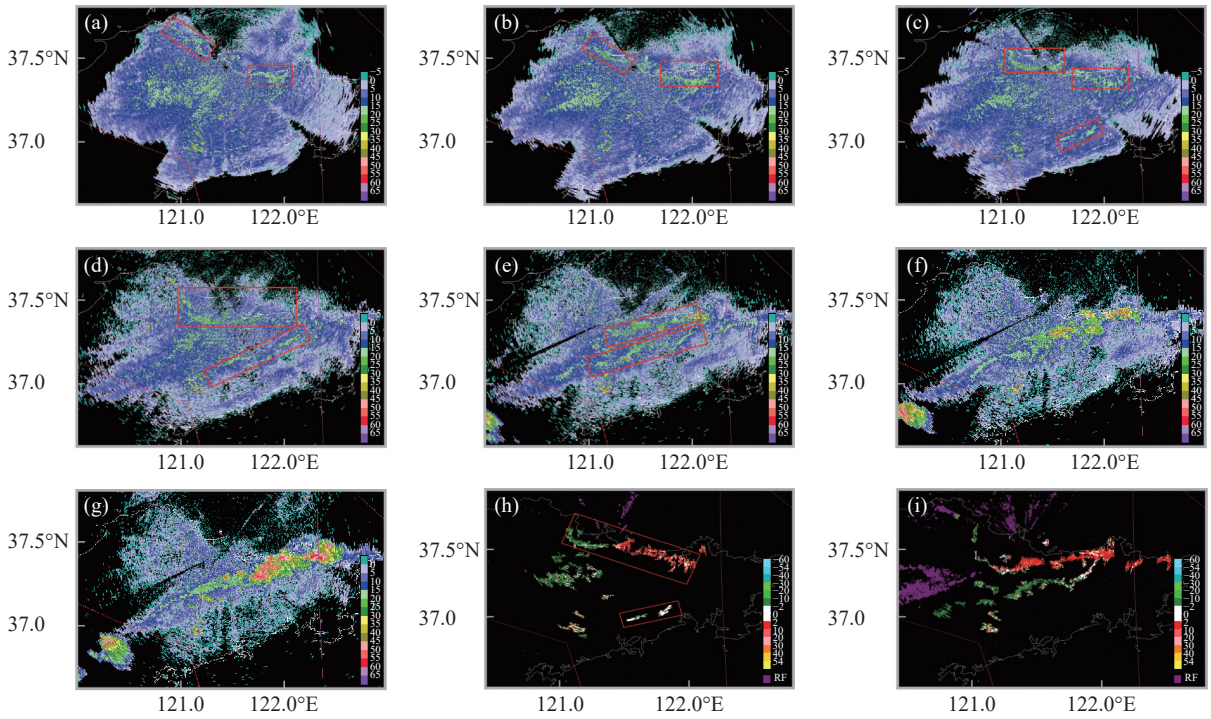


图 3 烟台多普勒雷达 0.5 °仰角 2023 年 7 月 9 日 12:01 (a)、13:10 (b)、13:50 (c)、15:00 (d)、15:35 (e)、15:58 (f)、16:34 (g) 反射率因子图和 13:50 (h)、15:35 (i) 径向速度图 (红框代表海风锋位置, 下同)

Fig. 3 Reflectivity factor at 0.5 ° elevation in Yantai doppler radar at (a) 12:01 BT, (b) 13:10 BT, (c) 13:50 BT, (d) 15:00 BT, (e) 15:35 BT, (f) 15:58 BT, (g) 16:34 BT and radial velocity at (h) 13:50 BT, (i) 15:35 BT on 9 July 2023 (The red box represent the location of the sea breeze front, same hereafter)

带呈近似“平行”的状态, 径向速度图 (图 3i) 中更为明显, 南岸回波带则再次向北推进 10 km, 长度达到 120 km, 其中回波最东侧的移速较快, 并与北岸海风锋相交触发了强对流。15:58 (图 3f) 南北两条弱回波带的中段相遇并触发对流, 此时东段的部分强回波已经发展到 60 dBz。16:34 (图 3g) 两条回波带的西段相遇, 但是在其下游触发的对流, 此时整个半岛东部强对流发展到最强, 雷达回波达到 65 dBz。

研究表明山东半岛南岸发生海风锋通常有三种地面形势: 1) 地面弱气压场; 2) 环境背景风为西北风; 3) 环境背景风为偏南风时存在较强的海陆温差 (盛春岩等, 2007; 董海鹰等, 2008; 万夫敬等, 2021)。地面天气图 (图略) 显示山东半岛处在 2~4 m·s^{-1} 的西南风环境背景流场中, 沿岸 20 km 范围内的温差达到 7~9 ℃, 符合上述的第三种地面形势。由于南岸离烟台站的雷达距离偏远, 烟台雷达能够探测到窄带弱回波的最早时间为 13:27, 为了确认南岸窄带弱回波最早的建立时间, 选取离南岸相对较近的威海站雷达 (图 4) 进行分析。雷达反射率因子显示最早在 11:38 就已经有窄带弱回波形成 (图 4a 红框内), 回波强度为 15~25 dBz, 距离海岸约 5 km, 长度仅 20 km, 高度 1.5 km 左右 (图 4i), 此时径向速度图 (图 4e) 中的弱速度窄带并不明显。12:34 窄带弱回波范围增大 (图 4b), 长约 50 km, 向内陆推进 10 km 左右, 并且在径向速度图 (图 4f) 中有明显的弱速度窄带与之对应。连续跟踪观察, 南岸的窄带弱回波在建立之后向内陆推进的速度缓慢 (约 5 km·h^{-1}), 回波长度的增加也较慢。13:18 之后回波长度迅速增长 (图 4c), 回波高度逐渐增高, 并有明显的北抬趋势, 对应的弱速度窄带 (图 4g) 在移动过程中也更加明显, 这与山东半岛地形抬升作用也有一定的关系。14:00 后, 南岸窄带弱回波 (图 4d、h) 迅速北移, 移速达到 10~15 km·h^{-1}, 宽度约 5 km, 高度达到最高的 2 km 左右 (图 4j)。以上分析表明南岸的窄带弱回波在离海岸 10~15 km 以内时, 向内陆推进速度较慢 (5 km·h^{-1} 以内), 在稳定向上层发展约 1 h 后开始迅速向北推进, 并且离海岸越远移速越快。以上特征与 Suresh (2007) 研究分析的印度半岛南部的海风锋移动发展特征极为相似, 也初步证明南岸的窄带弱回波可能是海风锋。

