

## 江苏沿海“7.26”飊线大风过程诊断模拟分析

庆涛<sup>1,2</sup>, 李泽宇<sup>3\*</sup>, 李超<sup>3</sup>, 史达伟<sup>4</sup>

(1. 南京市江宁区气象局, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省气象信息中心, 江苏 南京 210019; 3. 江苏省气象台, 江苏 南京 210008; 4. 连云港市气象局, 江苏 连云港 222006)

**摘要:** 利用加密自动观测资料、EAR5  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 再分析资料、常州和盐城SA天气雷达资料等和基于三维变分技术(3DVAR)的多雷达风场反演技术, 并利用WRF数值模式, 对2022年7月26日发生在江苏的一次大范围飊线大风过程进行了分析。结果表明: 在此次飊线大风过程中, 高空流出区辐散、低层低涡切变辐合, 上干冷下暖湿的环境并且配合低空西南急流源源不断输送水汽, 为对流的触发和组织化发展提供了较好的动力、水汽条件; 飊线入海前, 不稳定能量、垂直风切变、垂直上升和水汽条件均较好, 而飊线入海后, 众物理量配置较差, 这与飊线在陆上的组织化发展、强度维持及入海后强度减弱的变化对应较好; 飊线入海后, 底层后侧入流减弱, 使得干空气减少, 不利于飊线维持, 导致海上大风强度减弱。同时, 纬向海陆热力差异变小使得海风的强度也逐渐减小, 导致风场辐合效果变差, 这可能是飊线系统入海减弱和其引发的海上大风风力变弱的原因之一, 数值试验成功模拟了减小纬向热力差异会引发飊线对流系统的减弱。

**关键词:** 飊线; WRF模式; 纬向热力差异; 地形

**中图分类号:** P445 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)02-0117-09

### 0 引言

海上大风是海洋气象灾害性天气之一。触发海上大风的天气系统有很多, 既有大尺度的冷涡、副热带高压, 还有中尺度的热带气旋、飊线, 更有小尺度的龙卷、超级单体风暴等。有关海上大风的研究成果已有不少。吴海英等<sup>[1]</sup>探讨了冷空气对江苏近海强风形成和发展的影响, 指出强冷空气所伴随的冷平流增强了地面变压场及变压梯度, 是导致江苏近海大风出现的重要原因; 项素清<sup>[2]</sup>诊断分析了浙北沿海南大风过程, 发现入海高压的稳定维持和西面低值系统的发展是大风发生的直接原因; 徐哲永等<sup>[3]</sup>分析了舟山群岛海域一次大风过程, 发现高低层散度场的耦合以及高空锋区过境时产生的动力下沉运动造成强烈的动量下传, 并进一步加大了

地面风速; 陈淑琴等<sup>[4]</sup>分析了低压系统引发的舟山群岛一次大风过程, 发现中低层的温度平流是低压大风形成和维持的有利条件。纵观前人研究发现, 针对对流性的海上大风研究偏少, 这可能与海上对流大风的个例偏少和监测数据的稀缺有关, 也因为海陆边界的特殊地形和热力作用引发的海上对流大风具有一定的复杂性。由于海上对流大风天气不仅有强对流的历时短、突发性强的特点, 还会受到海陆地形和热力差异的影响<sup>[5-6]</sup>, 是气象科研工作者研究的热点和难点。

飊线作为一种线状强对流系统, 具有明显的传播性, 且系统移速较快, 容易造成大范围短时强降水、大风和雷暴等强对流天气, 并可能伴有冰雹、龙卷等极端天气; 在飊线系统入海过程中, 也会引发明显的海上大风天气。本文对2022年7月26日

收稿日期: 2022-12-05。

基金项目: 江苏省科协青年科技人才托举工程项目(TJ-2021-21); 连云港市科技重点研发计划(SF2132)。

作者简介: 庆涛(1988-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事天气预报预警技术研究。E-mail: utdi@163.com

\*通信作者: 李泽宇(1990-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事天气预报预警技术研究。E-mail: 200869697@qq.com

发生在江苏的一次大范围飏线大风过程进行分析,并探讨其入海后减弱的可能机理,希望为海上对流大风的预报研究提供新的思路与参考。

## 1 资料

地面雷暴大风和降水资料来源于江苏自动气象站;雷达基数据来源于常州(0519)、盐城(0515)SA(Search & Analysis)雷达站;灾情实况来源于气象信息员、气象爱好者提供的资料和实地调查照片。天气系统、物理量等资料采用欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的ERA5(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)逐小时再分析资料(水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ),包括对流有效位能(Convective Available Potential Energy)、6 km垂直风切变、水汽通量、垂直速度等物理量。

