

苏志重,王婧,王新敏,等.台风“杜苏芮”(2305)影响福建期间 DSAEF\_LTP 模型降水预报检验[J].海洋气象学报,2025,45(1):45-58.

SU Zhizhong, WANG Jing, WANG Xinmin, et al. Verification of precipitation forecast of Typhoon Doksuri (2305) during its impact on Fujian base on the DSAEF\_LTP model[J]. Journal of Marine Meteorology, 2025, 45(1):45-58. DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240426001. (in Chinese)

## 台风“杜苏芮”(2305)影响福建期间 DSAEF\_LTP 模型降水预报检验

苏志重<sup>1,2,3</sup>,王婧<sup>1,2,3</sup>,王新敏<sup>1,2,3</sup>,任福民<sup>4</sup>

(1.厦门市海峡气象重点开放实验室,福建 厦门 361012;2.厦门市气象局,福建 厦门 361012;3.福建省灾害天气重点实验室,福建 福州 350028;4.中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

**摘要** 为了评估改进的动力统计相似集合预报登陆台风降水模型(Dynamical-Statistical-Analog Ensemble Forecast model for Landfalling Typhoon Precipitation, DSAEF\_LTP)在2023年第5号超强台风“杜苏芮”影响福建地区的表现,对其预报的台风过程降水量进行常规检验和空间检验,并与欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)数值预报降水产品(以下简称“ECMWF”)、福建省气象局最优TS(threat score)评分订正法(optimal TS, OTS)订正降水产品(以下简称“FZECMOS”)结果进行对比。分析表明:(1) DSAEF\_LTP模型对福建沿海强降水落区和东北部强降水中心的预报接近实况,100 mm及以上和250 mm及以上等极端降水量TS评分比ECMWF和FZECMOS提升明显,但 DSAEF\_LTP模型存在特大暴雨预报范围显著偏小等缺点。(2)在100 mm及以上和250 mm及以上量级,MODE(Method for Object-based Diagnostic Evaluation)空间检验显示, DSAEF\_LTP模型在整体相似度上明显优于ECMWF和FZECMOS,尤其在对孤立小区域强降水的预报性能方面表现出色。(3)随着降水检验量级的增加, DSAEF\_LTP模型预报产品与实况重叠面积之比也增大,表明 DSAEF\_LTP模型在极端降水方面的预报效果更加突出。(4) DSAEF\_LTP模型还能够根据最新的相似路径实况和预报,调整筛选历史相似台风,合理保留相似台风及其降水分布,使得集合预报效果得以改善。

**关键词** DSAEF\_LTP模型;台风“杜苏芮”;台风过程降水量;预报检验

中图分类号: P732.7; P457.6 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2025)01-0045-14

DOI:10.19513/j.cnki.hyqxxb.20240426001

## Verification of precipitation forecast of Typhoon Doksuri (2305) during its impact on Fujian based on the DSAEF\_LTP model

SU Zhizhong<sup>1,2,3</sup>, WANG Jing<sup>1,2,3</sup>, WANG Xinmin<sup>1,2,3</sup>, REN Fumin<sup>4</sup>

(1. Xiamen Key Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen 361012, China; 2. Xiamen Meteorological Service, Xiamen 361012, China; 3. Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350028, China; 4. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

收稿日期:2024-04-26;修回日期:2024-08-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(42330610);福建省自然科学基金项目(2022J01446);华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ202317)

第一作者简介:苏志重,男,硕士,正高级工程师,主要从事天气预报技术和台风降水研究,shixinqianli@163.com。

通信作者简介:王新敏,女,硕士,正高级工程师,主要从事天气预报技术和暴雨机理研究,995378392@qq.com。

**Abstract** To assess the performance of the improved Dynamical-Statistical-Analog Ensemble Forecast model for Landfalling Typhoon Precipitation ( DSAEF\_LTP model ) during the impact of Super Typhoon Doksuri ( 2305 ) on the Fujian region, the forecast typhoon precipitation by the DSAEF\_LTP model is evaluated by using conventional and spatial verification methods. The results are compared with the ECMWF ( European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ) numerical prediction products ( hereafter referred to as ECMWF ) and the revised precipitation products of Fujian Meteorological Service based on OTS ( optimal threat score ) ( hereafter referred to as FZECMOS ). The main findings are summarized as follows. ( 1 ) The DSAEF\_LTP model forecast of intense precipitation distribution in the coastal areas of Fujian and the intense precipitation center in the northeastern part of Fujian closely align with actual observations. The TS values of the DSAEF\_LTP model show significant improvement compared to ECMWF and FZECMOS at the precipitation equal to or greater than 100/250 mm. However, the DSAEF\_LTP model has shortcomings such as a significantly smaller forecast area for very heavy rainstorm. ( 2 ) At the precipitation equal to or greater than 100/250 mm, the spatial verification results of MODE ( Method for Object-based Diagnostic Evaluation ) reveal that the DSAEF\_LTP model outperforms ECMWF and FZECMOS in overall similarity, particularly in forecasting intense precipitation in isolated small areas. ( 3 ) As the magnitude of precipitation increases, the overlap area between the DSAEF\_LTP model forecast products and the observations also increases, indicating the model's effectiveness in forecasting extreme precipitation. ( 4 ) The DSAEF\_LTP model demonstrates its ability to flexibly adjust and screen historically similar TCs ( tropical cyclones ) according to the latest observations and forecast of tracks, allowing for the reasonable retention of similar TCs and their associated precipitation distributions, which enhances the effect of ensemble forecast.

**Keywords** DSAEF\_LTP model ( Dynamical-Statistical-Analog Ensemble Forecast model for Landfalling Typhoon Precipitation ); Typhoon Doksuri; typhoon precipitation; verification of forecast

## 引言

台风所带来的强降水可能引发山洪、泥石流以及城市内涝等次生灾害,对沿海城市的人民生命财产安全构成严重威胁。福建位于中国东南沿海,拥有漫长的海岸线,使得西北太平洋台风有较高的登陆概率或对该区域产生显著影响<sup>[1-2]</sup>。因此,迫切需要提高登陆热带气旋(landfalling tropical cyclone, LTC)降水,尤其是极端降水的准确预报能力,以加强对此类复合灾害事件的预测和应对。

数值天气预报模式能够提供台风登陆期间的降水预报产品。此外,还有专门针对台风预报的数值模式,如国家气象中心基于中尺度数值模式(China Meteorological Administration Mesoscale Model,以下简称“CMA-MESO”)开发的区域台风数值预报系统(China Meteorological Administration\_Regional Mesoscale Typhoon Numerical Prediction System,以下简称“CMA-TYM”)<sup>[3]</sup>。相关的检验表明,CMA-TYM在120 h内的路径和强度预报方面接近国际水平,在实际业务中具有重要的参考价值<sup>[4]</sup>。广州热带海洋气象研

究所开发并业务运行的南海台风模式(Tropical Regional Assimilation Model for the South China Sea, 简记为“TRAMS”)主要用于为华南沿海地区提供南海区域的台风业务数值预报产品<sup>[5]</sup>。此外,经过订正的数值模式降水预报产品和人工智能降水量预报产品也在登陆台风降水中得到广泛应用。例如,姜丽黎等<sup>[6]</sup>采用动力与统计相结合的方法,对25个登陆中国的台风引起的极端降水事件进行概率预报研究,结果显示该方法具有一定的预报技巧,能准确预报多数站点的极端降水,但预报范围略偏大,空报率较高。Ren等<sup>[7-8]</sup>、Jia等<sup>[9]</sup>提出动力统计相似集合预报(Dynamical-Statistical-Analog Ensemble Forecast, DSAEF)理论,初步建立登陆台风降水(landfalling typhoon precipitation, LTP)预报的 DSAEF\_LTP 模型,通过在华东、华南及全国范围的试验和检验,表明该模型在台风极端降水应用方面相对于国内外数值模式有明显优势<sup>[10-13]</sup>。Su等<sup>[14]</sup>在模型中引入台风强度筛选因子,增加区域相似因子,并改进了集合预报方案,利用改进后的 DSAEF\_LTP 模型进行登陆福建台风降水预报对比试验,从而建立了影响福

建的台风降水预报模型。

2305 号台风“杜苏芮”于 2023 年 7 月 28 日登陆福建泉州,影响中国东部 14 省(区、市),造成严重灾害损失。在台风降水影响前,数值模式预报显示该次台风对福建地区有造成强降水的可能性,Su 等<sup>[14]</sup>改进后的 DSAEF\_LTP 模型也在此次强降水过程中实现业务化运行,提供“杜苏芮”台风过程的降水量预报产品。此文对改进后的 DSAEF\_LTP 模型预报产品进行检验,与数值模式产品、客观订正产品进行对比,以评估模型产品的性能,并为模型的进一步改进提供方向,目的是提高台风过程降水量客观预报水平。

