

刘升源,潘裕山,徐建军,等.不同驱动场对东亚区域再分析系统中华南台风降水影响的对比研究[J].海洋气象学报,2023,43(1):27-38.

LIU Shengyuan, PAN Yushan, XU Jianjun, et al. Comparative study on effects of different driving fields on typhoon precipitation over South China in the East Asia Reanalysis System[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(1): 27-38. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.01.003. (in Chinese)

不同驱动场对东亚区域再分析系统中 华南台风降水影响的对比研究

刘升源^{1,2,4}, 潘裕山^{1,2,4}, 徐建军^{1,2,3}, 张宇^{1,2,4}, 叶桂苓^{1,2,4}

(1. 中国气象局-广东海洋大学南海海洋气象联合实验室, 广东 湛江 524088; 2. 广东海洋大学南海海洋气象研究院, 广东 湛江 524088; 3. 广东海洋大学深圳研究院, 广东 深圳 518120; 4. 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088)

摘要: 使用 ERA-Interim 和 ERA5 两套再分析资料分别驱动东亚区域再分析系统 (East Asia Reanalysis System, EARS), 并输出 2015 年一年期试验再分析资料, 通过评估其中 3 次代表性的华南登陆台风降水过程, 对比不同驱动场对该系统的影响, 研究发现以 ERA5 驱动的 EARS 输出结果较 ERA-Interim 驱动的结果更准确, 尤其在丘陵和山地等复杂地形下的降水模拟改进明显。进一步用 ERA5 驱动的 EARS 输出结果与欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 新一代陆面再分析资料 ERA5-Land 对比分析, 发现 ERA5-Land 对于台风大尺度降水的把握更好, 而 EARS 对中小尺度降水过程的再现更完整, 特别是对沿海降水的模拟更准确。相较于 ERA5-Land, EARS 目前同化的观测资料有限, 对物理过程参数化方案的选择仍欠准确, 后续需要有针对性地改进。

关键词: 东亚区域再分析系统; 数值天气预报; 台风降水

中图分类号: P444; P456 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2023)01-0027-12

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.01.003

Comparative study on effects of different driving fields on typhoon precipitation over South China in the East Asia Reanalysis System

LIU Shengyuan^{1,2,4}, PAN Yushan^{1,2,4}, XU Jianjun^{1,2,3}, ZHANG Yu^{1,2,4}, YE Guiling^{1,2,4}

(1. CMA-GDOU Joint Laboratory for Marine Meteorology, Zhanjiang 524088, China; 2. South China Sea Institute of Marine Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. Shenzhen Institute of Guangdong Ocean University, Shenzhen 518120, China; 4. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

Abstract: The East Asia Reanalysis System (EARS) is driven by ERA-Interim and ERA5 reanalysis data, respectively, and the one-year experimental reanalysis data of 2015 are exported. By evaluating

收稿日期: 2022-04-22; 修订日期: 2022-07-29

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1510002, 2017YFC1501802); 国家自然科学基金重点项目 (42130605); 深圳市科技计划项目 (JCYJ20210324131810029); 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2019B1515120018)

第一作者简介: 刘升源, 男, 硕士研究生, 主要从事海气相互作用与区域数值模拟研究, syliu@stu.gdou.edu.cn.

通信作者简介: 徐建军, 男, 博士, 教授, 主要从事海洋气象与区域资料同化研究, jxu@gdou.edu.cn.

three representative typhoon precipitation processes over South China in 2015 and comparing the effects of different driving fields, it is found that the EARS results driven by ERA5 are more accurate than those driven by ERA-Interim, especially for simulated precipitation in complex terrains such as hills and mountains. Further comparative analysis is conducted between the EARS results driven by ERA5 and ERA5-Land, the new generation land surface reanalysis data of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), which shows that ERA5-Land has a better accuracy of large-scale typhoon precipitation, while EARS reproduces meso- and small-scale processes more completely and simulates precipitation in coastal areas more accurately in particular. In comparison to ERA5-Land, due to the present limit of assimilated observation data and inaccurate selection of physics parameterization schemes, EARS needs improvement accordingly in the future.

Keywords: East Asia Reanalysis System (EARS); numerical weather prediction; typhoon precipitation

引言

天气和气候的研究需要高分辨率、高质量、长期而连续的观测资料。再分析资料的出现有助于深入了解气候变化的形成及规律,使现代气候变化特点的研究快速发展与进步,为大气科学及其相关领域的研究提供重要支撑,极大地推动现代大气科学的发展。目前,国际上主要的再分析资料来源于美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)、日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)和美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)等^[1]。东亚区域气候变化的研究大多基于国际上主要的全球再分析资料进行,如:韩晋平等^[2]使用 ECMWF ERA40 和 NCEP 全球再分析资料研究东亚夏季风年代际变化的若干重要特征,黄燕玲等^[3]使用国内外广泛应用的 ECMWF 的 ERA-Interim、ERA40 和 JMA JRA55 及 NCEP 2 全球再分析资料对东亚夏季风异常活动进行研究。但是全球大气再分析资料分辨率较低,只能侧重于大尺度大气活动的研究,对中尺度大气活动特征研究拟合效果并不理想,且不能用于大多数由中小尺度大气活动引发气象灾害的研究^[4]。近些年来,区域大气再分析技术持续发展,其不仅比全球大气再分析资料具有更高的时空分辨率,还能捕获小尺度系统变化的信息,对局地强迫引起的气象特征有较好的反映能力^[5]。

西北太平洋是全球台风活动最为强烈和频繁的海域之一,平均每年约有 26 个台风生成,我国位于西

北太平洋沿岸,平均每年约有 7.2 个台风登陆,是受台风影响较多的国家之一^[6]。台风作为影响我国的主要灾害性天气系统之一,在其生成、发展、成熟和消亡阶段都伴随着大范围的强降水、暴雨灾害,对海上各种作业也有极大的威胁,因此对于台风降水准确及时的预报是防台抗台的重要前提。但台风降水的预报是公认的难点之一,其内部次网格系统生消快速,由于海上观测资料稀疏,往往难以监测和捕捉,区域数值模式对其预报非常困难。资料同化技术可以为区域数值模式提供更准确的背景场,从而提高天气预报准确率。现有的研究表明,利用变分资料同化系统(Gridpoint Statistical Interpolation System, GSI)、WRF-ARW (Advanced Research Weather Research and Forecasting) 模式发展区域再分析是合理的。文秋实等^[7]利用 WRF-ARW 模式和 GSI 同化系统设计华南地区对流尺度快速循环同化方案,同化常规观测(地面站、探空、飞机报和浮标站)和雷达径向风资料,结果表明 WRF-ARW 模式和 GSI 同化系统有良好的匹配性,GSI 同化方案可以改善华南降水发生时间、降水强度和日降水评分。

2015 年中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)设立“气象资料质量控制多源数据融合与再分析”攻关任务,东亚区域再分析是该攻关任务的一个攻关方向。目前,中国气象科学研究院已牵头部分科研单位和高校搭建和优化了东亚区域再分析系统(East Asia Reanalysis System, EARS),其初步试验评估结果表明再分析系统具有在全球再分析的基础上提高区域再分析资料性能的能力^[8]。潘裕山等^[9]评估了 EARS 对 2015 年西北太平洋热带气旋路径和强度的模拟结果,发现 EARS 对西北太平洋热带气旋强度的模拟整体优于