## 2 天气实况

2022年7月26日,江苏地区出现了一次自西向东、南北走向且发展成熟的飏线过程。飏线于14时(北京时,下同)左右沿泰州北部—扬州南部—镇江—常州—无锡西部一线发展成型,随后持续向东移动;15时前后是飏线发展最为旺盛的时段,其北段于盐城和南通交界处东移出海,南段位于苏州境内;17时30分左右飏线主体全部移出江苏陆地区域并进入江苏海区,强度逐渐减弱;20时前后飏线过程结束。此次飏线过程历时约6 h,导致江苏淮河以南地区出现自2022年入汛以来最大范围的雷暴大风、短时强降水和冰雹等强对流天气,造成苏州、南通等多地房屋和农作物损毁,其中陆地阵风为9~12级,最大风力为36.8 m/s(12级,出现于14时34分)出现在苏州东山胥口镇。飏线东移入海后,盐城南部和南通沿海海域于17时前后出现大风,阵风风力以8~9级为主。经陈淑琴等<sup>[7]</sup>统计分析,因为海陆交界处摩擦力和温湿存在差异,对流单体入海加强或者维持的可能性较大。但本次过程中,飏线入海后对流强度却逐渐减弱,所产生的海上大风较陆地风力也明显偏弱,这值得我们研究和探讨。

## 3 天气形势与物理量分析

2022年7月26日08时,江苏上空200 hPa为一致的偏西风(见图1),由于其风速明显强于西部安徽等地的西南风,造成江苏上空形成明显的出流区,抽吸辐散作用使得江苏地区低层的动力抬升条件较好;在500 hPa上,江苏位于冷涡底部和副热带高压之间的高空槽附近,500 hPa槽线压在山东中部—江苏西部一线,前倾特征明显,槽后干冷空气叠加在低层的暖湿气流上,致使冷暖气流在江苏省江淮之间强烈交汇,有利于对流的触发;在低层850 hPa和925 hPa上,08时江苏地区处在低涡前侧,西南风与东南风在淮河以南地区有明显交汇辐合,湿度条件较为有利,随着系统的东移,湿区增强且范围逐渐从江苏西部扩展到整个中东部地区。20时高空槽和副热带高压位置稳定少动,江苏中东部地区仍位于槽前,低涡略有东移南压,中心位于江苏省沿江一带,大湿区范围逐渐扩展至淮河以南中东部地区,200 hPa高空风速减小,出流区明显减弱,低层西南气流较08时有所减弱,但海上东南风明显加大(图略)。具体分析飏线发展最强时段(16时)的形势场(图略),低涡中心位于江淮之间西部,其底部的西南气流和前侧的东北气流较08时明显加强,在江苏东南部地区形成一条暖式切变线,急流轴顶部位位于沿江西部。综上所述,此次过程高空出流区辐散、低层低涡切变辐合、上干冷下暖湿的环境并且配合低空西南急流源源不断输送水汽,为飏线的触发以及雷暴大风、短时强降水的产生提供了较好的动力、水汽条件。

从2022年7月26日16时850 hPa的物理量分析可以看出(见图2),江苏地区6 km垂直风切变普遍超过9 m/s,东南及沿海部分地区达到了13~17 m/s,水汽平流在淮河以南西部地区有明显辐合交汇,该地区的比湿也超过12 g/kg,有一定的垂直上升条件,对飏线的组织化和加强发展极为有利;从对流有效位能的分布来看,淮河以南地区的对流有效位能整体较高,尤其是东南沿海地区普遍超过3 000 J/kg,有较强的不稳定能量,有利于飏线强度在陆地上的维持,随着飏线不断东移,江苏东南沿海地区的水汽辐合条件和垂直运动条件均有所减弱,近海区域的对流有效位能显著减小,这也



