

易笑园,陈宏,张庆,等.渤海湾西岸一次局地极端短时强降水事件的成因分析[J].海洋气象学报,2024,44(3):1-13.  
YI Xiaoyuan, CHEN Hong, ZHANG Qing, et al. Causes of an extreme local short-time heavy precipitation event along the west coast of Bohai Bay[J]. Journal of Marine Meteorology, 2024, 44(3): 1-13. DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240529001. (in Chinese)

## 渤海湾西岸一次局地极端短时强降水事件的成因分析

易笑园<sup>1</sup>, 陈宏<sup>2</sup>, 张庆<sup>1</sup>, 孙晓磊<sup>3</sup>, 胡潮<sup>4</sup>, 刘一玮<sup>1</sup>, 胡田田<sup>3</sup>

(1.天津市气象台,天津 300074;2.天津市人工影响天气办公室,天津 300074;3.天津海洋中心气象台,天津 300074;4.天津市滨海新区气象局,天津 300457)

**摘要** 2021年9月4日早晨,渤海湾西岸的天津滨海新区出现短时强降水,过程累计降雨量达224.2 mm,最大小时雨强为110.9 mm·h<sup>-1</sup>,均打破当地建站以来的历史纪录。利用加密自动气象观测站、风廓线雷达、多普勒雷达等观测资料,结合欧洲中期天气预报中心ERA5再分析资料,分析该事件成因及其与海陆环境的关系,探讨对流系统新生、组织化机制以及水汽输送特征等。结果表明:(1)对流单体在海岸线海水一侧新生后西移登陆,经多次与后向新生对流单体合并加强,最终发展为具有中 $\gamma$ 尺度涡旋且位于线状中尺度对流系统前端的强降水系统。(2)对流单体新生地点与两条地面辐合线的相交点对应。一条南北向的风速辐合线位于海上,与水陆表面摩擦系数差异有关;另一条东西向的风向辐合线位于陆地,由东北残余冷空气与原有偏南风相遇而成。(3)由于清晨海面湿度比陆地大,湿空气被向岸偏东气流从渤海湾带到西岸,为对流系统的发生发展提供热力条件;而850 hPa持续存在暖性切变线,为多个对流系统线状组织排列提供了动力支持;值得关注的是,浅层残余弱冷空气在925 hPa造成明显的中尺度锋生。(4)次级垂直环流促进周围水汽汇集和垂直向上输送加强,而水汽垂直递减率的大小(水汽垂直辐合)对小时雨强有指示意义。分钟雨强很可能与中 $\gamma$ 尺度涡旋有内在联系。

**关键词** 极端强降水;向岸急流;触发维持;水汽垂直输送及递减率;中 $\gamma$ 尺度涡旋

中图分类号: P426.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2024)03-0001-13

DOI: 10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240529001

## Causes of an extreme local short-time heavy precipitation event along the west coast of Bohai Bay

YI Xiaoyuan<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>2</sup>, ZHANG Qing<sup>1</sup>, SUN Xiaolei<sup>3</sup>, HU Chao<sup>4</sup>,  
LIU Yiwei<sup>1</sup>, HU Tiantian<sup>3</sup>

(1. Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074, China; 2. Tianjin Weather Modification Office, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Central Observatory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074, China; 4. Binhai New Area Meteorological Office of Tianjin, Tianjin 300457, China)

**Abstract** A short-time heavy precipitation process occurred in Binhai New Area, Tianjin on the west coast of Bohai Bay in the morning of 4 September 2021, with the accumulated rainfall of 224.2 mm and

收稿日期: 2024-05-29; 修回日期: 2024-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41575049, 42375019); 天津市科技计划项目(22KPMRC00080); 天津市海洋气象重点实验室开放基金项目(2024TKLOM05)

第一作者简介: 易笑园,女,正高级工程师,主要从事灾害性天气预报预警技术研究, yixy123@sina.com。

the maximum hourly rainfall intensity of  $110.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , which both break the station's historical records since its foundation. Based on the observations of intensive automatic meteorological observing stations, wind profile radars and Doppler radars, as well as ERA5 data, the paper analyzes the causes of the event, its relationship with sea and land environment, convective initiation, organized mechanism, transfer of water vapor and so forth. The results are as follows. (1) The convective cell, born on the sea surface, moves westward to land, strengthens after merging with backward newborn convective cell, and finally develops into a heavy precipitation system with meso- $\gamma$ -scale rotation at the front end of a linear mesoscale convective system. (2) Convective cells are triggered at the intersection of two surface convergence lines. One south-north wind speed convergence line, located on the sea surface, is related to the smaller friction coefficient of water surface than land. The other east-west wind direction convergence line, located on the land, is formed by the residual northeasterly cold air and original southerly. (3) In the morning, the humidity on the sea surface is higher than that on the land, so the warm and wet air is carried from Bohai Bay to its west coast by the boundary layer's onshore easterly flow, which is a favorable thermal condition for the occurrence and development of the convective system near the coastline. At the same time, the persistent warm shear line at 850 hPa provides dynamic support for the convective system's linear organized arrangement. It should be noticed that the residual weak cold air triggers meso-scale frontogenesis at 925 hPa. (4) The secondary vertical circulation promotes the accumulation and upward transfer of surrounding water vapor, and the lapse rate of water vapor (vertical convergence of water vapor) has indicative significance for hourly rainfall intensity. The minute rainfall intensity is probably intrinsically connected with the meso- $\gamma$ -scale rotation.

**Keywords** extremely heavy precipitation; onshore jet; initiation and maintenance; vertical transfer of water vapor and its lapse rate; meso- $\gamma$ -scale rotation

## 引言

中国沿海地区是中尺度对流系统及短时强降水的高发地带<sup>[1-2]</sup>。短时强降水是一种强对流天气,它侧重强调降水强度,一般用1 h内降雨量(即小时雨强)或1 min内降雨量(即分钟雨强)来描述,小时雨强超过  $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 属于重大强对流天气<sup>[3]</sup>。短时强降水具有突发性强、历时短、影响范围小等特点,常引发城市内涝、暴洪、山体滑坡等次生灾害,严重威胁人民生命和财产安全。2017年5月7日凌晨,华南沿海广州遭遇极端短时强降水袭击,最大小时雨强达  $180 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ,分钟雨强达  $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,最大3 h和过程累计降雨量分别达 382.6 mm(破历史记录)和 453.0 mm,造成 8 600 余人受灾,直接经济损失达 890 多万元<sup>[4]</sup>。

中小尺度对流系统发生发展机理是强对流天气研究的重点和难点问题,尤其是小尺度结构特征以及精细物理过程等有待于深入研究。近年来,短时强降水被广泛关注<sup>[5-13]</sup>,沿海地区聚集众多大型港口和养殖基地,强降水与海岸线附近的气象环境、下垫面以及沿海地区地形地貌等有极其密切的联

系<sup>[8-12]</sup>。如华南沿海频繁发生的短时强降水与向岸低空急流以及海陆边界摩擦差异有高度关联<sup>[8]</sup>。Bai 等<sup>[9]</sup>统计认为华南沿海白天对流新生地集中在距海岸线 100 km 内的陆地上,夜间大多分布在海岸线附近和邻近山脉的近海地区。Du 等<sup>[10]</sup>指出双低空急流(包括低空急流和边界层急流)及其耦合对华南沿海触发对流系统起关键作用。同时,边界层急流与海岸地形相遇会增强辐合,从而促使对流系统发展加强,因此强降水事件时常发生在距海岸线附近几十公里的迎风区域中,这是向岸气流携带大量水汽,影响岸上水汽输送和动力、热力物理过程的原因。曾智琳等<sup>[11-12]</sup>认为加大的向岸西南风急流促使边界层垂直风速切变增强,水平涡度倾斜部分转化为垂直涡度并发展,同时,凹凸海岸线地形导致多条地面辐合线和多个小涡旋的出现,从而使局地上升运动加强。模拟研究<sup>[13-14]</sup>表明向岸风增大了边界层湿度,从而改变大气垂直温湿廓线和稳定度。不同于华南沿海,渤海湾西岸的向岸气流不是来自南海深厚的偏南风(或季风),而是偏东风。渤海是半封闭的浅海,海陆温差具有日变化,白天偏东气流是冷湿的,夜间却是暖湿的;来自渤海湾的湿气流及其与上游冷池

