刘丽丽,李英华,王雪莲,等.2024. 区域海气耦合模式对黄渤海周边近地层温湿预报的性能研究[J].暴雨灾害,43(1):63-72. LIU Lili, LI Yinghua, WANG Xuelian, et al. 2024. Study on the influence of the regional air-sea coupled model on forecast accuracy of near-surface elements in the surrounding areas of the Yellow Sea and Bohai Sea [J]. Torrential Rain and Disasters,43(1):63-72 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-051

区域海气耦合模式对黄渤海周边近地层温湿预报的性能研究

刘丽丽[1,2],李英华[1,2],王雪莲[1,2],林毅[1,2],董琪如[1,2],邱晓滨[1,2]
(1. 天津市海洋气象重点实验室,天津 300074;2. 天津市气象科学研究所,天津 300074)

摘　要: 相对中国其他海域,三面环陆的黄渤海区域海洋与中纬度大气间的相互作用有其独特性,在该区域开展海气耦合模式对气象要素的影响研究十分必要。本文基于大气和海洋的全球预报和再分析资料,利用高分辨率区域海气耦合模式(简称耦合模式)和非耦合模式,开展数值模拟试验。并根据国家地面常规气象观测站和埕北石油A平台实况观测资料,对比分析了2020年6月两种模式对近地层大气温湿要素预报结果,并结合海温、海气热通量变化和风场调整情况,分析了海气双向耦合过程对近地层温湿要素预报影响的原因。结果表明:耦合模式对近地层的湿度要素预报改进较大,以增湿效应为主;海气双向耦合对温湿要素的影响范围可扩展至黄渤海周边省市全域,可提升耦合模式对黄渤海周边区域近地层湿度和白天温度的预报效果;湿度对海气双向耦合的响应速度明显快于温度,说明耦合模式先改进了近地层湿度预报效果;耦合模式海表向上的潜热通量增加是近地层温湿要素预报改进的主要原因。

关键词: 海气耦合模式;检验评估;热通量;温度;湿度
中图法分类号: P459.9　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-051

Study on the performance of the regional air-sea coupled model on forecast accuracy of near-surface temperature and humidity in the surrounding areas of the Yellow Sea and Bohai Sea

LIU Lili[1,2], LI Yinghua[1,2], WANG Xuelian[1,2], LIN Yi[1,2], DONG Qiru[1,2], QIU Xiaobin[1,2]

(1. *Tianjin Key Laboratory for Oceanic Meteorology, Tianjin* 300074; 2. *Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin* 300074)

Abstract: Compared with other sea areas in China, the interaction between the Yellow and Bohai Sea surrounded by land on three sides and the mid latitude atmosphere has its uniqueness, and it is necessary to conduct research on the impact of air-sea coupled model on meteorological elements in this region. Based on the global forecasting and reanalysis data for the atmosphere and ocean, the numerical experiments are conducted using the high resolution regional air-sea coupled model (referred to as coupled model) and uncoupled model. By utilizing the actual observation data of the national surface conventional observation stations and the Chengbei Petroleum A platform in the inspection area, a comparative analysis was conducted on the prediction results of the near-surface atmospheric temperature and humidity elements in June 2020. In addition, according to the changes in sea surface temperature, air-sea heat flux, and wind field adjustments, the reasons for the impact of the air-sea bidirectional coupling process on the prediction of near-surface temperature and humidity factors were analyzed. The results show that the coupled model improves the forecasting of humidity element near-surface, with a predominantly humidifying effect. The impact area of bidirectional coupling between air and sea on temperature and humidity can extend to the entire area around the Yellow and Bohai Sea, thereby improving the prediction of near-surface temperature during the daytime and humidity elements of the coupled model in this area. The response of humidity to the air-sea bidirectional coupling is significantly faster than that of temperature, indicating that the regional air-sea coupling model first improves the forecast of near-surface humidity. The increase of latent heat flux over the sea surface after coupling is the main reason for the improvement in the forecast of temperature and humidity elements near the surface layer.

Key words: air-sea coupled model; inspection and evaluation; heat flux; temperature; humidity

收稿日期: 2023-03-15;**定稿日期:**2023-09-12
资助项目: 国家自然科学基金项目(42105009);天津市自然科学基金项目(20JCYBJC00780);环渤海区域科技协同创新基金项目(QYXM201901);天津市气象局重点科研项目(202002zdxm01,202133cgzsxm02)

第一作者: 刘丽丽,主要从事海气耦合模式研究。E-mail: lililiuwuwu@126.com
通信作者: 李英华,主要从事数值模拟研究。E-mail: liyinghua05@163.com

引 言

海洋和大气组成了一个复杂的耦合系统，海洋向大气输送热量和水汽，大气则主要通过向下的动量输送影响海洋，简称海气耦合（Xie, 2022）。为描述海洋和大气之间物质及能量交换的正负反馈过程，海气耦合模式（包括全球海气耦合模式和区域海气耦合模式）成为认识和研究海气相互作用问题的重要工具(陈志强等，2022)。自20世纪90年代以来，海气耦合模式逐步在我国应用于天气和气候研究(刘屹岷等，1993)。在20世纪初，国内开展大量对全球海气耦合模式的应用评估工作，评估表明全球海气耦合模式能够模拟东亚地区的气候特征，但存在明显系统误差，且对我国东部大雨日变化趋势的空间分布模拟能力不足(赵宗慈等，1995；司东等，2009)。近年，基于第六次国际耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project 6, CMIP6),也有学者开展全球海气耦合模式模拟中国区域气象要素日较差能力评估(唐寅等，2022；王双双等，2022)。

由于受模式分辨率和一些物理过程参数化的限制，全球海气耦合模式难以合理再现局地的天气和气候变化特征(Zhou and Yu，2006)。随着区域海气耦合模式的发展，2010年左右，国内开始对区域海气耦合模式进行细致的分析和评估工作(黄立文等，2005；王子谦等，2012)。与全球气候模式和非耦合区域气候模式相比，区域海气耦合模式模拟结果具有明显的优势，区域海气耦合模式的水汽输送模拟能力有较大改进(周天军等，2016)。近年，对区域海气耦合模式的评估，大多集中于台风等具有强海气相互作用的灾害性天气(詹思屿等，2017)。然而，海洋和大气间热量和物质交换是一直持续并累积的，因此，在天气尺度下，区域海气耦合模式对长时间序列的天气预报性能需要进一步评估。

对于区域海气耦合模式来说，海洋分量模式把海温传递给大气分量模式，通过大气分量模式的近地层参数化方案计算海气热通量，热通量传导至边界层参数化方案，对大气的温度、比湿等要素进行调整(Chen and Duhia，2006)。所以，对温度等关键气象要素的模拟能力检验是海气耦合模式预报性能评估的重要内容。对于台风等灾害性天气，评估的重点为台风的强度和海面风场等大气相关物理量场(雷小途等，2019；陈志强等，2022)。对于长时间序列的区域海气耦合模式预报来说，与海气热通量直接相关的是近地层温度和湿度要素，因此，本文着重对近地层温度和湿度要素进行模式预报性能评估。