3.2 卫星云图的演变特征

分析葵花-9 卫星高分辨率的可见光波段云图 (图 5) 发现, 13:00 (图 5a) 半岛北岸有细胞状的积云开始发展, 一部分集中在福山区, 一部分集中在牟平区, 福山区的积云发展更为旺盛, 积云位置正好与雷达的窄带弱回波位置相对应, 即为北岸海风锋边界线。南岸附近虽有片状云系发展, 但从时间演变上看, 这些云系是以较高的层积云为主, 与南岸的窄带

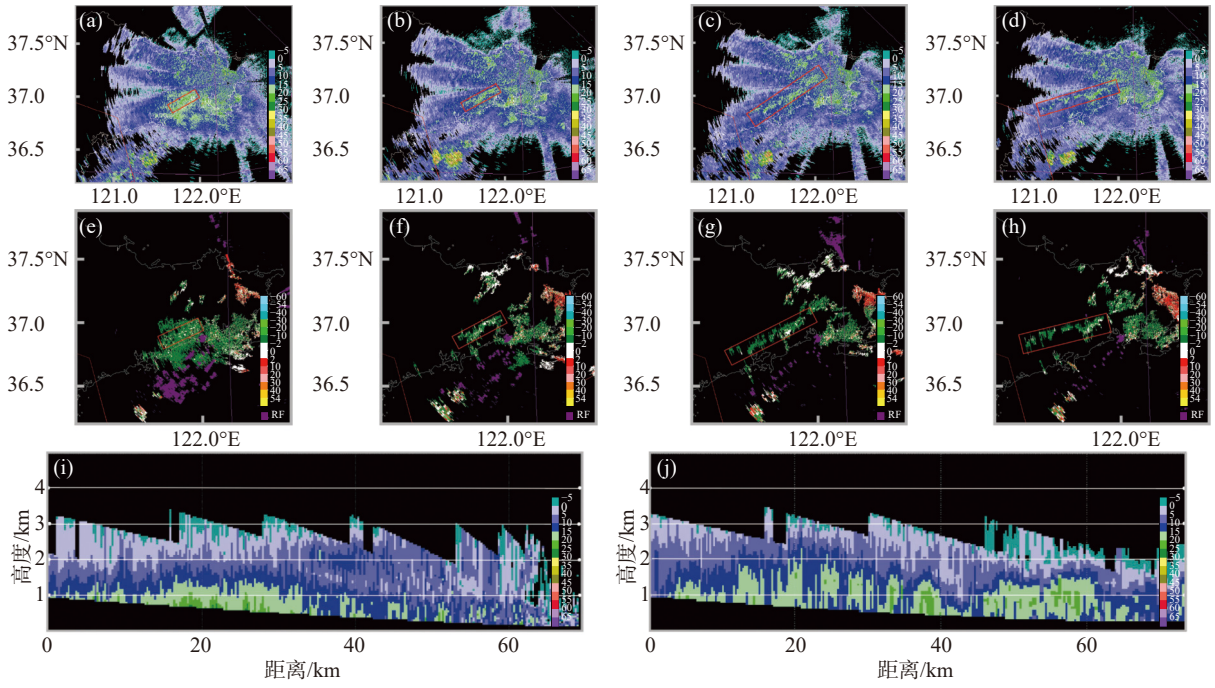


图 4 威海多普勒雷达 0.5 °仰角 2023 年 7 月 9 日 11:38 (a)、12:34 (b)、13:18 (c)、14:03 (d) 反射率因子图和 11:38 (e)、12:34 (f)、13:18 (g)、14:03 (h) 径向速度图以及 11:38 (i)、13:18 (j) 平行海风锋方向的反射率因子垂直剖面图

Fig. 4 Reflectivity factor in Weihai doppler radar at 0.5 °elevation at (a) 11:38 BT, (b) 12:34 BT, (c) 13:18 BT, (d) 14:03 BT, radial velocity at (e) 11:38 BT, (f) 12:34 BT, (g) 13:18 BT, (h) 14:03 BT and vertical profile of reflectance factor in the direction of parallel sea breeze fronts at (i) 11:38 BT, (j) 13:18 BT on 9 July 2023

弱回波无对应关系，但另一方面也表明半岛地区低空的水汽充足。14:00 (图 5b) 半岛北岸的细胞状积云数量明显增多，范围略有增大，尤其是福山区，其上的积云有连成线的趋势，正好对应福山区的海风锋向内陆增强推进的过程。15:00 (图 5c) 北岸的积云继续发展成为更长的积云线，整体呈东—西走向。后续当边界层上南北两条弱回波带逐渐相遇后，积云迅速发展成为浓积云和积雨云。