出流碰撞以及自身脉动辐合等,在渤海湾西岸强降水事件中起到重要的作用<sup>[15-17]</sup>。

近年来,随着新型探测设备的布设,“公里级、分钟级”精细化观测资料在揭示强对流天气精细结构及其物理过程中发挥了至关重要的作用,中尺度研究的视角逐渐从中 $\beta$ 尺度转向中 $\gamma$ 尺度,越来越多的研究发现极端强降水事件与水平尺度在2~20 km的中 $\gamma$ 尺度旋转(meso- $\gamma$ -scale rotation)有联系<sup>[18-25]</sup>。Nielsen等<sup>[21]</sup>指出,小时雨强超过75 mm·h<sup>-1</sup>的事件中,有50%与中 $\gamma$ 尺度旋转有关,旋转促进垂直速度加强和水汽聚集加剧,且旋转产生的动力加速度助力降雨效率的增加。一般具有中 $\gamma$ 尺度旋转特征的涡旋有中气旋(mesocyclone)和中涡旋(mesovortex),中气旋存在于对流层中层,其强烈的旋转是由水平涡度倾斜和周围风垂直切变引起的,具有中气旋的强降水(high precipitation, HP)超级单体是暴雨、冰雹、龙卷等恶劣天气的主要制造者<sup>[18-20,22]</sup>;而中涡旋存在于对流层低层及以下,是由于冷池出流边界产生的斜压水平涡度倾斜<sup>[22]</sup>或摩擦产生水平涡度倾斜而产生垂直涡度<sup>[12,23-24]</sup>。盛杰等<sup>[25]</sup>利用小波分析方法指出,分钟雨强时间序列上出现的波动峰值可能是由分钟级时间尺度的中 $\gamma$ 尺度对流系统造成的。

北方沿海的向岸气流结构、性质、环流背景与华南迥异,海岸线附近地区地形地貌相差甚远。目前针对渤海沿海强降水成因机理的研究较少,尤其是针对清晨或夜间的研究几乎还是空白。因此,有必要针对典型事件进行复盘,以探讨沿海地区中小尺度对流系统触发维持的机制及环境特点,厘清海陆下垫面、向岸急流和残余冷空气等的特殊作用,为提升环渤海沿岸强对流天气的预报预警能力提供借鉴和参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料介绍

图1是分析所用海洋站、位于滨海的塘沽风廓线雷达、沧州雷达(因当日天津塘沽雷达检修,未开机)的分布。由于加密自动气象观测站数量较多,约280多个,未在图中标出。为便于天气背景分析,选择当天业务所用实况天气图。欧洲中期天气预报中心ERA5资料(时间分辨率为1 h,空间分辨率为0.25°×0.25°)主要用于天气尺度背景、中尺度环境

条件、无观测时探空等分析。

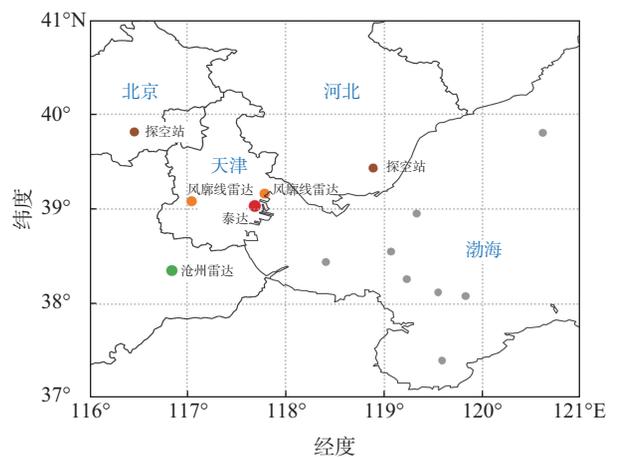
### 1.2 分析方法

根据文献<sup>[26]</sup>计算对流降水强度的简化公式,地面有效对流降水强度 $R_c$ 可近似写为

$$E\rho\int_{z_0}^z\frac{\partial qw}{\partial z}dz = E\rho\left(\int_{z_0}^z q\frac{\partial w}{\partial z}dz + \int_{z_0}^z w\frac{\partial q}{\partial z}dz\right) \quad (1)$$

$$\approx E\rho\sum qw。$$

由于对流降水过程气柱内水汽只有一部分降落到地面,另一部分在降水中被蒸发,因此引入有效凝结率 $E$ (无量纲),当对流层整层相对湿度越大,垂直风切变越小,雨滴越不容易蒸发,降水效率越高; $\rho$ 为大气密度,单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; $q$ 为比湿(无量纲),单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;  $w$ 为上升速度,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $z$ 为气柱高度,单位为 $\text{m}$ ;  $\sum qw$ 为各高度层垂直水汽输送量的总和。对于对流过程来说, $R_c$ 单位为 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,等同于 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ (常用 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )。由公式(1)知, $R_c$ 还取决于 $\int_{z_0}^z w\frac{\partial q}{\partial z}dz$ ,简化得到 $R_c \propto -w\frac{\partial q}{\partial z}$ ,即水汽垂直梯度( $\frac{\partial q}{\partial z}$ )和上升速度 $w$ 。



红色圆点—极端强降水区; 橘色圆点—风廓线雷达; 咖色圆点—探空站; 绿色圆点—沧州雷达; 灰色圆点—沿海及渤海湾内海洋站。

图1 极端强降水区和所用观测资料站点分布  
Fig.1 Distribution of extremely heavy rainfall area and stations of observation data used

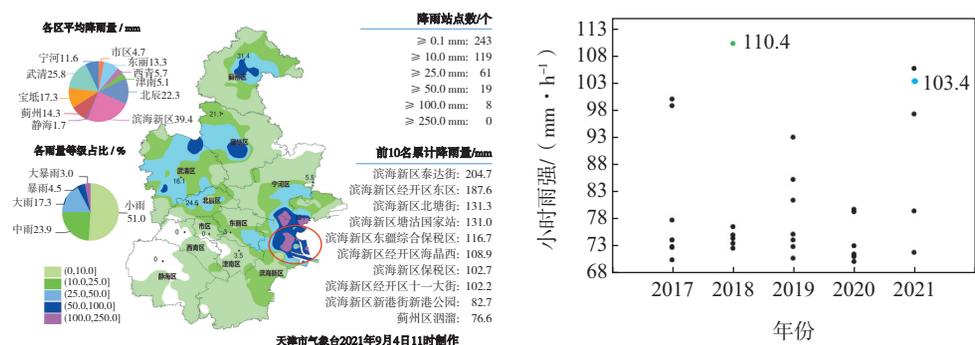
## 2 实况和降雨极端性分析

2021年9月4日早晨至中午,位于渤海湾西岸的天津滨海新区突发强降水(以下简称“9·4”过程),最大小时雨强和分钟雨强分别达110.9 mm·h<sup>-1</sup>和

$4.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 4日05—11时, 6 h累计降雨量达224.2 mm, 打破当地有气象纪录以来极值, 造成严重城市内涝, 一名人员遇难。由过程累计降雨量分布(图2a)可见, 强降水落区紧邻海岸线, 降水量超过100.0 mm的站有8个, 其中红圈内含泵站和泰达街站, 对应两站07:00—08:00的整点小时雨强分别达 $97.3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $103.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 分钟雨强峰值分别出现在07:21和07:47, 为 $4.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $3.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ (图2c)。可见, 分钟雨强峰值出现在泵站, 小时雨强

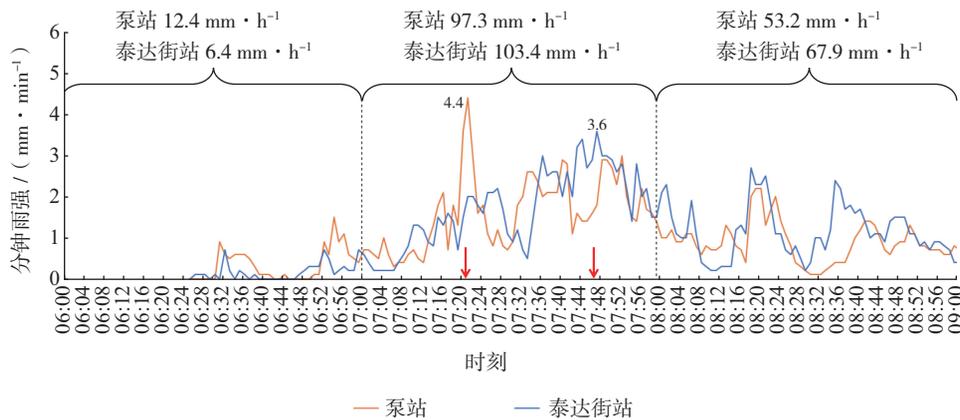
峰值出现在泰达街站, 影响分钟雨强和小时雨强的原因会在第4节和第6节进行分析。

为说明“9·4”过程小时雨强的极端性, 通过统计2017—2021年5年间(图2b), 天津各自动气象观测站共发生30次整点小时雨强超过 $70.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水事件, 此次整点小时雨强达 $103.4 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 位列第二位, 且主要降水集中在07:10—08:10, 期间滚动小时雨强更强, 达 $110.9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。以上统计表明, 该过程的小时雨强具有极端性。



