

海温对一次上岸对流风暴降水强度影响的数值模拟研究

邢蕊^{1,2,3} 章丽娜⁴ 熊秋芬⁴ 吴彬贵⁵ 汪澜²

1 中国气象局沈阳大气环境研究所/东北冷涡研究重点开放实验室, 沈阳 110166

2 福建省灾害天气重点实验室/中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室, 福州 350008

3 天津市滨海新区气象局, 天津 300457

4 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081

5 天津市气象科学研究所, 天津 300074

提 要:本文采取针对典型上岸对流风暴个例(2022年8月8日)开展高分辨率数值模拟和敏感性试验的方法,通过升高和降低黄渤海海温,探讨海温变化对上岸对流性降水强度的影响。结果表明:与控制试验相比,海温升高可使上岸对流性降水增强,其中海温升高1℃(2℃)时,沿岸区域平均累计降水量增加2.6 mm(15.7 mm),极值降水量增加38.2 mm(53.7 mm),当海温降低1℃(2℃)时,相应降水量减小3.7 mm(8.3 mm),极值降水量未受明显影响。分析原因发现:与控制试验相比,当海温升高2℃时,沿岸边界层温度梯度、风场辐合抬升以及对流有效位能(CAPE)和南移冷池的强度均有明显增强,导致冷池前沿锋区及动力抬升明显增强,但当海温升高1℃时,边界层风场辐合和南移冷池强度未见明显增强,冷池前沿锋区及动力抬升增强不如升高2℃时显著;当海温降低1℃和2℃时,中尺度环境场及南移冷池强度均有明显减弱,冷池前沿锋区不明显,动力抬升被大幅削弱,甚至转为下沉气流,最终导致上岸对流性降水强度减弱。本文研究结果可为上岸对流性降水预报提供一定的理论参考。

关键词:莱州湾, 海温, 上岸对流风暴, 降水强度, 数值模拟

中图分类号: P456

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2026.070401

Numerical Simulation Study on the Influence of Sea Surface Temperature on the Precipitation Intensity of a Landfalling Convective Storm

XING Rui^{1,2,3} ZHANG Lina⁴ XIONG Qiufen⁴ WU Bingui⁵ WANG Lan²

1 Shenyang Institute of Atmospheric Environment, CMA/Key Opening Laboratory for Northeast China Cold

Vortex Research, Shenyang 110166

2 Fujian Key Laboratory of Severe Weather/Key Laboratory of Straits Severe Weather, CMA, Fuzhou 350008

3 Binhai New Area Meteorological Office of Tianjin, Tianjin 300457

4 CMA Training Centre, Beijing 100081

5 Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074

*国家自然科学基金面上项目(42375019)、中国气象局复盘总结专项项目(FPZJ2025-009)、东北冷涡研究重点开放实验室开放基金课题(2023SYIAEKFMS09)、福建省灾害天气重点实验室和中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室开放课题(2024KFKT08)共同资助

2025年8月23日收稿;2026年7月4日收修定稿

第一作者:邢蕊,主要从事灾害性天气机理及高分辨率数值模拟研究. E-mail: nuistxr@163.com

通讯作者:章丽娜,主要从事中尺度气象学研究. E-mail: zhangln@cma.gov.cn

Abstract: This study conducts a high-resolution numerical simulation and sensitivity experiments on a typical case of landfalling convective storm (8 August 2022), by increasing and decreasing the sea surface temperature (SST) of the Yellow Sea and Bohai Sea, the impacts of SST variation on the intensity of landfalling convective precipitation are investigated. The results show that, compared with the control experiment, increased SST can enhance the intensity of landfalling convective precipitation. Specifically, when SST increases by 1 °C (2 °C), the average accumulated precipitation over coastal areas rises by 2.6 mm (15.7 mm) and the maximum precipitation increases by 38.2 mm (53.7 mm). When SST decreases by 1 °C (2 °C), the corresponding precipitation reduces by 3.7 mm (8.3 mm), while the maximum precipitation shows no significant change. Mechanism analysis indicates that, relative to the control experiment, a 2 °C SST rise significantly strengthens the coastal boundary layer temperature gradient, wind convergence lifting, as well as the intensity of convective available potential energy (CAPE) and southward-moving cold pools, leading to pronounced reinforcement of the front zone at the cold pool leading edge and dynamic lifting. In contrast, a 1 °C SST increase does not evidently enhance boundary layer wind convergence and southward-moving cold pool intensity, resulting in weaker enhancement of the front zone and dynamic lifting compared with the 2 °C SST increase. When SST decreases by 1 °C and 2 °C, the mesoscale environmental conditions and southward-moving cold pool intensity weaken substantially. The front zone at the cold pool leading edge becomes indistinct, and dynamic lifting is greatly weakened or even transformed into downdrafts, ultimately reducing the intensity of landfalling convective precipitation. The conclusions of this paper can provide a theoretical references for the intensity forecasting of landfalling convective precipitation.

Key words: Laizhou Bay, sea surface temperature, landfalling convective storm, precipitation intensity, numerical simulation

引 言

下垫面及边界层过程对强对流天气具有重要影响(徐姝等, 2024; 郑丽娜和孙继松, 2024; Lericos et al, 2007; Xu et al, 1996)。观测研究表明, 在海陆交界区域, 由于下垫面性质及边界层过程发生明显改变(Li et al, 2020; 邢秀芹, 1997), 对流系统移经这些区域时可能会出现强度加强(Murray and Colle, 2011; Lombardo and Colle, 2012; 陈淑琴等, 2011; 高梦竹等, 2017), 并导致沿岸地区出现强烈的灾害性天气(French and Parker, 2012; Lombardo and Colle, 2010; 李延江等, 2013): 如 2014 年 7 月 27 日下午, 一条南北向的弓形回波自杭州湾地区组织化发展加强并东移入海(即离岸对流), 造成 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的极端大风和 $50 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的短时强降水(Zhang et al, 2021); 2021 年 9 月 4 日早晨, 对流单体在渤海湾地区生成后西移进入陆地(即上岸对流)并加强, 造成极端强降水天气并导致滨海新区 1 人死亡(易笑园等, 2024)。由于海上缺乏高时空分辨率的观测资料, 以及数值模式通常无法精确刻画海陆分布及相应下垫面物理属性(Lombardo et al, 2016), 海岸线附近的强对流天气预报误差较大, 开展相关研究对于防灾减灾等工作具有重要意义。

对于由陆地移入海洋等水体的离岸对流强度变化及影响因素, 梁钊明等(2014)、王彦等(2014)、万夫敬等(2021)开展了一系列研究。在渤海海域, 通过对一次入海飚线过程进行数值模拟发现: 当离岸对流系统移入海洋后, 光滑的水面对近地面风有增强作用, 使得南北气流辐合增强, 进而造成初期的对流活动活跃(陶局等, 2019); 基于观测资料对 2021

年 7 月 31 日夜间的一次渤海湾飊线入海增强机制进行分析,发现海岸地形、海表温度是影响入海飊线强度变化的关键因子(梅婵娟等, 2025b)。在杭州湾地区,基于个例分析表明,杭州湾上更好的水汽和能量条件是使得离岸对流单体加强以及飊线持续发展的重要原因(高梦竹等, 2017);通过对多个离岸入海加强的典型对流过程研究发现,杭州湾海陆交界地区为移入该区域的对流系统提供了包括海风锋、地面辐合线、较大对流有效位能(CAPE)、明显的水汽通量辐合以及深层垂直风切变等有利的中尺度环境条件,并通过中尺度系统间的相互作用等,使得移入杭州湾的对流系统能够加强发展(沈杭锋等, 2010; 高梦竹等, 2017; 陈淑琴等, 2011; Zhang et al, 2021)。在国外, Lombardo and Colle (2012)通过多个热力和动力环境参数的合成分析发现,加强的线状中尺度对流系统对应最强的 0~3 km 垂直风切变和最弱的地面冷池,进一步的数值模拟研究表明,二者通过相互作用使得飊线离岸入海后得以加强(Lombardo and Colle, 2013)。以上研究表明,离岸对流系统强度加强与海岸地形、海表温度、水汽和能量等中尺度环境条件以及垂直风切变和地面冷池等多种因素相互作用有关,复杂的影响因素增加了海陆交界处对流性天气的预报难度。