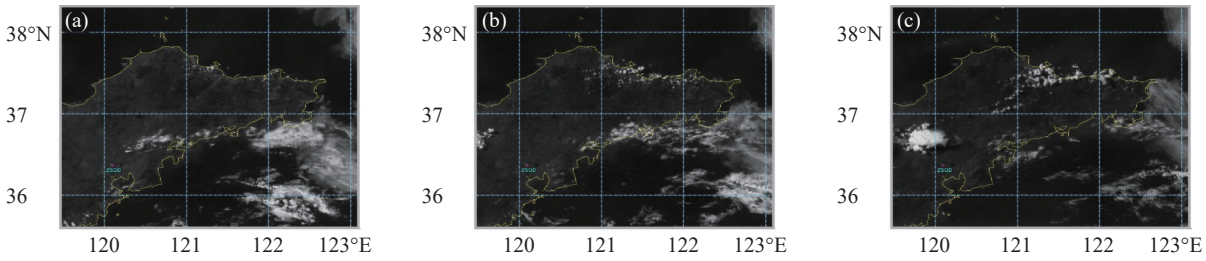


图 5 2023 年 7 月 9 日 13:00 (a)、14:00 (b)、15:00 (c) 葵花-9 卫星可见光云图

Fig. 5 The visible light cloud images of Himawari-9 satellite at (a) 13:00 BT, (b) 14:00 BT, (c) 15:00 BT on 9 July 2023

3.3 自动站气象要素的演变特征

海风锋过境前后气象要素的变化显著，利用自动气象站资料分析了半岛南北两岸基本气象要素的变化特征，站点位置如图 2b 中蓝点所示。从山东半岛北岸偏东的姜格庄站点的气象要素变化 (图 6a_1—a_4) 可以看出，变化最明显的要素是风向，在 11:30—12:00 风向开始向偏西方向偏转，较长时间时间维持在 270°左右，12:00 之后风向完全转为偏北风，温度、湿度转变较为迟滞且缓慢，其中温度是在 13:00 之后开始有所下降，相对湿度则是延迟到 14:00 之后才开始增大，风速是变化最不明显的要素。北岸偏西侧三个站点大柳行镇、福山区和回里镇的要素变化均有明显的突变时段，突变时间持续 10~30 min 不等，可清晰分辨海风锋过站的时间分别在 13:00、14:00 和 15:00 前后。其中最北侧站点大柳行镇的风向在 12:30 前率先转变为偏北风，而温度、湿度则是滞后到 13:00 才开始突然降低。南侧两个站点福山区和回里镇的所有要素的突变时间基本一致，分别在 14:00—14:20 和 15:00—15:20，其中福山区转为北风后，风速瞬间增大了 4 $m \cdot s^{-1}$。

山东半岛南岸选取的自动气象站分别为：海阳所镇、乳山市、泽头镇、南黄镇、午极镇和莒格庄镇，从图 6b_1—b_4 可见相对湿度有自南向北突然增大的过程，突变时长大部分在 10 min 左右，只有离海边最远的莒格庄镇时长达到 30 min 左右，这正好与南岸窄带弱回波自南向北的移动过程相呼应。其次变化较为明显的要素是温度，在相对湿度突变的时段内，温度也有相应的降低，其特征还表现为海边站点的

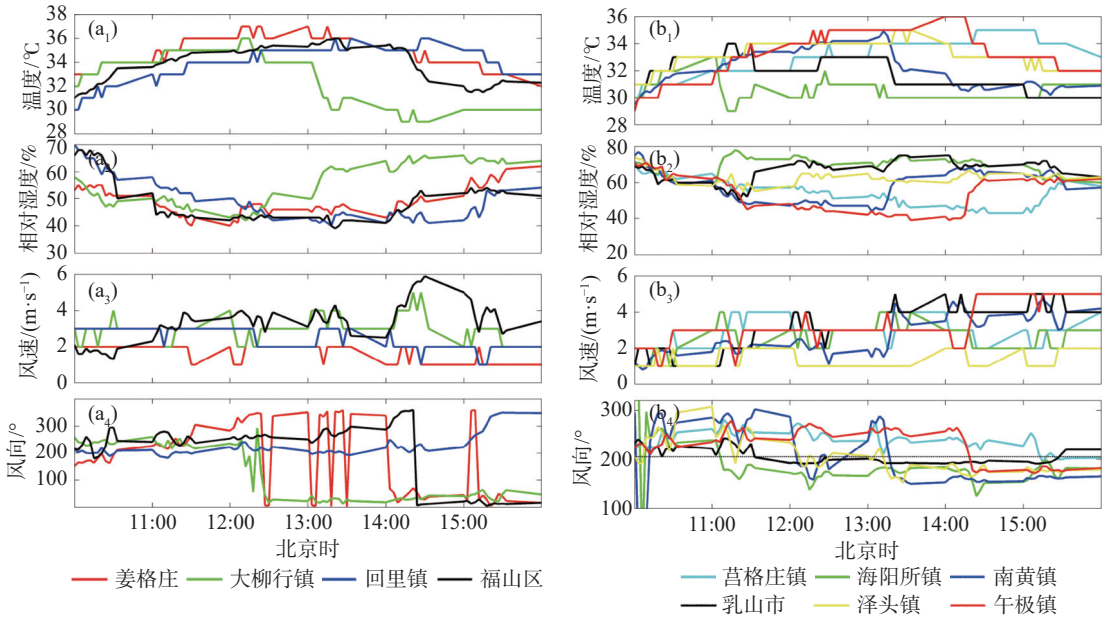


图 6 2023 年 7 月 9 日山东半岛北岸 (a_1—a_4) 和南岸 (b_1—b_4) 的自动气象站温度、相对湿度、风速和风向随时间变化图

Fig. 6 The time varivation of automatic weather station temperature, relative humidity, wind speed, and wind direction on (a_1-a_4) the north and (b_1-b_4) south coast of the Shandong Peninsula on 9 July 2023