(a) 2021年9月4日05—11时天津累计降雨量分布

(b) 2017—2021年天津各站整点小时雨强大于 $70.0 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水事件



(c) 2021年9月4日06—09时天津滨海新区泵站和泰达街站小时雨强和分钟雨强变化

a中色阶—降雨量, 单位为mm, 红色圆圈—极端强降水区; b中彩色点对应数字—小时雨强, 单位为 $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ; c中红色箭头—分钟雨强峰值对应时刻。

图2 2021年9月4日天津累计降雨量、小时雨强和分钟雨强及2017—2021年天津各站整点雨强大于 $70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水事件分布

Fig.2 Accumulated precipitation and hourly/minute rainfall intensity in Tianjin on 4 September 2021 and distribution of precipitation events of rainfall intensity higher than  $70 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  at each meteorological station in Tianjin from 2017 to 2021

### 3 环境背景分析

2021年9月4日08时(研究时段为05—11时), 500 hPa, 天津及渤海位于冷涡底部平直环流

中, 河北东北部和辽宁地区为西北气流(图3a), 山东半岛有浓密云系; 850 hPa, 河南有低压倒槽, 天津及渤海位于倒槽外围宽广的东南气流带中, 风速为 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右(图3b)。由地面形势场(图3c)来看,

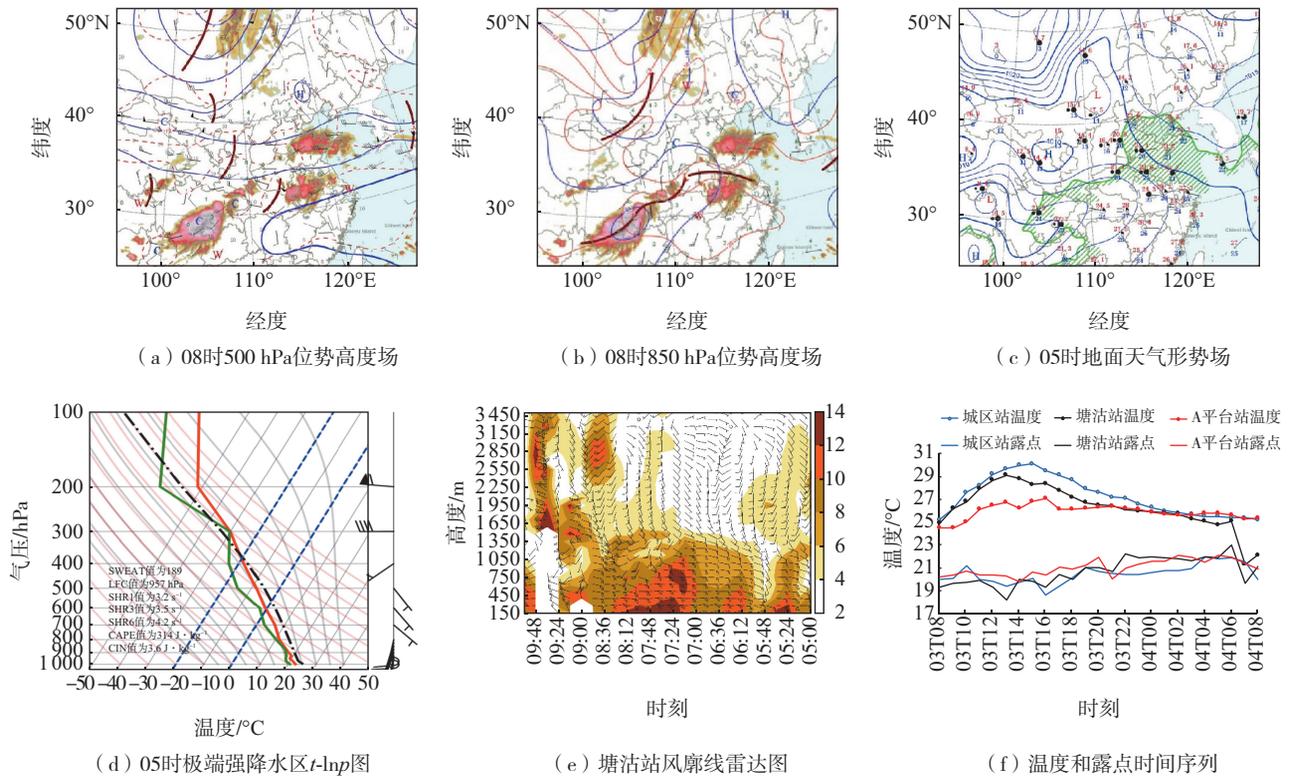
同样存在倒槽,与850 hPa 低压涡旋相对应,此时山东和河南南部有大片降雨区,天津及渤海被东南气流控制,从降水发生前的4日02时倒槽外围等压线位置(图略)对比看,东北方向有高压系统向西南方移动,地面东北风加大,此股东北气流是前一天残余冷空气形成的。

由降水发生前的4日05时极端强降雨区探空(图3d)看,强降雨前对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)为 $314 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,对流抑制能(convective inhibition, CIN)为 $3.6 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,强天气威胁(Severe WEATHER Threat, SWEAT)指数为189,自由对流高度(level of free convection, LFC)为957 hPa,0~6 km 风切变为 $4.2 \text{ s}^{-1}$ 。

由位于渤海湾西岸沿海的塘沽站风廓线雷达观测资料(图3e)看,06:12,塘沽站低层500 m 以下偏东风持续加大,07:00 前后,500~1 000 m 偏东风风

速增大,且偏东风大值区向上延伸。07:24,边界层内750 m 附近和近地层有两个急流中心,偏东风风速均大于 $10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,最大风速达 $12.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。07:00—08:00,向岸偏东气流加强增厚。

为对比海陆环境,选取位于海面的A平台站(站号54646)、位于海岸线的塘沽站和距海岸线约50 km 的城区站,分别代表海面、岸边和内陆3种下垫面的气温、湿度的逐时变化(图3f)。白天(3日08:00—20:00),气温由陆地站至海面站呈现逐渐降低的分布特征,且陆地城区站和塘沽站升温最快,而反映湿度的露点温度变化幅度小。夜间(3日21:00—4日05:00),城区站、塘沽站和A平台站的气温、露点变化均不大。05时,A平台的温度、露点均最高,说明对流系统出现之前海面相对于渤海湾西岸来说,湿度大、温度高,自海面吹向陆地的向岸东风是一支暖而湿的气流。



a、b、c、d、e 中风矢—风场, 风速单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; a、b 中蓝色等值线—位势高度, 单位为dagpm, 红色等值线—温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$ , 色阶—红外云图; c 中蓝色等值线—等压线, 单位为hPa, 绿色斜线—等比湿线, 其栅格化一侧为比湿达到 $15 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域; d 中绿色实线—环境露点, 红色实线—环境温度, 黑色虚线—气块轨迹, 蓝色虚线— $0^{\circ}\text{C}$ 和 $-20^{\circ}\text{C}$ 等温线; e 中色阶—风速, 单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图3 2021年9月4日位势高度场、地面天气形势场、极端强降雨区 t-lnp 图、塘沽站风廓线雷达图及3日08时—4日08时温度和露点时间序列

Fig.3 Geopotential height, surface synoptic chart, t-lnp diagram in extremely heavy precipitation area and wind profile radar map at Tanggu station on 4 September; time series of temperature and dew point from 08:00 BJT 3 to 08:00 BJT 4 September 2021