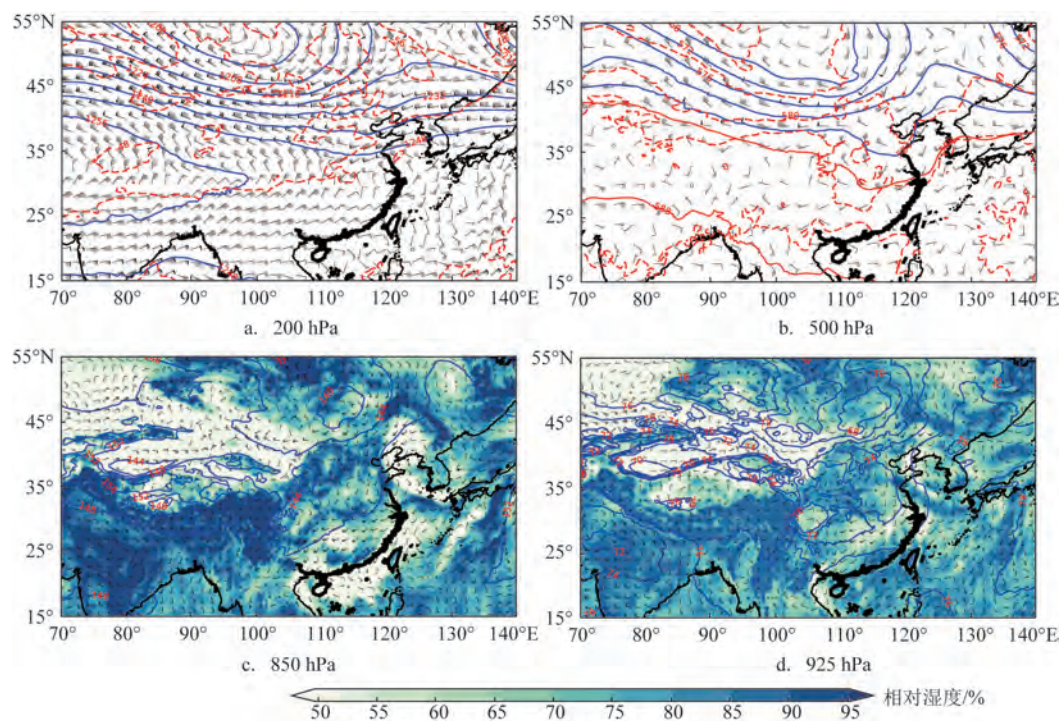


图1 2022年7月26日08时天气形势

Fig.1 Weather situations at 08:00 on July 26, 2022

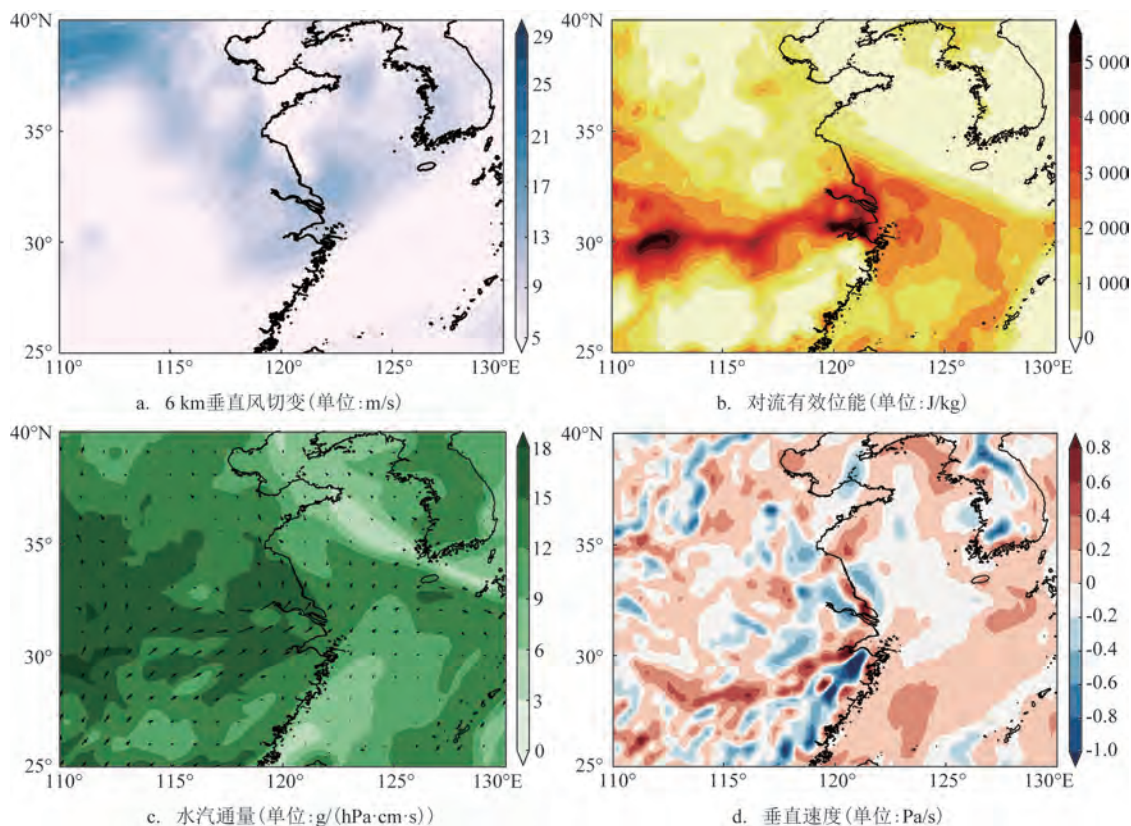


图2 2022年7月26日16时850 hPa物理量分析

Fig.2 Weather situations of 850 hPa at 16:00 on July 26, 2022

导致了飊线在入海前后结构的逐渐松散和回波强度的不断减弱。

#### 4 飊线入海减弱原因分析

为研究飊线入海后对流系统和对流大风减弱的原因,采用POTVIN等<sup>[8]</sup>提出的基于三维变分技术(3DVAR)的多雷达风场反演技术,基于泰州、南京、常州和南通的4部S波段双偏振天气雷达进行反演。为了克服多雷达联合反演中易出现的平流误差,在三维变分代价函数的观测项中加入光流法进行平流校正,并通过加强质量守恒约束抑制上边界的风场反演噪音,从而实现对此此飊线过程风场