温度变化大于内陆站点。风场变化显示, 在温度、湿度要素突变的时段前后, 有五个站点 (海阳所镇、乳山市、南黄镇、午极镇和莒格庄镇) 的风速有增大的趋势 (约 1~2 $m \cdot s^{-1}$), 所有站点的风向均有向南偏转的特征, 偏转幅度在 40°~120°左右, 且风向偏转后能够稳定维持。当以海岸线作为判定海陆风转换的标准时, 山东半岛南岸的海风角度大致在 25°~205°之间 (房云龙等, 2018), 因此所有站点均有陆风向海风转变的情况, 即表明南岸有明显的海风向内陆推进, 也再次证实南岸的窄带弱回波带就是海风锋。

对应海风锋在多普勒雷达中的演变, 排除西南环境背景风的影响, 可利用山东省自动站中的极大风资料 (图 7) 判断海风锋的位置变化。图 7a 显示 12:00 开始, 南北两岸分别有两条较短的海风锋发展, 其中北岸的海风锋容易判断, 有明显的南北风对峙, 而南岸海风锋的判断较为困难, 需以东南风或正南风进行辅助判断。12:30 (图 7b) 荣成市南部也形成了较短的海风锋, 但后续又转为西南风, 可能是因为荣成市南部的海岸线复杂, 无法形成稳定的海风。13:00 之前, 两岸的海风锋基本以原地维持为主。13:00 之后 (图 7c—d) 南岸海风锋开始向北推进, 其移动速度明显大于北岸, 尤其在 14:00 后 (图 7e—f), 南岸的海风有一次明显向北推进的过程, 而北岸的海风锋则是在 15:00 (图 7g—h) 后才有明显向南推进的趋势。直至 16:00 (图 7i) 南北两条海风锋相撞, 随后便触发了强对流天气。以上依据极大风判断海风锋的演变特征基本与多普勒雷达中窄带弱回波的演变特征一致。

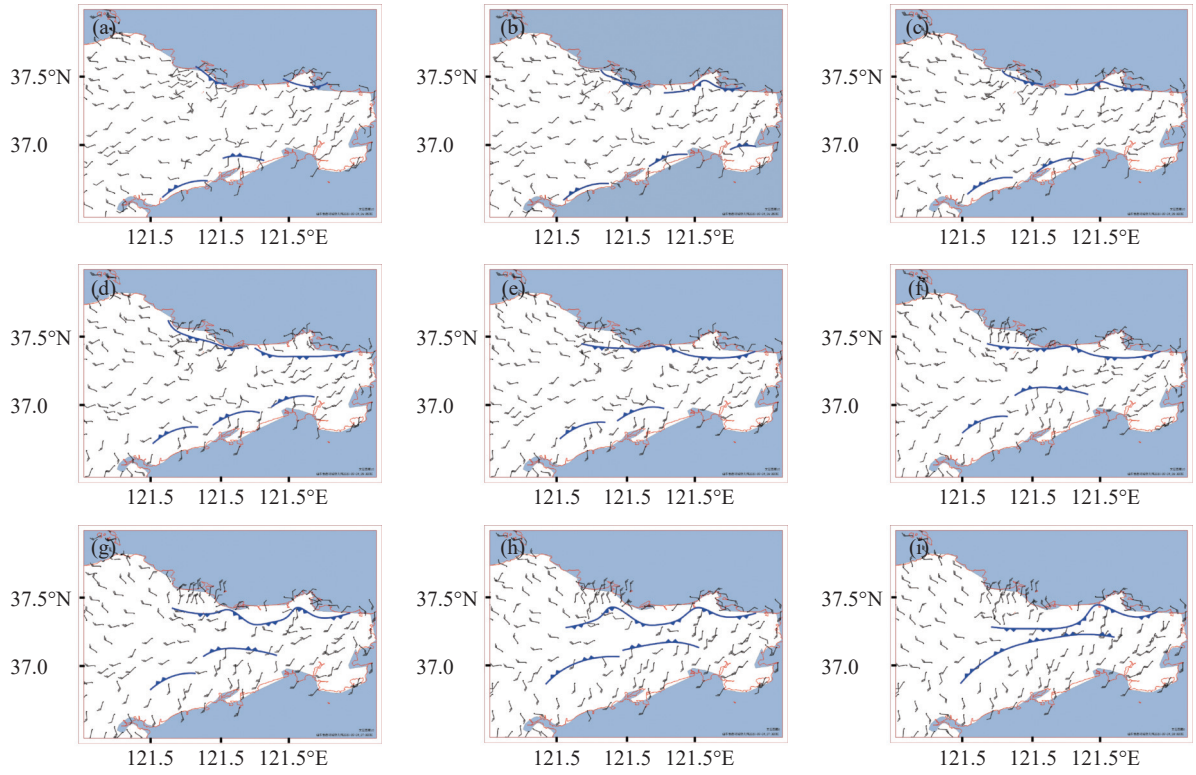


图 7 2023 年 7 月 9 日 12:00 (a)、12:30 (b)、13:00 (c)、13:30 (d)、14:00 (e)、14:30 (f)、15:00 (g)、15:30 (h)、16:00 (i) 山东省自动气象站极大风观测 (蓝色箭头曲线代表海风锋)