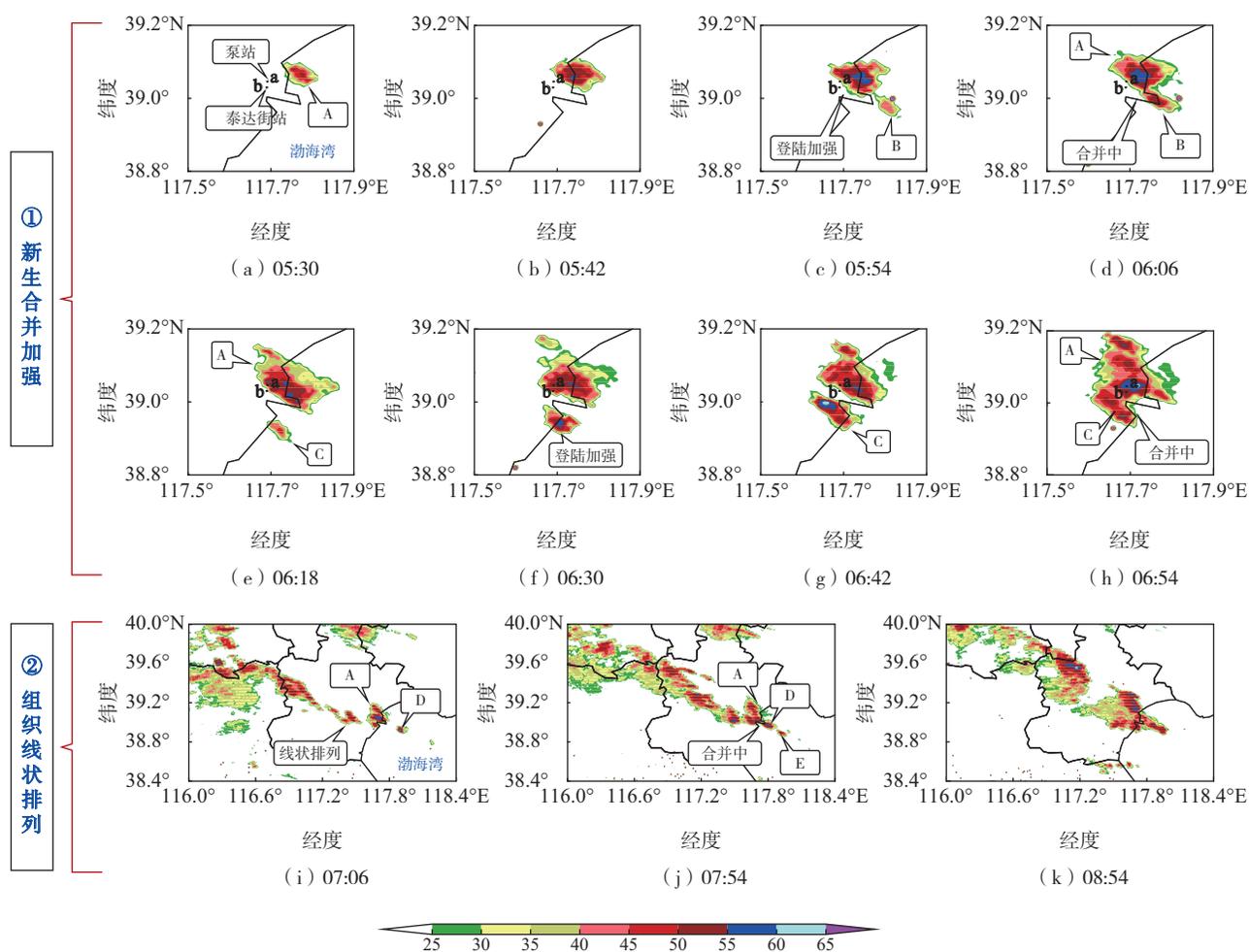
#### 4 对流系统的雷达回波演变

按照雷达组合反射率变化特征将对流系统演变过程分为两个阶段:第一阶段为回波单体新生及后向新单体不断生成、合并加强阶段(05:30—06:54,图4a—h),从中可见对流单体最初被触发的地点,多次合并发展为孤立强回波过程。第二阶段为强单体被组织为线状排列阶段(06:54—09:48,图4i—k)。

第一阶段:05:30,有一对流单体 A 在海岸线海水一侧新生(图4a)、发展(图4b),回波强度增强到 50 dBZ,随后继续加强并向西移动。05:54(图4c),回波单体向西登陆且加强,中心强度达到 55 dBZ,同时,其移动方向后侧(东南侧)有新生单体 B 生成。06:06(图4d),B 与 A 相接并开始合并,12 min 后,在回波南侧的海面中,再次有新生回波 C 生成

发展,此时原主体 A 强度略有减弱(图4e)。06:30(图4f),C 单体登陆并加强,强度达到 55 dBZ。06:42(图4g),C 与 A 接近。06:54(图4h),A 与 C 合并后中心强度增至 60 dBZ。对流系统演变中,后向传播(即在对流系统移动后侧不断有对流新生)易形成“列车效应”或多个对流系统合并使其加强,延长生命史,从而造成强降水<sup>[27-28]</sup>。

第二阶段:A 位置稳定少动,但海面上不断有新生回波(D、E)生成,并入 A 中(图4i、j),再次表现出后向发展特征。此时陆地上,多个强回波单体生成并沿东西向直线排列。海岸线附近的 A 回波位于线状中尺度系统对流串的东南端,强度为 50~55 dBZ。这一阶段降水强度最强、最集中,累计降水量达 82.7 mm,分钟雨量超过 1 mm 的时段集中在 07:10—07:48(图2c)。



色阶—雷达反射率因子,单位为dBZ; a、b、c、d、e、f、g、h—新生合并加强阶段,字母 a、b—泵站、泰达街站; i、j、k—线状组织维持阶段。

图4 2021年9月4日05:30—08:54沧州雷达回波组合反射率因子演变

Fig.4 Evolution of composite reflectivity from Cangzhou radar from 05:30 BJT to 08:54 BJT 4 September 2021

Zeng 等<sup>[23]</sup>利用垂直回波结构演变发现,强回波核(界定强度为 50 dBZ)发展后下降到地面时刻,即产生  $4.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  的雨强峰值,说明分钟雨强与反射率核心(反射率超过 50 dBZ)高度及其变化有很好的相关性。为了探究此次强回波核心高度及其变化与分钟雨强的对应关系,绘制垂直回波演变图(图 5a—b),由 55 dBZ 强回波核心维持时间看,泵站(06:54—07:30)和泰达街站(07:18—07:54)的 55 dBZ 以上回波核垂直伸展高度达 5 km,说明此时回波发展强盛,且维持了 30 min 左右,地面监测到分钟雨强分别达到  $4.4 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  和  $3.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,对应强回波核及地时刻(图 5a—b 中箭头所指),正好与泵站分钟雨强峰值出现时刻(07:21)、泰达街站分钟雨强峰值出现时刻(07:47)对应,与参考文献[23]结论一致。

由 07:06—07:18 泵站(图 5c—e)和 07:36—07:48 泰达街站(图 5f—h)径向速度看,均有正负速度对存在,泵站的正速度为  $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,泰达街站正速度为  $1 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,二者负速度均为  $5 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,故存在中  $\gamma$  尺度旋转,但未达到中气旋标准<sup>[29]</sup>。由中  $\gamma$  尺度涡旋类型和强度看,二者都是气旋性速度对,泵站旋转速度比泰达街站略大,分钟雨强峰值也大于泰达街站。其间是否存在内在联系,还需要大