国内的区域海气耦合模式检验评估工作多针对南海、华北等区域开展(詹思屿等，2017；张莉和丁一汇，2008a；张莉等，2008b)。然而，渤海是半封闭内海，平均水深仅19米，黄海为半封闭边缘海，平均水深仅44米，受地理位置和海水深度等因素的影响，黄渤海海洋与中纬度大气间的相互作用相对中国其他海域有其独特性。而且，区域海气耦合模式对长时间序列天气尺度的近地层要素预报性能尚未完全明确；耦合海洋模式后，对大气模式预报近地层要素的水平影响范围也需要进一步研究。因此，在黄渤海及周边区域，开展高分辨率区域海气耦合模式（简称耦合模式，下同）的近地层气象要素评估十分必要。本文通过对2020年6月每天00时(世界时，下同)起报的耦合模式和非耦合模式预报结果进行长时间序列检验，对比研究耦合模式和非耦合模式对近地层温湿要素的预报性能，进而分析耦合模式要素预报相对非耦合模式预报的优势，从而为进一步发展完善耦合模式的近地层要素预报提供参考。

1 资料和方法

1.1 资料说明

本文的耦合模式中大气分量模式的初始场和侧边界强迫场由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球预报系统(Global Forecast System，GFS)提供，时间间隔6 h，分辨率0.5°×0.5°；海洋分量模式初始场和侧边界采用的是美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)全球简单海洋资料同化分析系统(Simple Ocean Data Assimilation，SODA)气候态月平均资料，分辨率0.5°×0.5°。

温度、湿度统计检验所用实况数据为气象大数据云平台“天擎”国家地面常规气象观测站每小时自动观测数据。检验区域根据模式设置情况分为2个，首先选取图1中d02区域为检验区域，该区域内共有956个观测站点；其次，为避免因检验区域与耦合区域过于接近导致的检验结果偏差，设定d01区域为补充检验区域，以验证d02区域检验结果的可靠性，该区域内共有2013个观测站点。

热通量检验选取2020年6月24—30日连续7 d静稳天气下渤海埕北石油A平台(118°25′E，38°27′N)的通量观测数据，该数据由天津市气象科学研究所布设在A平台的开路涡动通量观测系统提供，数据质控等级7级以下，资料连续且质量较好。

1.2 评估方法

本文采用耦合和非耦合模式预报结果对比检验

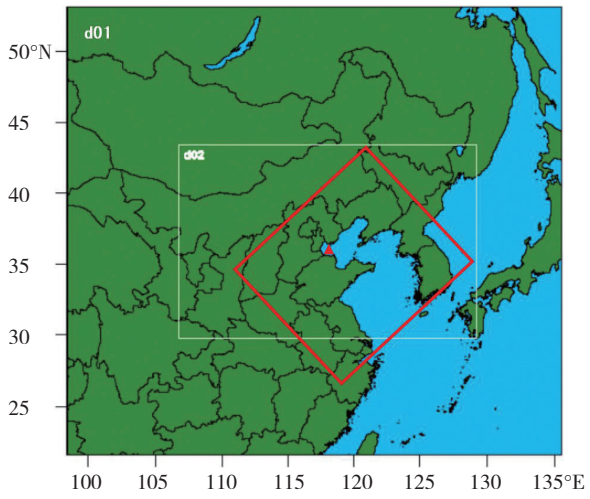


图1 耦合模式和非耦合模式范围示意图(d01为补充检验区域，d02为检验区域，红色框表示海洋分量模式区域，三角形为A平台所在位置)

Fig.1 Schematic diagram of the range of coupled model and uncoupled model (d01 is supplement inspection area, and d02 is the inspection area. The red box represents the ocean mode area,and the triangle represents the location of platform A)

的方法讨论海气双向耦合对大气近地层要素预报的影响，该方法可用于数值模式的评估(郝翠等，2022)。检验分为两个部分，一是近地层气象要素的传统整体误差检验，将地面观测的温度、湿度与模式结果比较，计算平均误差(记为 V_{me})和均方根误差(记为 V_{rmse})。其中，V_{me} 能够量化预报和实况之间的平均偏差，代表模式预报的系统误差，正值表示预报值高于实况值，负值表示预报值低于实况值，V_{rmse} 则能反映预报与实况的偏离程度；二是海气通量对比检验，利用渤海埕北石油A平台观测的连续7 d静稳天气的潜热通量、感热通量与耦合和非耦合模式12 h预报的数据进行日平均变化对比。其中，V_{rmse} 和 V_{me} 计算方法分别为

$$V_{\mathrm{rmse}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i-O_i)^2} \tag{1}$$

$$V_{\mathrm{me}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(F_i-O_i) \tag{2}$$

其中，F 为预报值，O 为实况值。N 为总样本数，i 为检验站点标号。本文的均方根误差和平均误差指的是2020年6月每天00时起报的模式预报误差的平均。为保持变量和通量的一致性，本文检验的要素均为大气分量模式的模拟结果。

2 数值模拟试验设计

本文设计两个数值模拟试验，分别是区域海气耦合数值模拟试验和非耦合数值模拟试验。

耦合数值模拟试验采用区域海气耦合(Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-SedimentTransport,COAWST)模式系统(Warner et al.，2010)，COAWST模式系统由美国伍兹霍尔海岸和海洋科学中心(Woods Hole Coastal and Marine Science Center，WHCMSC)牵头研发，该模式系统不仅应用于台风等中尺度天气个例的模拟(Nelson et al.，2014)，还应用于长时间序列的海气相互作用研究(Bruneau and Toumi，2016)。耦合模拟试验是基于COAWST模式系统框架，由COAWST两个开源的分量模式编译组成，分别是大气分量模式(Weather Research and Forecast model, WRF)和海洋分量模式(Regional Ocean Modeling System, ROMS)。分量模式间通过模式耦合器(Modeling Coupling Toolkit, MCT)实现双向耦合，分量模式间信息交换频率为30 min一次。大气分量模式为海洋分量模式提供风速风向等直接变量，海洋分量模式为大气分量模式提供海温直接变量。

耦合模式起报时间为2020年6月每日00时，预报范围如图1所示。其中，大气分量模式为两重嵌套(d01和d02)，分辨率分别为9 km和3 km，水平格点数分别为441×401和796×520，垂直层数为51层，微物理参数化方案为Thompson (Thompson et al.，2008)，长短波辐射方案为RRTMG (Iacono et al.，2008)，边界层和近地层方案为MYJ (Janjić，1994)，积云对流参数化方案为Grell-3 (Grell and Dévényi，2002)，第二重嵌套不采用积云对流参数化方案。海洋分量模式水平方向采用单重网格(3 km)，垂直43层，水平格点数为498×378，耦合模式系统的预报时长为48 h。

非耦合模式即单独大气模式，不耦合海洋模式ROMS，其起报时次、范围、分辨率、垂直层数、参数化方案等设置，均与耦合模式中大气分量模式的设置一致。非耦合的大气模式的海温场默认由大气初始场的2 m温度换算得到。