三维动力结构的实时快速反演。与传统的风场反演方法相比,该技术可提供分辨率更高且结构更完整的风场产品。图3为沿风暴入流缺口的反射率因子与风场纬向剖面图。由图3a可见,7月26日16时,即在飊线系统发展最为旺盛的时候,飊线前侧有低层环流入流进入飊线,且汇入上升气流,将干冷的高动量空气带到近地面,有利于地面大风的形成;飊线后侧则存在显著的干冷空气入流,这增强了对流云区的低层辐合,维持了飊线系统的发展。26日18时(见图3b),随着飊线系统入海,沿风暴入流缺口后侧的中层西北风明显减弱,说明干冷空气入流明显减少,导致该时段飊线强度显著下降。

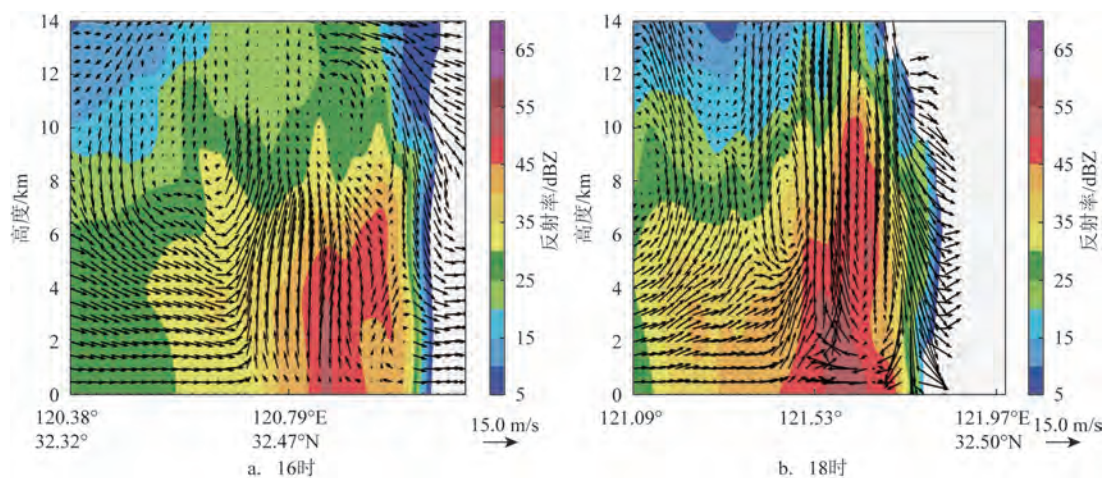


图3 2022年7月26日沿风暴入流缺口纬向剖面图

Fig.3 Zonal profile along storm inflow gap on July 26, 2022

由于陆地与海洋热力性质不同产生的纬向海陆热力差异,使得江苏近岸存在明显的海陆风,大气底层白天盛行海风,晚上盛行陆风,且海(陆)风的风速存在明显日变化,分别在15时(03时)前后达到极值<sup>[9-10]</sup>。从7月26日16时的地面风场可见(见图4),在江苏的东南部地区,地面以偏西风为主,其与海风产生的偏东风形成了风场辐合,可以维持飊线对流风暴的发展和底层大风的强度。在飊线逐渐入海的过程中,由于陆地降温比海洋快,海陆热力差异逐渐减小,海风的强度也逐渐减小,风场辐合效果变差,飊线系统也随之减弱。综上所述,纬向海陆热力差异变小可能是飊线系统入海减弱和其引发的海上大风风力变弱的原因之一。

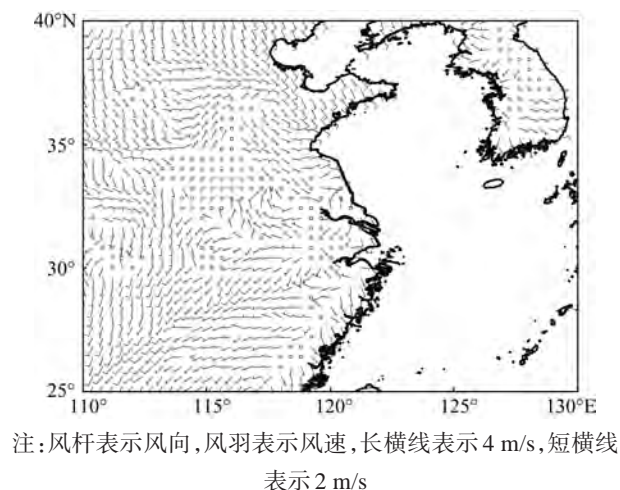


图4 2022年7月26日16时10m风场再分析数据

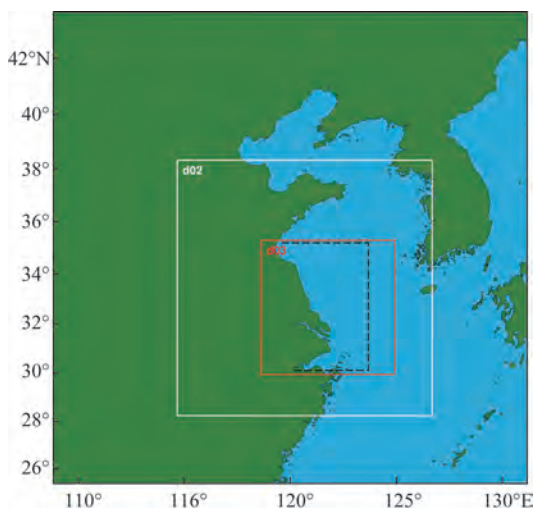
Fig.4 Reanalysis data of 10m wind field at 16:00 on July 26, 2022