## 1 台风概况

2305 号台风“杜苏芮”于 2023 年 7 月 21 日 08 时(北京时,下同)生成,其路径和强度见图 1。“杜苏芮”生成后稳定向西偏北方向移动,并于 28 日 09:55 在泉州晋江沿海登陆,登陆时为强台风级,中心最大风力为 15 级( $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )。“杜苏芮”登陆后强度逐渐减弱,并继续向北偏西方向移动横穿福建,于 28 日 22 时前后进入江西境内<sup>[15-16]</sup>。“杜苏芮”对福建的影响严重,台风移动路径绕过菲律宾吕宋岛和中国台湾岛,内核结构保持较为完整,最终正面登陆闽南沿海,风雨的破坏力给福建带来巨大损失。

受台风“杜苏芮”直接登陆影响,7 月 26—29 日福建沿海普降暴雨到大暴雨,局地特大暴雨。福州市区、闽侯、莆田市区、仙游、泉州南安日降雨量超过 1961 年以来历史极值纪录,莆田市区日降雨量破全省国家级气象观测站最大日降雨量历史纪录。台风“杜苏芮”共造成福建 266.69 万人受灾,农作物受灾面积达  $37\,396.27 \text{ hm}^2$ ,倒塌和严重损坏房屋 3 357 间,直接经济损失达 147.55 亿元。

## 2 数据和方法

### 2.1 资料

鉴于主要降水时段为“杜苏芮”台风登陆前的外围螺旋雨带降水和台风登陆后的本体降水及尾流降水,此研究中实况和用于对比分析的数值模式降水总量的统计时段为 2023 年 7 月 26 日 08 时—29 日 08 时。所用资料包括:

(1)1960—2018 年中国 2 027 个国家级气象观

测站逐日(20 时—次日 20 时)降水资料,该资料包括福建地区的 66 个地面站点数据。

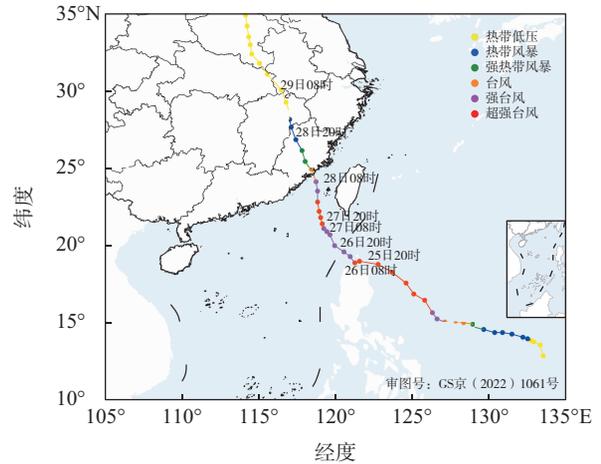


图 1 台风“杜苏芮”路径和强度

Fig.1 Track and intensity of Typhoon Doksuri

(2)2023 年 7 月 26 日 08 时—29 日 08 时台风“杜苏芮”影响期间福建地区 66 个地面站点降水数据,该地面站点与(1)中站点位置一致。

(3)1979 年以来欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA5 资料(<https://cds.climate.copernicus.eu/>)中的风场、位势高度场和水汽等数据。

(4)DSAEF\_LTP 模型降水预报结果和数值模式产品及订正预报产品。利用改进后的 DSAEF\_LTP 模型生成台风“杜苏芮”影响福建的过程降水预报产品,预报起报时间为 7 月 25 日 08 时,预报时效为 96 h。使用的对比预报产品是 ECMWF 数值预报降水量预报产品(以下简称“ECMWF”)和福建省气象局利用最优 TS(threat score)评分订正法(optimal TS,OTS;即“福建 OTS 算法”)生成的订正降水产品<sup>[17]</sup>,该降水产品为订正后的 ECMWF 降水预报产品(以下简称“FZECMOS”)。ECMWF 和 FZECMOS 的水平分辨率分别为  $9 \text{ km}\times 9 \text{ km}$  和  $3 \text{ km}\times 3 \text{ km}$ 。在对比检验中,将上述两类数据插值到本节(1)中所述福建地区站点上。ECMWF 的起报时间为 7 月 24 日 20 时,过程降水预报时效为 108 h;FZECMOS 的起报时间为 7 月 25 日 08 时,过程降水预报时效为 96 h。

(5)所使用的台风最佳路径资料集来自中国气象局上海台风研究所,数据包括每 6 h 的台风位置和

强度<sup>[18]</sup>,时间为1960—2018年。台风“杜苏芮”的实时路径采用中央气象台实时下发的报文信息(<http://www.nmc.cn/publish/typhoon/message.html>),路径预报信息采用中央气象台主观路径预报。

## 2.2 方法

### 2.2.1 DSAEF\_LTP 模型

文中所使用的 DSAEF\_LTP 模型运行过程主要有以下4个步骤(图2):获取目标热带气旋(tropical cyclone, TC; 对其进行过程降水预报的 TC)路径、构建广义初值、初值相似性判别、LTC 降水集合预报。第一是将起报时刻之前的目标 TC 观测路径和之后的目标 TC 预报路径相结合,构成目标 TC 的完整路径,其中预报路径采用基于中央气象台主观预报的 TC 路径预报结果。第二是构建广义初值,即构建对目标 TC 过程降水有影响的若干变量的初值。除了路径这一重要特征外,还有许多其他特征,如 TC 登陆季节、TC 其他自身特征(如强度、移速、结构等)和环境场特征(如季风、副热带高压、急流等)对于 TC 降水的形成十分重要,故需要逐步将这些特征的相似性(季节相似、TC 强度相似、TC 移速相似、TC 结构相似、季风相似、副热带高压相似等)考虑进来。第三是初值相似性判别。在既定的相似性区域内,计算目标 TC 与所有历史 TC(1960 年以来,目标 TC 之前)路径之间的 TC 路径相似面积指数(track similarity area index, TSAI)并升序排列, TSAI 越小说明两条路径间相似程度越高;在路径相似的基础上,依次判别目标 TC 与历史 TC 登陆季节、强度和移速等的相似性,以剔除与目标 TC 登陆季节、强度和移速等差异较大的历史 TC。第四是 LTC 降水集合预报,采用优化改进后的集合方案将筛选后的若干个最佳相似 TC 所对应的历史 TC 风场进行集合,从而得到目标 TC 的过程降水预报结果。

对于单个 TC 而言,每个参数都有多种取值方式,不同取值将产生大量组合,一种组合即一种预报方案,理想状态下参数间的随机组合可生成数百万套预报方案<sup>[14]</sup>。文中所使用的 DSAEF\_LTP 模型与 Ren 等<sup>[7-8]</sup>建立的原模型相比,主要在相似区域和集合预报方案方面做了改进。

图3中黑色框所示范围(ABCD)为原先模型相似区域,参数主要含义为:由C点的起报位置与对角点

A 最大预报时刻 TC 预报位置所围成的矩形范围为相似台风的搜寻区域,共15种取值方式。原先参数主要基于实况加预报路径所组成的矩形范围,存在相似区域偏小且偏东偏南,因此在预报台风路径的基础上采用扩大固定搜索范围的方式调整相似区域取值,考虑到西北太平洋台风最大直径在2 000 km左右,故选取2 000 km的正方形。新的相似区域应主要向西、向北扩大,对相似区域增加5种新的取值方式, $A_1B_1$ 为2 000 km, $B$ 和 $B_1$ 的中点为 $B_2$ 、 $D$ 和 $D_1$ 的中点为 $D_2$ ,其他线段长度由计算获得。图3为相似区域的示意图,新取值方式分别为:(1) $A_1B_1C_1D_1$ (红色框)是边长为2 000 km的正方形,将此作为相似区域的第16种取值方式;(2) $A_2B_2C_2D_2$ (绿色框)为第17种取值方式;(3) $A_3B_3C_3D_3$ 为第18种取值方式;(4) $A_4B_4C_4D_4$ 为第19种取值方式;(5) $A_5B_5C_5D_5$ 为第20种取值方式。

