

丁晨晨,任福民,邱文玉,等,2019. 基于路径相似的登陆热带气旋降水之动力-统计集合预报模型[J]. 气象,45(1):29-37. Ding C C, Ren F M, Qiu W Y, et al, 2019. A dynamical statistical ensemble forecast model for landfalling tropical cyclone precipitation based on track similarity[J]. Meteor Mon, 45(1):29-37(in Chinese).

基于路径相似的登陆热带气旋降水之 动力-统计集合预报模型*

丁晨晨^{1,2} 任福民² 邱文玉^{2,3} 李国平¹ 吴立广³ 蒋贤玲^{2,4}

¹ 成都信息工程大学, 成都 610225

² 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

³ 南京信息工程大学, 南京 210044

⁴ 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

提 要: 数值天气预报(NWP)过去几十年在热带气旋(TC)预报方面的最大进步是越来越准确的路径预报。对于登陆 TC 降水的预报,目前以数值模式为代表的技术手段预报能力还十分有限。围绕动力-统计结合之方法研究,初步发展了登陆热带气旋降水(LTP)预报的一种新方法:基于路径相似的登陆热带气旋降水之动力统计集合预报(LTP_DSEF)模型。该方法主要分为五步: TC 路径预报、相似路径 TC 识别、其他特征相似性的判别、TC 降水集合预报和最佳预报方案选择;涉及两个关键技术:TC 降水分离的客观天气图分析法(OSAT)和 TC 路径相似面积指数(TSAD)。

LTP_DSEF 模型对 2012—2016 年影响华南地区出现最大日降水量 ≥ 100 mm 的 21 个 TC 的定量降水预报(QPF)试验结果显示,该模型对登陆 TC 过程降水的预报结果优于动力模式。登陆 TC 过程降水 ≥ 50 mm 情况下,建模样本和独立样本平均 TS 评分均高于动力模式(EC、GFS、T639)相应的最好表现。对 LTP_DSEF 模型三个最佳方案的参数取值分析显示,起报时刻参数设定为最临近影响时刻即 TC 对陆地产生降水的前一天 12:00 UTC、集合参数取最大值时预报效果稳定趋好。

关键词: 登陆热带气旋,定量降水预报(QPF),路径相似,动力统计,集合预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.01.003

A Dynamical Statistical Ensemble Forecast Model for Landfalling Tropical Cyclone Precipitation Based on Track Similarity

DING Chenchen^{1,2} REN Fumin² QIU Wenyu^{2,3} LI Guoping¹

WU Liguang³ JIANG Xianling^{2,4}

¹ Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

³ Nanjing University of Information and Technology, Nanjing 210044

⁴ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract: Track forecasting is the greatest progress over past decades in numerical weather prediction (NWP) regarding the tropical cyclones (TCs). But the landfalling TC precipitation prediction capability of NWP models is still very limited. Focusing on combining dynamical and statistical methods, a new method named track-similarity-based Landfalling Tropical cyclone Precipitation (LTP) Dynamical-Statistical

* 国家自然科学基金面上项目(41375056、41675042)和厦门市科技计划项目(3502Z20174051)共同资助

2017 年 12 月 26 日收稿; 2018 年 5 月 11 日收修定稿

第一作者:丁晨晨,主要从事热带气旋降水研究. Email: dcccqkx@163.com

通信作者:任福民,主要从事热带气旋和极端事件研究. Email: fmren@163.com

Ensemble Forecast (LTP_DSEF) model has been developed. The LTP_DSEF model includes five steps: TC track prediction, identification of analogue TC tracks, identification of other analogue TC characteristics, ensemble forecasting of TC precipitation, and the best scheme selection. There are two key technologies involved: the Objective Synoptic Analysis Technique (OSAT) for partitioning TC precipitation and the objective TC Track Similarity Area Index (TSAI).

The application of LTP_DSEF model for 21 TCs with accumulated LTP ≥ 100 mm in South China during 2012–2016 reveals that the new method shows a better performance than the three NWP models (EC, GFS and T639) in predicting LTP. For ≥ 50 mm LTP forecasts, the threat score (TS) of LTP_DSEF model's results are superior to those of the three NWP models. Analysis of the values of the LTP_DSEF model's parameters for three best schemes shows that, the initial time designed to be the closest to the impact time, i. e., 1200 UTC on the previous day with precipitation on land and the ensemble parameter being the maximum are both beneficial to ideal forecasts.

Key words: landfalling tropical cyclone, quantitative precipitation forecast (QPF), track similarity, dynamic statistic, ensemble forecast

引 言

登陆热带气旋(以下简称 LTC)暴雨是 LTC 灾害的主因。我国仅近些年由 LTC 暴雨引起的灾害就足以令人触目惊心:2006 年,强热带风暴碧利斯因持续性暴雨造成 800 多人死亡和近 350 亿元的经济损失;0908 号台风莫拉克以高达 3059.5 mm 的过程降水量对台湾南部造成灾难性的后果(许映龙, 2009),导致约 700 人死亡或失踪;2013 年台风菲特在浙江中北部沿海极端暴雨和风暴潮导致余姚等城市被淹超过一周时间,直接经济损失超过 600 亿元。可见,加强 LTC 降水预报研究具有非常重要的现实意义,有利于提高我国防御 TC 暴雨灾害的能力。在科学上,LTC 降水预报是热带气旋科学面临的三大挑战之一(Chen et al, 2010; Woo et al, 2014),同时具有重大科学意义。