## 5 数值模拟

### 5.1 模式简介

高分辨率中尺度数值模式 WRF-ARW (Weather Research and Forecasting Model - the Advanced Research WRF) 3.7 版本包含 Kain-Fritsch 对流参数化方案、显式微物理参数化方案、行星边界层方案等多种方案,它可以很好地模拟对流单体的细节和发展消亡<sup>[11-14]</sup>。为进一步研究海陆热力差异对本次飊线入海减弱的影响,本文采用 WRF-ARW 模式设计了控制试验与敏感性试验。模式共有三重嵌套网格(见图 5),最内两层的网格为双向反馈。从外向内三层网格的网格点数分别设置为  $131 \times 131$ 、 $211 \times 211$ 、 $331 \times 331$ ,其中虚线框内区域为江苏沿海关键区,两组敏感性试验将分别调整关键区内的地形和海温,以达到改变江苏地区纬向海陆热力差异的目的。所有试验的水平网格分辨率由外往内分别设置为 18 km、6 km、2 km。模式的初始场与最外层网格侧边界数据取自于美国国家环境预报中心-全球资料同化系统(National Centers for Environmental Prediction-Global Data Assimilation System, NCEP-GDAS)逐 6 h  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  分辨率的再分析场资料,模式的积分时间为 6 h,即北京时间 2022 年 7 月 26 日 14—20 时。



注:虚线方框内的海上区域为江苏沿海关键区

图 5 数值模式三重网格位置

Fig.5 WPS domain configuration

### 5.2 控制试验分析

选取常州 SA 雷达(14、15 时次)和盐城 SA 雷达(17、20 时次)  $1.5^\circ$  仰角基本反射率因子产品对此次飊线东移减弱过程进行分析。14 时,回波主体位于淮河以南中部,反射率因子在 50 dBZ 以上,最大地区超过 65 dBZ,回波呈南北两断带状分布,南部回波逐渐发展合并,北部相对孤立松散(图略);15 时,南部带状回波在东移过程中进一步加强发展并且逐渐与移动相对较慢的北部回波合并,形成一条成熟完整的飊线(见图 6a),强对流风暴活跃并且具有明显的弓状回波特征;此后飊线不断东移并且在入海前维持较高强度,造成淮河以南地区大范围的雷暴大风、短时强降水和雷电天气;17 时,飊线的弓状回波主体已经移入海上,范围逐渐缩小,发射率因子减弱至 45~50 dBZ,17—19 时回波仍以飊线形式在海上东移,但受海陆热力差异、动力条件差异等因素影响,其强度难以在海上维持因此迅速减弱并最终于 20 时前后消亡。从图 6b 可以看出,15 时江苏东部地区有弓形回波发展,已具备飊线系统的形态;17 时回波主体已经移至江苏沿海地区,飊线系统东移入海;20 时回波强度明显减弱,飊线系统基本消散。综上所述,WRF-ARW 模式能够较好地模拟此次飊线系统的产生—强盛—入海减弱—消亡的过程,且各时次模拟的飊线位置和强度与实况基本一致。

### 5.3 敏感试验分析

从分析控制试验的海表温度可以看出(图略),7 月 26 日 14 时,即模拟的初始时刻,江苏地区存在明显的纬向海陆热力差异。为了减小这种海陆热力差异,研究设计热力敏感试验,并参考江苏沿海地区与低纬度地区的海温差,人为地将江苏沿海关键区的海温升高  $4^\circ\text{C}$ 。从试验结果可以看出(见图 7a),控制试验较热力敏感试验模拟的最大反射率因子明显增强,增强幅度为 1~4 dBZ,这表明,减小纬向热力差异会导致飊线对流系统的减弱,飊线引发的海上大风也会相应地变弱。另外,为了消除纬向海陆热力差异的影响,在地形敏感试验中,人为将江苏沿海关键区的海洋地形修改为陆地,这也将导致关键区内纬向热力差异明显减小。由图 7b 可见,人为减小纬向热力差异,会导致最大反射率因子显