国际主流的再分析资料,且 EARS 还可获得热带气旋的精细结构,对观测资料缺乏的西北太平洋热带气旋的研究有实用意义。

在初步评估的基础上,为进一步了解 EARS 对台风降水的模拟能力,并对比不同驱动场对 EARS 的影响,本文使用不同的初始场和边界条件(ERA-Interim 和 ERA5)分别驱动东亚区域再分析系统,输出 2015 年一年期的试验再分析资料集,并对其中 3 次有代表性的华南登陆台风降水过程进行评估,以探讨东亚区域再分析系统对台风降水模拟的优劣特性,旨在为后续改进东亚区域再分析系统提供更具体的发展方向。

1 东亚区域再分析系统

本文拟评估的东亚区域试验再分析资料来自配置优化后的东亚区域再分析系统(EARS),使用新一代的中尺度非静力数值预报模式 WRF-ARW 3.9.1.1 和美国国家环境预报中心的变分资料同化系统 GSI 3.6 搭建^[10]。

1.1 模式和同化方案设计

EARS 的模式方案为:单层网格,水平分辨率为 12 km,格点数为 760×900,模拟区域中心为 100°E、38°N,基本覆盖整个东亚区域,包括北印度洋、南海区域和部分西太平洋区域(图 1)。模式垂直层数 74 层,模式顶层气压为 10 hPa。模式的参数化方案为:New Thompson 微物理方案、Kain-Fritsh 积云参数化方案、RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)长波辐射

方案、Dudhia 短波辐射方案、Noah-MP 陆面方案和 YSU(Yonsei University)行星边界层方案。

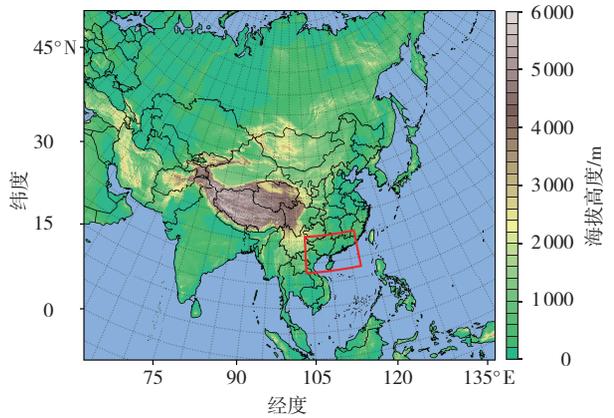


图 1 东亚区域再分析系统(EARS)模拟区域和拟评估区域(红框)

Fig.1 Simulation area and the area to be evaluated (red frame) in the East Asia Reanalysis System (EARS)

图 2 为 EARS 的同化流程,采用 3D-Var (three dimensional variational) 方式和部分循环同化方案,循环同化每日进行一次。冷启动从前一日 18:00(世界时,下同)开始,使用欧洲中期天气预报中心的再分析资料作为初始场和边界条件,起旋(spun-up)预报 6 h,其间不进行资料同化。热启动从 00:00 开始,采用循环同化方案,每 6 h 进行一次资料同化,同化的背景场为前 6 h 的预报输出,同化的观测资料为所分析时刻的常规和卫星观测资料,同化得到的分析场作为下一时刻预报的初始条件。热启动 4 次,即预报 24 h 后,当日再分析结束,然后进行下一日再分析运算^[9-10]。

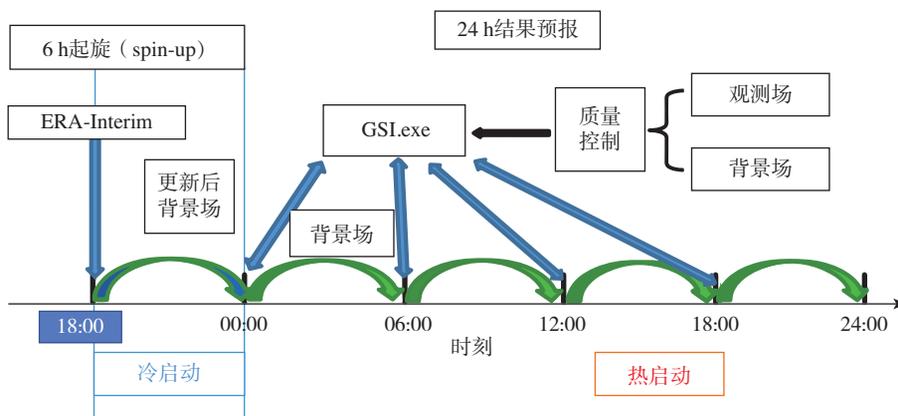


图 2 资料同化试验方案设计

Fig.2 Design of data assimilation scheme

1.2 同化和驱动场的资料

此次试验中 GSI 同化的常规观测资料为 NCEP 全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)的地面站、探空站、船舶和浮标站、全球电信系统的测风气球资料和飞机报资料。同化的卫星资料为 GDAS 的大气红外探测器、微波探测装置 A 型、高分辨率红外探测仪 4 型和微波湿度探测器的卫星辐射资料。微波探测装置 A 型主要用于大气温度的垂直探测,微波湿度探测器主要用于湿度的垂直探测,大气红外探测器主要用于探测精细的大气温度和湿度廓线,高分辨率红外探测仪 4 型主要用于大气垂直方向温度、湿度的探测。以上资料进入 EARS 前已进行质量控制,以保证同化质量。

为了对比不同驱动场对 EARS 的影响,探讨更合适的模拟方案,本文分别使用 ERA-Interim 和 ERA5 两套再分析资料作为初始场和边界条件驱动 EARS。ERA-Interim 再分析资料^[11]为欧洲中期天气预报中心发布的第三代再分析资料,水平分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$,时间分辨率为 6 h。ERA5 再分析资料^[12]是 ERA-Interim 再分析资料的升级版,水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率提高为 1 h,取每 6 h 数据作为驱动场。此次试验使用上述两套再分析资料分别驱动 EARS,输出 2015 年一年期的试验再分析资料集。以下将使用 ERA-Interim 和 ERA5 作为驱动场的 EARS 试验再分析资料分别简称为 EARS(ERA-Interim 驱动)和 EARS(ERA5 驱动)。

2 用于评估的资料与方法

2.1 用于评估的降水资料

2.1.1 国家级气象观测站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量网格数据集

用于评估 EARS 对华南台风降水模拟的资料为国家级气象观测站与 CMORPH(Climat Prediction Center MORPHing technique)降水产品融合的逐时降水量网格数据集(以下简记为“融合降水”,merged

precipitation)。该数据集基于全国自动气象站观测的小时降水资料和美国气候预测中心的全球 CMORPH 卫星反演降水资料,采用概率密度匹配 PDF(probability density function)和最优插值 OI(optimal interpolation)两步融合算法,生成逐小时降水融合产品^[13-15],覆盖的空间范围为 $70^\circ \sim 140^\circ \text{E}$ 、 $15^\circ \sim 60^\circ \text{N}$,水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,产品总体误差水平在 10% 以内,强降水和站点稀疏区的误差在 20% 以内^[13-17]。

2.1.2 欧洲中期天气预报中心 ERA5-Land 再分析资料

ERA5-Land 再分析资料^[18]为欧洲中期天气预报中心的新一代全球陆面再分析资料,使用 ERA5 再分析资料中陆面变量进行再分析重新生成,分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,可提供自 1950 年 1 月以来的逐时数据。

2.2 用于评估的热带气旋最佳路径数据集

用于评估的热带气旋最佳路径资料为中国气象局热带气旋资料中心的最佳路径数据集,该数据集提供自 1949 年以来西北太平洋(含南海,赤道以北, 180° 以西)海域热带气旋每 6 h 的位置和强度^[19-20]。为评估东亚区域再分析系统对登陆华南地区的台风降水模拟效果,选取 2015 年 3 个代表性的登陆华南台风:1508 号“鲸鱼”(Kujira)、1510 号“莲花”(Linfa)和 1522 号“彩虹”(Mujigae)(表 1 和图 3)。