然而除离岸对流外,由海洋移入陆地的上岸对流系统同样具有模式可预报性差、致灾性强等特点(汪雅等, 2013; 易笑园等, 2024),但目前对于上岸对流的研究相对较少,影响上岸对流强度变化的主要因素尚不清晰。环渤海地区是中尺度对流系统活动较频繁的区域之一(郑永光等, 2008; 盛杰等, 2020),气候统计分析表明,春夏季渤海南部莱州湾地区的海温较邻近海域的温度偏高(刘伊格, 2019),而其东侧的山东半岛北部陆地受地形影响,地表温度偏低,独特的下垫面造成该地区海陆之间的温度梯度更为明显。另外在全球气候变暖背景下,全球大部分海洋表面温度呈上升趋势(肖昀廷等, 2025; Shi et al, 2024),发生显著局地海洋热浪时,海温较气候态可上升约 3℃(Sugimoto, 2025)。在此气候背景下,当莱州湾地区海温发生变化时,该地区的海陆温差强度随之发生变化,当对流系统由渤海上空南移上岸时,其带来的降水可能会有不同的特征。因此,本文以 2022 年 8 月 8 日在渤海海上生成并南移影响莱州湾东侧沿岸地区的一次强对流过程为例,通过人为升高或降低海温的数值敏感性试验,探讨海温变化对上岸对流风暴降水的影响,从而为渤海南岸降水预报业务提供理论参考。

1 资料和研究方法

1.1 资料

本文采用的资料主要有:(1)地面自动站 24 h 累计降水量及逐小时降水量,用于分析天气实况及降水特点;(2)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的第 5 代全球大气再分析资料(ERA5)逐小时数据,水平分辨率为 0.25°×0.25°,用以天气形势分析,并作为数值试验的初始场和侧边界条件;(3)基于国家级地面-卫星-雷达三源融合实况格点降水数据(简称 CMPAS 资料, 5 km 分辨率)的逐小时实况降水,用于数值模拟结果的对比验证。由于各试验计算累计降水的时段和区域一致,因此累计降水量可反映降水强度。

1.2 个例简介

1.2.1 天气实况

2022 年 8 月 8 日 02 时(北京时,下同)前后,呈准东西向带状结构的对流性降水回波

首先在渤海中部海域被触发，随后不断发展加强并南移上岸影响莱州湾东侧沿岸（图略）。受其影响，莱州湾东侧沿岸陆地出现了明显降水，部分站点达到了暴雨量级（图 1a）。龙口岬岛站及邻近 3 个暴雨站的逐小时降水量变化（图 1b）表明，主要降雨时段集中在 8 日 07—08 时前后，其中龙口岬岛站最大降水强度为 60.25 mm h^{-1} ，另外有 2 个自动站的小时降水强度超过 50 mm h^{-1} 。

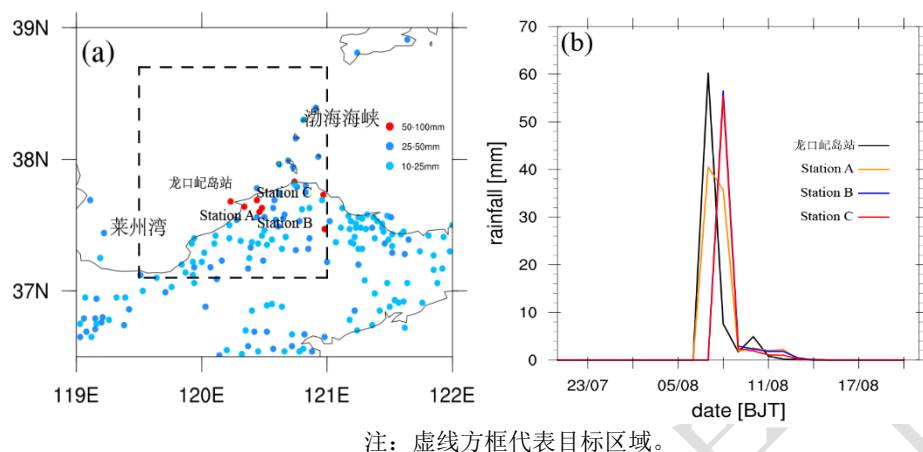
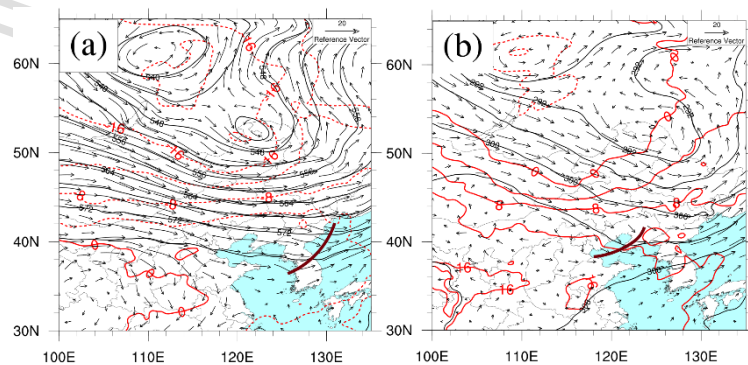


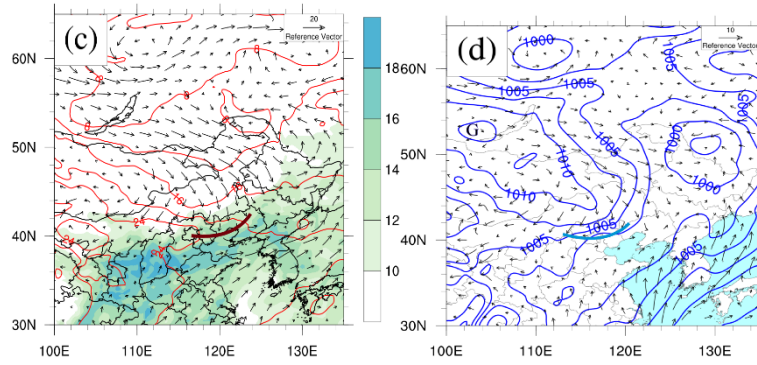
图 1 2022 年 8 月 7 日 20 时至 8 日 20 时莱州湾东侧沿岸附近 (a) 不同量级日降水量的自动站分布及 (b) 龙口岬岛站、站 A、站 B、站 C 逐小时降水量随时间的变化曲线

Fig.1 (a) Distribution of automatic weather stations with different magnitudes of daily precipitation , and (b) time series of hourly precipitation at Longkouqi Island Station, Station A, Station B, and Station C along the eastern coastal area of Laizhou Bay from 20:00 BT 7 to 20:00 BT 8 August 2022

1.2.2 环流形势分析

2022 年 8 月 7 日 20 时，东北地区 500 hPa 存在冷涡，其南侧为较平直的偏西气流，朝鲜半岛有弱短波槽，渤海海域主要受西北偏西气流影响（图 2a）。700 hPa 切变线位于渤海上空，其后有弱的冷平流（图 2b）。850 hPa 切变线位于渤海西侧海岸线一带，渤海位于 20°C 以上暖区及 $12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 比湿大值区中（图 2c）。925 hPa 的环流形势与 850 hPa 类似（图略）。在海平面气压场上，中高纬度大陆地区为高压控制，大陆高压前侧的冷锋位于渤海西侧陆地地区（图 2d），本次过程属于冷锋影响的强对流天气过程。综上分析可知，地面锋线滞后于低空切变线，系统呈前倾结构，该环流形势有利于渤海上空出现对流。





注：图 a~c 中棕色线代表切变线，图 d 中粗蓝色短线代表冷锋。图 2 2022 年 8 月 7 日 20 时渤海上空 (a) 500 hPa 和 (b) 700 hPa 位势高度 (黑色等值线, 单位: dagpm)、风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 和等温线 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)，(c) 850 hPa 比湿 (填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 和等温线 (红色等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)，(d) 海平面气压场 (蓝色等值线, 单位: hPa) 和风场 (箭头, 单位: m s^{-1})

Fig.2 The geopotential height (black contour, unit: dagpm), wind field (vector, unit: m s^{-1}) and isotherms (red contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) at (a) 500 hPa and (b) 700 hPa, (c) the specific humidity (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), wind field (vector, unit: m s^{-1}) and isotherms (red contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 850 hPa, and (d) the sea level pressure field (blue contour, unit: hPa) and wind field (vector, unit: m s^{-1}) over the Bohai Sea at 20:00 BT 7 August 2022