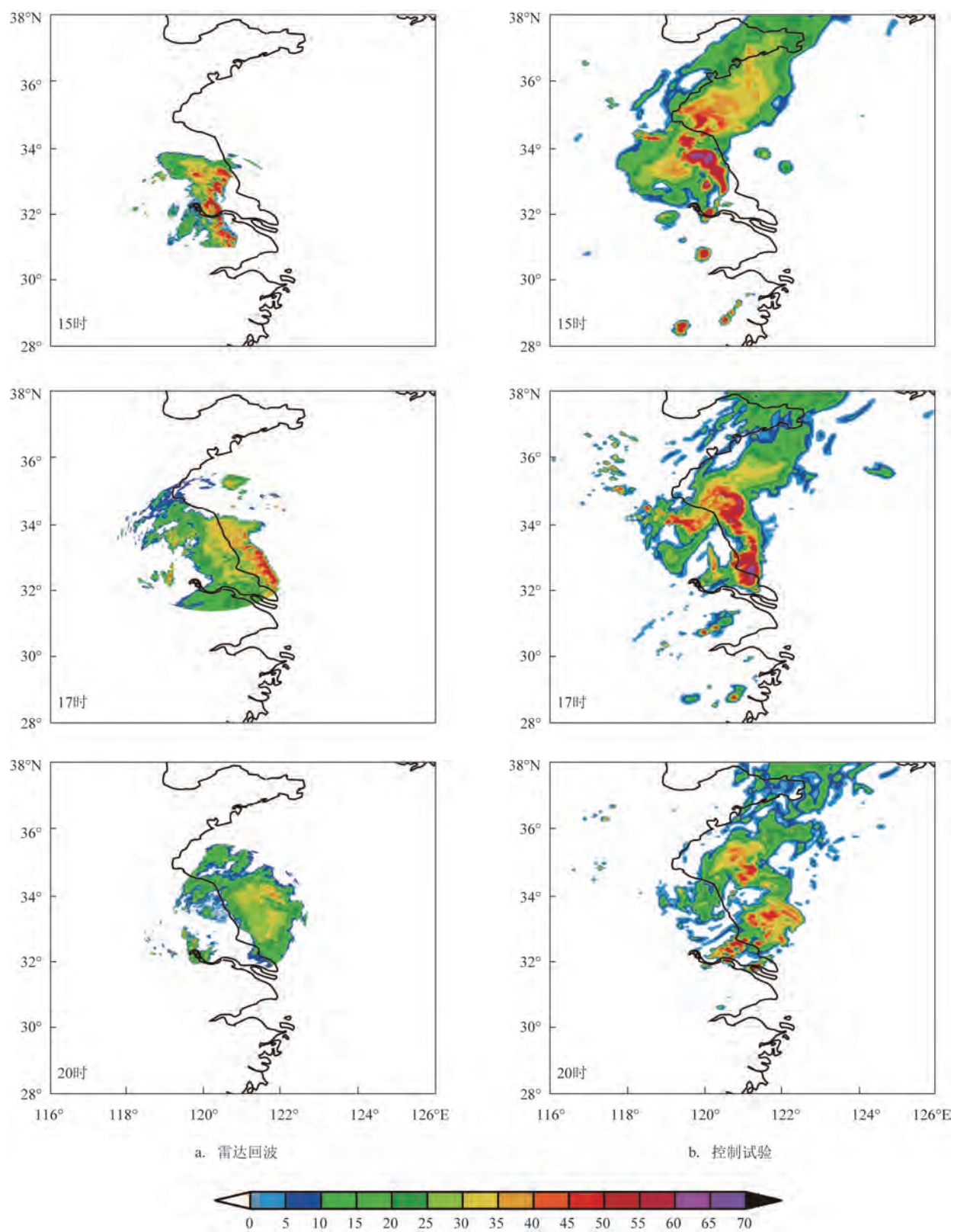


图6 颱线入海前后1.5°雷达回波和控制试验反射率因子演变(单位: dBZ)

Fig.6 Evolution of 1.5° radar reflectivity and CTL on July 26, 2022 (unit: dBZ)