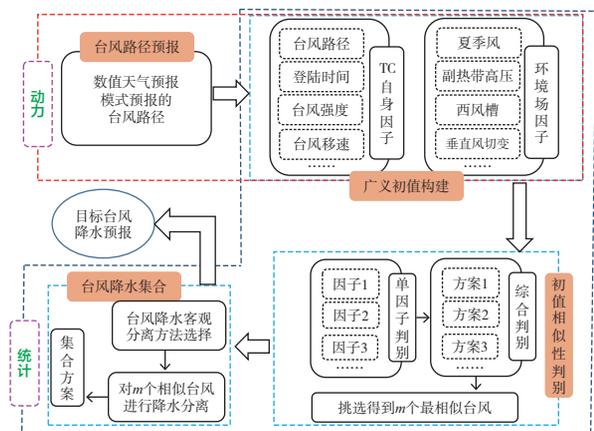


图2 DSAEF\_LTP 模型流程图

Fig.2 Flow diagram of DSAEF\_LTP model

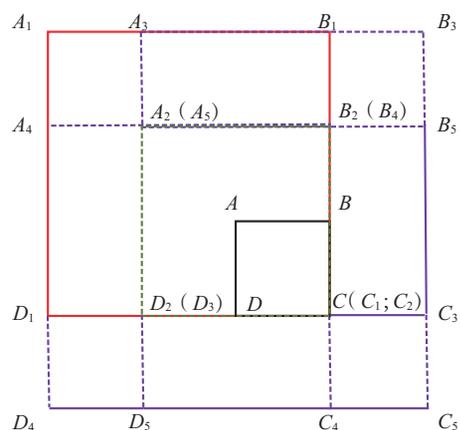


图3 新增相似区域示意图

Fig.3 Schematic diagram of newly added similarity region

在 DSAEF\_LTP 模型的 LTC 降水集合预报步骤上,原来只有平均值和最大值 2 种集合预报方法,此研究考虑了基于站点集合和场集合 2 类集合方式,

新增 4 种集合方法,包括最优百分位方法、概率匹配平均、等差权重集合平均、基于 TSAI 的非等差权重集合平均,方法具体说明见表 1<sup>[10]</sup>。

表 1 DSAEF\_LTP 模型新增的集合预报方法

Table 1 Improved ensemble forecast methods in the DSAEF\_LTP model

新增集合方法名称	实施方法
最优百分位	如果 $\text{Max}[P(i)] \geq 100 \text{ mm}$ , 则 $P = \text{Max}[P(i)]$ ; 如果 $P(i)$ 的 90% 分位值不小于 50 mm, 则 $P$ 等于 90% 分位值; 如果 $P(i)$ 的 75% 分位值不小于 25 mm, 则 $P$ 等于 75% 分位值; 如果 $P(i)$ 的中位值不小于 10 mm, 则 $P$ 等于中位值; 如果上述条件都不满足, 则 $P$ 等于 10% 分位值
概率匹配平均	第一步, 将 2 027 个站 $m$ 个成员所有 (含 $140 \times m$ 个站点) 的 TC 过程最大降水量从大到小排列, 分为 2 027 等份, 保留每一等份的中位数; 第二步, 对每个站点上 $P(i)$ 求平均得到集合平均场, 将集合平均场所有站点的数值按从大到小排列, 并保留各数值在平均场中的位置; 第三步, 将第一步保留下来的降水值序列与集合平均场序列从大到小一一对应, 将第二步的预报值保留至其对应数值所在集合平均场中
等差权重集合平均	各入选相似 TC 过程降水量的权重为 $W(i) = \frac{(2 \times m - i) \times 2}{(3 \times m - 1) \times m}$ ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), $P = \sum_{i=1}^m W(i) \times P(i)$
基于热带气旋路径相似面积指数的非等差权重集合平均	对入选的 $m$ 个相似台风的路径相似面积指数分别取倒数, 即 $A(i) = \frac{1}{I_{\text{TSA}}(i)}$ ( $i = 1, 2, \dots, m$ ), 相似性第 $i$ 的相似 TC 降水场权重为 $W(i) = \frac{A(i)}{\sum_{i=1}^m A(i)}$ , 即 $P = \sum_{i=1}^m W(i) \times P(i)$

注:  $P$  表示降水量,  $i$  表示第  $i$  个相似台风,  $P(i)$  表示第  $i$  个相似台风的降水量,  $W(i)$  表示第  $i$  个相似台风的权重,  $I_{\text{TSA}}$  为热带气旋路径相似面积指数的值<sup>[8]</sup>,  $A(i)$  表示第  $i$  个相似台风的路径相似面积指数的倒数。

针对以上改进 DSAEF\_LTP 模型在福建地区的可用性和参数选取问题, Su 等<sup>[14]</sup> 已通过 42 个降水量超过 100 mm 的台风个例研究证明该模型在福建地区的台风过程降水预报能力超过最优数值预报, 并给出了模型最优参数。在此次台风“杜苏芮”的业务实时预报中, 模型的各个参数采用 Su 等<sup>[14]</sup> 的研究方案, 具体参数方案见表 2。

表 2 台风“杜苏芮”影响过程 DSAEF\_LTP 模型实时业务参数表

Table 2 Real-time operational parameters of the DSAEF\_LTP model during the impact of Typhoon Doksuri

参数	方案
起报时刻	出现降水的当日 08 时
相似区域	相似区域第 17 种取值方式 <sup>[14]</sup>
纬度极值点分割度阈值	0.1
重叠度阈值	0.4
登陆季节相似	1—12 月
强度相似	历史台风降水过程第一日台风平均强度与目标台风所有级别
最佳相似台风个数 $m$	10
集合预报方案	最优百分位法

### 2.2.2 检验方法

(1) 常规检验方法。采用 3 种常用的预报评分方法<sup>[19]</sup>, 即 TS 评分、空报率 (false alarm ratio, FAR) 和漏报率 (missing ratio, MR), 评估 DSAEF\_LTP 模型的台风过程降水预报能力。三者的计算公式<sup>[20-21]</sup> 如下。

$$V_{\text{TS}} = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \quad (1)$$

$$V_{\text{FAR}} = \frac{N_B}{N_A + N_B} \quad (2)$$

$$V_{\text{MR}} = \frac{N_C}{N_A + N_C} \quad (3)$$

式中:  $V_{\text{TS}}$  为 TS 评分值,  $V_{\text{FAR}}$  为空报率值,  $V_{\text{MR}}$  为漏报率值,  $N_A$  为预报正确的站点数 (实况和预报都出现某量级降水的站点数),  $N_B$  为空报站点数 (预报出现某量级的降水而实况降水未达到此量级的站点数),  $N_C$  为漏报站点数 (实况降水出现某量级而预报未达到此量级的站点数)。以上 3 种评分的取值范围为 0~1。  $V_{\text{TS}}$  越接近 1, 表明报中率越高、预报效果

越好;  $V_{\text{FAR}}$  越接近 1, 表明空报现象越严重;  $V_{\text{MR}}$  越接近 1, 表明漏报现象越严重。

(2) 空间检验方法。采用基于目标的诊断检验方法。MODE (Method for Object-based Diagnostic Evaluation) 方法是 Davis 等<sup>[22]</sup> 发展的一种基于目标的诊断评估方法。MODE 空间检验通过降水量阈值设定, 从预报和实况气象要素场中筛选出满足阈值的降水场目标, 进而对预报和实况场筛选出的降水场目标进行目标对匹配和分析, 再对降水场目标的特征参数(如质心距离、轴角差、面积比、长短轴差等)进行合理配置, 计算每组目标对的匹配度参数、独立属性及匹配目标对的诊断量, 从而诊断出预报场和实况场的空间特性差异及模式预报误差属性<sup>[23]</sup>。国家气象中心已将 MODE 方法集成到天气预报全流程检验评估程序库(Meteorological Evaluation Program Library, 以下简称“MetEva”)中, 此研究主要基于 MetEva 1.7.5 版本的 MODE 检验工具开展相关研究<sup>[24]</sup>。

### 3 结果分析

改进的 DSAEF\_LTP 模型在台风“杜苏芮”生成后和影响福建期间实时业务运行; 每日上午定时运行, 每次根据当日 08 时的台风实时路径和预报路径及模型的参数方案按照流程筛选相似台风, 并生成台风“杜苏芮”过程降水预报产品。以下从常规检验、降水落区空间检验和相似台风路径降水分布等方面检验模型的实时降水预报性能。

#### 3.1 常规检验对比

对比分析 DSAEF\_LTP 模型的降水预报结果和 ECMWF 数值模式及客观订正产品 FZECMOS 的  $V_{\text{TS}}$  (图 4a)。(1) 在 25 mm 及以上量级, FZECMOS 的  $V_{\text{TS}}$  最高, 达 0.79; DSAEF\_LTP 模型的  $V_{\text{TS}}$  次之, 为 0.78; ECMWF 的  $V_{\text{TS}}$  紧随其后, 为 0.76。三者的差距微小。(2) 在 50 mm 及以上量级, FZECMOS 和 DSAEF\_LTP 模型的结果相近,  $V_{\text{TS}}$  均为 0.65~0.66, 但 ECMWF 的  $V_{\text{TS}}$  只有 0.52, 明显小于前二者。(3) 在 100 mm 及以上量级, DSAEF\_LTP 模型排名第一, 其  $V_{\text{TS}}$  为 0.54, 而第二名的 FZECMOS 评分只有 0.45, ECMWF 的评分更是下降到 0.26, DSAEF\_LTP 模型的预报能力分别比 FZECMOS 和 ECMWF 提高 20% 和 108%。(4) 在 250 mm 及以上量级, ECMWF 的  $V_{\text{TS}}$  为 0, 显示该数值模式对于台风“杜苏芮”的极端