1.3 模拟方案设置

本文利用 WRFV4.3 对此次 2022 年 8 月 7—8 日在渤海上空发展并南移上岸的对流性降水过程开展数值模拟及改变海温的敏感性试验。考虑到模式 Spin up 时间的影响, 选取 2022 年 8 月 7 日 20 时作为模式初始时间, 利用 ERA5 再分析资料作为模式的初始场和侧边界条件, 模式积分时长为 24 h, 至 8 日 20 时结束。模式采用三重双向嵌套网格, 水平分辨率分别为 27、9、3 km, 格点数为 183×166 、 256×235 、 526×433 , 垂直分层 45 层, 模式顶气压为 100 hPa。控制试验采取的物理方案为: 云微物理过程选取 Purdue Lin 方案, 积云对流参数化方案第一层采用 Betts-Miller-Janjic 方案, 第二、三层网格则将此方案关闭, 短波辐射、长波辐射、边界层过程分别采用 Dudhia、RRTM、ACM2 方案。模式区域采用 MODIS 30'' 地形高程数据。模拟区域、莱州湾地形及 2022 年 8 月 7 日 20 时的地表温度分布如图 3 所示。

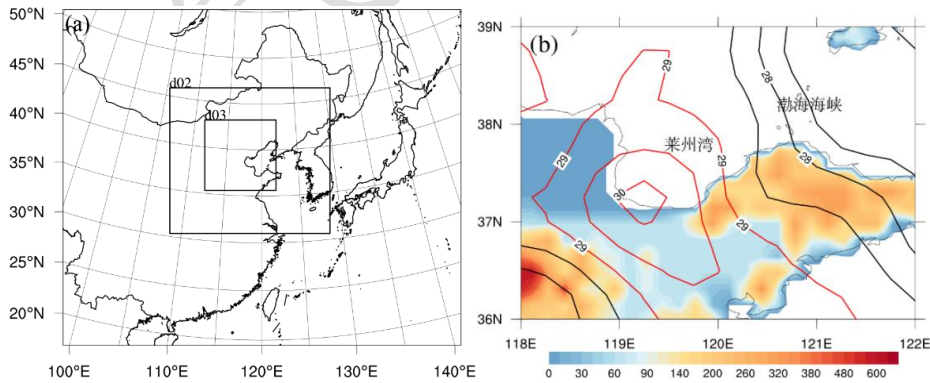


图 3 (a) 模拟区域示意图, (b) 莱州湾地区地形 (填色, 单位: m) 及基于 ERA5 资料的 2022 年 8 月 7 日 20 时的地表温度 (等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig.3 (a) Schematic diagram of the simulation zone, and (b) the terrain of Laizhou Bay area (colored, unit: m) and surface temperature (contour, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 20:00 BT 7 August 2022 based on EAR5 data

本文在控制试验的基础上设计了将渤海及黄海北部海温分别增加和减小 1℃、2℃ 的敏感性试验（表 1），这是由于一方面基于 ERA5 资料计算的 2005—2025 年 8 月 7 日 20 时前后该区域的平均海温发现，海温呈逐渐上升趋势（图略），最大增幅达 4℃。另一方面，前人在研究海温变化对天气系统的影响时，在敏感性试验中将海温增加、减小幅度设置在 2℃ 以内，以更符合实际海温变化规律，比如梁军等（2007）曾开展了将黄海北部海温增加和减小 1、2、4℃ 的敏感性试验，用以分析海温对北上台风的影响，Von Storch et al（1988）将特定区域的海温增加和减小 2℃，用以分析海温变化对南太平洋热带辐合带的影响，因此本研究敏感性试验所设计的海温变化幅度合理可行。另外，本文主要针对基于 D03 网格的数据开展分析。

表 1 控制试验及敏感性试验方案设计

Table 1 Control and sensitivity test schemes

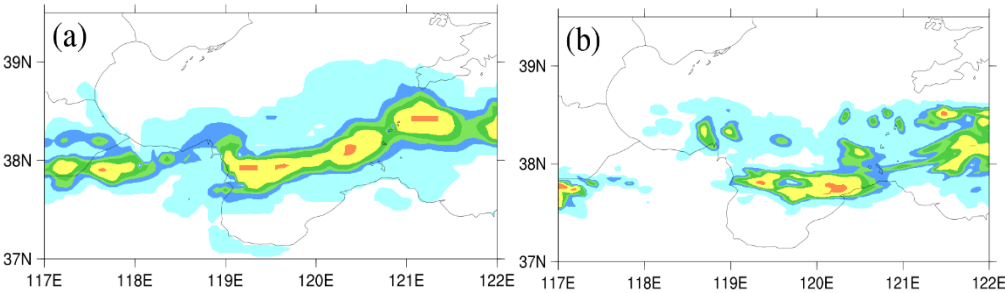
试验名称	试验描述
SST-2	渤海及黄海北部海温减小 2℃
SST-1	渤海及黄海北部海温减小 1℃
CTRL	控制试验
SST+1	渤海及黄海北部海温增加 1℃
SST+2	渤海及黄海北部海温增加 2℃

注：渤海及黄海北部指 37° ~42 ° N、113° ~128° E 的海洋部分。

2 海温影响沿岸降水强度的敏感性试验结果分析

2.1 模拟效果检验

图 4 为基于 CMPAS 资料的逐小时实况降水量与控制试验的对比。可看出，CTRL 试验基本模拟出了渤海中南部地区的带状降水及其逐渐南移并影响莱州湾及东侧陆地的过程，在移入陆地前后雨带的落区与实况基本一致，但陆地上模拟的降水强度偏强，另外 CTRL 试验所模拟的雨带向南的移动速度略快于实况。除逐小时降水量外，CTRL 试验所模拟的反射率因子、2 m 气温及探空曲线的分布也与实况较为一致（图略）。总体而言，CTRL 试验较成功地模拟出了此次降水过程，数值试验结果可用于分析海温变化对莱州湾东侧沿岸降水的影响。



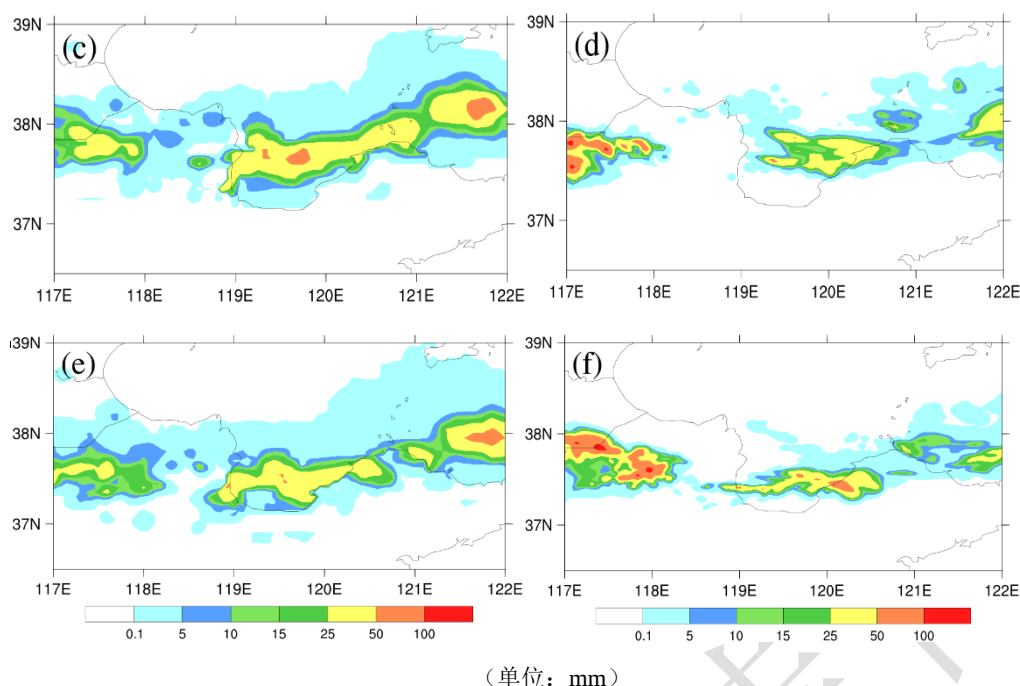
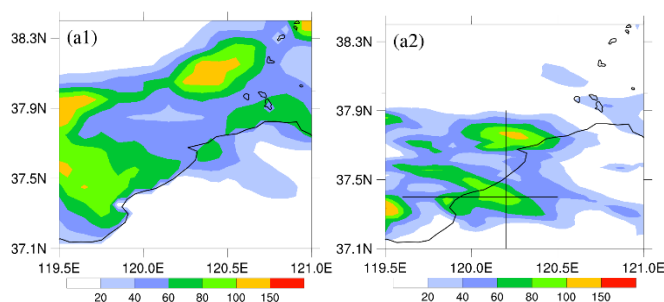