本文选取的 3 个台风类型均为业务预报中典型的难点:Kujira 系典型南海生成台风,强度偏弱,云系特征不清晰,各业务机构对其定位误差较大,导致后续的登陆点预报错误;Linfa 系西北太平洋生成后移入南海的台风,各机构均空报其进入南海后的两次转向,120 h 路径预报误差接近 1 000 km;Mujigae 系近岸快速加强的秋台风,各业务机构均低估其登陆强度,是 1949 年以来 10 月登陆中国的最强台风^[21]。3 个台风发生时间、路径、强度各具特点,对这 3 个个例进行降水评估,可以有代表性地检验并改进东亚区域再分析系统对不同类型台风降水的模拟能力。

表 1 2015 年登陆华南地区的热带气旋

Table 1 Tropical cyclones that landed in South China in 2015

编号名称(英文名)	生命期	登陆时刻	登陆地点
1508 号“鲸鱼”(Kujira)	2015-06-19—2015-06-24	2015-06-21 18:50	海南万宁
1510 号“莲花”(Linfa)	2015-07-01—2015-07-09	2015-07-09 12:00	广东陆丰
1522 号“彩虹”(Mujigae)	2015-09-30—2015-10-05	2015-10-04 14:00	广东湛江

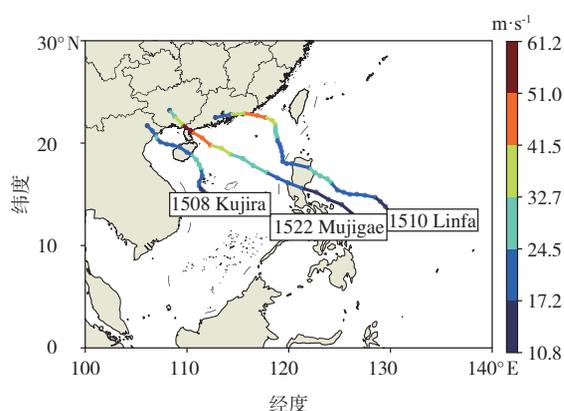


图 3 2015 年登陆华南地区的 3 个台风路径 (数据来自 CMA 热带气旋最佳路径数据集, 色标代表最大风速)

Fig.3 Tracks of three typhoons that landed in South China in 2015 (data from CMA Tropical Cyclone Best Track Database, color scale for maximum wind speed)

2.3 评估方法

使用风险评分 (threat score, TS) 对模拟降水进行统计检验评估。TS 评分公式为:

$$V_{TS} = \frac{N_a}{N_a + N_b + N_c},$$

式中各项如表 2 所示, P 为拟评分的量级, N_a 为降水模拟正确格点数, N_b 为降水空报格点数, N_c 为降水漏报格点数。TS 格点评分可以反映模拟区域内降水模拟的准确程度, 其值介于 0 和 1 之间, TS 评分越接近 1, 代表模式降水量级越接近实况降水量级。

表 2 模拟和实况降水二分型列联表

Table 2 Contingency table of simulation and observation events in the evaluation

实况降水	模拟降水	
	$\geq P$	$< P$
$\geq P$	N_a	N_c
$< P$	N_b	/

注: P 为拟评分的量级, N_a 为模拟正确格点数, N_b 为空报格点数, N_c 为漏报格点数; “/” 为无降水模拟正确格点数, 在本文降水 TS 评分中不参与计算。

以融合降水作为降水实况资料, 设定 4 个代表性量级 (10 mm、25 mm、50 mm、100 mm), 分别计算 EARS (ERA5 驱动)、EARS (ERA-Interim 驱动)、ERA5-Land 在台风 Kujira、Linfa、Mujigae 生命期间的分级 TS 格点评分。

由于 TS 格点评分需要在相同分辨率的条件下进行, 本文通过资料插值的方法将用于计算的 4 种资料统一插值成分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$, 区域范围

为 $18^\circ \sim 25^\circ N$ 、 $104.5^\circ \sim 117.0^\circ E$ 的数据资料, 基本覆盖我国整个华南区域 (评估范围见图 1, 下同)。常用的不同网格之间的插值方法有: 双线性法、距离权重法、克里格法和第二类守恒插值法等。在大气模式中, 辐射通量、降水一般采用第二类守恒插值方法, 该方法较双线性插值法虽然有更大的误差, 但在保留源网格和目标网格之间的数据积分值方面更具优势^[22-23], 故使用第二类守恒插值方法将不同网格的资料插值为相同网格的资料并进行评估。

3 不同驱动场对 EARS 在华南登陆台风降水模拟中的影响

已有研究表明, 相比于 ERA-Interim, ERA5 减小了随机误差, 在东亚区域总体上改进了适用性^[24-26]。在 EARS 前期已进行的初步结果评估中, EARS (ERA5 驱动) 相较 EARS (ERA-Interim 驱动) 对台风路径的模拟有良好改进^[9], 为了进一步探讨不同的驱动场对 EARS 在华南登陆台风降水模拟中的影响, 使用 EARS (ERA-Interim 驱动) 和 EARS (ERA5 驱动) 对其中 3 次有代表性的登陆华南台风降水过程进行对比评估。

由台风 Kujira、Linfa 和 Mujigae 日平均降水量的空间分布 (图 4) 可知, EARS (ERA5 驱动) 和 EARS (ERA-Interim 驱动) 的降水空间分布和融合降水基本一致, 它们在 Kujira、Linfa 和 Mujigae 生命周期对华南地区模拟的日平均降水量范围基本为 5~30 mm, 降水主要集中在海南西南部、广东中南部以及广西东北部, 这 3 个地区的降水主要是台风降水: Kujira 登陆海南万宁; Linfa 登陆广东陆丰, 最后于广东中南部地区消亡; Mujigae 登陆广东湛江, 最后于广西南宁消亡。EARS (ERA-Interim 驱动) 在广东中南部和广西东北部模拟的日平均降水范围和降水量较 EARS (ERA5 驱动) 和融合降水的偏大。EARS (ERA5 驱动) 与 EARS (ERA-Interim 驱动) 分别和融合降水的日平均降水量偏差 (图 5) 表明, EARS (ERA5 驱动) 与 EARS (ERA-Interim 驱动) 总体高估这 3 次台风降水, 如前文提到的 3 个台风降水的主要区域, 高估的范围为 6~18 mm。在华南中部等大部分地区, EARS (ERA5 驱动) 模拟的日平均降水较 EARS (ERA-Interim 驱动) 更接近融合降水, 整体效果更优; 而在海南西北部, EARS (ERA5 驱动) 的日平均降水量则比 EARS (ERA-Interim 驱动) 的偏大。