3 海气耦合和非耦合模式近地层气象要素预报对比分析

为评估耦合模式对近地层温湿要素的预报性能，利用平均误差和均方根误差等传统整体误差检验方式，对耦合模式的近地层温湿要素预报结果进行检验评估。通过耦合和非耦合模式检验结果的对比，分析海气双向耦合对黄渤海及周边区域近地层温湿要素预报的影响特征。

3.1 近地层温度场的对比分析

海温通过感热和潜热通量影响近地层大气温度，在d02目标检验区域，2 m温度预报与实况的平均误差(图2a)表明，耦合和非耦合模式的2 m温度预报均存在日变化特征，即白天2 m温度预报明显偏高，而夜间2 m温度预报偏高情况相对较弱。这表明耦合后温度

预报的系统性偏差特征依然存在。但从量值上看，非耦合模式白天最大误差可达2.74 ℃，夜间温度预报偏高0.2～0.5 ℃，而耦合模式的温度预报与实况更加接近，白天误差最大达2.63 ℃，比非耦合模式的误差减少约0.1 ℃。耦合和非耦合模式的差异主要出现在预报12 h之后。由此可见，耦合能够改善模式预报的系统性偏差，尤其预报12 h后对2 m温度预报的改进作用表现明显。

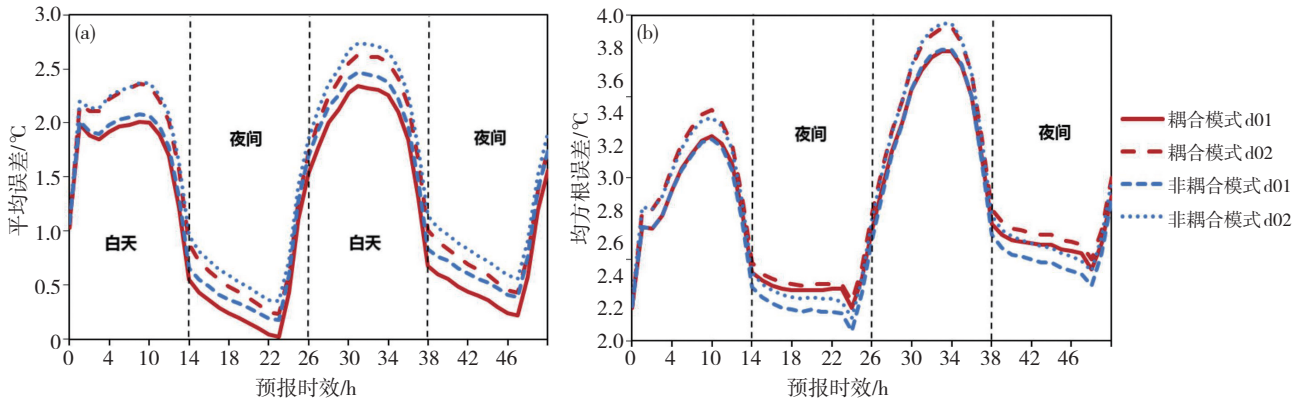


图2 2020年6月耦合和非耦合模式d01和d02目标检验区域2 m温度预报的平均误差(a)和均方根误差(b)

Fig.2 (a) Average error and (b) root-mean-square error of 2 m temperature forecast of coupled and uncoupled models in the d02 target test area in June 2020

在d02目标检验区域，从2 m温度预报与实况的均方根误差(图2b)来看，耦合和非耦合模式预报的均方根误差白天基本一致，区域性差异主要在夜间，非耦合模式的温度预报均方根误差夜间更小，说明尽管耦合能够改进模式对2 m温度预报的系统性偏差，但是却加大了该区域的误差偏离程度，即耦合模式的温度预报存在部分区域过高或过低的情况。

总得来说，耦合模式对白天的温度预报有改进，但会增大部分区域的夜间温度误差，导致某个局部区域夜间温度过高或者过低的现象。此外，2 m温度均方根误差增大，说明耦合海洋分量模式对d02目标检验区域的温度预报是负效应。

从不同预报时效耦合对非耦合模式2 m温度预报的差值变化可以看出(图3)，在预报3 h时，耦合与非耦合模式的差异性最先出现在海洋周边，黄渤海沿岸站点的2 m温度较非耦合模式有明显下降；至预报12 h(图3b)，耦合海洋分量模式降温影响向内陆推进，主要影响至辽宁南部、天津、河北东部、山东东部区域，沿岸降温幅度增强，但是河北南部部分站点的温度略有增加；至预报24 h(图3c)，耦合海洋分量模式的降温作用继续向西和向北推进，北至辽宁北部，西至河北南部—山东西部，均降温明显；至预报48 h(图3d)，山东西部有明显的降温，但河北中部区域有弱增温。可见，耦合海洋分量模式的降温作用可随预报时效增加逐步向内陆扩散，黄渤海周边尤其是沿岸区域降温幅度较大，降温影响范围的主体可推进至辽宁—河北—山东全境。

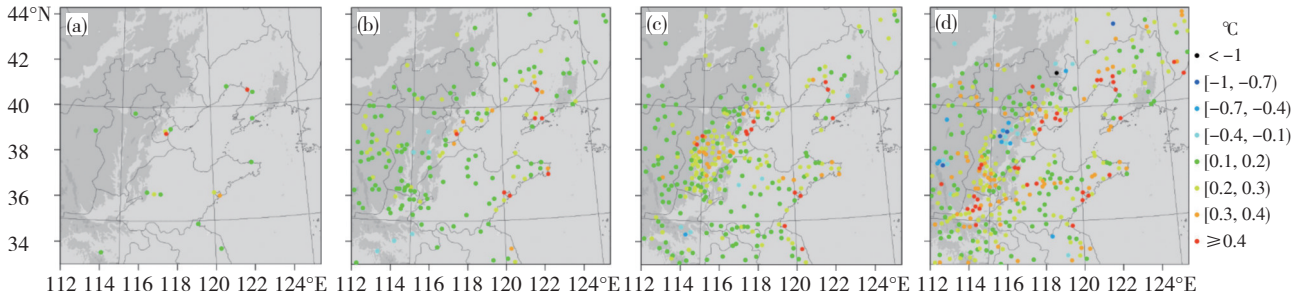


图3 2020年6月黄渤海周边区域耦合和非耦合模式3 h (a)、12 h (b)、24 h (c)、48 h (d) 预报时效的2 m温度预报差

Fig.3 Difference diagram of 2 m temperature prediction of reginal coupled and uncoupled models at (a) 3 h, (b) 12 h, (c) 24 h and (d) 48 h in the surrounding areas of the Yellow Sea and Bohai Sea in June 2020

3.2 近地层湿度场的对比分析

在d02目标检验区域，2 m相对湿度预报与实况的平均误差(图4a)表明，耦合和非耦合模式2 m相对湿度平均误差的趋势较为一致，均存在明显的日变化特征，耦合模式2 m相对湿度预报的平均偏差比非耦合模式低，说明耦合模式对2 m相对湿度预报的系统性偏差有改进，对近地层大气起到增湿作用。