Fig. 7 The peak gust of automatic meteorological stations at (a) 12:00 BT, (b) 12:30 BT, (c) 13:00 BT, (d) 13:30 BT, (e) 14:00 BT, (f) 14:30 BT, (g) 15:00 BT, (h) 15:30 BT, (i) 16:00 BT 9 July 2023 in Shandong Province (The blue arrow curve represents the sea breeze front)

4 "平行"双支海风锋碰撞的对流触发机制分析

山东半岛的双支海风锋个例极少, 目前仅有一次"人"字形海风锋研究, 也只是分析了其三维结构, 而对于其内部的动力抬升机制并不清楚。"人"字形结构的双支海风锋为同向追赶型的碰撞叠加, 而本文发现的"平行"结构双支海风锋则为相向对撞型的碰撞, 两者的形态结构完全不同, 为了探究"平行"双支海风锋碰撞对雷暴触发的动力抬升机制, 利用 ERA5 再分析资料分析了 11:00—15:00 时段内 975 hPa 的水平风场与垂直速度分布 (图 8), 图 8a 中显示半岛南岸的垂直上升运动从 11:00 开始就有所表现, 不过强度较弱。12:00—13:00 (图 8b—c), 南岸的上升运动有明显的增强, 范围也有所扩大, 此时正对应南岸海风锋的建立发展时段。另外, 还发现 11:00 在青岛以南的海域 (以下简称南部海域) 有明显的风速辐合抬升区, 且随时间推移迅速向东北方向移动, 强度

略有减弱。到 14:00 (图 8d) 南部海域的抬升区与南岸海风锋的抬升区合并得到加强，最大垂直速度达到 0.4 m·s^{-1}。半岛北岸初期以下沉气流为主，烟台以北的海域 (以下简称北部海域) 有明显的上升运动，且随时间的推移，其上升运动逐渐向南移动。14:00 北岸有偏北海风形成，对应海风锋开始向内陆移动，沿岸地区有明显的抬升运动区。15:00 (图 8e)，北岸海风的偏北分量更为明显，在北岸形成明显的南北风向辐合，其最大上升运动区略有南移，与南侧的强抬升上升区形成相向移动的形势，使得整个半岛东部地区全部处在强抬升运动中，满足了强对流的触发条件。

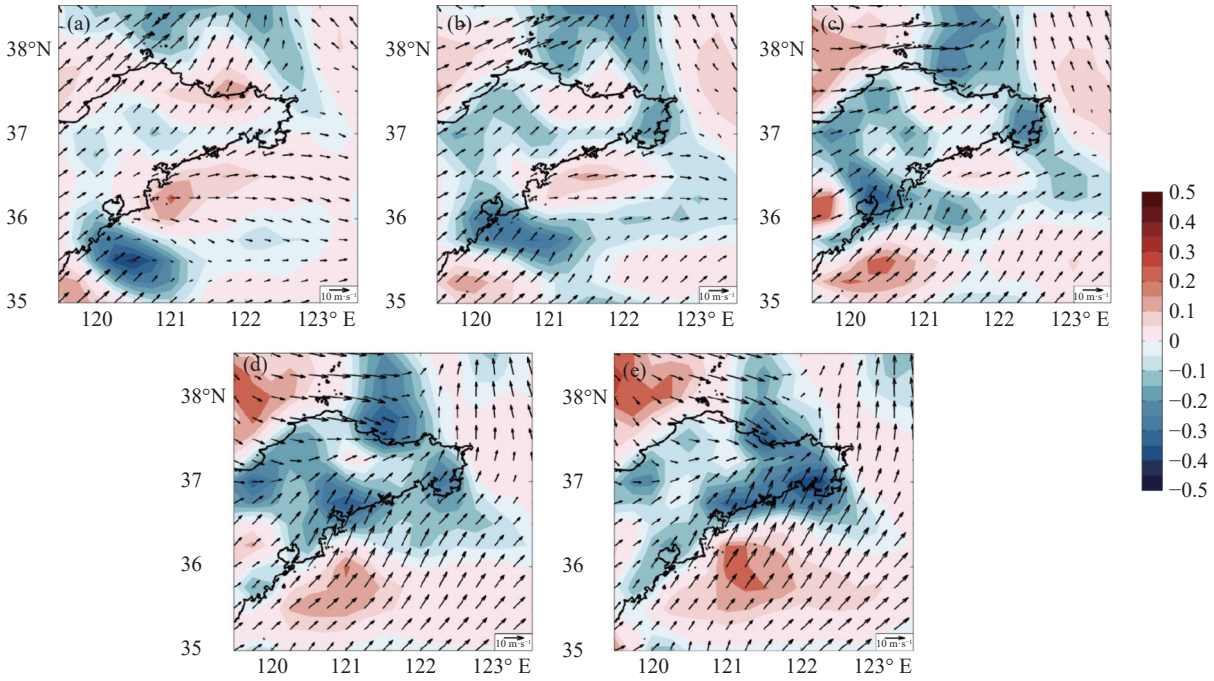


图 8 2023 年 7 月 9 日 11:00 (a)、12:00 (b)、13:00 (c)、14:00 (d)、15:00 (e) 975 hPa 风场 (矢量) 与垂直速度 (填色，单位:m·s^{-1}) 分布