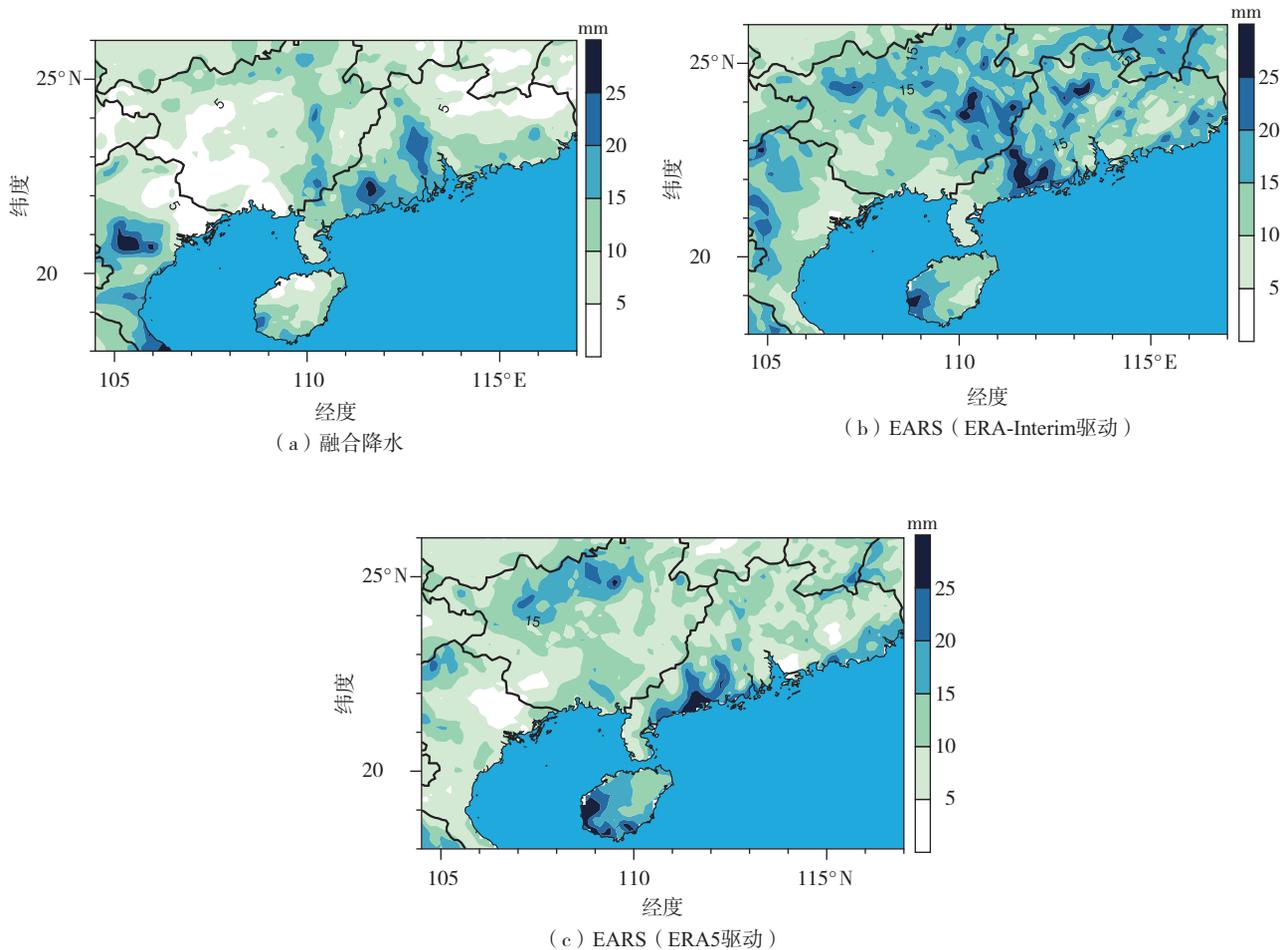


图4 台风 Kujira、Linfa 和 Mujigae 生命期间融合降水与不同驱动场模拟的日平均降水量(色阶)
 Fig.4 Merged precipitation and daily mean simulated precipitation (color scale) by different driving fields for Typhoon Kujira, Linfa, and Mujigae

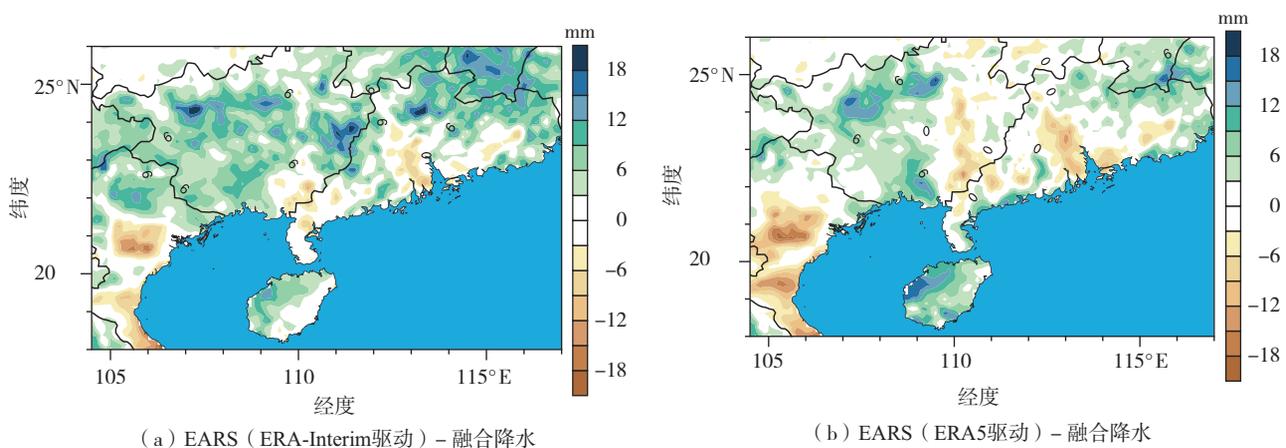


图5 台风 Kujira、Linfa 和 Mujigae 生命期间不同驱动场模拟分别与融合降水的日平均降水量偏差(色阶)
 Fig.5 Bias (color scale) between merged precipitation and daily mean simulated precipitation by different driving fields for Typhoon Kujira, Linfa, and Mujigae

图 6 为 EARS (ERA5 驱动)、EARS (ERA-Interim 驱动)和融合降水在 Kujira、Linfa 和 Mujigae 生命期间的华南日平均降水的时间序列。由图可见,3 个台风都为华南区域带来充足的降水,除了 7 月 6 日、7 月 8 日、9 月 30 日和 10 月 2 日这 4 天,其他时段日平均降水均超过 3 mm。整体而言,EARS(ERA5 驱动)和 EARS(ERA-Interim 驱动)高估台风降水,EARS(ERA5 驱动)、EARS(ERA-Interim 驱动)分别高估 16.0% 和 43.5%,EARS(ERA5 驱动)的降水模拟效果更好。EARS 对 Linfa 的降水量偏差在 7 月 5 日及之后明显缩小,这与台风进入南海的时间吻合,相似的现象也出

现在 10 月 2—3 日,这同样与 Mujigae 进入南海的时间重合,表明移入南海后,EARS 对台风降水模拟能力明显提高。另外,EARS 对于降水模拟明显低估的日期出现在 6 月 23 日和 10 月 4—5 日,即 Kujira 和 Mujigae 登陆华南地区之后,其偏差主要来源于复杂地形下对台风强度和螺旋雨带形态的模拟误差^[9],导致降水落区与实际有偏差。其中以 ERA-Interim 驱动的 EARS 在广西北部 and 东部出现明显的降水空报,在使用 ERA5 作为驱动场后,这两个区域的偏差明显减少,消空效果较好,表明 EARS(ERA5 驱动)相对 EARS(ERA-Interim 驱动)对台风外围雨带的模拟有所改进。