在d02目标检验区域，由均方根误差(图4b)分析，耦合模式的均方根误差比非耦合模式的偏低，说明耦合模式不仅降低了2 m相对湿度的系统性偏差，而且

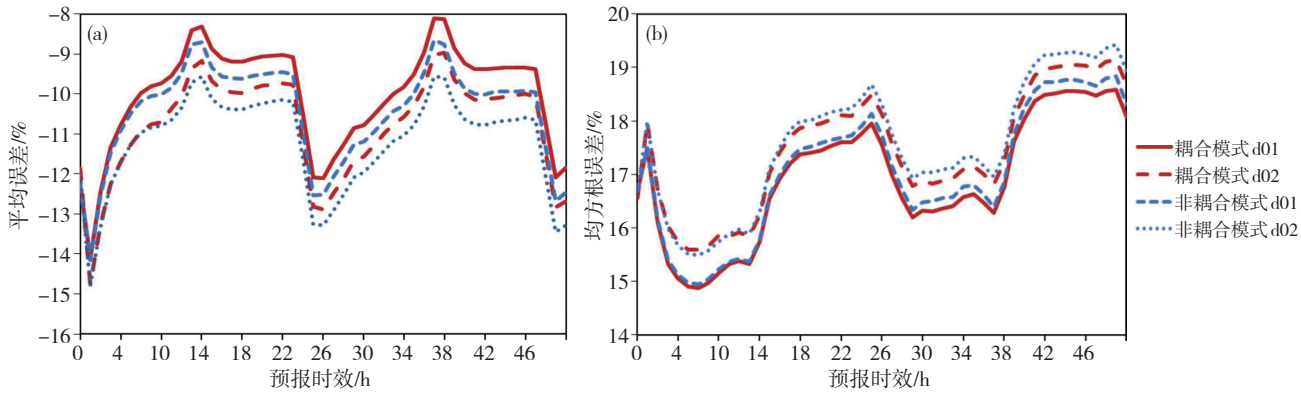


图4 2020年6月耦合和非耦合模式d01和d02目标检验区域2 m相对湿度预报的平均误差(a)和均方根误差(b)

Fig.4 (a) Average error and (b) root-mean-square error of 2 m relative humidity of coupled and uncoupled models in d02 target test area in June 2020

其预报与实况的偏离程度也有所降低，进一步印证了耦合模式在相对湿度预报上具有优势，且对区域性范围的增湿作用随时间逐渐增强。

总的来说，2 m相对湿度预报存在总体偏干的系统性偏差，耦合海洋分量模式对近地层大气有明显的增湿作用，预报5 h后，可明显表现2 m相对湿度的区域性差异，近地层相对湿度比温度对耦合海洋分量模式的敏感性更强。

由耦合和非耦合模式2 m相对湿度预报的差值变化(图5)可见，在预报3 h(图5a)时，耦合海洋分量模式对海岸区域产生明显增湿作用，渤海湾和辽东湾的沿岸增湿尤为明显；至预报12 h (图5b)，耦合导致的增湿作用向内陆持续推进，黄渤海周边区域均出现增湿效应；至预报24 h (图5c)，增湿效应影响范围明显比3 h预报时效更加集中，在天津和河北南部区域增湿幅度明显，这与2020年6月850 hPa气候特征对应(刘芸芸等，2021)；至预报48 h(图5d)，辽宁、河北、山东均有较强的增湿，但是河北中部略偏干。可见，耦合模式对湿度预报的影响同样具有随时间变化逐步向内陆地区推进的特征，推进速度较温度影响更快，其增湿影响范围也可达黄渤海周边省市全境。

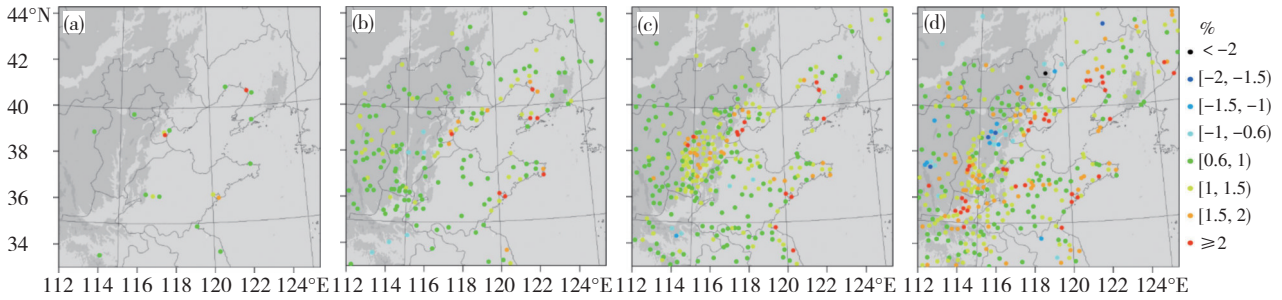


图5 2020年6月黄渤海周边区域耦合和非耦合模式3 h (a)、12 h (b)、24 h (c)、48 h (d)预报时效的2 m相对湿度预报差值图

Fig.5 Difference diagram of 2 m relative humidity prediction of reginal coupled and uncoupled models (a) 3 h, (b) 12 h, (c) 24 h and (d) 48 h in the surrounding areas of the Yellow Sea and Bohai Sea in June 2020

通过对大气近地层温度、湿度的预报误差分析，发现除系统性偏差外，在5~12 h预报时效左右，耦合海洋分量模式对近地层大气的温度和湿度可产生区域性影响，湿度影响为区域性较均一的增湿作用，温度影响主要为降温作用，但是存在部分弱增温区域。耦合海洋分量模式导致温度和湿度预报改变的原因，需要通过海气界面热通量交换和风场调整角度进一步分析。

由于耦合海洋分量模式区域(图1红框)和目标检验区域(图1中d02区域)比较接近，为避免检验偏差，以耦合和非耦合模式的最外层区域(d01)为目标检验区域，开展补充评估，并将结果与d02目标检验区域结果对比分析(图略)，结果显示两个目标检验区域的误差趋势具有相似性，只是量值不同，这与海气耦合影响范围有关。总体来看，目标检验区域和耦合海洋分量模式区域的大小关系会影响近地层温湿度检验的误差量值，但是对耦合模式性能的结论没有产生本质的影响。

4 海气耦合对近地层温湿要素预报影响的原因分析

海气耦合模式可反映出海洋和大气的双向反馈作

用,海洋模式通过海温变化,改变了海气界面的热通量传导,而热通量的变化又影响大气模式对近地层温湿要素的预报效果。基于上文分析结论,进一步探讨海气双向耦合对近地层温湿要素预报改进的原因。