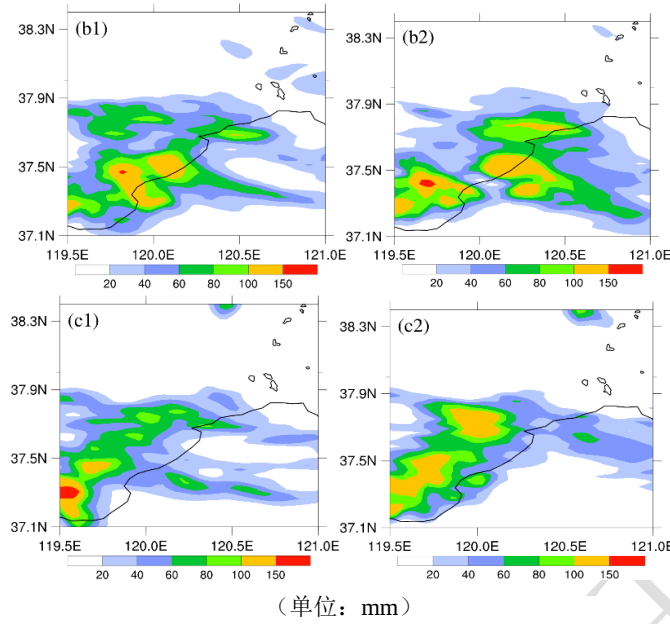
图4 莱州湾地区 2022 年 8 月 8 日 (a, b) 06 时, (c, d) 07 时, (e, f) 08 时 (a, c, e) CMPAS 资料与 (b, d, f) 控制试验逐小时降水量分布

Fig.4 The distribution of hourly precipitation at (a, b) 06:00 BT, (c, d) 07:00 BT, (e, f) 08:00BT 8 August 2022 based on (a, c, e) CMPAS data and (b, d, f) control test on Laizhou Bay Area

2.2 增减海温对沿岸降水强度的影响

图 5 为 2022 年 8 月 8 日 05—11 时实况与各试验累积降水量分布,将 CTRL 试验与实况在沿岸地区的累积降水量进行对比发现,CTRL 试验模拟出了伸向沿岸陆地的累积降水区,但强度偏强,位置偏南(图 5a₁, 5a₂)。将各敏感性试验的累积降水量与 CTRL 试验进行对比发现:(1)当升高海温时,沿岸陆地上降水强度呈增强趋势(图 5b₁, 5b₂),CTRL 试验(图 5a₂)在图 1a 虚线方框所示的陆地部分区域平均降水量为 23.7 mm,降水量极值为 84.6 mm, SST+1、SST+2 试验的平均降水量分别为 26.3 mm、39.4 mm,降水量极值分别为 122.8 mm、138.3 mm。模式中海温增加 1℃(2℃)时,区域平均降水量增加 2.6 mm(15.7 mm),降水量极值增加 38.2 mm(53.7 mm),表明海温升高使沿岸区域平均累积降水量最多增加 16 mm,降水量极值可增加 50 mm 左右,且升高 2℃时沿岸降水量增大幅度明显大于升高 1℃时的情形。(2)降低海温时,沿岸陆地上降水强度逐渐减小(图 5c₁, 5c₂),SST-1、SST-2 试验的区域平均降水量分别为 20.0 mm、15.4 mm,降水量极值分别为 87.3 mm、83.4 mm,与 CTRL 试验相比平均降水量分别减小了 3.7 mm、8.3 mm,表明海温每降低 1℃,沿岸区域平均累积降水量减小约 4 mm 左右,而降水量极值并未随海温降低明显减小。





注：图 a_2 中横、竖黑色实线（分别对应 37.4°N 和 120.2°E ）分别为图 8、图 11 垂直剖面所在位置。
图 5 2022 年 8 月 8 日 05—11 时莱州湾东侧沿岸附近 (a_1) CMPAS 资料, (a_2) CTRL 试验以及 (b_1) SST+1, (b_2) SST+2, (c_1) SST-1, (c_2) SST-2 敏感性试验的累计降水量空间分布

Fig.5 Spatial distributions of accumulated precipitation for (a_1) CMPAS data, (a_2) CTRL test, (b_1) SST+1, (b_2) SST+2, (c_1) SST-1, and (c_2) SST-2 sensitivity experiment near the eastern coastal of Laizhou Bay during 05:00–11:00 BT 8 August 2022

2.3 增减海温对沿岸中尺度环境的影响

增减海温可对沿岸陆地的中尺度环境条件造成明显影响。由图 6 可知,海温增加(减小)可使沿岸陆地 CAPE 明显增大(减小),但对沿岸 925 hPa 比湿影响较小,比湿的变化幅度基本在 1 g kg^{-1} 内。各数值试验区域(图 1a 中虚线方框的陆地部分,下同)平均 CAPE 和 925 hPa 比湿列于表 2,由表 2 可知,与 CTRL 试验相比,模式中海温增加 1°C (2°C) 时,CAPE 增大约 $37 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($98 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$),而海温降低 1°C (2°C) 时,CAPE 减小约 $48 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($89 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)。由表 2 还可看出,海温变化所引起的比湿变化幅度较小。

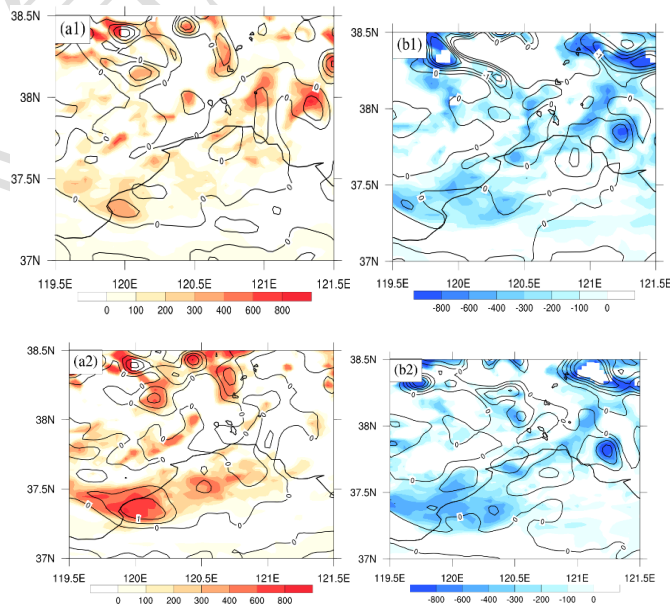


图 6 2022 年 8 月 8 日 04 时莱州湾东侧沿岸附近 (a_1) SST+1、(b_1) SST-1、(a_2) SST+2、(b_2)

SST-2 试验与 CTRL 试验的 CAPE（填色，单位： $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）和 925 hPa 比湿（等值线，单位： $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ）的差值分布

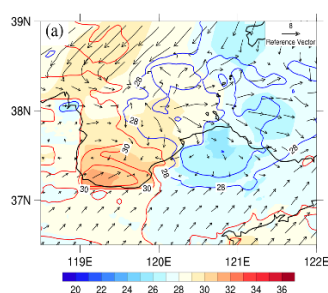
Fig.6 The differences distributions of CAPE (colored, unit: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) and specific humidity (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) on 925 hPa between sensitivity tests of SST+1 (a_1), SST-1(b_1), SST+2(a_2), SST-2(b_2) and CTRL test near the eastern coastal of Laizhou Bay at 04:00 BT 8 August 2022

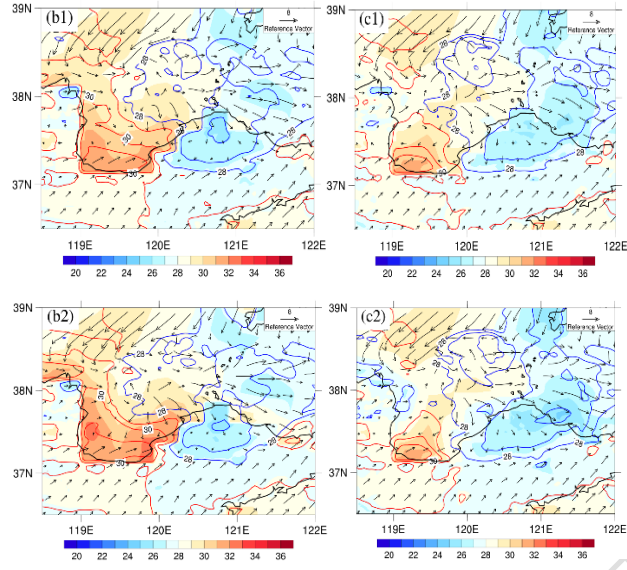
表 2 2022 年 8 月 8 日 04 时各数值试验区域平均 CAPE 和 925 hPa 比湿