降水没有预报能力; 而 DSAEF\_LTP 模型的  $V_{\text{TS}}$  达到 0.25, 远远超过 FZECMOS 的 0.095, 是 FZECMOS 评分的 2.6 倍。

在漏报率方面(图 4b), DSAEF\_LTP 模型的表现也十分稳定, 所有量级的漏报率数值都是最低的。在 100 mm 及以上量级,  $V_{\text{MR}}$  为 44%; 在 250 mm 及以上量级,  $V_{\text{MR}}$  也只有 33%。

在空报率方面(图 4c), 在 100 mm 及以上量级, DSAEF\_LTP 模型和 FZECMOS 的  $V_{\text{FAR}}$  是相同的, 为 3%; 在 250 mm 及以上量级, DSAEF\_LTP 模型的  $V_{\text{FAR}}$  最小, 为 71%; 而 ECMWF 的  $V_{\text{FAR}}$  为 100%, FZECMOS 的  $V_{\text{FAR}}$  也达到 75%。DSAEF\_LTP 模型较 2 个对比产品取得了极佳的预报效果。可以看出, 在 100 mm 及以上和 250 mm 及以上的量级表现方面, DSAEF\_LTP 模型的预报结果比动力数值模式和其他客观订正产品展现出更高的预报准确率和更小的空报率、漏报率, 验证了该模型与所用参数在实际业务中能够取得与建模试验一致的预报效果。

#### 3.2 降水落区空间检验对比

由 2023 年 7 月 26 日 08 时—28 日 08 时福建地区台风“杜苏芮”过程累计降水量分布(图 5a)来看, 主要降水出现在福建中北部沿海地区, 呈带状分布, 降水中心出现在福建中部的莆田和泉州东北部, 过程降水量超过 500 mm, 达到特大暴雨量级; 大暴雨量级的降水则覆盖厦门以北的福建沿海地区, 宁德市区、柘荣、福州市区、闽侯、莆田市区、仙游、泉州南安等地的过程降水量为 250~400 mm。DSAEF\_LTP 模型预报(图 5b)的主要降水中心出现在福建沿海和三明龙岩交界, 达到大暴雨以上量级; 宁德市区、柘荣、福州北部等地预报的降水中心降水量超过 250 mm, 为大暴雨量级。可以看出, DSAEF\_LTP 模型预报的过程累计降水量虽然在福建西南部的龙岩和三明交界地区预报值偏大, 但基本预测出沿海强降水雨带的特征, 在福建北部沿海降水中心也有较好的对应, 但泉州、莆田等福建中部降水中心区域预报量偏小, 特大暴雨预报范围显著偏小, 500 mm 以上极端降水更是出现漏报。由 ECMWF 25 日 20 时起报的累计降水量(图 5c)来看, 其预报的大暴雨落区主要位于福建中南部, 降水中心位于福建南部的漳州和厦门, 但在福建中北部沿海, ECMWF 预报的降水量为 25~100 mm, 与实况偏差较大。FZECMOS

(图 5d) 预报的大暴雨落区偏大, 基本覆盖福建省, 其降水预报中心为厦门附近, 为 250~500 mm,

福建北部的沿海降水中心没有体现, 仍仅有大暴雨量级。

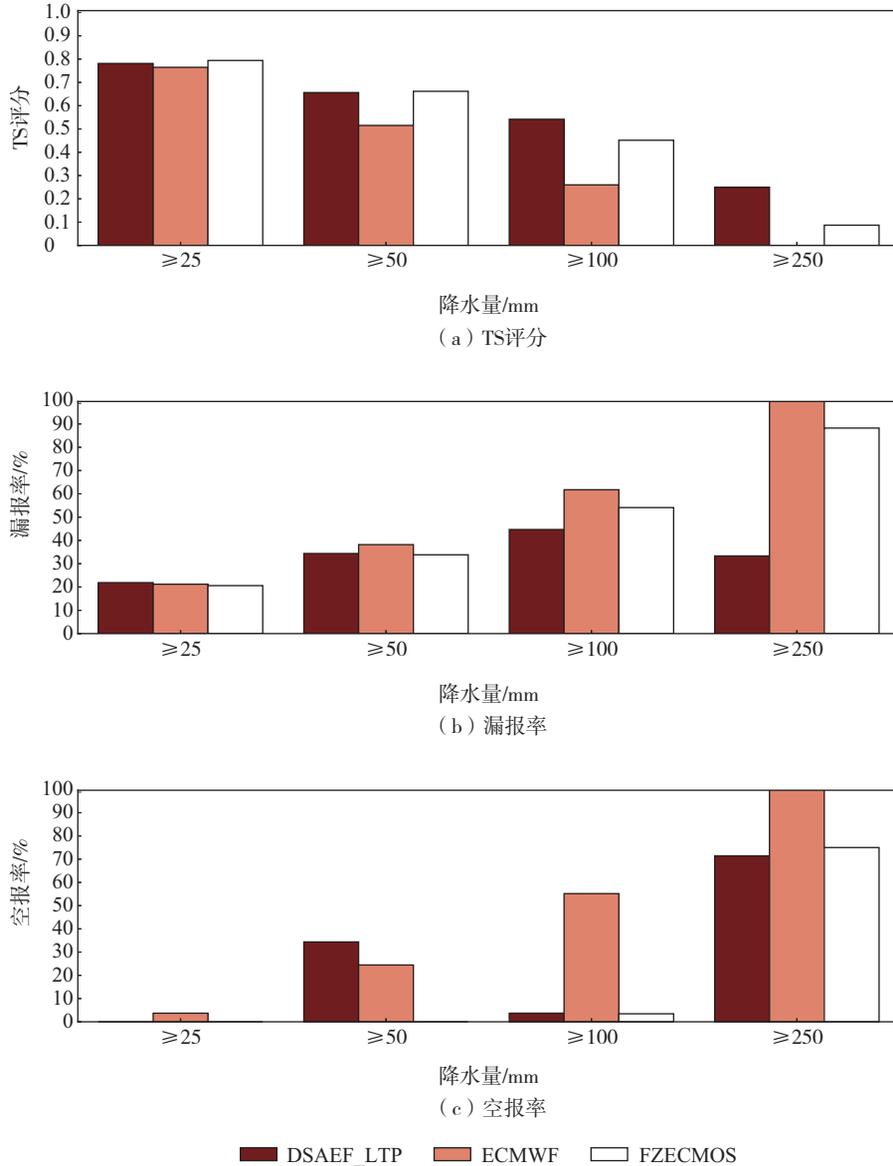


图 4 2023 年 7 月 26 日 08 时—29 日 08 时福建过程降水量 DSAEF\_LTP 模型与 ECMWF、FZECMOS 的  $V_{TS}$ 、 $V_{MR}$ 、 $V_{FAR}$  对比  
Fig.4 Comparison of  $V_{TS}$ ,  $V_{MR}$  and  $V_{FAR}$  between the DSAEF\_LTP model and ECMWF/FZECMOS for total precipitation in Fujian from 08:00 BJT 26 to 08:00 BJT 29 July 2023

以上定性分析了降水预报的空间分布特征, 为了定量对比降水预报空间分布的优劣, 采用 MODE 方法进行空间检验, 检验 DSAEF\_LTP 模型预报和对比模型的降水空间分布特征和预报性能。文中 MODE 方法采用检验阈值累计降水量不小于 100 mm 和不小于 250 mm。图 6 为累计降水量不小于 100 mm 的实况和预报目标匹配分布情况。可以看出, 3 个预报场的目标物均找到了匹配

对象, 且没有出现空报和未配对的情况。3 个预报场的目标物大小不一, 由表 3 可以看出, DSAEF\_LTP 模型的降水目标物在目标质心距离(观测与预报之差的绝对值)上为 0.609, 目标角度差(观测与预报之差的绝对值)为 5.043, 目标面积比(观测与预报之比)为 63.8%, 重叠面积比(观测与预报之比)为 73.6%, 误差远小于其他 2 个对比产品; DSAEF\_LTP 模型的降水目标物匹配相似度达到