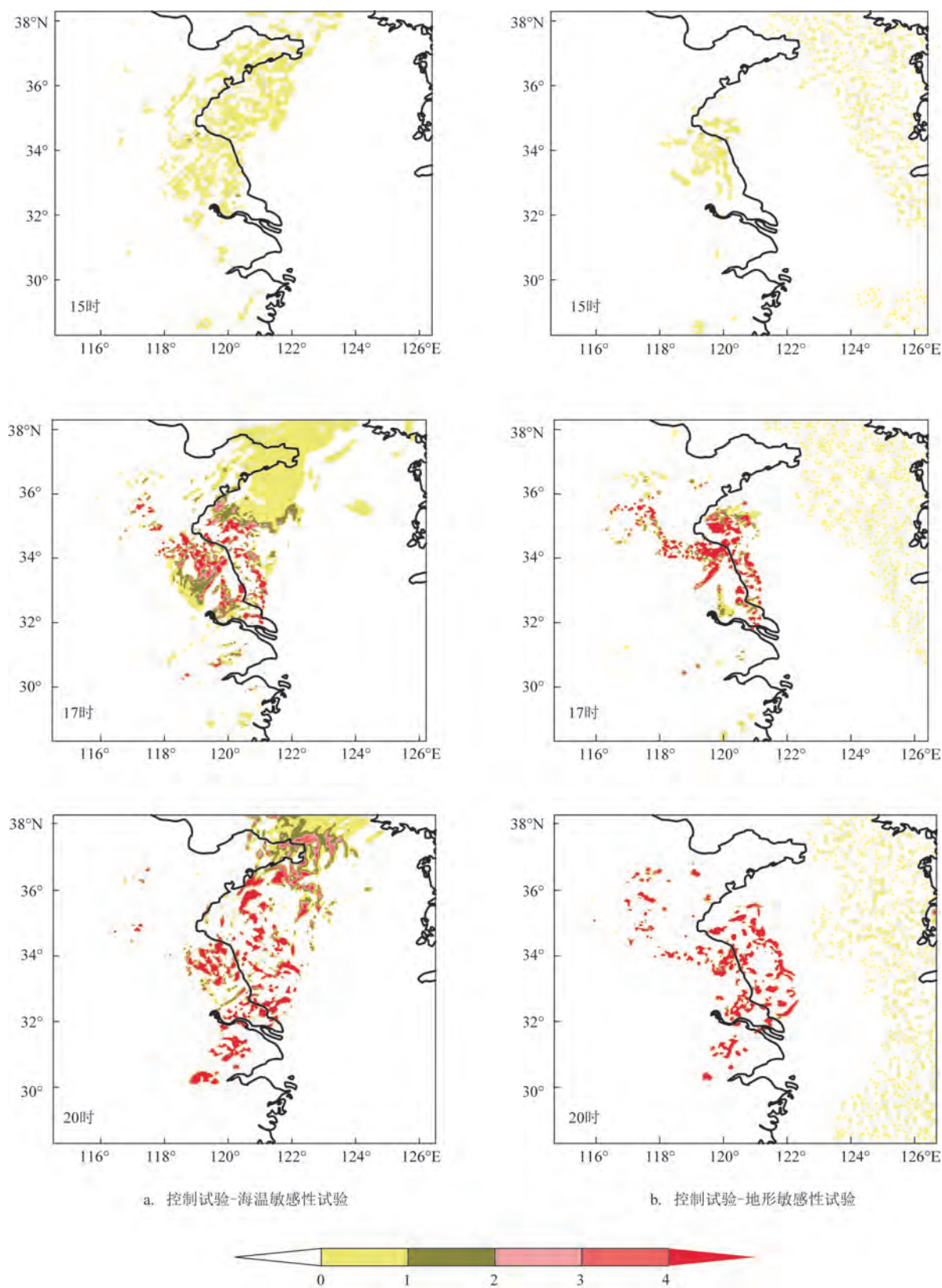


图7 2022年7月26日14—20时数值试验中1.5°雷达回波反射率因子差异演变

Fig.7 Evolution of 1.5° radar reflectivity during 14:00—20:00 on July 26, 2022



著减弱,这与热力敏感试验的结论较为一致。综上所述,减小纬向热力差异会引发飊线对流系统的减弱,这可能是这次飊线入海后,海上大风与陆地风力偏弱的可能机制之一。

## 6 结论

通过分析2022年7月26日发生在江苏一次大范围飊线大风过程的环流形势和物理量场,探讨其入海后减弱的可能机理。结论如下:

①通过环流背景分析,此次飊线大风过程高空流出区辐散、低层低涡切变辐合,上干冷下暖湿的环境并且配合低空西南急流源源不断输送水汽,为对流的触发和组织化发展提供了较好的动力、水汽条件。

②飊线入海前,江苏地区有较强的不稳定能量,低层垂直风切变大,水汽平流在淮河以南西部地区有明显辐合交汇,较好的垂直上升和水汽条件有利于飊线在陆地上的组织化发展;随着飊线不断东移,入海后飊线对流结构逐渐松散,回波强度不断减弱,海上大风强度弱于陆上大风。

③基于三维变分技术(3DVAR)的多雷达风场反演产品的分析表明,飊线入海后,底层后侧入流减弱,使得干空气减少,不利于飊线维持,导致海上大风强度减弱。纬向海陆热力差异变小,使得海风的强度也逐渐减小,导致风场辐合效果变差,这可能是飊线系统入海减弱和其引发的海上大风风力变弱的原因之一。

④WRF-ARW模式能够较好地模拟此次飊线系统的产生—强盛—入海减弱—消亡的过程,敏感性试验验证结果表明,人为减小纬向热力差异,将引发飊线对流系统的减弱,这可能是这次飊线入海后,海上大风较陆地风力明显偏弱的机制之一。