Fig. 8 The distribution of wind field (vector) and vertical velocity (shaded, unit: m·s^{-1}) at 975 hPa at (a) 11:00 BT, (b) 12:00 BT, (c) 13:00 BT, (d) 14:00 BT, (e) 15:00 BT on 9 July 2023

为了更好的展现风场在三维空间的演变特征，沿 121.25°E 做经向风 v 和垂直风 w 的流场 (由于 w 较 v 明显偏小，图中流场的 w 扩大 5 倍) 与垂直速度剖面 (图 9)，图 9a 显示在 11:00，与 975 hPa 的水平形势场相对应，在不同纬度有三个上升运动区：1) 37°N 附近半岛南岸的海风锋上升运动区，强度较弱，最大上升速度 0.2 m·s^{-1}，高度从近地层发展至 950 hPa 附近；2) 38°N 以北对应北部海域的抬升运动区，强度较强，从近地层发展至 700 hPa 附近，最大上升运动区位于 925 hPa 附近，最大上升速度达到 0.35 m·s^{-1}；3) 36°N 以南对应南部海域的风速辐合抬升区，强度极强，从近地层发展至 700 hPa 附近，最大上升运动区位于 850—700 hPa 之间，最大值超过 0.5 m·s^{-1}。12:00 (图 9b)，三个抬升区均有增强发展，南岸海风锋上升区的南北位置变化不大，高度发展至 925 hPa 附近 (约 800—1 000 m)，与回波剖面的高度相近。北部海域的抬升区向南发展，且最大上升区有所抬升，南部海域的抬升区向北发展，但最大上升区下降到 975 hPa 附近。13:00 (图 9c)，南岸海风锋抬升区的位置和高度依然维持，南部海域的抬升运动有所减弱，此时距离南岸海风锋约 0.5°的纬度距离，北岸近地层风向转向，对应海风锋向内陆推进，北部海域的抬升运动持续增强且最大上升区抬升至 800 hPa 附近。14:00 (图 9d)，北岸海风锋继续向上发展至 975 hPa 附近，其自身的抬升运动与其上层北部海域的抬升运动合并加强，使得最大抬升区扩展到 975—700 hPa，而南岸海风锋的抬升运动则与南部海域的抬升运动合并，使得南部海域原先减弱的抬升运动再次得到加强，最大抬升区从 1 000 hPa 扩展到 600 hPa，可能是导致该时段南岸海风锋窄带弱回波的高度升高且移速增快的主要因素。南北两个强抬升区在 900 hPa 以上高度合并，在 900 hPa 以下相距 0.7°。15:00 (图 9e) 前后，南北两个强抬升区整体合并，使得最强抬升区从 950 hPa 发展到 600 hPa 以上，最大抬升速度达到 2.3 m·s^{-1}，有利于强对流天气的发生发展。

综上分析表明，受槽前偏南气流的影响，山东半岛北部渤海海域和南部黄海海域在低层存在较强的

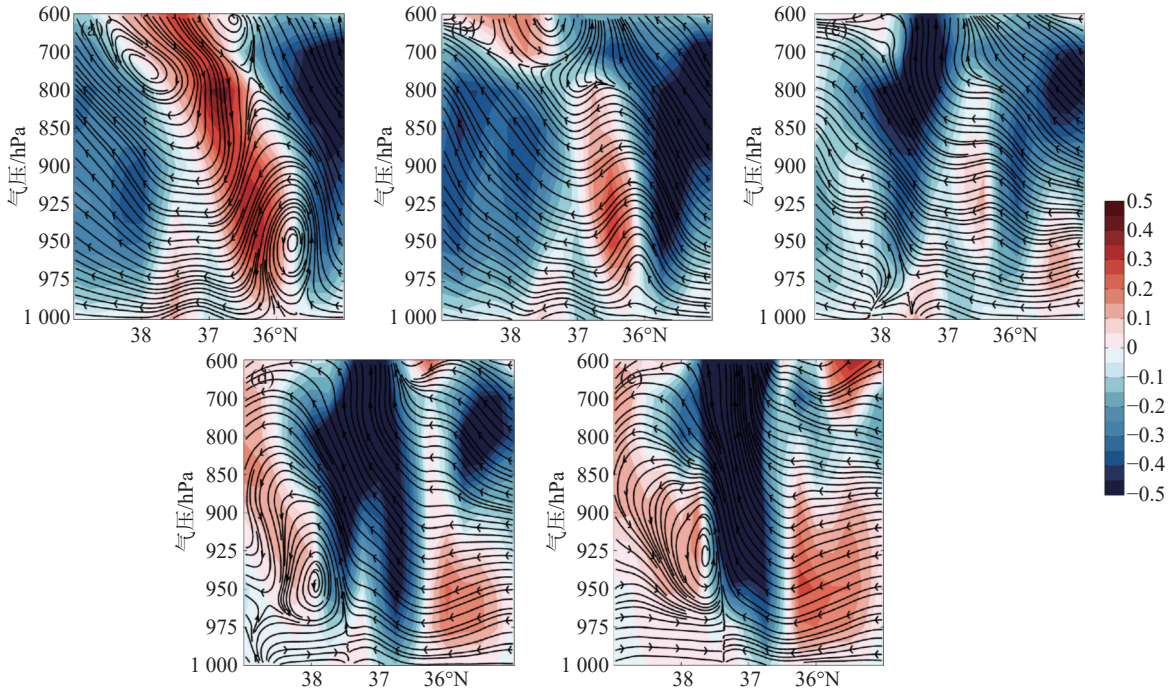


图 9 2023 年 7 月 9 日 11:00 (a)、12:00 (b)、13:00 (c)、14:00 (d)、15:00 (e) 沿 121.25°E 的垂直速度 (填色, 单位: m·s^{-1}) 与 v·5×w 环流 (流线) 经向剖面图