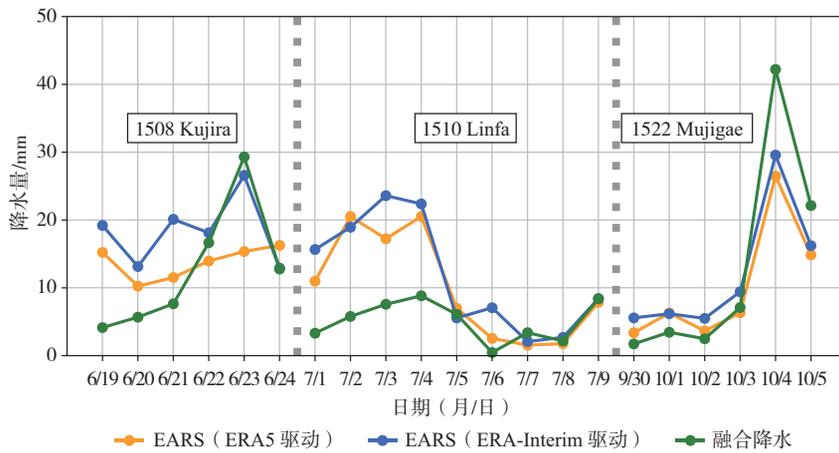
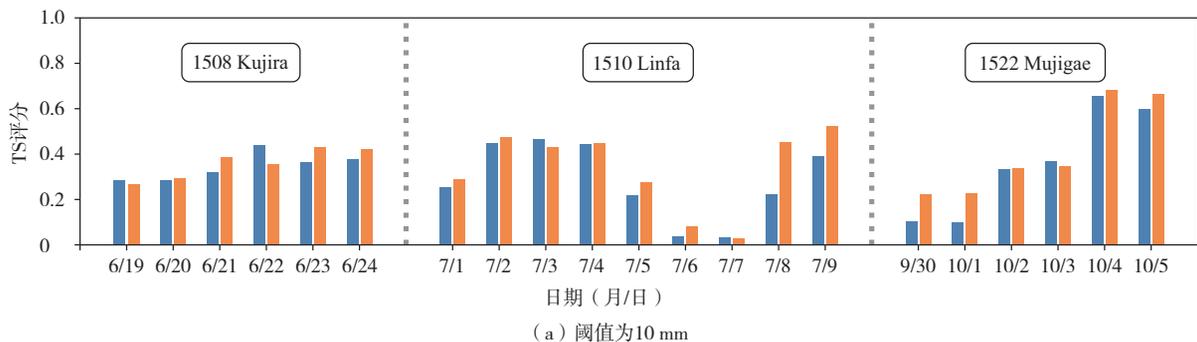


图 6 台风 Kujira、Linfa 和 Mujigae 生命期间不同驱动场模拟与融合降水中华南区域日平均降水时间序列
Fig.6 Time series of merged precipitation and daily mean simulated precipitation by different driving fields in South China for Typhoon Kujira, Linfa, and Mujigae

为了定量评估两个驱动场对 EARS 的影响差异,图 7 展示了分别以 ERA-Interim 和 ERA5 驱动的 EARS 在 3 个台风生命期间对华南地区日降水模拟的 TS 评分。由 TS 评分可见,评估中雨以上量级(日降水量 $R \geq 10$ mm)和大雨以上量级(日降水量 $R \geq 25$ mm)时,EARS(ERA5 驱动)对华南登陆台风日降水模拟整体比 EARS(ERA-Interim 驱动)准确,总体效果稳定,尤其是

大雨以上量级 EARS(ERA5 驱动)模拟效果的优势最大(图 7a、b)。但当评估阈值为 50 mm,即暴雨以上量级降水时,EARS(ERA5 驱动)的优势缩小,其中有 8 d 的模拟效果比 EARS(ERA-Interim 驱动)准确,但有 7 d 的模拟效果与 EARS(ERA-Interim 驱动)持平或略差(图 7c)。当评估阈值为 100 mm 时,EARS(ERA5 驱动)的整体结果更优(图 7d)。



(a) 阈值为 10 mm

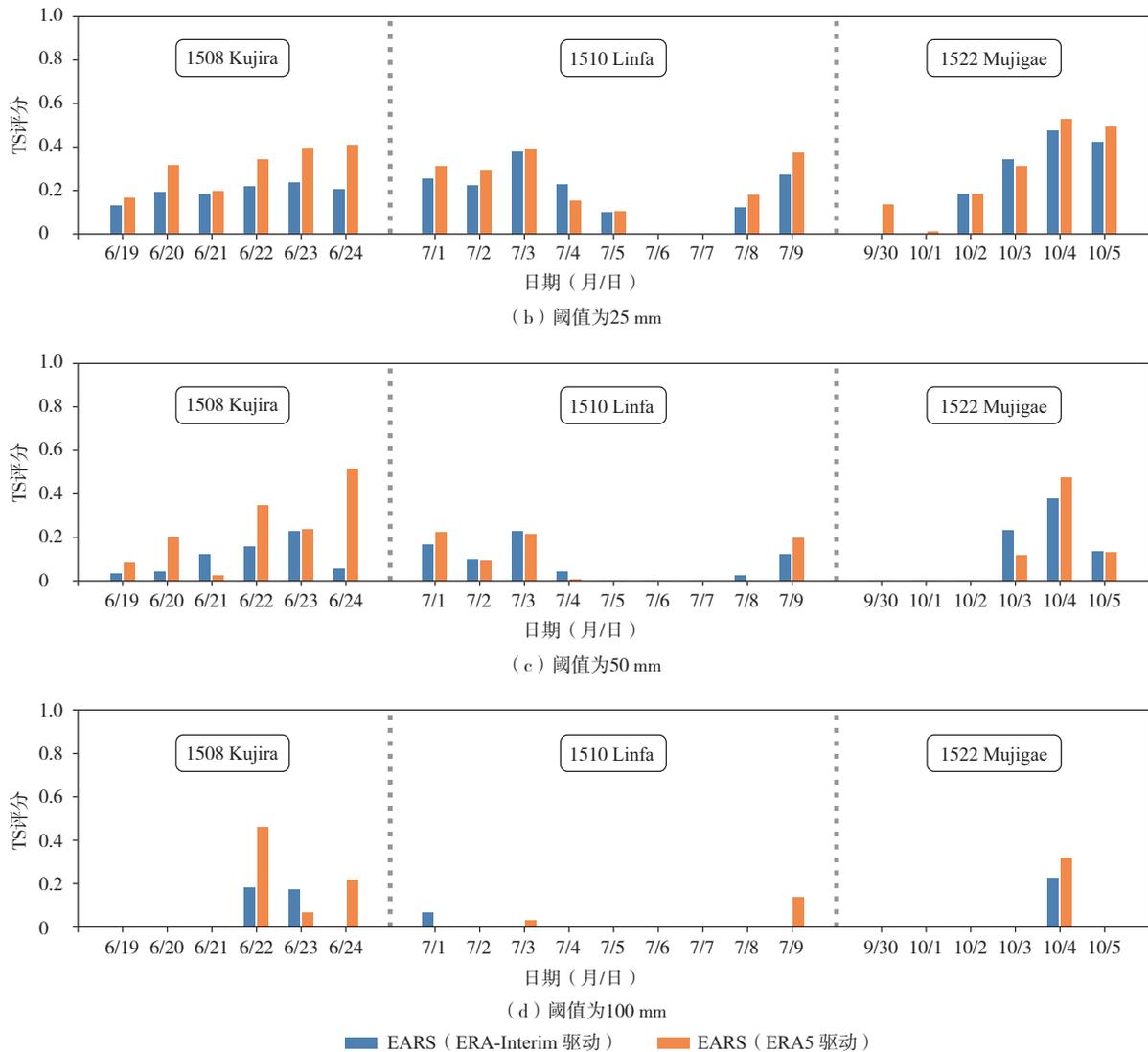


图7 EARS(ERA-Interim 驱动)和 EARS(ERA5 驱动)中台风 Kujira、Linfa 和 Mujigae 日降水的 TS 评分
Fig.7 Threat score of daily precipitation of Typhoon Kujira, Linfa, and Mujigae in EARS
(ERA-Interim driving and ERA5 driving, respectively)