### 参考文献:

- [1] 吴海英, 孙燕, 曾明剑, 等. 冷空气引发江苏近海强风形成和发展的物理过程探讨[J]. 热带气象学报, 2007, 23(4): 388-394.  
WU H Y, SUN Y, ZENG M J, et al. Discussion of physical mechanisms for a gale process caused by severe cold air offshore Jiangsu[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(4): 388-394.
- [2] 项素清. 浙北沿海海南大风过程诊断分析[J]. 海洋预报, 2004, 21(1): 75-80.
- XIANG S Q. Diagnostic analysis of the south gale in the north coast of Zhejiang province[J]. Marine Forecasts, 2004, 21(1): 75-80.
- [3] 徐哲永, 王雷, 王坚侃. 舟山群岛海域一次大风过程的诊断分析[J]. 海洋预报, 2012, 29(5): 53-58.  
XU Z Y, WANG L, WANG J K. Diagnosis analysis of a strong gale in Zhoushan islands[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(5): 53-58.
- [4] 陈淑琴, 黄辉. 舟山群岛一次低压大风过程的诊断分析[J]. 气象, 2006, 32(1): 68-73.  
CHEN S Q, HUANG H. Diagnosis of gales caused by depression in Zhoushan islands[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(1): 68-73.
- [5] 许爱华, 孙继松, 许东蓓, 等. 中国中东部强对流天气的天气形势分类和基本要素配置特征[J]. 气象, 2014, 40(4): 400-411.  
XU A H, SUN J S, XU D B, et al. Basic synoptic situation classification and element character of severe convection in China[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(4): 400-411.
- [6] 盛春岩, 李建华, 范苏丹. 地形及下垫面对渤海大风影响的数值研究[J]. 气象, 2014, 40(11): 1338-1344.  
SHENG C Y, LI J H, FAN S D. Numerical study of terrain and underlying surface effect on Bohai gale[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(11): 1338-1344.
- [7] 陈淑琴, 黄辉, 周丽琴, 等. 对流单体在杭州湾入海时的强度变化分析[J]. 气象, 2011, 37(7): 889-896.  
CHEN S Q, HUANG H, ZHOU L Q, et al. Analysis on the intensity changes of convective cells in the Hangzhou bay when entering the sea[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(7): 889-896.
- [8] POTVIN C K, SHAPIRO A, XUE M. Impact of a vertical vorticity constraint in variational dual-Doppler wind analysis: Tests with real and simulated supercell data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2012, 29(1): 32-49.
- [9] 苗峻峰. 城市热岛和海风环流相互作用的数值模拟研究进展[J]. 大气科学学报, 2014, 37(4): 521-528.  
MIAO J F. An overview of numerical studies of interaction of urban heat island and sea breeze circulations[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(4): 521-528.
- [10] GASSMANN M I, PÉREZ C F, GARDIOL J M. Sea - land breeze in a coastal city and its effect on pollen transport[J]. International Journal of Biometeorology, 2002, 46(3): 118-125.
- [11] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [12] KAIN J S, MICHAEL FRITSCH J. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme[M]//EMANUEL K A, RAYMOND D J. The Representation of Cumulus Convection in Numerical Models. Boston: American Meteorological Society, 1993: 165-170.
- [13] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. Journal of Applied Meteorology



- and Climatology, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [14] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the Advanced Research WRF version 3[R]. NCAR Technical Notes NCAR/TN-4751STR, 2008: 113.

## Diagnostic simulation analysis of "7.26" squall line gale process along Jiangsu coast

QING Tao<sup>1,2</sup>, LI Zeyu<sup>3\*</sup>, LI Chao<sup>3</sup>, SHI Dawei<sup>4</sup>

(1. Jiangning Meteorological Bureau of Nanjing, Nanjing 211100, China; 2. Jiangsu Meteorological Information Center, Nanjing 210019, China; 3. Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210019, China; 4. Lianyungang Meteorological Bureau, Lianyungang 222006, China)

**Abstract:** Based on data from ground-based observations,  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$  reanalysis data of ERA5, SA weather radar data in Changzhou and Yancheng, 3DVAR-based radar-retrieved wind data and the WRF simulation, a large-scale squall line gale process occurred in Jiangsu Province on July 26, 2022 is analyzed. The results show that the squall line gale process is characterized by divergent air motion in the upper outflow area and shear convergent air motion in the lower vortex area. The upper dry-cold and the lower warm-wet condition along with the continuous moisture transport of the low-level southwest jet provide a good dynamical background for triggering and maintaining the convection. The instability energy, vertical wind shear, vertical ascending and water vapor conditions are optimal when the squall line is inland, while after the squall line moves into the ocean, the environmental condition is getting worse. The change of the environmental condition corresponds well with the development of the squall line. After the squall line enters the ocean, the inflow at the back of the squall line bottom layer weakens, leading to the reduction of dry air and the weakening of the squall line, and thus the strength of the gale wind. Meanwhile, as a possible cause of the weakening of the squall line and sea gale during its motion in the ocean, the reduction of the zonal land-sea thermal difference reduces the intensity of the sea breeze, which leads to weaker convergent wind motion. The numerical experiment successfully simulates the process of the zonal thermal difference reduction leading to the weakening of the squall line convection system.

**Key words:** squall line; WRF model; zonal thermal difference; terrain