91.5%, 远高于 ECMWF 和 FZECMOS 的 75.4% 和 76.2%。这说明 DSAEF\_LTP 模型的累计降水预报

在空间分布形状、走向和落区等方面与实况的相关性较好, 该目标物的预报好于其他预报。

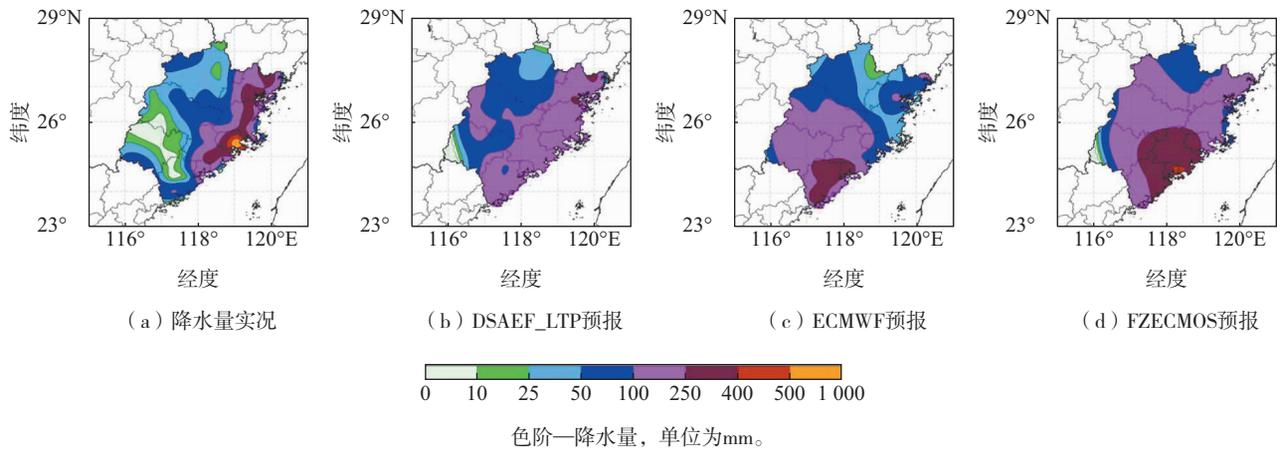
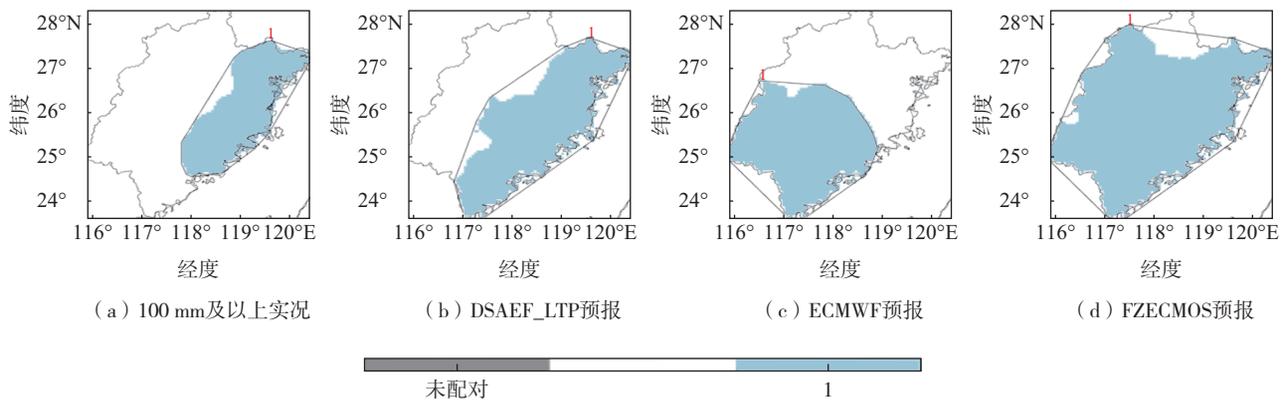


图5 2023年7月26日08时—29日08时降水量实况与模式预报过程降水量分布  
Fig.5 Distribution of observed precipitation and model forecast precipitation from 08:00 BJT 26 to 08:00 BJT 29 July 2023



蓝色区域—成功配对目标1; 灰色区域—未成功配对目标; 白色区域—其他区域。

图6 累计降水量 100 mm 及以上实况和模式预报场目标匹配分布  
Fig.6 Distribution of target matching for observations and model results with accumulated precipitation equal to or greater than 100 mm

表3 由 MODE 方法检验识别福建沿海 100 mm 及以上降水量的目标属性值和属性比值

Table 3 Target attribute values and attribute ratios for identifying precipitation equal to or greater than 100 mm along the coastal areas of Fujian with the MODE method

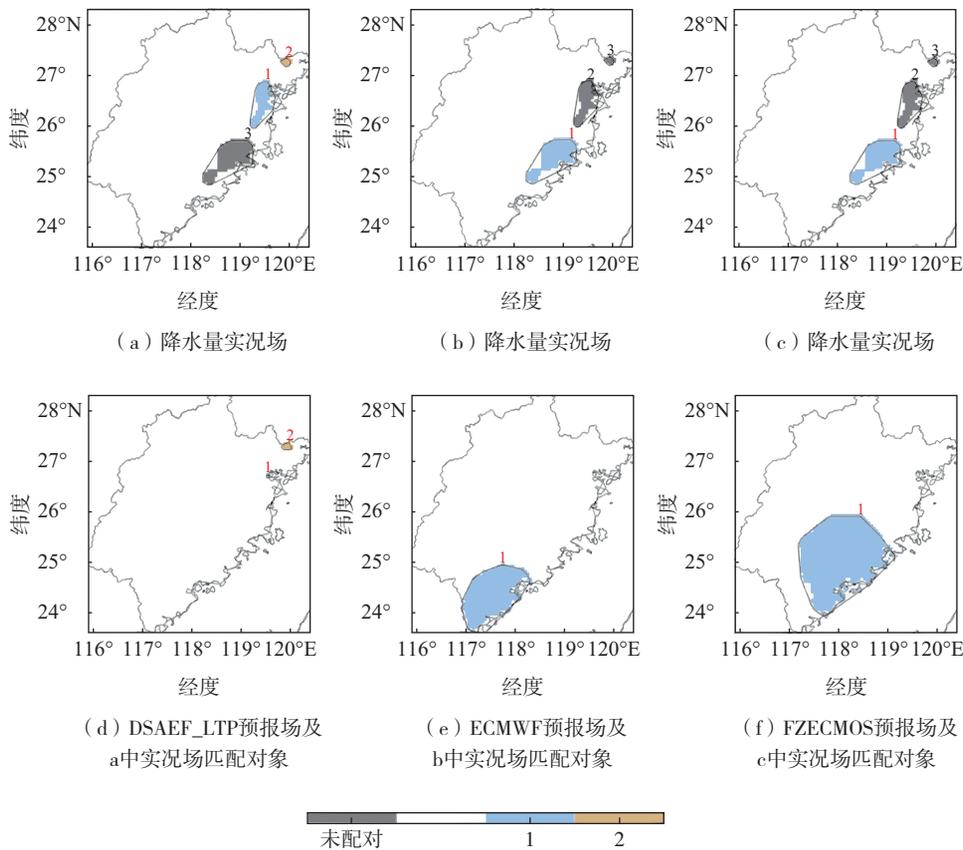
预报模型	属性值或比值				
	整体相似度/%	目标质心距离	目标角度差	目标面积比/%	重叠面积比/%
DSAEF_LTP	91.5	0.609	5.043	63.8	73.6
ECMWF	75.4	1.746	46.560	66.4	25.8
FZECMOS	76.2	1.052	23.968	37.1	50.8

图7为累计降水量250mm及以上的实况和预报目标匹配分布情况, 其中图7a、b、c均为相同的实况场, 但在不同预报场的匹配中对应不同的目标编号(用图中数字表示), 不同颜色表示配对情况。可以看出, 实况观测场(图7a)识别出了3个目标物, DSAEF\_LTP模型预报了目标1和目标2(图7d), 但出

现1个漏报目标物, 在福建中部沿海莆田地区; ECMWF(图7e)和FZECMOS(图7f)均漏报2个目标物, 只匹配到最南侧的漳州附近目标; 因此, DSAEF\_LTP模型有更优的匹配目标结果。在配对的目标物属性或比值上(表4), DSAEF\_LTP模型的目标2整体相似度达92.5%, 质心距离为0.027, 目标面积比为

100%,重叠面积比为 84.6%。目标 2 为宁德柘荣站,在远离大范围强降水区域的独立小区域内,DSAEF\_LTP 模型准确预报,显示出了 DSAEF\_LTP 模型的优越性。对于目标 1,DSAEF\_LTP 模型整体相似度为 63.6%,目标面积比为 4.1%,重叠面积比为 7.8%,与实况观测场(图 7a)相似程度较差,这主要是由 DSAEF\_LTP 模型在该区域预报 250 mm 及以上降水落区偏小造成的。对于目标 3,DSAEF\_LTP 模型则出现了漏报。相较于 DSAEF\_LTP 模型,ECMWF(图 7e)和 FZECMOS(图 7f)均只有 1 个匹配对象,