4.1 海温差异分析

海温是耦合和非耦合试验的主要差别,是海气耦合传递的关键要素。由于A平台实况观测海温缺失,本文仅讨论该站耦合和非耦合模式模拟海温的差异。从海温日变化的结果(图6)看出,耦合模式预报海温较非耦合模式模拟海温偏低。6月,气温高于海温,当海温模拟偏低,会增大海气温差,进而增加海表面向上的感热通量;但同时由于海温的降低,不利于海表面水汽的蒸发,会引起向上的潜热通量降低,需进一步分析哪种热通量差异对近地层温度和湿度的影响起主导作用。

4.2 海气界面热通量交换分析

感热通量和潜热通量的模拟效果影响近地层温湿要素预报,因此,通过对比耦合模式和非耦合模式热通量预报的差异性,可以进一步分析耦合模式对近地层温湿要素预报改善的原因。

4.2.1 A平台热通量日变化特征

由潜热通量日变化的检验结果(图7a、c)可见,耦合和非耦合模式预报的潜热通量未反映出明显的日变化特征,但总体上,耦合模式潜热通量日变化的平均误差小于非耦合模式,即耦合海洋分量模式改善了潜热通量的计算结果,改善的量值最大可达27 W·m^{-2}。从感热通量日变化的检验结果(图7b、d)看,耦合和非耦合模式感热通量的日变化特征略有反映,但是量值明显比观测小。耦合模式的感热通量比非耦合略差,从量值上看,两者偏差最大可达4.3 W·m^{-2}。

因此,从偏差量值的角度分析,耦合模式主要改进了近地层参数化方案的潜热通量,对感热通量的影响相对较小。潜热通量则影响了近地层湿度要素的模拟精度。因此,耦合模式通过改进潜热通量,进

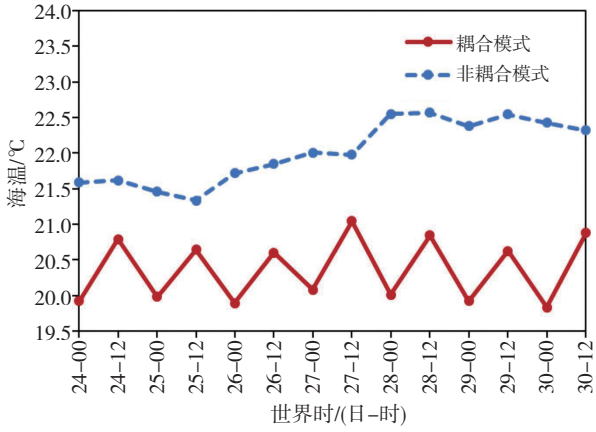


图6 2020年6月24日00时–6月30日12时A平台站点海温预报的7 d日平均变化

Fig.6 The 7–day daily average variation of sea surface temperature forecast at platform A from 00:00 UTC 24 to 12:00 UTC 30 June, 2020

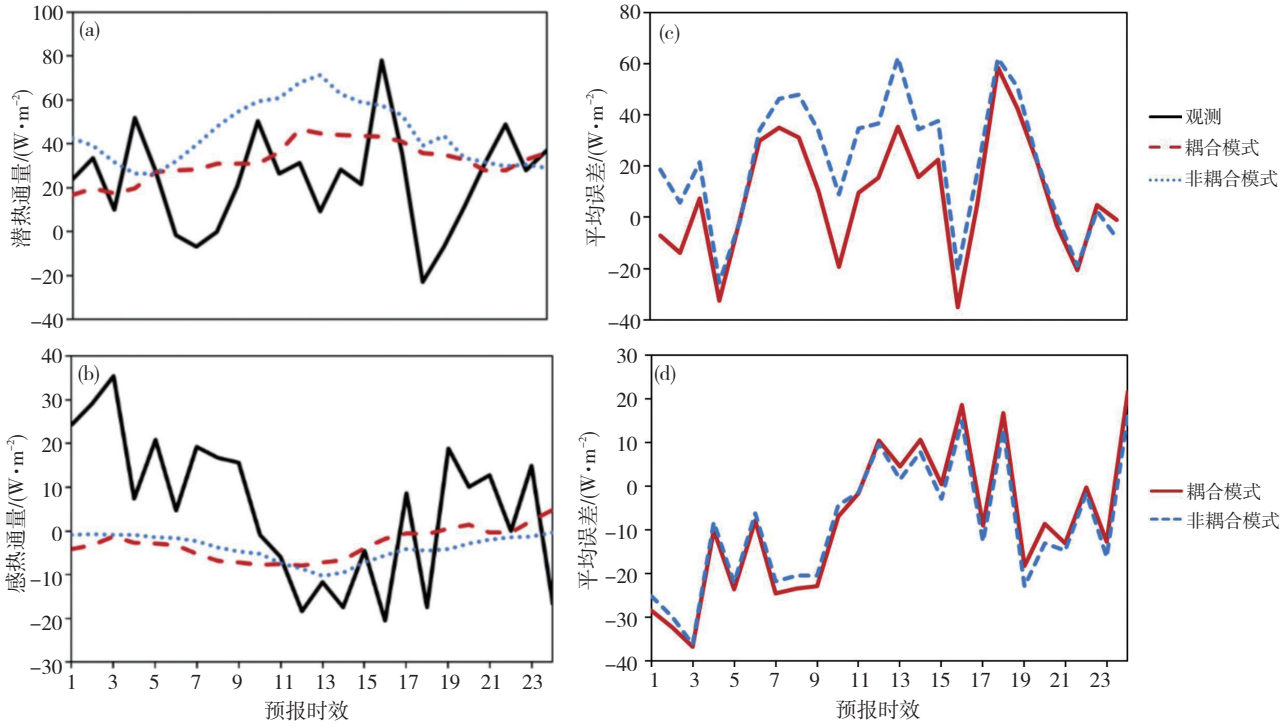


图7 2020年6月24—6月30日观测、耦合和非耦合模式预报A平台站点潜热通量(a,c)和感热通量(b,d)的7 d日平均变化(a,b)和平均误差(c,d)图

Fig.7 The 7–day (a, b) daily average variation and (c, d) average error of (a, c) the latent heat flux and (b, d) sensible heat flux of platform A predicted by two models from 24 to 30 June, 2020

而优化了大气模式对大气边界层湿度的预报结果。

4.2.2 热通量区域差异特征

为避免模式初始预报阶段spin-up对结果的影响，根据前文耦合和非耦合模式2 m温度和相对湿度预报的差异性对比分析可知，两个模式的差异在模拟12 h即可影响黄渤海及周边省市区域。因此选取12 h预报时效的感热通量和潜热通量对比分析(图8)。两个模式预报的感热通量整体差异性不大(图8a)，在渤海湾内为负值，A平台所在的渤海湾口处为较弱的正值。相对于感热通量，潜热通量在黄渤海区域差异性明显(图8b)，A平台所在的渤海湾口处为较弱的负值，辽东湾、渤海中部和莱州湾的大部分区域均为明显的正值，最大差值可达40 W×m^{-2}以上。因此，无论从量值还是区域分布情况看，潜热通量的差异是影响近地层气象要素改变的主要因子，也是耦合海洋分量模式导致近地层增湿的主要原因。