Table 2 The zonal averaged CAPE and 925 hPa specific humidity for each numerical experiment at 04:00

BT 8 August 2022		
试验	CAPE/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	925 hPa 比湿/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
SST-2	1630	19.8
SST-1	1671	19.9
CTRL	1719	20.0
SST+1	1756	20.0
SST+2	1817	20.1

对流系统上岸前，CTRL 试验海陆温度对比明显（图 7a），SST+1、SST+2 试验海陆温差均有增大（图 7b₁，7b₂），而在 SST-1、SST-2 组试验中，海陆温差则明显减小（图 7c₁，7c₂）。无论海温升高还是降低，地表温度的高（低）值区均与 2 m 气温的高（低）值区一致（图 7）。从 2 m 气温来看，CTRL 试验在海岸线附近存在等温线密集带，区域平均温度梯度为 $0.662 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ ，SST+1、SST+2 试验沿岸地区的等温线密集程度明显增大，区域平均温度梯度分别为 $0.758 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.785 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ ，较 CTRL 试验分别增加 $0.096 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.123 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 。而 SST-1、SST-2 试验则相反，海岸线附近等温线更加稀疏，温度梯度分别为 $0.563 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.519 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ ，较 CTRL 试验分别减小 $0.099 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $0.143 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ 。温度场的变化导致海平面气压场发生变化（低温区对应局地高压，高温区则与低压对应，图略），进而造成 10 m 风场发生显著的改变。在 CTRL 试验中，气流向沿岸等温线密集带处辐合，造成区域平均散度值为 $-0.403 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，SST+1、SST+2 试验区域平均散度分别为 $-0.390 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $-0.601 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，表明海温升高 1℃ 时并未造成沿岸辐合明显增强，但升高 2℃ 时，沿岸辐合增强明显。SST-1、SST-2 试验区域平均散度分别为 $-0.289 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $-0.054 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，散度值增大幅度分别为 $0.114 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 、 $0.349 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ，表明海温降低可使沿岸边界层辐合程度减弱，其中降低 2℃ 时减弱幅度约为降低 1℃ 时的 3 倍。



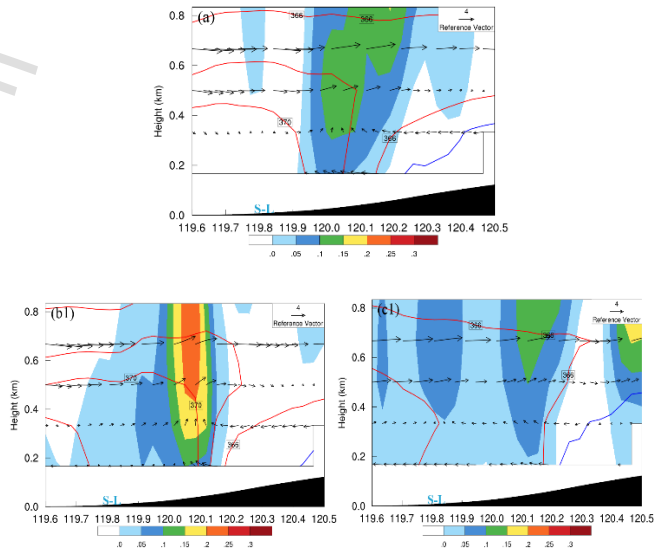


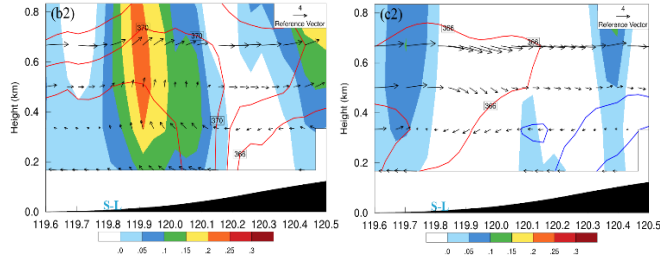
注：图中红色等值线代表 2 m 气温 $>28^{\circ}\text{C}$ ，蓝色等值线代表 2 m 气温 $\leq 28^{\circ}\text{C}$ 。

图 7 2022 年 8 月 8 日 04 时莱州湾地区 (a) CTRL, (b₁) SST+1, (c₁) SST-1, (b₂) SST+2, (c₂) SST-2 试验的地表温度 (填色, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、2 m 气温 (等值线, 间隔 1°C) 和 10 m 风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 的分布

Fig.7 The distribution of surface temperature (colored, unit: $^{\circ}\text{C}$), 2 m temperature (contour, interval is 1°C), and 10 m wind field (vector, unit: m s^{-1}) of numerical tests of (a) CTRL, (b₁) SST+1, (b₂) SST+2, (c₁) SST-1 and (c₂) SST-2 near Laizhou Bay at 04:00 BT 8 August 2022

在边界层垂直运动方面, 对流系统上岸前, CTRL 试验由于沿岸有气流向等温线密集带处辐合, 加之沿岸陆地能量条件较好, 导致边界层内存在弱上升运动 (垂直速度最约 $0.1\sim 0.15 \text{ m s}^{-1}$) (图 8a)。SST+1、SST+2 试验在沿岸地区等相当位温线逐渐变密, 边界层内的辐合上升运动强度增强 (最大约 $0.2\sim 0.25 \text{ m s}^{-1}$)、范围扩大, 其中当海温升高 2°C 时上升运动的增强最显著 (图 8b₁, 8b₂)。SST-1 试验在沿岸地区等相当位温线比 CTRL 试验更加稀疏, 能量条件变差, 上升运动明显减弱 (图 8c₁)。SST-2 试验在 120°E 附近甚至出现稳定边界层结构, 主要表现为下沉运动 (图 8c₂)。





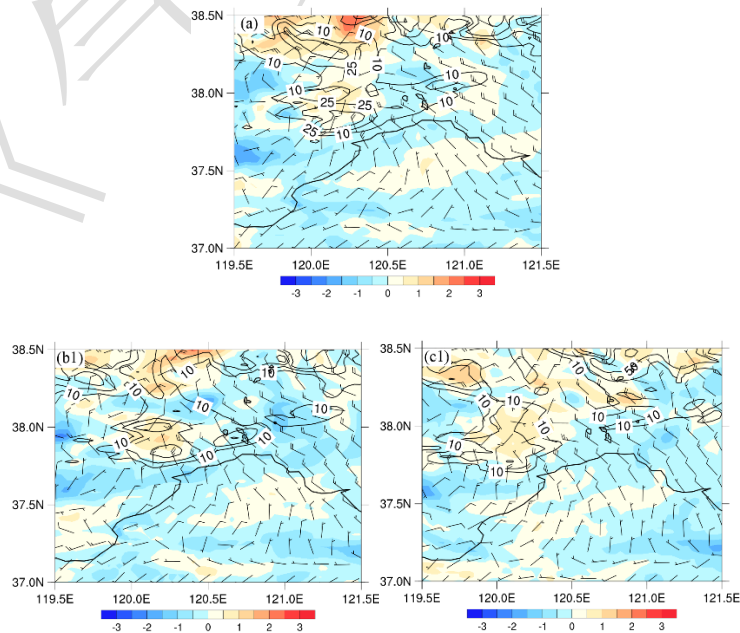
注：图中黑色阴影代表陆地，S-L 代表海陆交界点所在位置，剖面所在位置为图 5a₂ 中东西向实线。

图 8 2022 年 8 月 8 日 05 时 $37.4^{\circ} N$ 、 $119.6^{\circ} \sim 120.5^{\circ} E$ 区域 (a) CTRL, (b₁) SST+1, (c₁) SST-1, (b₂) SST+2, (c₂) SST-2 试验 $u-w$ 风场 (箭矢, 垂直速度扩大 10 倍)、相当位温 (等值线, 单位: K) 和垂直速度 (填色, 单位: $m \cdot s^{-1}$) 的垂直剖面