ECMWF 的目标 1 整体相似度只有 28.2%,目标质心距离比 DSAEF\_LTP 模型的 2 个目标都大;由目标降水分布(图 7e)可以看出,ECMWF 目标 1 位于实况观测场(图 7b)目标 1 的西南方向,重叠面积比甚至为 0,这意味着该目标完全脱离了实况场。因此,虽然 ECMWF 报出了 250 mm 及以上的强降水落区,但落区的完全偏离将导致防范效果的偏差。FZECMOS(图 7f)的目标 1 整体相似度为 72.2%,相较于实况场(图 7c),其预报面积过大,与观测重叠面积比只有 19.4%,这将导致空报率和漏报率均较大。



a、b、c—相同的实况场(在不同预报场的匹配中对应不同的目标编号,用图中数字表示);蓝色区域—成功配对目标1;黄色区域—成功配对目标2;灰色区域—未成功配对目标;白色区域—其他区域。

图 7 累计降水量 250 mm 及以上的实况场和模式预报场目标匹配分布

Fig.7 Distribution of target matches for observations and model results with accumulated precipitation equal to or greater than 250 mm

表 4 由 MODE 方法检验识别福建 250 mm 及以上降水量的目标属性值和属性比值

Table 4 The same as Table 3, but for precipitation equal to or greater than 250 mm

预报模型	目标编号	属性值或比值				
		整体相似度/%	目标质心距离	目标角度差	目标面积比/%	重叠面积比/%
DSAEF_LTP	1	63.6	0.262	133.658	4.1	7.8
DSAEF_LTP	2	92.5	0.027	5.620	100	84.6
ECMWF	1	28.2	1.599	6.357	41.6	0
FZECMOS	1	72.2	0.814	24.278	18.9	19.4

由 100 mm 及以上(表3)和 250 mm 及以上(表4)量级的比较来看,随着降水量级的增大,DSAEF\_LTP 模型的整体相似度(最佳目标)维持在 92%左右,重叠面积比也从 73.6%增长到 84.6%;但 ECMWF 和 FZECMOS 的整体相似度却出现下降,重叠面积比例下降严重,甚至降为 0。因此可以看出,DSAEF\_LTP 模型在极端降水方面有更加优异的表现。

由以上空间分布检验分析可以看出,在台风“杜苏芮”过程的降水预报中,DSAEF\_LTP 模型均有突出的表现,不仅在整体相似度上优于 ECMWF 和 FZECMOS,而且对于孤立小区域的强降水也有优异的预报性能。通过 100 mm 及以上和 250 mm 及以上量级的比较可以看出,对于更极端降水(降水量不小于 250 mm),DSAEF\_LTP 模型预报能力有更大的提升。这体现出 DSAEF\_LTP 模型预报降水在强度、落区、结构等方面具有优势。

### 3.3 DSAEF\_LTP 模型相似台风路径和降水分布

为了了解 DSAEF\_LTP 模型对此次台风过程降水预报能力较好的原因,从模型筛选出的相似台风入手,分析相似台风的路径以及降水分布对最终模型集合预报的影响。

首先,分析 DSAEF\_LTP 模型筛选出的与“杜苏芮”台风最相似的前 10 个历史台风。在 24 日的预报(图 8a)中,台风“杜苏芮”起报时刻实况位置位于吕宋岛东部海域,模型筛选出的相似个例大部分经过巴士海峡并北上台湾海峡登陆福建沿海,登陆

点较为分散,全省南北沿海均有相似台风登陆。25 日(图 8b),台风“杜苏芮”起报时刻实况位置靠近吕宋岛北部沿海,模型筛选的相似台风路径在巴士海峡附近较 24 日更为集中,且 2 次预报在福建地区登陆位置基本相似。24 日 08 时,中央气象台主观路径预测 27 日 20 时之前台风路径平均偏差为 136.8 km,而 25 日 08 时的预报值为 77.5 km,较之前偏差减小 43%。路径偏差的减小为 DSAEF\_LTP 模型选取更相似台风打下重要基础。

在 25 日的预报(图 8b)中,根据台风“杜苏芮”实况和最新路径强度预报模型筛选出的相似台风有 7 个与 24 日相同,其余 3 个相似台风则被替换。经过 1 d 的发展,实况和预报的 25 日台风“杜苏芮”强度达到超强台风级,因此在模型 25 日筛选的相似台风中,可以看到增加了台风以上级别的 1614 号“莫兰蒂”、7412 号“Lucy”和 1209 号“苏拉”等对福建沿海降水影响重大的台风,同时排除了 1709 号“纳沙”和 6904 号“Winnie”等强度较弱的相似台风,这使得模型降水集合预报中福建中东部沿海出现强降水的概率加大。从模型 2 次预报的特大暴雨以上量级  $V_{TS}$  上看,25 日的  $V_{TS}$  为 0.42,24 日的  $V_{TS}$  甚至为 0,25 日的预报效果明显好于 24 日。可以看出,更新台风实况和路径强度预报之后,筛选出更多与当前实况相似的台风,在此基础上更新台风路径、强度预测构成的目标 TC 完整路径能够提高 DSAEF\_LTP 模型的预测能力。

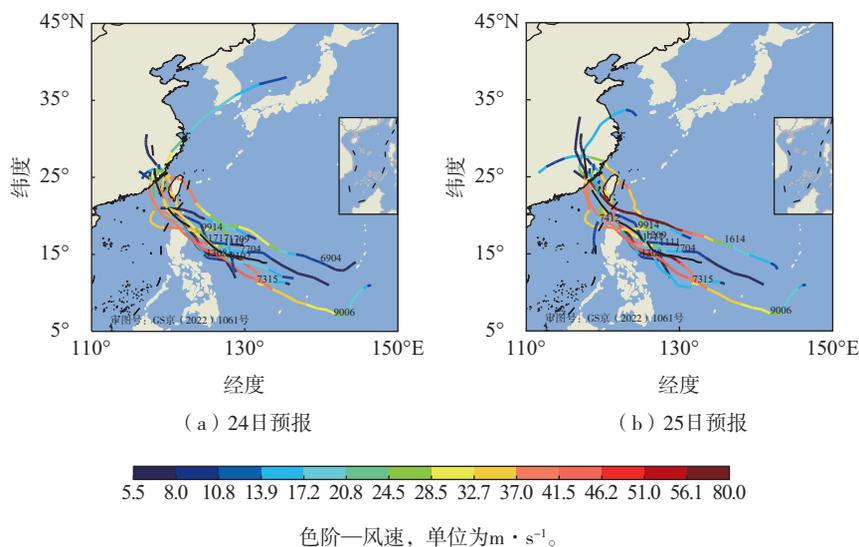


图 8 DSAEF\_LTP 模型 24、25 日预报筛选出的历史相似台风路径分布

Fig.8 Tracks of historically similar TCs chosen by the forecast of DSAEF\_LTP model on 24 and 25 July

其次,对 DSAEF\_LTP 模型筛选出的相似台风降水量分布(图 9)进行分析。可以看出,模型所选出的相似台风降水极值中心均出现在福建沿海地区,与台风“杜苏芮”的实况一致,除了 7704 号“Thelma”、1717 号“古超”和 7315 号“Nora”台风之外,其他 7 个台风的降水中心极值均超过 250 mm,1111 号“南玛都”、9006 号“Percy”和 9914 号“Dan”台风降水甚至超过 400 mm,这为 DSAEF\_LTP 模型集合预报出 250 mm 及以上的强降水提供了支持。其中 1308 号“西马仑”、9006 号“Percy”台风的降水中心位于台风登陆点附近,共有 4 个台风(7315 号“Nora”、1111 号“南玛都”、1614 号“莫兰蒂”、9914 号“Dan”)的降水中心位于台风前进方向的右侧,1210 号“达维”和 7417 号“Helen”则在台风路径的左右方向均出现降水中心。 DSAEF\_LTP 模型在筛

选相似台风时已经考虑了热带气旋路径、强度、移速、登陆季节和环境场(含下垫面)因子等,因此 DSAEF\_LTP 模型筛选出的相似台风降水中心和路径的相对位置关系多样,不只是出现在台风本体经过的附近地区,更为合理保留相似台风及其降水分布,在集合预报运算中有更好的结果。同时可以看到,有 6 个相似台风(7704 号“Thelma”、7315 号“Nora”、1111 号“南玛都”、1209 号“苏拉”、1614 号“莫兰蒂”和 9914 号“Dan”)在宁德柘荣有较为孤立的降水中心,占总相似台风个数的 60%,这为 DSAEF\_LTP 模型在该地区预报出孤立的降水中心提供了集合样本。可以看出, DSAEF\_LTP 模型充分利用了较为准确的路径预报和丰富的历史数据,利用准确模式来做预报,并采用集合预报的方式实现预报,这是 DSAEF\_LTP 模型预报较为成功的关键。