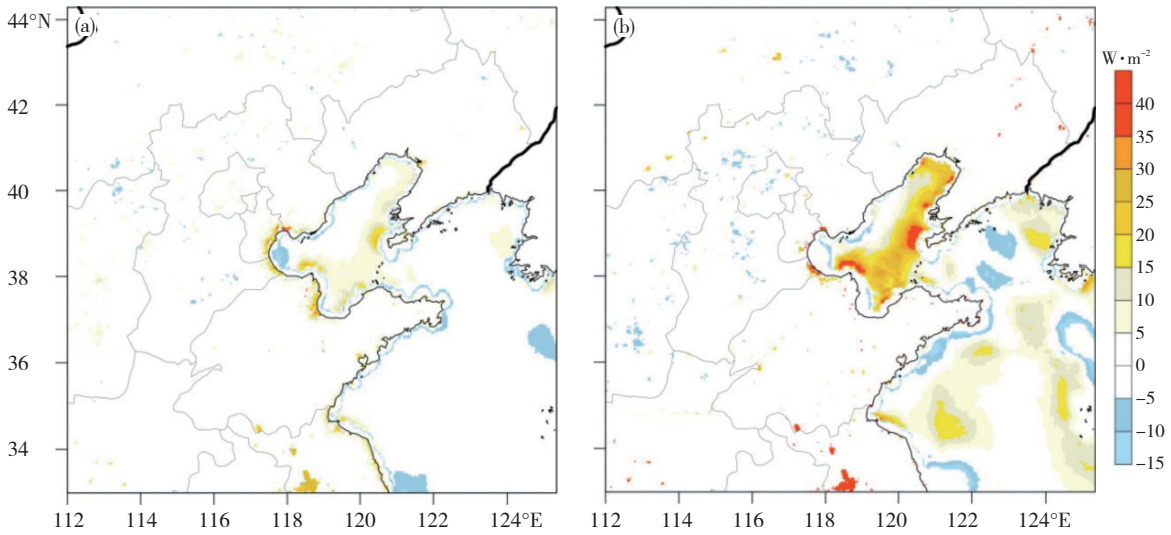


图8 2020年6月黄渤海周边区域耦合和非耦合模式12 h预报时效感热通量(a)和潜热通量(b)的差值图

Fig.8 Difference diagram of (a) sensible heat flux and (b) latent heat flux for 12 hour prediction of reginal coupled and uncoupled models in the surrounding areas of the Yellow Sea and Bohai Sea in June 2020

4.3 近地层风场调整分析

耦合海洋分量模式后，大气模式里的海温数据0.5 h更新一次，海温的变化会引起海气边界层局地风场的改变，进而将海洋对大气的降温增湿作用向周边区域传播，造成黄渤海沿岸和周边区域的温度和湿度要素随时间的区域性偏差分布。

4.3.1 近地层风场调整情况

由耦合和非耦合模式10 m风预报的差值图(图9a)可以看出，3 h预报时效，在渤海中部和黄海北部区域，耦合相对非耦合模式模拟风速增大；12 h预报时效，耦合海洋分量模式后的偏差随着大气环流的运动影响陆地区域，影响的大值区位于河北南部(图9b)，河北南部的风速偏差正负均有，对应此区域的温度和湿度差异也是正负值均存在(图3b、5b)。24 h预报时效，两个模式渤海中部和辽东湾的风速差明显加大，河北南部的风速差转为正值，风向存在辐合(图9c)，对应存在大范围的降温影响(图3c)，增湿也非常显著，个别站点增湿量级与海洋沿岸接近(图5c)。48 h预报时效，两个模式黄海中部风速差开始显现，天津西侧风速为负值且风向辐散(图9d)，分别对应天津西侧区域的增温降湿影响(图3d、5d)。

因此，耦合海洋分量模式对陆地近地层温湿要素的影响与风速和风向的偏差有一定的关系，风速正偏差和风向辐合的大值区，易出现明显的降温增湿，而风速负偏差和风向辐散的大值区，则表现出升温降湿的影响。此外，在沿岸区域，风向的异常始终垂直于海陆边界，说明通过海气通量的在线交换，影响了模拟要素的海陆差异，进一步引起风场变化。鉴于海陆风受海陆分布影响且具有垂直于海陆边界的特点，耦合海洋分量模式很可能改变近岸海陆风分布特征和影响范围，进而影响沿岸区域的降温增湿作用。

4.3.2 近地层风场调整原因分析

耦合和非耦合模式的热通量模拟存在差异性，这种差异性直接影响大气分量模式对近地面温度的模拟结果。从耦合和非耦合模式最底层大气温度的差值图(图10)可见，在模拟时效内，渤海中部、辽东湾和黄海北部、黄海中部地面温度差均为正值，渤海湾沿岸周边为负值。耦合海洋分量模式后，黄渤海大部分区域存在偏高的温度区，温度偏差正值区域对应风场的辐合，有利于海面的暖湿空气向上抬升；而渤海湾周边的温度偏差负值区易引起下沉运动，地面风场辐散为主。因此，耦合通过海温差异，引起海面热通量