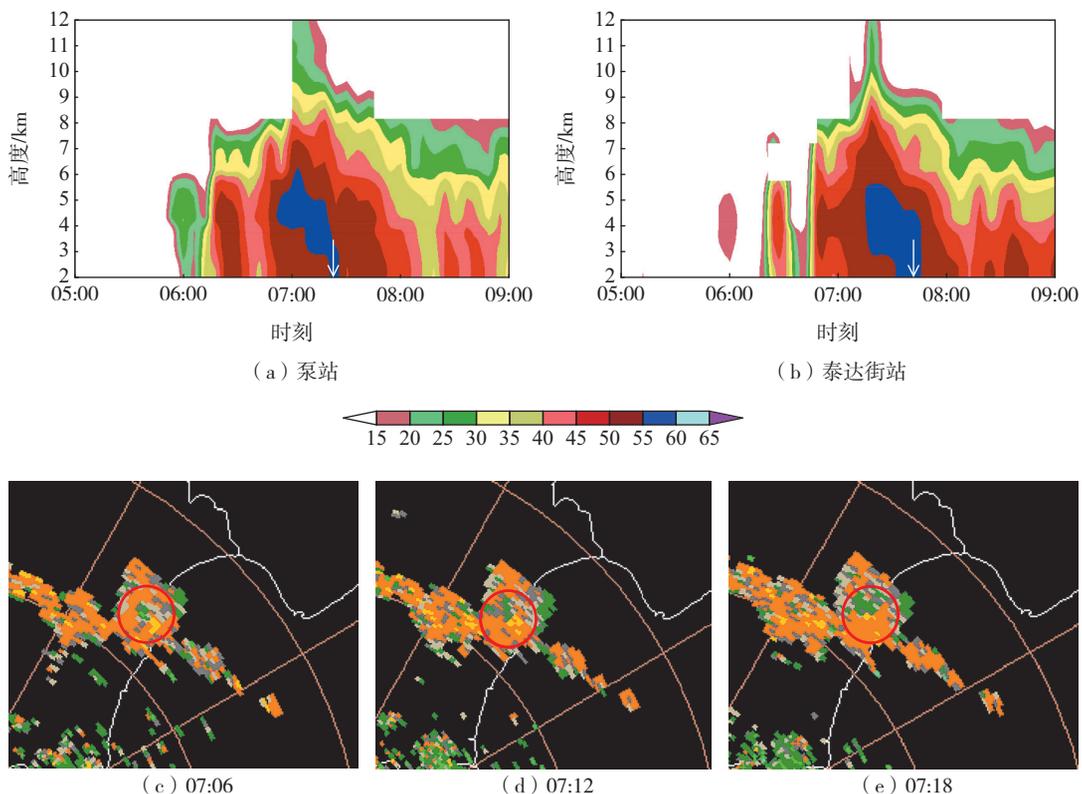
量个例佐证。

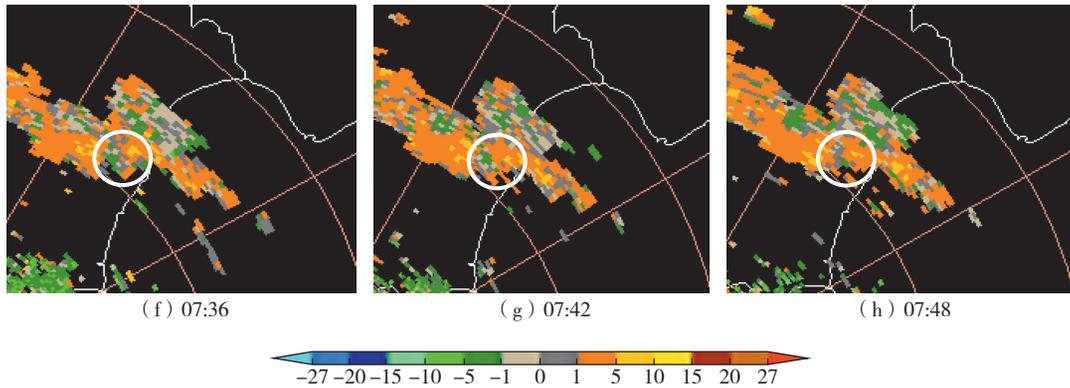
## 5 对流的触发与组织

为了进一步分析对流系统新生地点和发展维持的原因,用地面加密自动气象观测站实况资料,计算地面假相当位温、散度、水汽通量等物理量;结合 ERA5 资料,计算边界层和对流层低层锋生函数及散度。

### 5.1 地面热力和动力环境条件

假相当位温( $\theta_{se}$ )大值区代表高能量区,是对流系统发展有利的热力环境。04—06 时(图 6a、b),渤海湾是高能量区,海面到天津地区始终有一条高  $\theta_{se}$  带(色阶),且覆盖极端强降水区。向岸东南气流由渤海向西岸汇集,形成渐近线(辐合带),为对流系统触发发展提供热力和动力支持。图 6c 是 9 月 4 日 02—11 时极端降水区附近地面散度,可见地面散度从 03 时开始出现负值,表明此时此位置存在上升辐合的动力条件,且强度逐渐增大,07 时地面辐合达到峰值( $-1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ),地面辐合早于降水两个多小时出现,且辐合最大值出现后,小时雨强达到最大值。因此,地面散度正负及强度变化,对对流发生及降水加强具有预警意义。

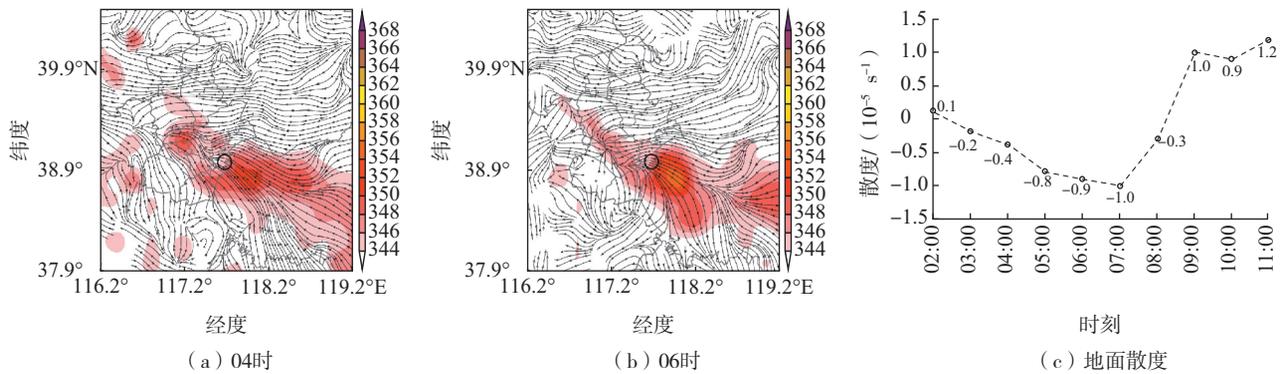




a、b中箭头一分钟雨强最大时刻，色阶—雷达反射率因子，单位为dBZ；c、d、e、f、g、h中圆圈—正负速度对，色阶—径向速度，单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图5 2021年9月4日05:00—09:00泵站和泰达街站雷达回波垂直分布随时间变化和沧州多普勒雷达 $1.5^\circ$ 仰角径向速度图

Fig.5 Vertical distribution of radar echoes from radars at Bengzhan station and Taidajie station from 05:00 BJT to 09:00 BJT 4 September 2021 and radial velocity at  $1.5^\circ$  elevation from Cangzhou Doppler radar



a、b中色阶—假相当位温，单位为K，黑色圆圈—极端强降水区，箭头线—风场。

图6 2021年9月4日假相当位温的空间分布及极端强降水区附近地面散度的时间序列

Fig.6 Spatial distribution of pseudo-equivalent potential temperature and time series of surface divergence on 4 September 2021

## 5.2 对流单体的新生地点

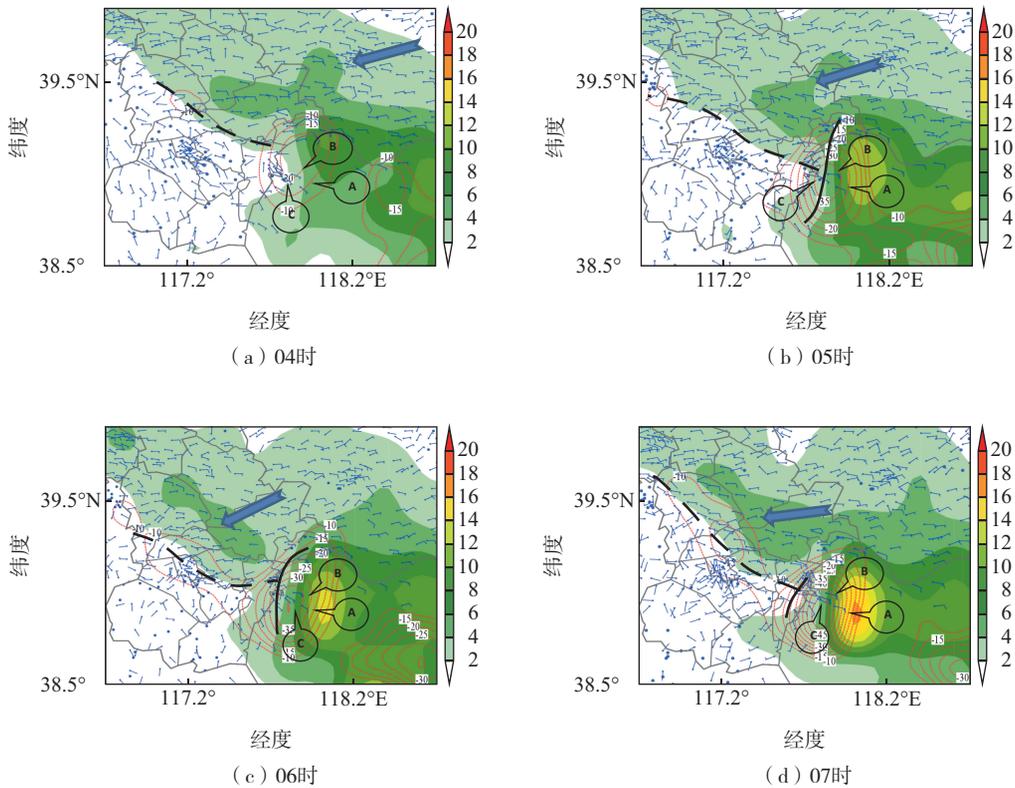
对流单体 A 新生地点位于海岸线以东的海水下垫面,4日04—07时(图7),地面始终存在弱东北风,风速约为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,自渤海湾北岸吹向西南,这股气流与图3c中反映的东北风一致,是前一天东移南下冷空气的残余势力。一致的东北风与南侧风形成西北—东南走向的风向辐合线,由地面水汽通量分布看,此时东北风携带着湿空气。