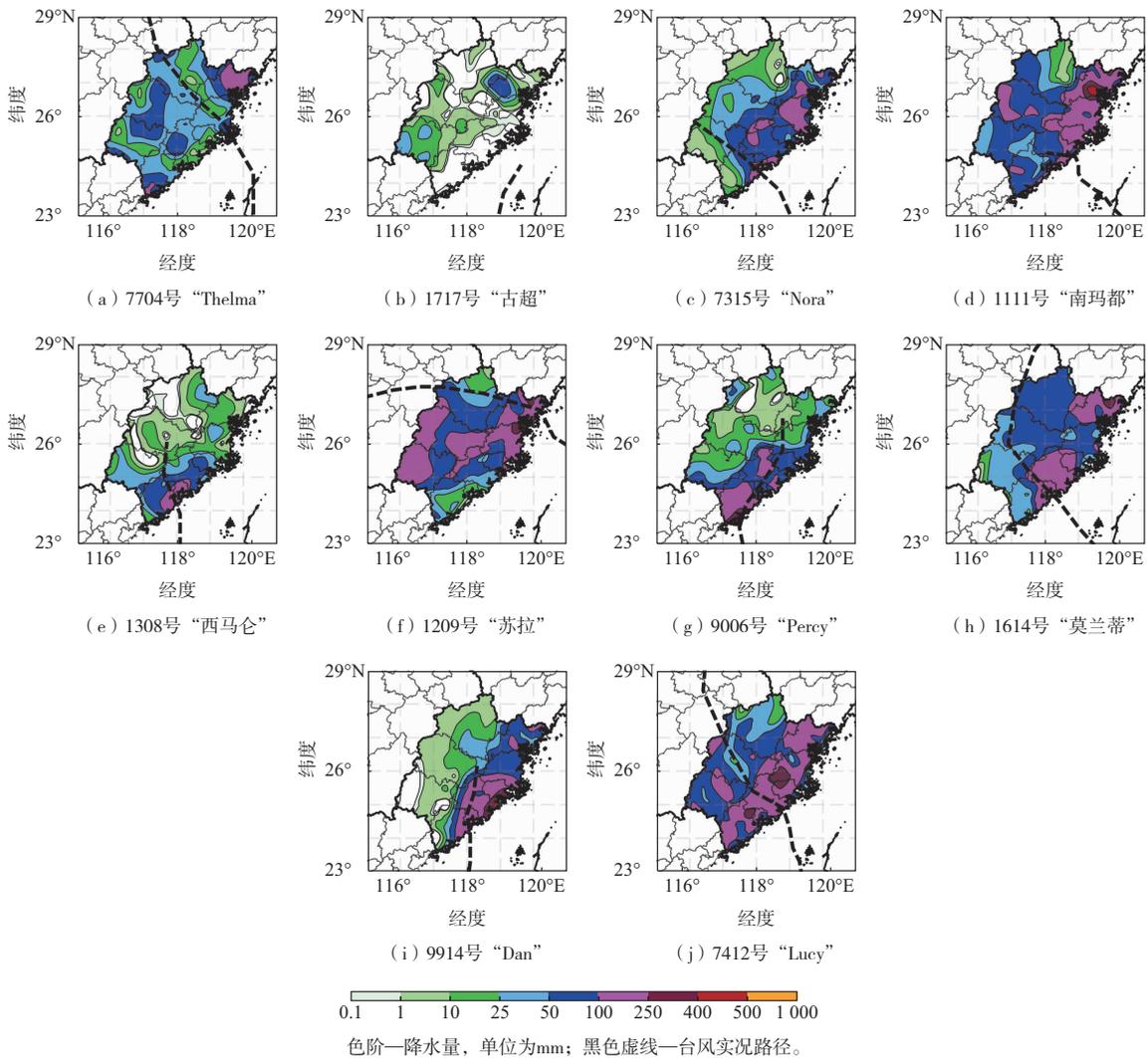
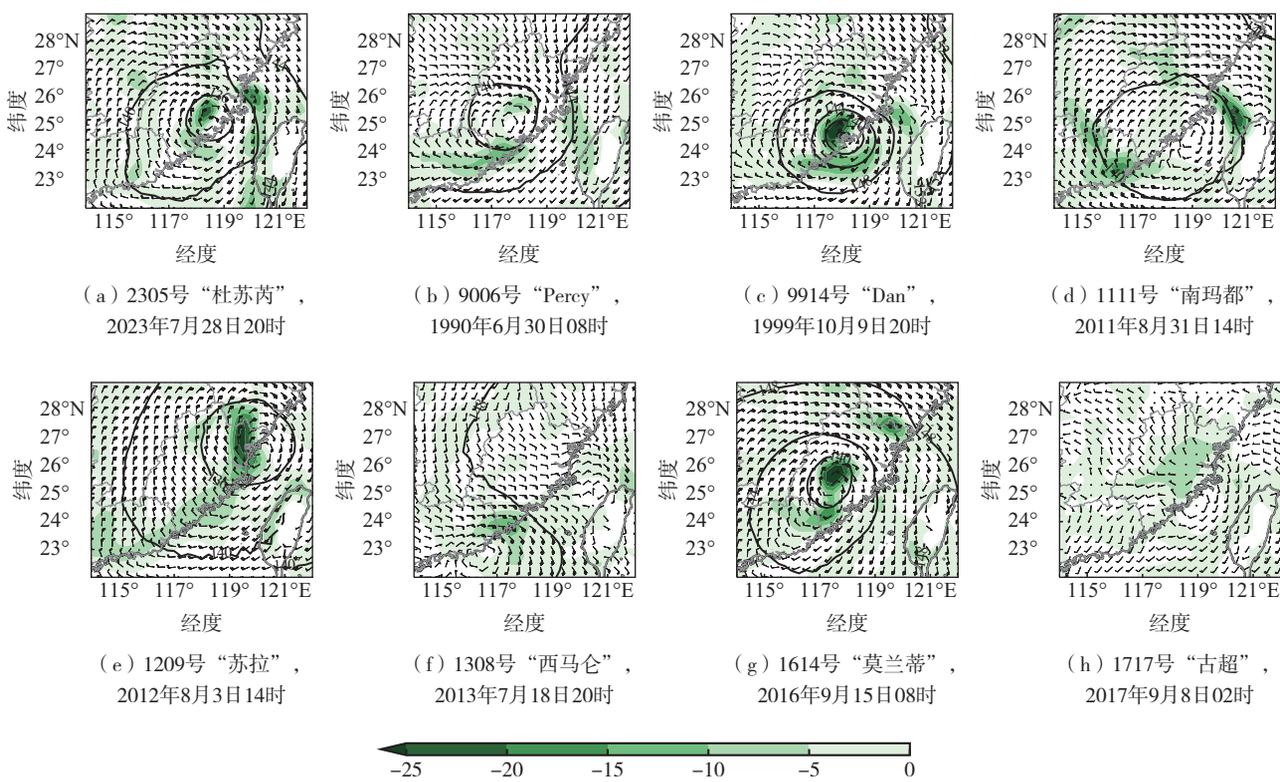


图 9 DSAEF\_LTP 模型筛选出的历史相似台风过程累计降水量分布

Fig.9 Distribution of accumulated precipitation of historically similar typhoons screened by the DSAEF\_LTP model

已有研究<sup>[23-24]</sup>表明,台风“杜苏芮”在登陆福建前后存在持续而充沛的水汽输送,这是造成福建极端降水的主要原因之一,因此除了检验上述台风路径的相似性之外,文中还比较了相似台风在水汽输送方面的异同。图10为 DSAEF\_LTP 模型筛选出的历史相似台风的水汽通量散度分布,受资料长度限制,只分析1979年后的历史相似台风。由图10a可以看出,台风“杜苏芮”在登陆福建时,其中心附近的北侧和外围环流的东北象限存在明显的水汽通量辐合大值区,中心强度超过  $-20 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ,水汽通量辐合的大值区同样是强降雨的落区,造成福建中部沿海和东北部沿海出现极端降水。由9006号“Percy”(图10b)、9914号“Dan”(图10c)、1614号“莫兰蒂”(图10g)来看,

台风中心附近和外围环流的东北象限同样存在水汽通量辐合大值区,9914号台风水汽通量辐合强度甚至与台风“杜苏芮”类似,这样的水汽输送强度和位置相似性也造成相似的台风强降雨落区。1111号“南玛都”(图10d)、1209号“苏拉”(图10e)台风中心附近的水汽通量辐合大值区位于福建北部,其中心强度甚至超过  $-25 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ,造成该地区出现强降雨,对于福建中部沿海的强降雨落区存在一定的偏差。1717号“古超”(图10h)则是由于水汽通量散度较小,未能造成大范围的强降雨。总体上看, DSAEF\_LTP 模型筛选出的历史相似台风的水汽通量散度中心值大部分强度接近甚至超过台风“杜苏芮”,其分布也与台风“杜苏芮”存在类似的区域,表现出良好的筛选能力。