东亚区域再分析系统对登陆华南台风的降水模拟效果在不同阶段上也存在差异,主要考虑受台风强度的影响。图 8 为 CMA 最佳路径数据集中台风 Kujira、Linfa 和 Mujigae 的近中心日平均最大风速随时间的变化。可见在台风巅峰强度日和登陆日(6月22日、7月8—9日、10月4日),EARS(ERA5 驱动)的评分都较同个台风的其他阶段更高,且相比 EARS(ERA-Interim 驱动)评分优势更大。

综上所述,相较于以 ERA-Interim 驱动的 EARS,ERA5 驱动的 EARS 对处于巅峰强度或登陆前后的华南台风降水模拟更准确,且对大雨以上量级(日降水量 $R \geq 25$ mm)的降水模拟明显把握更好。总得来说,ERA5 驱动的 EARS 对登陆华南台

风的降水模拟更优。

4 EARS (ERA5 驱动) 和 ERA5-Land 对华南台风降水模拟的对比评估

由上述结果得知,用 ERA5 驱动的 EARS 对登陆华南台风的降水模拟更具有优势,下文进一步对比评估 ERA5-Land 再分析资料和 EARS(ERA5 驱动)对台风降水模拟的优劣。图 9 为融合降水和 ERA5-Land 在 Kujira、Linfa 和 Mujigae 生命期间对华南降水模拟的空间分布及两者降水量偏差。ERA5-Land 降水的空间分布和降水量基本与融合降水一致,降水量较大的地方从北到南分别出现在 Mujigae 经过的广西东北部、Linfa 经过的广东中南部和 Kujira 经过的海

南西部,日平均降水量基本达到 15 mm 以上(图 9a、b)。图 9c 为 ERA5-Land 与融合降水的日平均降水量偏差,如图所示,华南大部分地区的偏差在±3 mm

以内,偏差不大,其余地区除了少数地区为负偏差,其他均为正偏差。结果表明,ERA5-Land 整体高估华南台风降水。

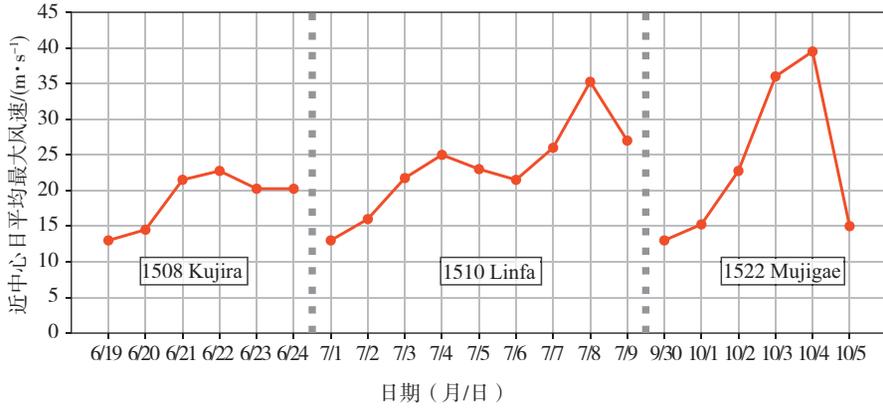


图 8 CMA 最佳路径数据集中台风 Kujira、Linfa 和 Mujigae 近中心日平均最大风速
Fig.8 Daily mean maximum wind speed near the centers of Typhoon Kujira, Linfa, and Mujigae in CMA Tropical Cyclone Best Track Database