Fig. 9 The meridional profile of vertical velocity (shaded, unit: m·s^{-1}) and v·5×w circulation (streamline) along 121.25°E at (a) 11:00 BT, (b) 12:00 BT, (c) 13:00 BT, (d) 14:00 BT, (e) 15:00 BT on 9 July 2023

辐合抬升运动且均向内陆移动, 北部海域抬升区的移速较南部偏慢, 其抬升运动在移动过程中不断加强并向上层发展, 南部海域的抬升运动则逐渐减弱并向下层发展。南岸海风锋在建立之后便原地稳定维持 (与南岸弱窄带回波的变化一致), 而北岸海风锋直到 14:00 之后才开始向内陆明显推进。随后南部海域减弱的抬升运动与南岸海风锋的抬升运动合并得到再次增强, 而北部海域向上层发展的抬升运动与近地层北岸海风锋的抬升运动合并, 使抬升区在垂直方向上扩展至 975—600 hPa, 形成两个强抬升运动区, 二者相向移动在 15:00 后再次合并, 此时低层的最强抬升运动正位于本次强降水落区附近, 在满足对流不稳定层结条件和水汽条件的前提下, 触发了最大反射率因子达到 65 dBz 的强对流回波。虽然从多普勒雷达和自动气象站中观察到本次强对流过程是由双海风锋碰撞触发, 但在分析垂直运动后发现, 强对流实际是低层大气扰动抬升和海风锋共同作用的结果, 其中前者所提供的抬升力更为显著。

5 结论

本文利用 2023 年 7 月 9 日的常规观测资料、多普勒雷达、葵花-9 卫星和 ERA5 再分析等资料, 在山东半岛东部识别出两条"平行"相向移动的海风锋, 并对其中尺度特征以及碰撞后触发强对流的机制进行了初步分析, 主要结论如下:

(1) 山东半岛东部出现"平行"双支海风锋时的地面环境风为西南风, 高空为东北冷涡控制, 有明显的前倾槽结构, 层结极其不稳定。双支海风锋分别位于福山至牟平沿岸和海阳至乳山沿岸。北岸海风锋建立初期呈西北—东南向, 在向南推进过程中逐渐转为与南岸海风锋"平行"的东北—西南向, 二者相遇后便自东向西的触发了短时强降水和雷暴大风等强对流天气。

(2) 南岸海风锋的移速大于北岸海风锋, 在其离海岸 10~15 km 以内时移速较慢, 速度在 5 km·h^{-1} 以内, 稳定向上发展至 2 km 后迅速向北推进, 移速达到 10~15 km·h^{-1}。北岸海风锋的东段移动不明显, 西端移速 5~10 km·h^{-1}。

(3) 卫星云图上, 半岛北岸能发现有积云与海风锋相对应, 随着海风锋的增强, 积云从细胞状发展成积云线, 而半岛南岸未发现类似的积云。

(4) 自动站气象要素变化表明, 在半岛北岸海风锋过境时, 风向变化最明显, 部分站点存在温度、湿度变化滞后风向变化的特征, 而南岸海风锋过境时, 虽然风向也有陆风向海风转变的过程, 但相对湿度的变化更为显著, 且各要素的变化具有一致性。通过极大风资料判断海风锋的位置变化基本与多普勒

雷达上窄带弱回波的演变一致。

(5) 强对流发生前期，山东半岛南北两侧的海域中均伴有低层大气扰动抬升并向内陆推进。随着南北岸海风锋的先后建立，南部海域逐渐减弱的低层大气扰动抬升区与南岸海风锋合并得以再次增强，而北部海域的抬升区与北岸海风锋合并使抬升区在垂直方向上得以扩展增强，其中低层大气扰动所提供的抬升力较海风锋更为显著。两个强抬升区相向移动在 15:00 后合并加强，随后便触发了短时强降水和雷暴大风等强对流天气。

参考文献 (References):

陈德花,潘宁,张玲,等.2018.海风锋及低压环流对闽东一次暴雨过程的影响分析[J].暴雨灾害,37(2):149−157. Chen D H, Pan N, Zhang L, et al. 2018. Analysis of a heavy rainfall event triggered by sea breeze front and cyclonic circulation in the eastern coast of Fujian [J]. Torrential Rain and Disasters,37(2):149−157 (in Chinese). doi:10.3969/i.issn.1004−9045.2018.02.006

董海鹰,邵玲玲,李德萍,等.2008.青岛奥帆赛期间海风锋触发的对流性降水特征[J].气象,(S1):47−53. Dong H Y, Shao L L, Li D P, et al. 2008. Characteristics of convective precipitation triggered by sea breeze fronts during the Qingdao Olympic Sailing Competition [J]. Meteorological Monthly,(S1):47−53 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2008.S1.007