Fig.8 The vertical profiles of $u-w$ wind field (vector, vertical velocity amplified by 10 times), equivalent potential temperature (contour, unit: K), and vertical velocity (colored, unit: $m \cdot s^{-1}$) for the (a) CTRL, (b₁) SST+1, (c₁) SST-1, (b₂) SST+2, and (c₂) SST-2 experiments in $37.4^{\circ} N$, $119.6^{\circ} \sim 120.5^{\circ} E$ area at 05:00 BT 8 August 2022

2.4 增减海温对南移冷池强度的影响

梅婵娟等 (2025a; 2025b) 的研究表明, 由于渤海海峡对应冷水区, CAPE 值相对较低, 对流系统移经渤海海峡时强度可发生减弱。改变海温的敏感性试验结果具有类似的表现 (图 9), 在海上对流性降水上岸前, 相比于 CTRL 试验 (图 9a), SST+1、SST+2 试验 (图 9b₁, 9b₂) 在渤海海峡处的降水强度相当或略偏强, 对应降水前侧的冷池强度也具有类似的表现; SST-1、SST-2 试验渤海海峡处强降水范围明显缩小 (图 9c₁, 9c₂), 冷池强度也随之减弱。至 8 日 07 时 (图 10), 冷池南移影响沿岸陆地, CTRL 试验区域平均冷池强度约 $-0.26^{\circ}C$, 而 SST+1、SST+2、SST-1、SST-2 试验分别为 $-0.24^{\circ}C$ 、 $-0.49^{\circ}C$ 、 $-0.19^{\circ}C$ 、 $-0.18^{\circ}C$ 。总体而言, 当海温增加 $1^{\circ}C$ 时, 南移冷池的强度未显著加强, 而海温增加 $2^{\circ}C$ 时, 冷池强度明显加强; 海温降低时, 南移冷池则明显减弱。



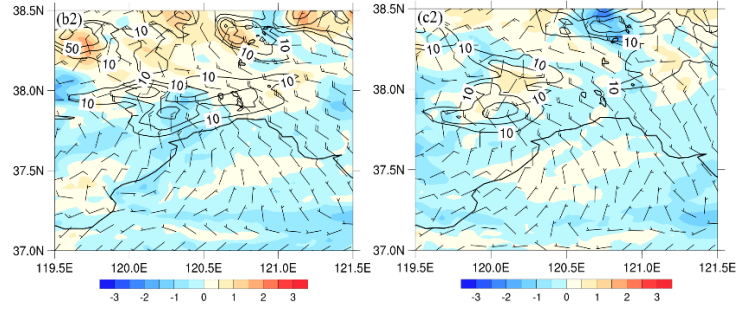
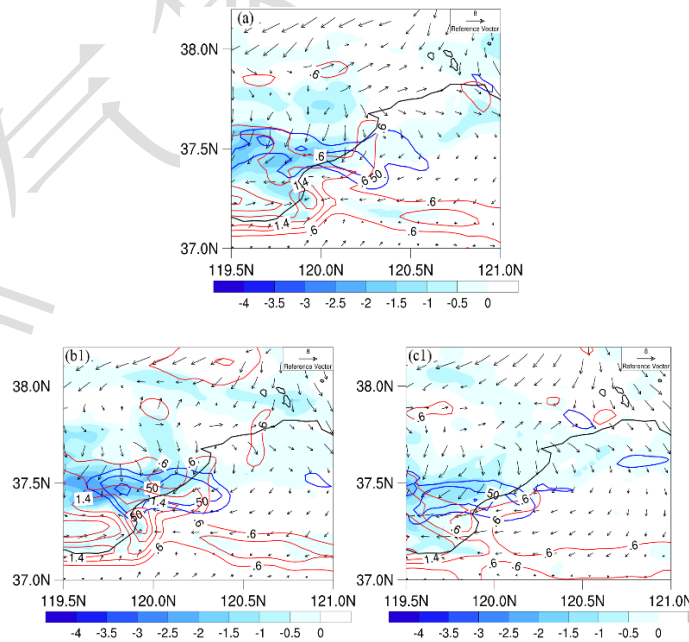


图9 2022年8月8日05时莱州湾东侧沿岸附近(a) CTRL, (b₁) SST+1, (c₁) SST-1, (b₂) SST+2, (c₂) SST-2 试验风场(风羽), 2 m 变温(填色, 单位: °C) 和 1 h 累计降水量(等值线, 取值 10、25、50 mm) 的分布

Fig.9 The distribution of wind field (barb), 2 m temperature variation (colored, unit: °C), and 1-hour accumulated precipitation (contour, Values: 10, 25, 50 mm,) for the (a) CTRL, (b₁) SST+1, (c₁) SST-1, (b₂) SST+2, and (c₂) SST-2 experiment near the eastern coastal of Laizhou Bay at 05:00 BT 8 August 2022

2.5 不同强度冷池与锋区造成沿岸降水的差异

以上分析表明, 在模式中改变海表温度可显著影响沿岸地区中尺度环境条件, 以及由强对流降水所导致的南移冷池强度。在控制试验中(图 10a), 冷池出流呈东西带状分布, 南移过程中与沿岸附近温度梯度大值区相遇, 冷池前沿温度梯度增大(锋区增强), 并造成上升运动(图 11a), 07—08 时累计降水量大值中心基本与二者相交的区域重合(图 10a), 可见上岸对流性降水造成的冷池出流与沿岸等温线密集带相遇使得锋区及抬升加强, 进而形成沿岸降水。在 SST+1、SST+2 试验中, 冷池前沿进一步加强锋区(图 10b₁, 10b₂)及抬升(图 11b₁, 11b₂), 尤其当海温增加 2°C 时冷池强度更强, 使得沿岸降水也强于 CTRL 和 SST+1 试验; 而 SST-1、SST-2 试验中, 由于冷池强度和沿岸等温线密集程度均弱于 CTRL 试验(图 10c₁, 10c₂), 冷池前沿的锋区及抬升(图 11c₁, 11c₂)减弱, 造成沿岸地区降水较弱。



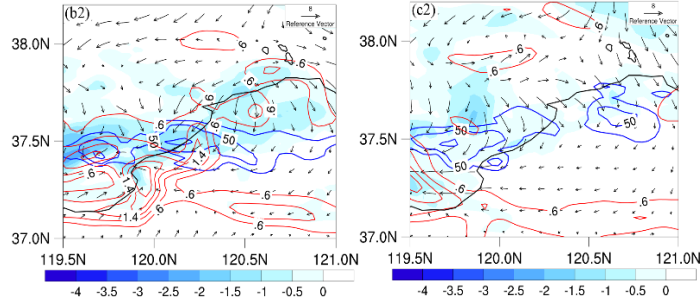
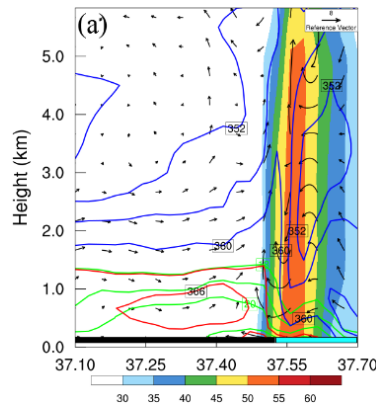


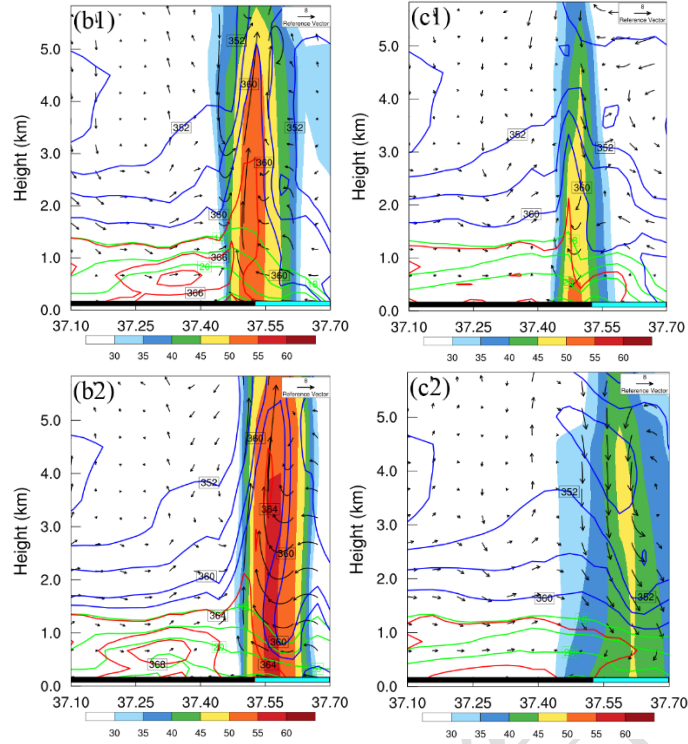
图 10 莱州湾东侧沿岸附近 2022 年 8 月 8 日 06—07 时平均温度梯度(红色等值线,单位: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$)、风场(风羽)、2 m 变温(填色,单位: $^{\circ}\text{C}$)和 07—08 时累积降水量(蓝色等值线,取值 25, 50, 100 mm)的分布