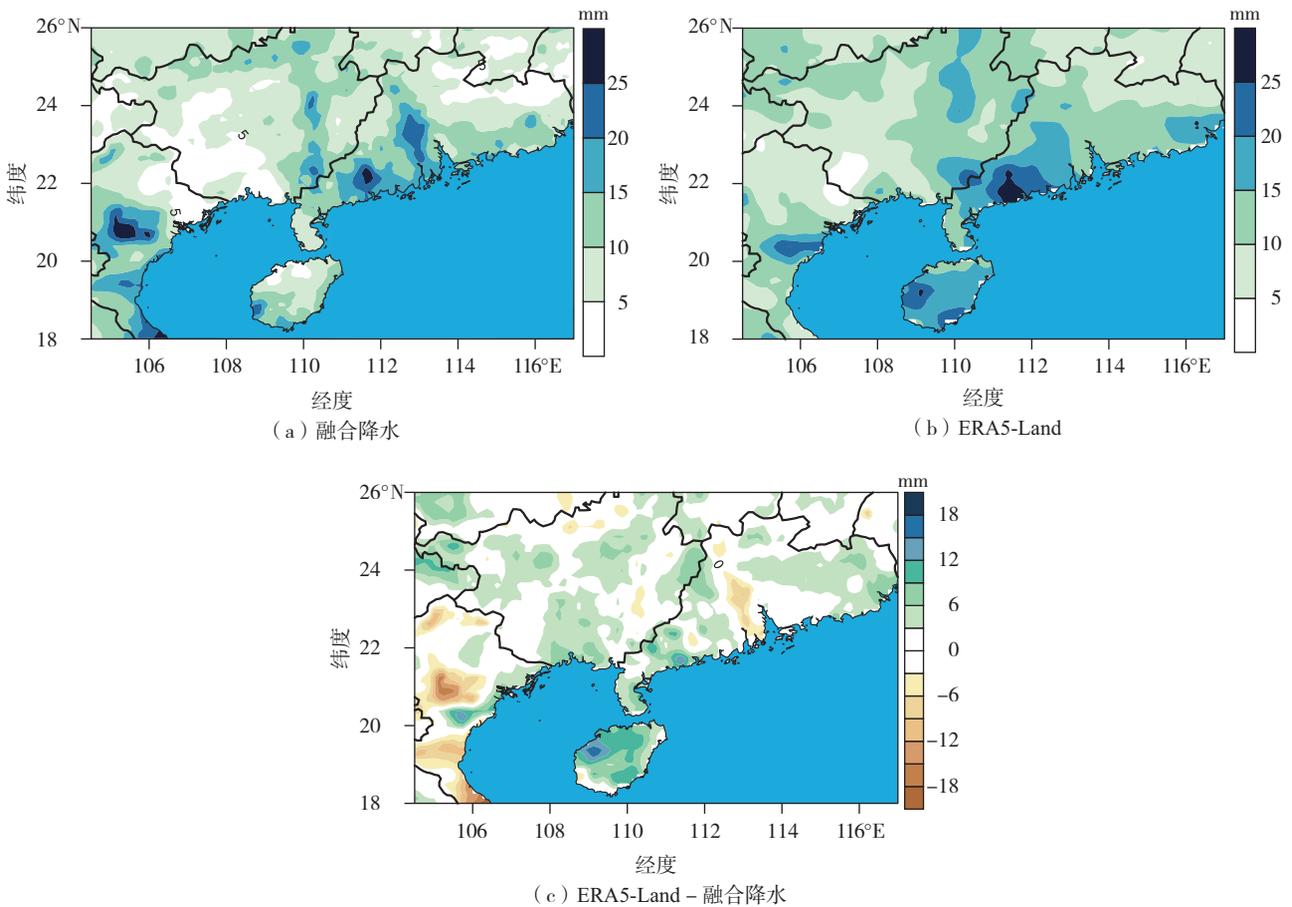


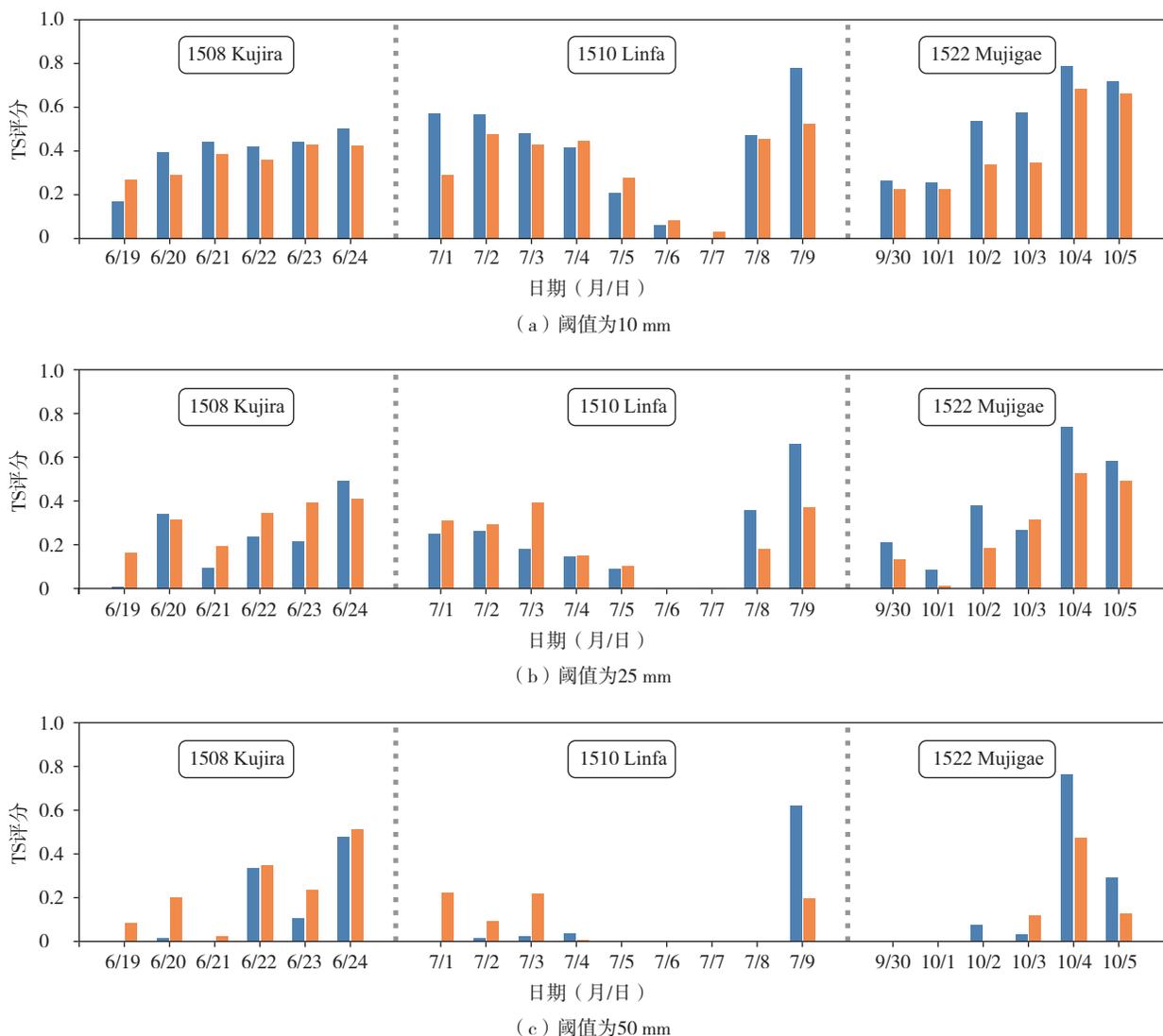
图 9 台风 Kujira、Linfa 和 Mujigae 生命期间融合降水、ERA5-Land 对华南降水模拟的空间分布和两者降水量的偏差(色阶)
Fig.9 Spatial distribution of merged precipitation and simulated precipitation by ERA5-Land in South China and bias between them for Typhoon Kujira, Linfa, and Mujigae (color scale)

以融合降水为标准,分别对 ERA5-Land 和 EARS(ERA5 驱动)的华南台风降水模拟进行 TS 评分(图 10)。综合评分结果,EARS(ERA5 驱动)在 Kujira、Linfa 生命期间对华南地区降水模拟比 ERA5-Land 更准确。具体来看,在中雨以上量级($R \geq 10$ mm)的台风降水模拟中,EARS(ERA5 驱动)对降水的把握略低于 ERA5-Land,但整体差异不大(图 10a);而随着降水量级增大,EARS(ERA5 驱动)在 Kujira、Linfa 生命期间华南地区降水 TS 评分整体优于 ERA5-Land(图 10b-d),表明 EARS(ERA5 驱动)对大雨以上量级的台风降水把握更好,尤其在台风登陆前,EARS(ERA5 驱动)对沿海的对流发展模拟更完整,特别在暴雨量级降水中的模拟比 ERA5-Land 更准确。

在 Mujigae 生命期间,EARS(ERA5 驱动)的降水模拟结果不如 ERA5-Land,尤其在登陆前后,虽然

EARS(ERA5 驱动)能准确模拟台风快速加强的过程,但对 Mujigae 登陆后快速减弱的模拟不足^[9],因此在登陆点附近高估了降水;另外,外围雨带落区的模拟偏差导致对广西南部和珠三角西部的降水漏报。与前两次台风登陆过程不同,Mujigae 登陆前后有冷空气的参与,这给东亚区域再分析系统带来了更多的挑战,对此需要更多的试验研究。

在台风发展的不同阶段,两者的差异也相当明显。在台风登陆前后,不管是 EARS(ERA5 驱动)还是 ERA5-Land,降水模拟都较其他阶段更准确,表现为图 10 各个台风生命时间中的 TS 评分均向台风登陆时间“聚拢”。当降水阈值为 10 mm 时,EARS(ERA5 驱动)和 ERA5-Land 评分的差异不大,但随着降水阈值的增加,两者的差异增大,EARS(ERA5 驱动)和 ERA5-Land 在不同日期均出现不同程度的偏差,两者对强降水量级和落区的把握仍需提高。



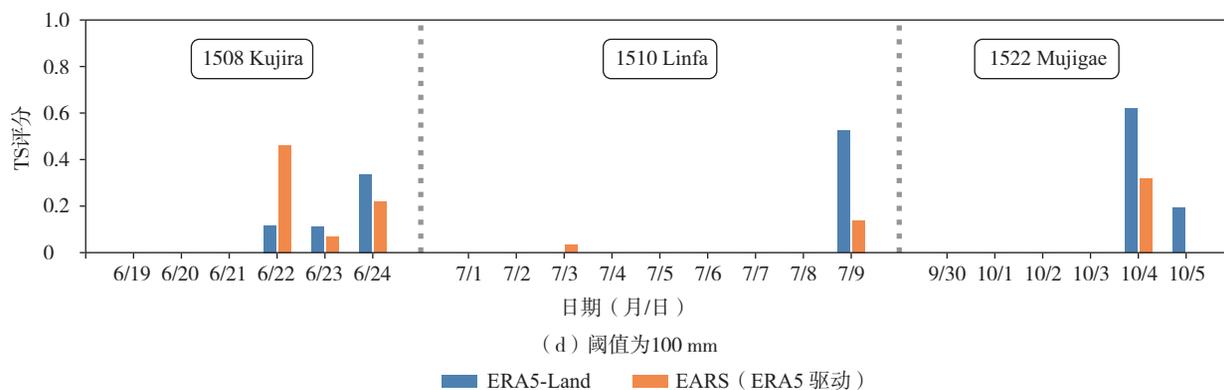


图 10 ERA5-Land 和 EARS(ERA5 驱动)中 Kujira、Linfa 和 Mujigae 日降水的 TS 评分
Fig.10 Threat score of daily precipitation of Typhoon Kujira, Linfa, and Mujigae in ERA5-Land and EARS (ERA5 driving)