4日04时(图7a),海岸线附近A、B、C三站均有向岸东风气流,且风速均较小,仅为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;05时(图7b),向岸东风有所加大,但越靠近海岸线,风速越小,海水中A、B站风速分别为 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而陆地上的C站风速仍为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这

可能是水面摩擦系数小于陆地的原因。一条南北走向的风速辐合线沿海岸线形成,随着向岸风进一步加大,风速辐合线向陆地推进,与陆地上西北—东南走向的风向辐合线相遇。在相交点位置,05:18,对流单体 A 生成(图略);直至06时(图7c),风速辐合线登陆,交汇点靠近海岸线,此时C站风速也增大到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与A、B站风速一致。07时(图7d),西移登陆的南北向风速辐合线维持少动,其与东西向风向辐合线依然相交,对应交点上单体 A 强度增至60 dBZ(图4i、j)。水汽通量散度表明,多个对流单体发生发展的地点始终是地面水汽通量大的辐合区,04、05、06、07时,极端强降水区地面水汽通量散度分别为 $-20 \times 10^{-5}$ 、

$-30 \times 10^{-5}$ 、 $-30 \times 10^{-5}$ 、 $-35 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 这表明水汽随着向岸偏东风向相交点汇集。总之,两条辐合线交汇点是气流辐合、上升运动较强

区,交汇点海面一侧是向岸气流汇集、高能量中心和水汽输送旺盛带,因此,这一区域不断有多个对流单体(A—E,图4)新生和发展。



色阶—水汽通量,单位为 $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ;红色虚线—水汽通量散度,单位为 $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;  
风矢—风场,风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;A、B、C—海上观测站;黑色实线和虚线—地面辐合线位置。

图7 2021年9月4日04—07时地面水汽通量及其散度分布

Fig.7 Distribution of surface vapor flux and its divergence from 04:00 BJT to 07:00 BJT 4 September 2021

### 5.3 多个回波单体线状组织排列机制

众多对流单体排列组织维持,仅靠有利的地面条件是不够的,因此分析925~700 hPa各层的动力条件和锋生作用。

4日05—08时,850 hPa,河北中部至渤海湾海岸线存在一条西南风与东南风的切变线,切变线持续且略向北移动,其东端位于极端强降水区上空,南侧偏南风维持在 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,北侧东南气流加强到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。05(图略)—08时,切变线呈东西向稳定维持在天津塘沽—北辰—武清一线,08时(图8a)切变线略北抬。同时,负散度区与切变线配合较好,负散度中心维持在 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,切变线穿过负散度中心且在天津中部维持,为线状排列提供了持久的动力支持。

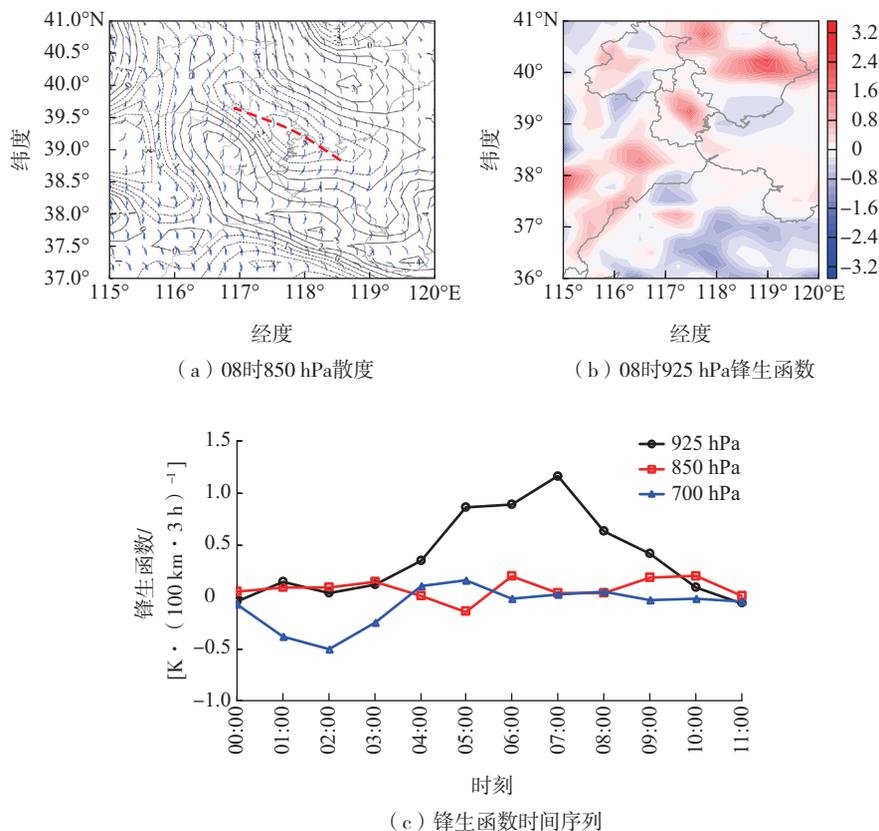
锋生描述冷暖气团相互作用及动态变化,锋生

函数是量化锋生锋消的物理量参数。进一步计算锋生函数水平分布,发现925 hPa上05(图略)—08时(图8b)天津地区明显存在中尺度锋区,且显著高于850 hPa和700 hPa(图略)。05—08时,锋生函数越来越强,位置略北推。这表明冷暖气流的汇合仅在边界层存在,浅薄且高度低,锋生区与850 hPa切变线位置相对应。

图8b表明,冷暖空气相对势力增强,锋生加大,925 hPa锋生函数由05时的 $0.86 \text{ K} \cdot (100 \text{ km} \cdot 3 \text{ h})^{-1}$ 增大为07时的峰值 $1.16 \text{ K} \cdot (100 \text{ km} \cdot 3 \text{ h})^{-1}$ ,而其他层锋生函数几乎接近0。从东北路南下的弱冷空气厚度浅薄,仅限于边界层,而来自南方的暖气流厚度达到850 hPa以上。图8c是4日00—11时锋生函数随时间变化,850 hPa和700 hPa在04—11时锋生函数几乎为0,而在925 hPa为正值,07时达到最

大值,结合风廓线雷达观测(图3e),说明这段时间中尺度锋区以北的东北气流与以南的偏南气流都在加强,而冷暖空气的对峙仅在925 hPa以下高度内。

锋生函数为正的区,利于上升气流发展,锋生作用为第一阶段对流系统触发和第二阶段排列组织化起到促进作用。



a中等值线—散度,单位为 $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,风矢—风场,风速单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,红色虚线—切变线;b中色阶—锋生函数,单位为 $\text{K} \cdot (100 \text{ km} \cdot 3 \text{ h})^{-1}$ 。

图8 2021年9月4日850 hPa散度和925 hPa锋生函数及极端强降水区上空各层锋生函数随时间变化

Fig.8 Distribution of 850-hPa divergence and 925-hPa function of frontogenesis at 08:00 BJT and time series of 925/850/700-hPa function of frontogenesis over extremely heavy rainfall area from 00:00 BJT to 11:00 BJT 4 September 2021