房云龙,郑标,赵铁成,等.2018.青岛流亭机场海风特征分析及对飞行的影响[J].海洋气象学报,38(4):115−121. Fang Y L, Zheng B, Zhao T C, et al. 2018. Analysis on the characteristics of sea breezes at Qingdao Airport and their impacts on the flight [J]. Journal of Marine Meteorology,38(4):115−121 (in Chinese). doi:CNKI:SUN:SDQX.0.2018−04−012

冯箫,施萧.2019.海南岛不同土地覆盖资料对 WRF 模拟的影响[J].沙漠与绿洲气象,13(2):123−129. Feng X, Shi X. 2019. Effects of different land cover data on WRF simulation in Hainan Island [J]. Desert and Oasis Meteorology,13(2):123−129 (in Chinese). doi:10.12057/i.issn.1002−0799.2019.02.018

高晓梅,俞小鼎,王令军,等.2018.山东半岛两次海风锋引起的强对流天气对比[J].应用气象学报,29(2):245−256. Gao X M, Yu X D, Wang L J, et al. 2018. Comparative analysis of two strong convections triggered by sea-breeze front in Shandong Peninsula [J]. Journal of Applied Meteorological Science,29(2):245−256 (in Chinese). doi:10.11898/1001−7313.20180210

顾问,张晶,谈建国,等.2017.上海夏季海风锋及其触发对流的时空分布和环流背景分析[J].热带气象学报,33(5):644−653. Gu W, Zhang J, Tan J G, et al. 2017. Characteristics and circulation background of Shanghai summer sea breeze front and its induced convection [J]. Journal of Tropical Meteorology,33(5):644−653 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004−4965.2017.05.008

陆汉城,杨国祥.2000.中尺度天气原理和预报[M].北京:气象出版社:167-170. Lu H C, Yang G X. 2000. Principles and forecasting of mesoscale weather [M]. Beijing:China Meteorological Press:167-170 (in Chinese)

盛春岩,王建林,刁秀广.2007.2006 年 8 月青岛国际帆船赛期间海陆风特征及三维结构分析[J].中国海洋大学学报,37(4):609−614. Sheng C Y, Wang J L, Diao X G. 2007. The features and three-dimensional structures of sea and land breeze during the Qingdao 2006 International Regatta [J]. Periodical of Ocean University of China,37(4):609−614 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1672−5174.2007.04.017

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):23−28. Wang Y, Li S S, Guo L, et al. 2006. Analysis of radar echo characteristics of sea wind front in Bohai Bay [J]. Meteorological Monthly,32(12):23−28 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000−0526.2006.12.004

万夫敬,孙继松,孙敏,等.2021.山东半岛海风锋在一次飑线系统演变过程中的作用[J].气象学报,79(5):717−731. Wan F J, Sun J S, Sun M, et al. 2021. Impacts of sea breeze front over Shandong Peninsula on the evolution of a squall line [J]. Acta Meteorologica Sinica,79(5):717−731 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2021.056

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,29(1):39−41. Yu X L, Yan L F. 2001. Severe convective cloud cluster and local rainstorm in the northern coastal area of Shandong Peninsula [J]. Meteorological Science and Technology,29(1):39−41 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1671−6345.2001.01.009

Atlas D. 1960. Radar detection of the sea breeze [J]. Journal of The Atmospheric Sciences,17(3):244−258. doi:10.1175/1520−0469(1960)0172.0.CO;2

Banta R M, Olivier L D, Levinson D H. 2011. Evolution of the Monterey Bay sea-breeze layer as observed by pulsed doppler lidar [J]. Journal of The Atmospheric Sciences,50(24):3959−3982. doi:10.1175/1520−0469(1993)0502.0.CO;2

Dias M, Machado A J. 1997. The role of local circulations in summertime convective development and nocturnal fog in São Paulo, Brazil [J]. Boundary-Layer Meteorology,82(1):135−157. doi:10.1023/A:1000241602661

Fovell R G. 2005. Convective initiation ahead of the sea-breeze front [J]. Monthly Weather Review,133:264−278. doi:10.1175/MWR−2852.1

Fu S, Rotunno R, Chen J, et al. 2021. A large-eddy simulation study of deep-convection initiation through the collision of two sea-breeze fronts [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,21(12):9289−9308. doi:10.5194/acp−21−9289−2021

Li J, Dou J X, Lenschow D H, et al. 2023. Analysis of boundary layer structure, turbulence, and flux variations before and after the passage of a sea breeze front using meteorological tower data [J]. Journal of Meteorological Research,37(6):855−877. doi:10.1007/s13351−023−3057−y

Lin W S, Wang A Y, Wu C S, et al. 2001. A case modeling of sea-and breeze in Macao and its neighborhood [J]. Advances in Atmospheric Sciences,18(6):1231−1240. doi:10.1007/s00376−001−0037−x

Miao J F, Kroon L J M, Vilà-Guerau de Arellano J, et al. 2003. Impacts of topography and land degradation on the sea breeze over eastern Spain [J]. Meteorology and Atmospheric Physics,84(3-4):157−170. doi:10.1007/s00703−002−0579−1

Sai P J, Prasad M B, Vasavi S. 2022. A framework for sea breeze front detection from coastal regions of India using morphological snake algorithm [J]. ECS Transactions,107(1):585−597. doi:10.1149/10701.0585ecst

Suresh R. 2007. Observation of sea breeze front and its induced convection over Chennai in Southern Peninsular India using Doppler weather radar [J]. Pure and Applied Geophysics,164(8-9):1511−1525. doi:10.1007/s00024−007−0234−3

(责任编辑　张 文)