总的来说,两套再分析资料在降水模拟技巧上各有优劣势,在 3 次台风降水过程中,ERA5-Land 描述的降水落区整体形态分布更优,对于大尺度降水的把握更好,但对中小尺度降水表现一般,难以准确再现中小尺度过程的降水中心极值。而 EARS 对中尺度过程的描述更完整,对沿海降水的模拟更准确,在 Kujira 和 Linfa 登陆前的大雨和暴雨模拟中有正技巧,但在复杂地形中的降水表现欠佳,山区、丘陵带出现比沿海更明显的降水量偏差,因此在气旋登陆后的降水预报技巧不及 ERA5-Land。相较于 ERA5-Land,东亚区域再分析系统目前同化的观测资料有限,同时对物理过程参数化方案的选择仍欠准确,后续需要有针对性地改进。

5 结论

分别使用 ERA-Interim 和 ERA5 两套再分析资料驱动东亚区域再分析系统 (EARS),对 2015 年 3 次登陆华南台风的降水过程进行对比试验,并与 ERA5-Land 的降水资料进行比较评估,探讨东亚区域再分析资料对华南台风降水模拟的优劣特性,结果表明:

(1) EARS (ERA5 驱动) 相较于 EARS (ERA-Interim 驱动) 对处于成熟阶段和登陆前后的华南台风降水模拟更准确,两者在台风登陆前均倾向于高估台风降水,台风登陆后略低估或能够准确模拟降水。

(2) 以 ERA5 和 ERA-Interim 驱动的林ARS 对台风降水的模拟效果差异随着降水量级增大而增大, EARS(ERA5 驱动) 对大雨以上量级的降水把握明显更好。

(3) 在 EARS 与 ERA5-Land 的对比分析中,两者各有优势, EARS 对中尺度过程的描述更完整, ERA5-Land 对大尺度降水的把握更好; EARS 对沿海降水的模拟更准确, ERA5-Land 描述的降水落区整体形态分布更优。

(4) EARS(ERA5 驱动) 的误差主要来源于复杂地形中的降水量偏差,分析原因是 EARS 目前同化的观测资料有限,同时对边界层等物理过程参数化方案的选择仍欠准确,后续需要对此改进。

台风降水目前仍是预报技术难点^[27-30],即便是新一代的全球再分析资料对华南台风降水模拟仍存在不少误差。除了考虑天气尺度和其他中尺度系统的影响,在月或季节尺度上台风也会受到 ENSO 和季风等系统的调制,如 2015 年台风活动活跃期不明显,呈现南海台风偏少、超强台风异常偏多、登陆个数及频次偏少等特征^[21],这是受到全球尺度海气系统影响的结果。各个尺度对台风的影响并不单一,仅仅提高分辨率虽然可以捕捉更小尺度系统的特征,但同时也会带来非线性误差,因此还需要在参数化方案、同化方案和耦合系统等各方面同步优化,这也是东亚区域再分析系统未来的发展方向。

参考文献:

- [1] 赵天保,符淙斌,柯宗建,等.全球大气再分析资料的研究现状与进展[J].地球科学进展,2010,25(3):242-254.
- [2] 韩晋平,王会军.东亚夏季风年代际变化的若干重要特征及两份大气再分析资料的异同[J].地球物理学报,2007,50(6):1666-1676.

- [3] 黄燕玲,陈海山,蒋薇,等.东亚夏季风异常活动的多模态特征:不同再分析资料的比较分析[J].大气科学,2015,39(1):145-160.
- [4] 朱智,师春香,张涛,等.多种再分析地表温度资料在中国区域的适用性分析[J].冰川冻土,2015,37(3):614-624.
- [5] 高学杰,赵宗慈,丁一汇,等.温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 I:模式对中国气候模拟能力的检验[J].气象学报,2003,61(1):20-28.
- [6] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979.
- [7] 文秋实,王东海.基于 GSI 的华南地区对流尺度快速循环同化预报试验[J].气象,2017,43(6):653-664.
- [8] 尹金方,梁旭东,陈锋,等.东亚区域大气再分析技术研究及资料集建设[J].气象科技进展,2018,8(1):79-84.
- [9] 潘裕山,徐建军,张宇,等.基于东亚区域再分析系统模拟 2015 年西北太平洋热带气旋[J].广东海洋大学学报,2020,40(5):53-63.
- [10] 黄奇恩,徐建军.东亚及其周边海域的一年大气再分析资料试验与评估[J].厦门大学学报(自然科学版),2020,59(3):401-411.
- [11] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. Appl Opt, 2011, 137(656):553-597.
- [12] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5 [J]. ECMWF Newsl, 2019, 159:17-24.
- [13] 沈艳,潘旸,宇婧婧,等.中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J].大气科学学报,2013,36(1):37-46.
- [14] 潘旸,沈艳,宇婧婧,等.基于最优插值方法分析的中国区域地面观测与卫星反演逐时降水融合试验[J].气象学报,2012,70(6):1381-1389.
- [15] 张蒙蒙,江志红.我国高分辨率降水融合资料的适用性评估[J].气候与环境研究,2013,18(4):461-471.
- [16] XUE T, XU J J, GUAN Z Y, et al. An assessment of the impact of ATMS and CrIS data assimilation on precipitation prediction over the Tibetan Plateau [J]. Atmos Meas Tech, 2017, 10(7):2517-2531.
- [17] 薛春芳,潘留杰.基于 MODE 方法的日本细网格模式降水预报的诊断分析[J].高原气象,2016,35(2):406-418.
- [18] MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA A, et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications [J]. Earth Syst Sci Data, 2021, 13(9):4349-4383.
- [19] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2014, 31(2):287-301.
- [20] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. Adv Atmos Sci, 2021, 38(4):690-699.
- [21] 许映龙,黄奕武.2015 年西北太平洋和南海台风活动特征及主要预报技术难点[J].海洋气象学报,2017,37(1):31-41.
- [22] JONES P W. First- and second-order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates [J]. Mon Wea Rev, 1999, 127(9):2204-2210.
- [23] 王兰宁,李清泉,吴统文.插值方案对耦合系统积分稳定性影响的数值研究[J].南京气象学院学报,2009,32(2):230-238.
- [24] NOGUEIRA M. Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years: process-based analysis of systematic and random differences [J]. J Hydrol, 2020, 583:124632.
- [25] 孟宪贵,郭俊建,韩永清.ERA5 再分析数据适用性初步评估[J].海洋气象学报,2018,38(1):91-99.
- [26] 刘婷婷,朱秀芳,郭锐,等.ERA5 再分析降水数据在中国的适用性分析[J].干旱区地理,2022,45(1):66-79.
- [27] 任福民,向纯怡.登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望[J].海洋气象学报,2017,37(4):8-18.
- [28] 廖菲,李文婷,张子然,等.1949—2017 年南海海域热带气旋强度和路径快速变化统计特征[J].海洋学报,2019,41(9):126-135.
- [29] 马蕴琦,任福民,冯恬,等.强热带风暴“碧利斯”(0604)极端降水研究回顾[J].海洋气象学报,2020,40(3):1-10.
- [30] 秦思,姚美,任福民,等.强台风“菲特”(1323)极端降水研究进展[J].海洋气象学报,2021,41(1):11-18.