## 6 水汽垂直输送及递减率

“9·4”过程的降水量、雨强均破历史纪录,同一一般短时强降水相比,其水汽输送应具特殊性。短时强降水和暴雨都与水平方向的水汽汇集相联系,而降水强度更取决于水汽垂直梯度和上升速度<sup>[26]</sup>。

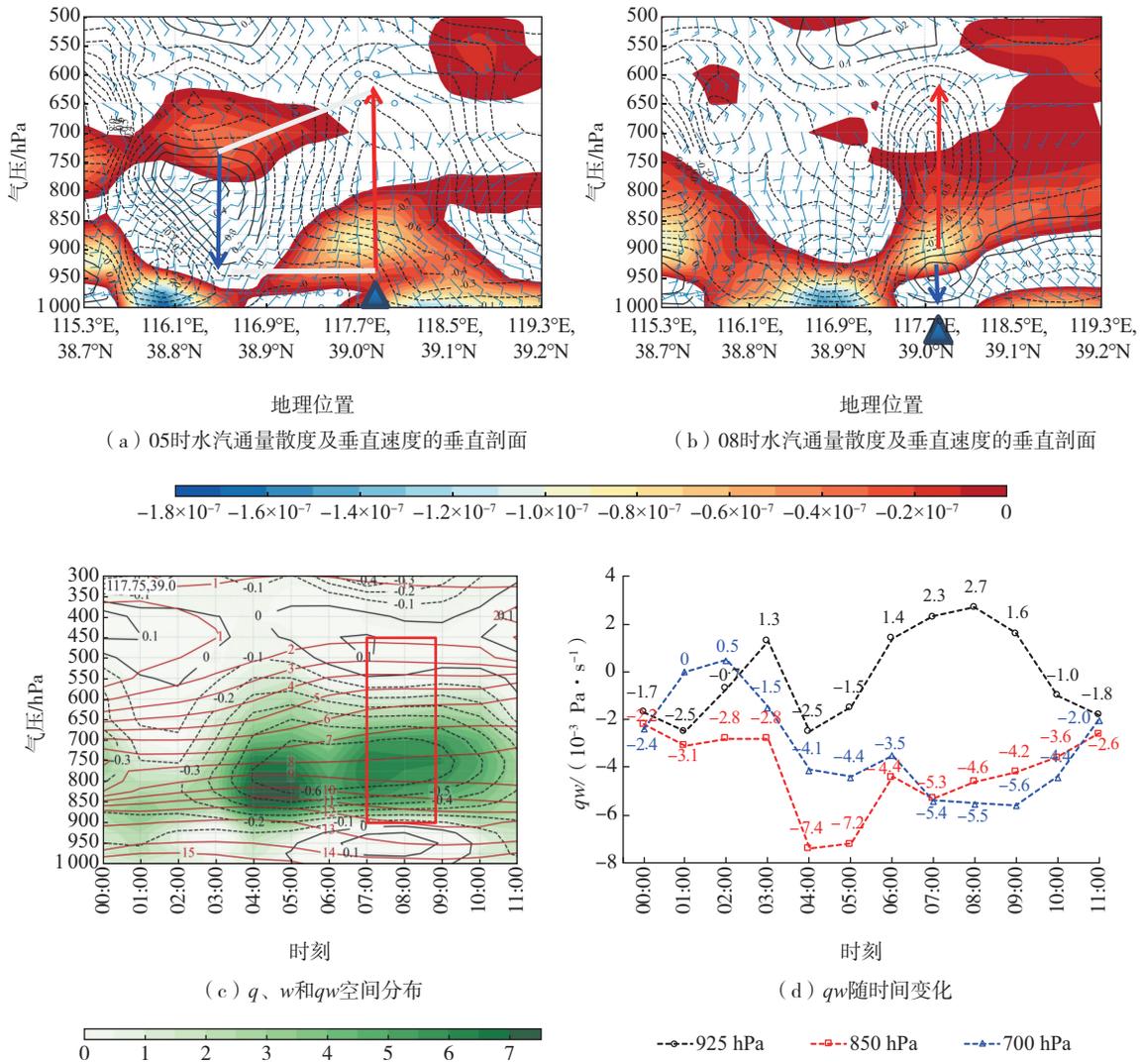
4日05时(图9a),强降水还未出现,在极端强降水区上空,垂直速度较大,825~750 hPa有垂直上升速度强值中心,为 $-0.7 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ (负值为上升运动);同时在西侧 $116.5^\circ \text{E}$ 、 $38.85^\circ \text{N}$ 附近,存在垂直下沉速度大值中心,为 $0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。下沉气流的上、下边界分别为700 hPa和950 hPa(以垂直速度为 $0 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 界定)。下沉气流与上升气流之间的区域,700 hPa为东南气

流,存在偏东气流分量;950 hPa为西南气流,存在偏西气流分量。偏西气流分量—极端强降水区上升气流—偏东气流分量—西侧下沉气流正好形成封闭的垂直次级环流圈,这对上升运动的加强和持久起关键作用。925 hPa附近存在一个水汽通量辐合中心,水汽由西南气流提供,输送的水汽厚度为975~800 hPa;同时,975 hPa以下,水汽随向岸偏东风由渤海湾向陆地输送,输送的水汽厚度为地面至950 hPa。随着06时(图略)两个中心合并,西南和东南两支通道将大量水汽汇集在极端降水区上空。

4日08时(图9b),垂直上升速度大值中心抬升至750~700 hPa,上升运动的下边界由05时地面抬升至900 hPa,此时900 hPa以下为下沉运动,中

心强度为  $0.3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,这是降雨在边界层造成拖曳下沉气流。07—08时,极端强降水区内泵站和泰达街站的降雨量最大,此时仅一个水汽通量辐合中心,高度在 900 hPa 附近,大量水汽汇聚在 950~700 hPa。与区域大暴雨相比,“9·4”过程的水平通量辐合强度值小 2 个量级。那么,垂直向上的水汽输送是否对雨量和雨强有某种指示意义?通过简化定量计算水汽的垂直输送及比湿垂直递减率(比湿随高度的变化),找出影响降雨强度的关键因子。

图 9c 是 4 日 00—11 时比湿( $q$ )及其与垂直速度( $w$ )的乘积  $qw$  随高度的变化, $qw$  大值区集中在 925~650 hPa。图 9d 计算了 07 时和 08 时 925、850、700 hPa 高度  $qw$  值(负值表示向上水汽输送)逐时变化,分别为  $2.3\times 10^{-3}$ 、 $-5.3\times 10^{-3}$ 、 $-5.4\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $2.7\times 10^{-3}$ 、 $-4.6\times 10^{-3}$ 、 $-5.5\times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,700 hPa 的  $qw$  绝对值最大,表明小时雨强与 850、700 hPa 的水汽垂直输送效率关系密切,特别是 700 hPa 垂直水汽输送,对小时雨强的指示性最强。



a、b中色阶—水汽通量散度,单位为 $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,风矢—风场,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,等值线—垂直速度,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,蓝色三角—极端强降水区,红、蓝箭头—上升、下沉气流;c中色阶— $qw$ ,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,红色实等值线—比湿,单位为 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,黑色等值线—垂直速度,单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ ,红框—降水最强时段。

图 9 2021 年 9 月 4 日 05 时和 08 时水汽通量散度、垂直速度的垂直剖面 and  $qw$  空间分布及其时间变化

Fig.9 Vertical section of vapor flux divergence/vertical velocity at 05:00/08:00 BJT 4 September; spatial distribution and temporal variation of  $qw$

900 hPa 高度处的比湿为  $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 450 hPa 高度处的比湿为  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 900 hPa 和 450 hPa 的高度差为 450 hPa, 比湿差为  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比湿随高度的变率为每百帕降低  $0.22 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。对比北京“6·23”强降水过程(雨强为  $128 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )<sup>[18,26]</sup>, 比湿随高度的变率为每百帕降低  $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 比湿在垂直方向上变率略小。该算法只是粗略推断, 还需大量实例来佐证。

## 7 物理过程概念模型

“9·4”极端强降水过程中, 空间风场配置有地面向岸偏东风气流、边界层内弱东北冷空气、850 hPa 东南风与偏南风形成的切变线、上升气流与中  $\gamma$  尺度涡旋等多尺度气流共同作用。渤海湾海面提供了利于对流发展的暖湿环境, 边界层水汽随向岸偏东风由海面向陆地输送, 对流层低层水汽来自偏南气流, 两支水汽通道将大量水汽汇集在极端降水区上空。对流单体新生位置对应两条地面辐合线的交点, 925 hPa 存在较明显的浅层中尺度锋生, 在对流层低层存在稳定少动的切变线, 为众多对流系统被组织排列为线状提供热力和动力支持(图 10)。