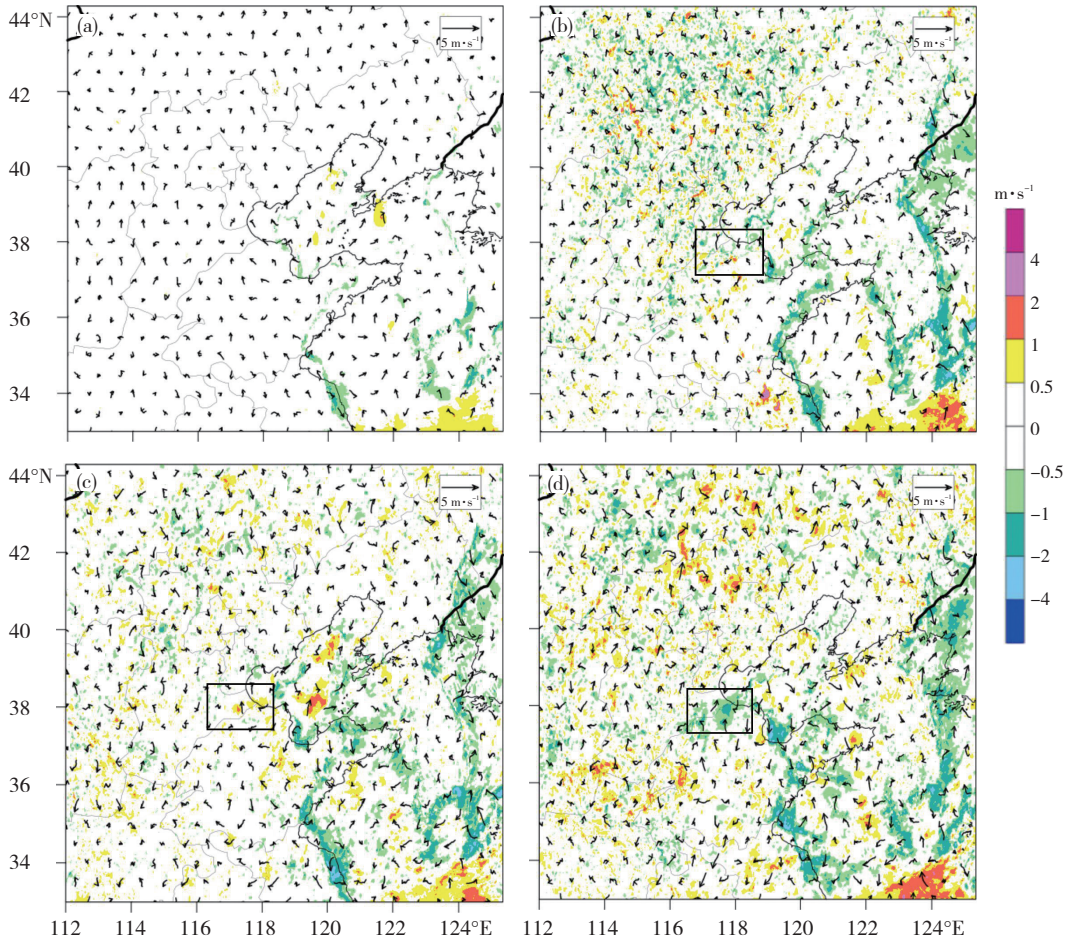


图9 2020年6月黄渤海周边区域耦合和非耦合模式3 h (a)、12 h (b)、24 h (c)、48 h (d)预报时效10 m风预报的差值(填色)图(箭头表示风向差,黑框内为风场辐合辐散区)

Fig.9 Difference diagram of 10 m wind field prediction of reginal coupled and uncoupled models (shaded) at (a) 3 h, (b) 12 h, (c) 24 h and (d) 48 h in the surrounding areas of the Yellow Sea and Bohai Sea in June 2020 (The arrow is the wind direction difference, and the black box represents the wind field divergence)

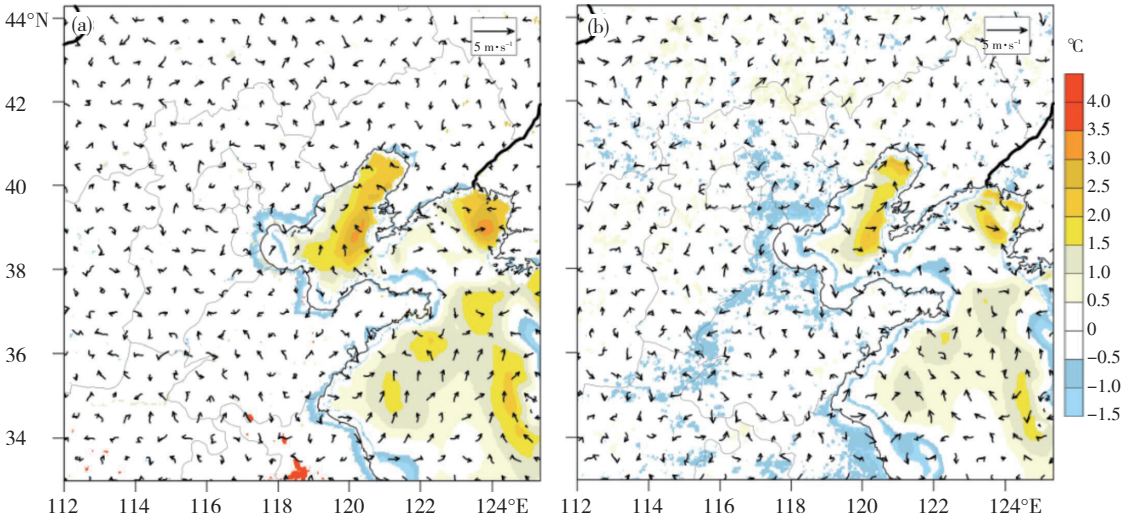


图10 2020年6月黄渤海周边区域耦合和非耦合模式12 h (a)、48 h (b)预报时效最底层大气温度的差值(填色)图(箭头表示风向差)

Fig.10 Difference diagram of 10 m wind field prediction of coupled and uncoupled models (shaded) at (a) 12 h, (b) 48 h in the surrounding areas of the Yellow Sea and Bohai Sea in June 2020 (The arrow is the wind direction difference)

变化，进而改变近海海面空气温度，受垂直混合机制影响，从而调整近地层的风场。

5 结论与讨论

本文利用NCEP的GFS资料、SODA气候态月平均资料、国家自动站资料和埕北石油A平台资料，采用耦合模式和非耦合模式，分别对2020年6月进行模拟，并对比评估两个模式的预报结果，分析中尺度海气耦合模式对黄渤海及周边区域近地层大气温度和湿度预报的影响特征和原因，得到如下主要结论：

(1) 耦合海洋分量模式对近地层大气以增湿和降温效应为主；耦合模式改进了近地层湿度要素预报效果；耦合模式对温度的改进作用主要体现在白天，夜间对预报结果则是负效应。

(2) 耦合海洋分量模式后增湿和降温效应的传播随时间由海洋逐步向内陆扩展；增湿和降温影响范围可覆盖黄渤海及其周边区域；湿度要素随时间向内陆扩展的速度较温度快且影响范围大。

(3) 耦合模式主要改进了潜热通量，进而改善了大气分量模式近地层湿度预报偏干、白天温度预报偏高的状态。

(4) 耦合模式的大气增温降湿作用对内陆影响的不均匀性与近地层风速风向有关。耦合海洋分量模式后，海温和热通量的差异导致近地层大气温度变化，进而引起近地层风场调整。风速正偏差和风向辐合的大值区，易出现明显的降温增湿，而风速负偏差和风向辐散的大值区，则表现出升温降湿的影响。

本文研究发现海气耦合模式系统对黄渤海及其周边区域近地层湿度要素改进明显，但研究结果仅代表6月的平均状态，而台风和由海风锋引起的降水等高影响天气的海气相互作用对内陆近地层要素的影响会更加显著，需进一步分类讨论。耦合模式的温度预报在夜间比非耦合模式预报误差偏大的原因，后续需要从海温分布和海陆差异引起的长波辐射变化及云的发展等方面进一步讨论。因本文重点开展耦合和非耦合模式对气象要素模拟差异分析，未对9 km分辨率和3 km分辨率的模拟结果差异性进行详细分析，将在后续从积云参数化和模式截断误差等方面进一步研究。

参考文献(References)：

陈志强,甘秋莹,徐建军.2022.利用海-气-浪耦合模式(COAWST)对北印度洋一次强热带风暴“Fani”(2019)过程的数值模拟[J].热带气象学报,38(3):366-376. Chen Z Q, Gan Q Y, Xu J J. 2022. Numerical simulation of severe tropical storm Fani (2019) in the northern Indian ocean using the COAWST model [J]. Journal of Tropical Meteorology,38(3):366-376 (in Chinese). doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2022.033