(a) CTRL, (b₁) SST+1, (c₁) SST-1, (b₂) SST+2, (c₂) SST-2 试验

Fig.10 The distribution of the averaged temperature gradient (red contour, unit: $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$), wind field (barb), and 2 m temperature variation (colored, unit: $^{\circ}\text{C}$) from 06:00 BT to 07:00 BT, as well as the accumulated precipitation (blue contour, Values: 25, 50, 100mm) from 07:00 BT to 08:00 BT on 8 August 2022 near the eastern coastal of Laizhou Bay for the (a) CTRL, (b₁)SST+1, (c₁) SST-1, (b₂) SST+2, and (c₂) SST-2 experiments

在控制试验中, 上岸对流系统前方在垂直方向上形成对流不稳定的大气层结(图 11a)以及较为有利的中尺度环境条件, 系统中下沉气流形成冷池出流, 并在沿岸地区与边界层锋区相遇(图 10), 使得锋区和抬升加强, 在不稳定的大气环境中触发对流, 形成沿岸地区的降水。当海温升高 1°C 时(图 11b₁), 系统前方对流不稳定性及温度梯度等中尺度环境条件有所增强, 冷池强度虽没有明显增强, 但仍使得冷池前沿锋区及抬升加强, 从而使得沿岸降水强于 CTRL 试验; 当海温升高 2°C 时(图 11b₂), 系统前方对流不稳定、温度梯度、边界层风场的辐合抬升等中尺度环境条件以及冷池强度均有明显增强, 导致冷池前沿锋区及抬升、对流性降水强度均明显强于 CTRL 和 SST+1 试验。当海温降低 1°C 时(图 11c₁), 中尺度环境条件以及冷池强度均有明显减弱, 导致冷池前沿锋区和抬升以及沿岸降水随之减弱, 而当海温降低 2°C 时(图 11c₂), 边界层内出现稳定层结结构以及下沉气流, 系统及沿岸降水减弱的更明显。





注：红色等值线表示相当位温 ≥ 366 K，蓝色等值线表示相当位温 < 366 K；横坐标黑色和蓝色条块分别代表陆地和海洋。

图 11 2022 年 8 月 8 日 07 时 120.2°E, 37.10°~37.70° N 区域 (a) CTRL, (b₁) SST+1, (b₂) SST+2, (c₁) SST-1, (c₂) SST-2 试验相当位温 (红色、蓝色等值线, 单位: K)、比湿 (绿色等值线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、反射率因子 (填色, 单位: dBZ)、v-w 风场 (箭矢, 垂直速度扩大 10 倍, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 的垂直剖面

Fig.11 The vertical profiles of equivalent potential temperature (red and blue contours, unit: K), specific humidity (green contours, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), reflectivity factor (colored, unit: dBZ), and v-w wind field (vectors; the vertical velocity amplified by a factor of 10, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) in 120.2° E, 37.10° —37.70° N area at 07:00 BT 8 August 2022 for (a) CTRL, (b₁) SST+1, (b₂) SST+2, (c₁) SST-1, and (c₂) SST-2 experiments

3 结论与讨论

本文采取针对典型上岸对流个例开展 WRF 模式的高分辨率数值模拟及改变海温的敏感性试验方法, 探讨了黄渤海海温变化对上岸对流性降水强度的可能影响及原因。主要结论如下:

(1) 与 CTRL 试验相比, 当海温逐渐升高时, 沿岸陆地附近降水强度随之增强, 其中海温升高 1°C (2°C) 时, 区域平均降水量增加 2.6 mm (15.7 mm), 降水量极值增加 38.2 mm (53.7 mm)。而海温逐渐降低时, 沿岸陆地的降水强度随之减弱, 当海温降低 1°C (2°C) 时, 相应区域平均降水量减小 3.7 mm (8.3 mm), 但降水量极值受海温降低的影响不显著。

(2) 对本次个例而言, 升高或降低海温可对沿岸陆地中尺度环境条件产生明显影响: 与 CTRL 试验相比, 当海温升高 1°C 时, 沿岸陆地温度梯度明显增强, 边界层风场辐合虽未见明显增强, 但由于 CAPE 值有所增大, 导致边界层内的上升运动随之增强; 当海温升高 2°C 时, 上述中尺度环境条件均变得更加有利; 而当海温降低 1°C 时, 上述中尺度环境场明显减

弱, 当海温降低 2℃时, 上述要素进一步减弱, 边界层内转为以下沉运动为主。

(3) 在海温变化对南移冷池强度的影响方面, 与 CTRL 试验相比, 海温升高 1℃时未对南移冷池强度产生明显影响, 而当海温升高 2℃时, 冷池强度明显增强; 当海温逐渐降低时, 冷池强度则明显减弱。总之, 海温逐渐升高时的冷池强度明显强于海温逐渐降低时的情形。

(4) 在不同海温试验背景下, 不同强度的冷池出流在沿岸陆地不同的中尺度环境大气中触发了不同强度的对流性降水。当海温升高 1℃时, 由于沿岸 CAPE 有所增强, 温度梯度有所增大, 南移冷池虽未见增强, 但仍使得沿岸锋区和抬升运动有所加强, 导致沿岸降水相比于 CTRL 试验有所增强; 当海温升高 2℃时, 中尺度环境条件及冷池均有明显加强, 冷池前沿锋区和动力抬升加强, 使得沿岸降水相比于 CTRL 及 SST+1 试验均明显增强。当海温降低 1℃时, 沿岸中尺度环境条件及冷池强度均有所减弱, 沿岸降水随之减弱; 当降低 2℃时, 边界层内转为以下沉运动为主, 沿岸降水减弱的更加明显。

导致对流性降水强度发生变化的影响因素有很多, 本文的分析表明在一定条件下, 海温的变化可通过影响莱州湾东侧沿岸地区的中尺度环境条件、以及南移冷池的强度等, 进而影响上岸对流性降水的强度, 所得结论可为上岸对流降水强度变化和渤海南岸降水预报业务提供一定的理论参考。另外, 本文仅对一次莱州湾东侧沿岸南移上岸对流性降水过程开展了数值模拟与诊断分析, 还需针对多个相似个例进行深入研究, 以验证所得出的主要结论, 并总结相应的客观预报方法以实现业务应用。

参考文献

- 陈淑琴, 黄辉, 周丽琴, 等, 2011. 对流单体在杭州湾入海时的强度变化分析[J]. 气象, 37(7): 889-896. Chen S Q, Huang H, Zhou L Q, et al, 2011. Analysis on the intensity changes of convective cells in the Hangzhou Bay when entering the sea[J]. Meteor Mon, 37(7): 889-896 (in Chinese).
- 高梦竹, 陈耀登, 章丽娜, 等, 2017. 对流移入杭州湾后飑线发展机制分析[J]. 气象, 43(1): 56-66. Gao M Z, Chen Y D, Zhang L N, et al, 2017. Analysis on influence of convection after moving into Hangzhou Bay on the development of squall line[J]. Meteor Mon, 43(1): 56-66 (in Chinese).
- 李延江, 景华, 李江波, 等, 2013. 一次渤海强对流天气系统监测与大风成因探讨[J]. 海洋预报, 30(1): 25-35. Li Y J, Jing H, Li J B, et al, 2013. The causes of a gale and the monitoring system for severe convective weather over the Bohai Bay[J]. Marine For, 30(1): 25-35 (in Chinese).
- 梁军, 陈联寿, 李英, 2007. 热带气旋在黄海北部转向引发暴雨的环境场特征及数值试验分析[J]. 大气科学, 31(5): 1011-1020. Liang J, Chen L S, Li Y, 2007. The characteristics of large-scale circulation of torrential rain associated with the tropical cyclone turning in the Northern Yellow Sea and numerical experiments[J]. Chin J Atmos Sci, 31(5): 1011-1020 (in Chinese).
- 梁钊明, 高守亭, 王东海, 等, 2014. 京津冀地区与海风锋相互作用的对流系统的发展预判分析[J]. 气象学报, 72(1): 116-132. Liang Z M, Gao S T, Wang D H, et al, 2014. Analysis of the development prognosis of the convective systems interacting with sea breeze front in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Acta Meteor Sin, 72(1): 116-132 (in Chinese).
- 刘伊格, 2019. 渤海和黄海海表温度变化及成因分析[D]. 南京: 南京大学. Liu Y G, 2019. Sea surface temperature change and cause analysis in the Bohai Sea and the Yellow Sea[D]. Nanjing: Nanjing University (in Chinese).
- 梅婵娟, 侯淑梅, 汤欢, 等, 2025a. 渤海海峡下垫面对线性风暴强度的影响分析[J]. 热带气象学报, 41(1): 112-124. Mei C J, Hou S M, Tang H, et al, 2025a. Effects of the underlying surface on the intensity of linear storms in the Bohai Strait[J]. J Trop Meteor,