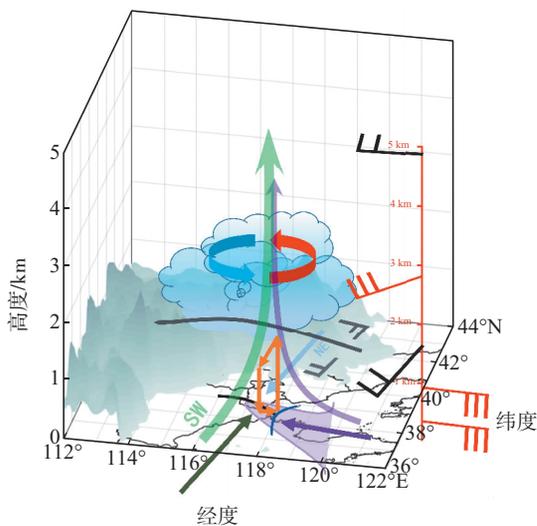


图 10 “9·4”极端短时强降水事件动力和热力配置的物理概念模型

Fig.10 Physical conceptual model of dynamic and thermal configuration of the extreme short-time heavy precipitation along the coast of Bohai Bay on 4 September

## 8 小结

利用加密自动气象观测站、风廓线雷达、多普勒雷达、探空等观测资料和 ERA5 资料, 分析“9·4”渤

海湾畔天津滨海新区出现的极端短时强降水事件的成因及其与海陆环境的关系, 探讨北方海岸线附近中小尺度对流系统触发维持机制以及水汽在水平、垂直方向的输送特征等。得到以下结果:

(1) “9·4”事件发生在冷空气过后倒槽外围气流影响的弱天气背景下, 尚存残余弱冷空气自东北路径南下, 影响渤海及其沿岸地区, 清晨海面湿度较大, 海陆温差较午后小, 向岸边界层东风气流(加强为急流)将海上暖湿空气带到陆地。

(2) 对流单体在海岸线海水一侧新生后西移登陆, 其移动方后侧不断有对流单体新生, 经多次合并加强为强降水系统, 其内部有中  $\gamma$  尺度旋转, 旋转促进垂直速度加强和水汽聚集加剧, 且旋转产生的动力加速度助力降雨效率的增加。

(3) 对流单体被触发位置对应两条地面辐合线的相交处。一条南北向风速辐合线位于海面, 其形成与水陆表面摩擦系数存在差异有关; 另一条东西向风向辐合线位于陆地, 是由残余冷空气形成的东北风与原有风相遇而成的。清晨边界层向岸东风加强为急流, 使切变线加强且稳定少动, 同时在边界层内残余的湿冷空气与原有干暖空气形成弱的浅层中尺度锋生, 为对流系统发生发展、众多对流系统组织排列为线状提供动力和热力支持。

(4) 次级垂直环流的存在促进了周围水汽汇集(水汽通量负散度大)及垂直向上输送, 而水汽垂直输送及比湿垂直递减率的大小(或水汽在垂直向的辐合强弱)对极端小时雨强有指示意义。分钟雨强峰值出现时刻对应强回波核心及落地时刻, 其强度大小很可能与中  $\gamma$  尺度涡旋的存在及强度有内在联系。

总之, “分钟级”和“公里级”高分辨率资料的运用是深入研究中小尺度天气成因的关键, 此文虽为个案研究, 但对提高沿海地区短时强降水机理的认识有一定的借鉴和参考意义。

## 参考文献:

- [1] 郑永光, 陈炯, 朱佩君. 中国及周边地区夏季中尺度对流系统分布及其日变化特征[J]. 科学通报, 2008, 53(4): 471-481.
- [2] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析

- [J].气象学报,2013,71(3):367-382.
- [3] 郑永光,周康辉,盛杰,等.强对流天气监测预报预警技术进展[J].应用气象学报,2015,26(6):641-657.
- [4] 田付友,郑永光,张小玲,等.2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J].气象,2018,44(4):469-484.
- [5] 吴梦雯,罗亚丽.中国极端小时降水2010—2019年研究进展[J].暴雨灾害,2019,38(5):502-514.
- [6] 赵海军,潘玲,毛子卿.山东省持续性短时强降水过程物理量特征分析[J].海洋气象学报,2023,43(1):63-74.
- [7] 王文波,高晓梅,杨萌,等.一次局地短时强降水的成因和预报误差分析[J].海洋气象学报,2019,39(1):142-150.
- [8] WANG H, LUO Y L, JOU B J D. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event during SCMPREX: observational analysis [J]. *J Geophys Res: Atmos*, 2014, 119(23):13206-13232.
- [9] BAI L Q, CHEN G X, HUANG L. Convection initiation in monsoon coastal areas (South China) [J]. *Geophys Res Lett*,2020,47(11):e2020GL087035.
- [10] DU Y, CHEN G X. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part II: convection initiation[J]. *Mon Wea Rev*,2019,147(2):543-565.
- [11] 曾智琳,湛芸,朱克云.2017年6月一次华南沿海强降水的对流性特征及热动力机制研究[J].大气科学,2019,43(6):1295-1312.
- [12] 曾智琳,湛芸,王东海.2018年8月华南超历史极值降水事件的观测分析与机理研究[J].大气科学,2020,44(4):695-715.
- [13] 鲁蓉,孙建华,傅慎明.近海水汽初值和对流影响一次华南前汛期沿海强降水对流系统发展过程的机理研究[J].大气科学,2018,42(1):1-15.
- [14] 孙建华,郑淋淋,赵思雄.水汽含量对飊线组织结构和强度影响的数值试验[J].大气科学,2014,38(4):742-755.
- [15] 易笑园,李泽椿,孙晓磊,等.渤海西岸暴雨中尺度对流系统的结构及成因[J].应用气象学报,2011,22(1):23-34.
- [16] 陶局,赵海坤,易笑园,等.基于 RMAPS 的一次局地强降水过程成因分析[J].气象科技,2019,47(2):299-311.
- [17] 尉英华,陈宏,何群英,等.渤海西岸偏东风对天津局地大暴雨的影响分析[J].气象,2019,45(1):61-72.
- [18] 张文龙,崔晓鹏,黄荣,等.北京“623”大暴雨的强降水超级单体特征和成因研究[J].大气科学,2019,43(5):1171-1190.
- [19] 靳振华,易笑园,孙晓磊,等.天津沿海一次强降水超级单体环境条件及结构分析[J].暴雨灾害,2019,38(6):606-614.
- [20] 胡鹏,焦洋,高帆.鲁中地区一次超级单体风暴的雷达观测分析[J].海洋气象学报,2019,39(2):134-142.
- [21] NIELSEN E R, SCHUMACHER R S. Observations of extreme short-term precipitation associated with supercells and mesovortices [J]. *Mon Wea Rev*, 2020, 148(1):159-182.
- [22] ROTUNNO R, KLEMP J. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms [J]. *J Atmos Sci*, 1985,42(3):271-292.
- [23] ZENG Z L, WANG D H. On the local rain-rate extreme associated with a mesovortex over South China: observational structures, characteristics, and evolution [J]. *Mon Wea Rev*,2022,150(5):1075-1096.
- [24] ZHANG Q Y, LUO Y L, TANG Y, et al. Cause-effect relationship between meso- $\gamma$ -scale rotation and extreme short-term precipitation: observational analyses at minute and sub-kilometer scales [J]. *J Meteor Res*, 2022, 36(4):539-552.
- [25] 盛杰,张小雯,孙军,等.三种不同天气系统强降水过程中分钟雨量的对比分析[J].气象,2012,38(10):1161-1169.
- [26] 孙继松.短时强降水和暴雨的区别与联系[J].暴雨灾害,2017,36(6):498-506.
- [27] SCHUMACHER R S, JOHNSON R H. Quasi-stationary, extreme-rain-producing convective systems associated with midlevel cyclonic circulations[J]. *Wea Forecasting*, 2009,24(2):555-574.
- [28] 侯淑梅,俞小鼎,张少林,等.山东中西部后向发展雷暴初步研究[J].气象学报,2015,73(5):819-836.
- [29] 俞小鼎.多普勒天气雷达原理与业务应用[M].北京:气象出版社,2006.