郝翠,张迎新,徐路扬,等.2022.改进最优集合预报方法对北京极端气温和风速预报的检验[J].暴雨灾害,41(4):467-476. Hao C, Zhang Y X, Xu L Y, et al. 2022. Verification of improved analog ensemble methods for forecasting extreme temperature and wind speed in Beijing [J]. Torrential Rain and Disasters,41(4):467-476 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2022.04.011

黄立文,吴国雄,宇如聪.2005.中尺度海-气相互作用对台风暴雨过程的影响[J].气象学报,63(4):455-467. Huang L W, Wu G X, Yu R C. 2005. The effects of mesoscale air-sea interaction on heavy rain in two typhoon processes [J]. Acta Meteorologica Sinica,63(4):455-467 (in Chinese).doi:10.11676/qxxb2005.045

雷小途,李永平,于润玲,等.2019.新一代区域海-气-浪耦合台风预报系统[J].海洋学报,41(6):123-134. Lei X T, Li Y P, Yu R L, et al. 2019. A new generation of regional air-sea-wave coupled typhoon prediction system [J]. Haiyang Xuebao,41(6):123-134 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.06.012

刘屹岷,姜达雍,杨梅玉.1993.浅水波耦合海气模式中海洋对大气影响的数值试验[J].气象科学,13(1):18-26. Liu Y M, Jiang D Y, Yang M Y. 1993. The numerical experiments of oceanic influence on atmosphere in a coupled ocean-atmosphere model of shallow water wave [J]. Scientia Meteorologica Sinica,13(1):18-26 (in Chinese)

刘芸芸,王永光,柯宗建.2021. 2020年夏季我国气候异常特征及成因分析[J].气象,47(1):117-126. Liu Y Y, Wang Y G, Ke Z J. 2021. Characteristics and possible causes for the climate anomalies over China in summer 2020 [J]. Meteorological Monthly,47(1):117-126 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.01.011

司东,丁一汇,柳艳菊.2009.全球海气耦合模式(BCC_CM1.0)对江淮梅雨降水预报的检验[J].气象学报,67(6):947-960. Si D, Ding Y H, Liu Y J. 2009. Evaluation of meiyu prediction in the Yangtze-Huaihe region by coupled Ocean-Atmosphere General Circulation Model (BCC_CM1.0) [J]. Acta Meteorologica Sinica,67(6):947-960 (in Chinese)

唐寅,毛新燕,钱闯,等.2022.CMIP6模式对中国近海气象要素模拟评估与预测[J].海洋科学,46(12):88-102. Tang Y, Mao X Y, Qian C, et al. 2022. Evaluation and prediction of coastal meteorological elements in China by the CMIP6 model [J]. Marine Sciences,46(12):88-102 (in Chinese). doi:10.11759/hykx20220118001

王双双,谢文强,延晓冬.2022.CMIP6模式对中国气温日较差的模拟能力评估[J].气候与环境研究,27(1):79-93. Wang S S, Xie W Q, Yan X D. 2022. Evaluation on CMIP6 model simulation of the diurnal temperature range over China [J]. Climatic and Environmental Research,27(1):79-93 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21063

王子谦,段安民,郑永骏,等.2012.中尺度海-气耦合模式GRAPES_OMLM对台风珍珠的模拟研究[J].气象学报,70(2):261-274. Wang Z Q, Duan A M, Zheng Y J, et al. 2012. Simulative study of Typhoon Chanchu (2006) using the mesoscale coupled air-sea model GRAPES_OMLM [J]. Acta Meteorologica Sinica,70(2):261-274 (in Chinese). doi: 10.11676/qxxb2012.026

詹思屿,齐琳琳,卢伟,等.2017.基于区域海气浪耦合模式的海洋风场预报性能研究[J].海洋预报,34(6):16-26. Zhan S Y, Qi L L, Lu W, et al. 2017. Application of a regional ocean-atmosphere-wave coupled mod-

el on predicted wind field cases in the Northwest Pacific Ocean [J]. Marine Forecasts, 34(6):16–26 (in Chinese). doi:10.11737/j.issn.1003–0239.2017.06.003

张莉,丁一汇.2008a.全球海气耦合模式对我国极端强降水模拟试验[J].应用气象学报,19(6): 760–769. Zhang L, Ding Y H. 2008a. Evaluation of extreme heavy precipitation in coupled ocean–atmosphere general circulation models [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 19(6):760–769 (in Chinese)

张莉,丁一汇,孙颖.2008b.全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验[J].大气科学,32(2):261–276. Zhang L, Ding Y H, Sun Y. 2008b. Evaluation of precipitation simulation in east Asian monsoon areas by coupled ocean–atmosphere general circulation models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,32(2):261–276 (in Chinese)

赵宗慈,丁一汇,李晓东,等.1995.海气耦合模式在东亚地区的可靠性评估[J].应用气象学报,6(增刊):9–18. Zhao Z C, Ding Y H, Li X D, et al. 1995. Evaluation of CGCM climate simulation in east Asia region [J]. J Quarterly Journal of Applied Meteorology, 6(Sup):9–18 (in Chinese)

周天军,邹立维,韩振宇,等.2016.区域海气耦合模式FROALS的发展及其应用[J].大气科学,20(1):86–101. Zhou T J, Zou L W, Han Z Y, et al.2016. Development and applications of a regional atmosphere–ocean coupled model (FROALS): A review[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences,20(1):86–101 (in Chinese). doi:10.3878/j.issn.1006–9895.1508.15153

Bruneau N, Toumi R. 2016. A fully–coupled atmosphere–ocean–wave model of the Caspian Sea [J]. Ocean Modelling,107:97–111. doi:10.1016/j.ocemod.2016.10.006

Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land–surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system [J]. Part I: Model description and implementation. Monthly Weather Review, 129: 569–585. doi:10.1175/1520–0493(2001)129<0569:CAALSH>2.0.CO;2

Grell G A, Dévényi D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques [J]. Geophysical Research Letters,29(14),1693. doi:10.1029/2002GL015311

Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long–lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models [J]. Journal of Geophysical Research,133(13):1–8.doi:10.1029/2008JD009944

Janjić Z I. 1994. The step–mountain Eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. Monthly Weather Review, 122:927–945. doi:10.1175/1520–0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2

Nelson J, He R Y, Warner J C, et al. 2014. Air–sea interactions during strong winter ectratropical storms [J]. Ocean Dynamics,64(9): 1233–1246. doi:10.1007/s10236–014–0745–2

Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization [J]. Monthly Weather Review,136:5095–5115. doi:10.1175/2008MWR2387.1

Warner J C, Armstrong B, He R Y, et al. 2010. Development of a Coupled Ocean–Atmosphere–Wave–Sediment Transport (COAWST) modeling system [J]. Ocean Modelling,35(3):230–244. doi:10.1016/j.ocemod.2010.07.010

Xie S P. 2022. Coupled atmosphere–ocean dynamics from El Nino to climate change [M]. Elsevier Press: 432

Zhou T J, Yu R C. 2006. Twentieth century surface air temperature over China and globe simulated by coupled climate models [J]. Journal of Climate,19(22):5843–5858.doi:10.1175/JCLI3952.1

（责任编辑　张　文）