- 41(1): 112-124 (in Chinese).
- 梅婵娟, 王秀明, 李蕊, 等, 2025b. 渤海湾飑线入海增强机制的个例研究[J]. 气象, 51(9): 1061-1071. Mei C J, Wang X M, Li R, et al, 2025b. A case study on the enhancement mechanism of squall lines moving into the Bohai Bay[J]. Meteor Mon, 51(9): 1061-1071 (in Chinese).
- 沈杭锋, 翟国庆, 朱补全, 等, 2010. 浙江沿海中尺度辐合线对飑线发展影响的数值试验[J]. 大气科学, 34(6): 1127-1140. Shen H F, Zhai G Q, Zhu B Q, et al, 2010. A model study of impact of coastal mesoscale convergence line on development of squall line over Zhejiang Province[J]. Chin J Atmos Sci, 34(6): 1127-1140 (in Chinese).
- 盛杰, 郑永光, 沈新勇, 2020. 华北两类产生极端强天气的线状对流系统分布特征与环境条件[J]. 气象学报, 78(6): 877-898. Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y, 2020. Climatology and environmental conditions of two types of quasi-linear convective systems with extremely intense weather in North China[J]. Acta Meteor Sin, 78(6): 877-898 (in Chinese).
- 陶局, 易笑园, 赵海坤, 等, 2019. 一次飑线过程及其受下垫面影响的数值模拟[J]. 高原气象, 38(4): 756-772. Tao J, Yi X Y, Zhao H K, et al, 2019. Numerical simulation on the influence of Bohai Sea to a squall line process[J]. Plateau Meteor, 38(4): 756-772(in Chinese).
- 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 Meteor Sin, 79(5): 717-731 (in Chinese).
- 汪雅, 苗峻峰, 谈哲敏, 2013. 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, 71(6): 1146-1159. Wang Y, Miao J F, Tan Z M, 2013. Numerical study of the impact of differences between sea and land underlying surface on thunderstorm in the Ningbo Area[J]. Acta Meteor Sin, 71(6): 1146-1159 (in Chinese).
- 王彦, 高守亭, 梁钊明, 2014. 渤海湾海风锋触发雷暴的观测和模拟分析[J]. 高原气象, 33(3): 848-854. Wang Y, Gao S T, Liang Z M, 2014. Analysis on the observation and simulation of thunderstorms triggered by sea breeze front in Bohai Bay[J]. Plateau Meteor, 33(3): 848-854 (in Chinese).
- 肖昀廷, 蔡晨康, 黄亦心, 等, 2025. 海表温度日变化特征对海陆风模拟的影响研究[J]. 地学前缘, 32(3): 218-230. Xiao Y T, Cai C K, Huang Y X, et al, 2025. Study on the impact of daily sea surface temperature variation characteristics on the simulation of sea land breeze[J]. Earth Science Frontiers, 32(3): 218-230 (in Chinese).
- 邢秀芹, 1997. 胶东半岛地区海陆风特征[J]. 气象, 23(5): 56-58. Xing X Q, 1997. Characteristics of land-sea breeze in Peninsula Area on Bohai Bay[J]. Meteor Mon, 23(5): 56-58 (in Chinese).
- 徐姝, 易笑园, 熊明明, 等, 2024. 华北局地大暴雨过程中多个 β 中尺度对流系统发生发展对比分析[J]. 气象, 50(2): 181-194. Xu S, Yi X Y, Xiong M M, et al, 2024. Comparative analysis of occurrence and development of multiple β -meso scale convective systems during a localized severe torrential rain event in North China[J]. Meteor Mon, 50(2): 181-194 (in Chinese).
- 易笑园, 陈宏, 张庆, 等, 2024. 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, 44(3): 1-13. Yi X Y, Chen H, Zhang Q, et al, 2024. Causes of an extreme local short-time heavy precipitation event along the west coast of Bohai Bay[J]. J Marine Meteor, 44(3): 1-13 (in Chinese).
- 郑丽娜, 孙继松, 2024. 泰山地形对一次副高边缘大暴雨过程影响的观测分析[J]. 气象学报, 82(2): 155-167. Zheng L N, Sun J S, 2024. Observational analysis of the topographic effect of Mount Tai on an extreme rainfall event occurring at the edge of the subtropical high[J]. Acta Meteor Sin, 82(2): 155-167(in Chinese).
- 郑永光, 陈炯, 朱佩君, 2008. 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, 53(4): 471-481. Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, 2008. Distribution of summer mesoscale convective systems in China and surrounding areas and their diurnal variation characteristics[J]. Sci Bull, 53(4): 471-481 (in Chinese).

-
- French A J, Parker M D, 2012. Observations of mergers between squall lines and isolated supercell thunderstorms[J]. *Wea Forecasting*, 27(2): 255-278.
- Lericos T P, Fuelberg H E, Weisman M L, et al, 2007. Numerical simulations of the effects of coastlines on the evolution of strong, long-lived squall lines[J]. *Mon Wea Rev*, 135(5): 1710-1731.
- Li Y L, Wang Y Q, Lin Y L, et al, 2020. Effects of terrain and landmass near Fujian Province of China on the structure and propagation of a long-lived rainband in typhoon Longwang (2005): a numerical study[J]. *J Geophys Res Atmos*, 125(22): e2020JD033393.
- Lombardo K, Colle B A, 2013. Processes controlling the structure and longevity of two quasi-linear convective systems crossing the southern New England Coast[J]. *Mon Wea Rev*, 141(11): 3710-3734.
- Lombardo K, Sinsky E, Jia Y, et al, 2016. Sensitivity of simulated sea breezes to initial conditions in complex coastal regions[J]. *Mon Wea Rev*, 144(4): 1299-1320.
- Lombardo K A, Colle B A, 2010. The spatial and temporal distribution of organized convective structures over the northeast and their ambient conditions[J]. *Mon Wea Rev*, 138(12): 4456-4474.
- Lombardo K A, Colle B A, 2012. Ambient conditions associated with the maintenance and decay of quasi-linear convective systems crossing the Northeastern U.S. coast[J]. *Mon Wea Rev*, 140(12): 3805-3819.
- Murray J C, Colle B A, 2011. The spatial and temporal variability of convective storms over the Northeast United States during the warm season[J]. *Mon Wea Rev*, 139(3): 992-1012.
- Shi J R, Santer B D, Kwon Y O, et al, 2024. The emerging human influence on the seasonal cycle of sea surface temperature[J]. *Nat Climate Change*, 14(4): 364-372.
- Sugimoto S, 2025. Marine heatwave off Tokai, Japan, attributed to the Kuroshio Large Meander Path, and an associated increase in summer rainfall over Japan[J]. *J Oceanogr*, 81(1): 63-79.
- Von Storch H, Van Loon H, Kiladis G N, 1988. The southern oscillation. Part VIII: model sensitivity to SST anomalies in the tropical and subtropical regions of the South Pacific convergence zone[J]. *J Climate*, 1(3): 325-331.
- Xu L, Raman S, Madala R V, et al, 1996. A non-hydrostatic modeling study of surface moisture effects on mesoscale convection induced by sea breeze circulation[J]. *Meteor Atmos Phys*, 58(1-4): 103-122.
- Zhang L N, Sun J Z, Ying Z M, et al, 2021. Initiation and development of a squall line crossing Hangzhou Bay[J]. *J Geophys Res Atmos*, 126(1): e2020JD032504.