色阶—水汽通量散度,单位为  $10^{-5} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ; 风矢—风场,风速单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 等值线—位势高度,单位为  $\text{dagpm}$ 。

图10 DSAEF\_LTP 模型筛选出的历史相似台风的850 hPa风场、位势高度场和水汽通量散度  
Fig.10 Wind field at 850 hPa, geopotential height field and water vapor flux divergence of historically similar typhoons screened by the DSAEF\_LTP model

由以上结果分析可看出,在100 mm及以上和250 mm及以上量级, DSAEF\_LTP 模型的预报能力明显超出其他模式,体现出其优势;对于空间检验方面, DSAEF\_LTP 模型更能抓住台风降水分布的空间

特点,但在极端降水(250 mm及以上量级)的分布上仍存在预报落区偏小和漏报的问题。由 DSAEF\_LTP 模型相似台风路径和降水分布分析可以看出, DSAEF\_LTP 模型可以按照更加可靠的台风路径预

测结论进一步调整相似台风的筛选和降水预报更新,从而提高预报能力。从整体上看, DSAEF\_LTP 模型对台风“杜苏芮”过程降水预报能力超过了对比的 ECMWF 和 FZECMOS 产品,可进一步支持台风降水业务预报能力的提升。

#### 4 结论与讨论

改进后的 DSAEF\_LTP 模型已在福建地区业务应用,该模型通过判断历史台风与目标台风广义初值的相似性,找到与目标台风最相似的多个历史台风,通过将这些历史相似台风的观测降水进行集合,进而得到目标台风的降水预报。针对 2023 年第 5 号超强台风“杜苏芮”在福建地区的过程降水量,对比检验了改进后的 DSAEF\_LTP 模型产品、ECMWF 数值预报降水产品、福建省气象局 OTS 订正降水产品(FZECMOS),主要结论如下:

(1)改进的 DSAEF\_LTP 模型台风过程降水预报系统对此次福建地区台风过程降水有较好的预报能力。随着降水量级提高, DSAEF\_LTP 模型的降水预报  $V_{TS}$  较数值模式和订正预报产品的提升水平越高。在 100 mm 量级, DSAEF\_LTP 模型产品的  $V_{TS}$  为 0.54, 分别比 FZECMOS 和 ECMWF 提高 20% 和 107%。在 250 mm 及以上量级, DSAEF\_LTP 模型产品的  $V_{TS}$  达 0.25, 是 FZECMOS 评分的 2.6 倍, 展现出较好的预报能力。但 DSAEF\_LTP 模型存在特大暴雨预报范围显著偏小的问题, 这可能与筛选的历史相似台风个例中缺少足够的极端降水相似样本有关, 需要进一步解决极端降水相似台风样本量的问题。

(2)MODE 空间检验表明, DSAEF\_LTP 模型不仅在整体相似度上优于 ECMWF 和 FZECMOS, 而且对于孤立小区域的强降水也有优异的预报性能。由 100 mm 及以上和 250 mm 及以上量级的比较可以看出, 随着降水量级的增大, DSAEF\_LTP 模型的整体相似度(最佳目标)维持在 92% 左右, 重叠面积比也从 73.6% 增长到 84.6%。对于极端降水(降水量不小于 250 mm), DSAEF\_LTP 模型预报能力更加显著, 体现出 DSAEF\_LTP 模型预报降水在强度、落区、结构等多方面具有优势。

(3)通过分析 DSAEF\_LTP 模型相似台风路径和降水分布发现, 随着台风“杜苏芮”的实况位置和

预报位置强度的变化, DSAEF\_LTP 模型筛选历史相似台风也产生调整, 相似台风降水中心和路径的相对位置关系多样, 不只是出现在台风本体经过的附近地区, 因此更为合理保留相似台风及其降水分布, 集合预报效果也随之改善。由相似台风的水汽通量散度分析也能看出 DSAEF\_LTP 模型具有良好的筛选能力。

DSAEF\_LTP 模型业务运行不久, 目前只收集和检验个别台风, 对于其长期的表现仍有待检验, 后续将研究多选评估样本以便更加客观评价算法的有效性。同时可以看出, DSAEF\_LTP 模型在福建地区的产品分辨率仍然较低, 因此如何提高 DSAEF\_LTP 模型产品空间分辨率仍值得研究。

**致谢:**感谢福建省气象局海洋气象灾害机理及预报技术重点创新团队在技术和经费上的支持。

#### 参考文献:

- [1] 官晓军, 潘宁, 黄待静, 等. 基于降水极端预报指数的福建台风极端降水预报研究[J]. 气象学报, 2021, 79(3): 414-427.
- [2] 苏志重, 石顺吉, 张伟, 等. 1960—2010 年福建省极端降水事件变化趋势分析[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(2): 166-172.
- [3] ZHANG Z, WANG W G, DOYLE J D, et al. A review of recent advances (2018–2021) on tropical cyclone intensity change from operational perspectives, part 1: dynamical model guidance[J]. Trop Cyclone Res Rev, 2023, 12(1): 30-49.
- [4] 瞿安祥, 麻素红, 张进. CMA-TYM 混合 En3DVar 方案的设计和初步试验[J]. 气象, 2022, 48(3): 299-310.
- [5] 薛纪善, 陈德辉. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 姜丽黎, 余晖. 基于动力相似方法的台风极端降水概率预报研究[J]. 热带气象学报, 2019, 35(3): 353-364.
- [7] REN F M, QIU W Y, DING C C, et al. An objective track similarity index and its preliminary application to predicting precipitation of landfalling tropical cyclones[J]. Wea Forecasting, 2018, 33(6): 1725-1742.
- [8] REN F M, DING C C, ZHANG D L, et al. A dynamical-statistical-analog ensemble forecast model: theory and an application to heavy rainfall forecasts of landfalling tropical cyclones[J]. Mon Wea Rev, 2020, 148(4): 1503-1517.

- [9] JIA Z, REN F M, DING C C, et al. An application of the LTP\_DSEF model to heavy precipitation forecasts of landfalling tropical cyclones over China in 2018[J]. *Sci China Earth Sci*, 2020, 63(1): 27-36.
- [10] JIA L, JIA Z, REN F M, et al. Introducing TC intensity into the DSAEF\_LTP model and simulating precipitation of super-typhoon Lekima (2019)[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2020, 146(733): 3965-3979.
- [11] DING C C, REN F M, LIU Y N, et al. Improvement in the forecasting of heavy rainfall over South China in the DSAEF\_LTP model by introducing the intensity of the tropical cyclone [J]. *Wea Forecasting*, 2020, 35(5): 1967-1980.
- [12] MA Y Q, REN F M, JIA L, et al. Experiments with the improved Dynamical-Statistical-Analog Ensemble Forecast model for Landfalling Typhoon Precipitation over South China[J]. *J Trop Meteor*, 2022, 28(2): 139-153.
- [13] 任福民, 贾莉, 吴彩铭, 等. 相似预报原理之再认识: 动力统计相似集合预报理论及其对登陆台风降水预报的应用研究进展[J]. *气象学报*, 2023, 81(2): 193-204.
- [14] SU Z Z, MA Y Q, JIA L, et al. Application of the improved Dynamical-Statistical-Analog Ensemble Forecast model for Landfalling Typhoon Precipitation in Fujian province[J]. *Front Earth Sci*, 2022, 10: 1018851.
- [15] 刘达, 向纯怡, 张玲, 等. 台风“杜苏芮”(2305)的主要特点及路径和强度预报难点分析[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(4): 1-10.
- [16] 崔梦雪, 向纯怡, 张晗昀, 等. 台风“杜苏芮”(2305)引发福建极端强降水的特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(4): 11-20.
- [17] 吴启树, 韩美, 刘铭, 等. 基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(3): 306-317.
- [18] 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.
- [19] 王晓峰, 周荣卫. 全球模式降水预报在雅砻江流域汛期的效果检验[J]. *气象*, 2021, 47(10): 1193-1205.
- [20] 姚梦颖, 吴梦雯, 刘建勇, 等. 浙江区域台风暴雨多模式QPF融合技术应用试验[J]. *海洋气象学报*, 2023, 43(2): 76-87.
- [21] 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.
- [22] DAVIS C, BROWN B, BULLOCK R. Object-based verification of precipitation forecasts. Part II: application to convective rain systems[J]. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(7): 1785-1795.
- [23] 王彬雁, 陈朝平, 丛芳, 等. MODE方法在西南区域模式降水预报检验中的应用[J]. *高原山地气象研究*, 2020, 40(2): 26-30.
- [24] 刘凑华, 代刊, 林建, 等. 天气预报全流程检验评估程序库的设计与实现[J]. *气象*, 2023, 49(3): 351-364.