围绕 LTC 降水预报问题,国内外学者主要从数值模式、统计方法以及动力-统计结合三个角度开展了研究工作。基于数值模式,一些研究集中于同化技术对模式初始场的改进(Xiao et al, 2007; 袁炳等, 2010; Zhao et al, 2012; Zhang and Pu, 2014),另一些研究侧重于不同物理过程参数化的改进(薛根元等, 2007; 张亚洲等, 2011; Yu et al, 2013),而其他一些研究则关注集合预报方案的研究(Zhang et al, 2010; Hsiao et al, 2013; Fang and Kuo, 2013; Hong et al, 2015)。与此同时,一些工作(贡九鼎等, 1995; 岳彩军等, 2006; 冯利华, 2000; Wei, 2012a; 2012b;

Li et al, 2015)开展了 LTC 降水预报统计方法研究。动力-统计结合的 LTC 降水预报方法研究曾受到较多关注,但近些年进展有限:利用数值模式的 TC 预报路径和历史观测降水,一些研究(Marks et al, 2002; Lee et al, 2006; Lonfat et al, 2007)从气候平均角度做出 TC 降水预报;采用数值模式的 TC 预报路径和起报时刻 TC 雨强分布,一些学者开展 TC 降水预报研究(Kidder et al, 2005; Liu, 2009; Ebert et al, 2011);同时,采用数值模式的预报要素场,另一些学者通过动力相似判别进行 TC 降水预报研究(钟元等, 2009; 李博和赵思雄, 2009)。

LTC 降水预报方法研究领域存在的主要问题,一是以 NWP 模式为代表的预报技术对 LTC 降水预报能力目前仍非常有限(程正泉等, 2005; Tuleya et al, 2007; Marchok et al, 2007; 黄伟等, 2009; Wang et al, 2012; 麻素红等, 2013);二是 NWP 模式的发展是一个长期的渐变过程,短时间内很难快速提高数值模式的预报技巧(王太微和陈德辉, 2007; Bauer et al, 2015);三是统计模型由于缺乏物理基础,自身无法克服预报效果的不稳定性,始终不能成为预报技术的主流发展方向。

动力模式与统计方法结合是预报技术发展的一条重要途径,其本质是通过引入历史观测数据信息有针对性地减小数值模式的预报误差,而动力-统计相似预报是其中的一个重要分支(Chou, 1974; 丑纪范, 1986)。这当中,动力-统计如何结合是能否成功的关键。如果将动力模式的优势与丰富的历史资料相结合,充分挖掘出历史资料的价值,是否能有希望

呢?数值模式在过去 30 年在 TC 研究及其业务能力发展中所取得的最大成功是越来越准确的 TC 路径预报 (Fraedrich et al, 2003; Langmack et al, 2012; Cangialosi and Franklin, 2015; National Hurricane Center, 2017; 陈国民等, 2017)。然而,在已有的动力-统计 LTC 降水预报方法研究中,虽有不少研究应用了 TC 预报路径,少数研究也考虑了预报要素场的动力相似方案,但是,尚未见有学者从数值模式关于 TC 预报方面的最大优势——TC 预报路径的角度进行动力相似预报研究(任福民和向纯怡, 2017)。本研究正是这方面的一个尝试,将目标 TC 路径预报与丰富的历史 TC 资料库相结合,开展 LTC 过程降水预报,建立了基于路径相似的路径相似性判别、TC 降水集合预报和最佳预报方案选择。

1 LTP_DSEF 模型

图 1 是动力-统计相结合进行 LTC 降水预报新方法 LTP_DSEF 模型的预报思路。该方法包括五个步骤:TC 路径预报、相似路径 TC 识别、其他特征相似性的判别、TC 降水集合预报和最佳预报方案选择。

第一步,TC 路径预报。直接采用 NWP 的 TC 路径预报结果。考虑到国家气象中心官方主观综合预报是基于 NWP 预报的订正预报,本研究将它等

同于 NWP 预报并应用。

第二步,相似路径 TC 识别。又可分为 4 个小步,即目标 TC 完整路径的获取、相似区域 R 的确定、TC 路径相似指数的选择和该区域内历史 TC 依据路径相似性依次排序。

其中,目标 TC 完整路径由登陆前预报时刻(含)之前的观测路径和 NWP 模式的预报路径共同组成;相似区域 R 根据目标 TC(可能的)登陆情况和预报的具体需求来确定;TC 路径相似指数采用 TC 路径面积相似指数 (TSAI) (Ren et al, 2017);最后,在相似区域 R 内就目标 TC 路径与该区域内历史 TC 逐一进行 TSAI 计算,识别得到依据路径相似性依次排序的历史 TC 序列。

第三步,其他特征相似性的判别。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。需要指出的是,对不同相似性进行判别时,相应的特征最好已实现参数化以供选择,如季节相似参数可选择同月、7—9 月、5—11 月或全年等,TC 强度相似参数可选择同级、同级及以上等级,或最大等级等,目前本文只加入了登陆季节这一相似特征。

经过其他特征相似性判别这一步,对历史 TC 进行进一步筛选。假设某一方案(即每个相似性参数都确定了某一种取值)筛选得到 $N(N \geq 0)$ 个 TC,挑选其中 n (如 1~16)个最佳相似 TC。

第四步,TC 降水集合预报。首先,采用客观天气图分析法(任福民等, 2001; 2011; Ren et al, 2007)对 n 个相似 TC 进行降水分离,得到每一个相似 TC 的过程降水场;然后,基于 n 个相似 TC 的降水采用不同的集合方案(如取平均或最大值)进行集合,从而得到目标 TC 的降水预报。

第五步,最佳预报方案选择。此步骤只在模型建立的过程中执行,当模型最优方案确立后,实际用于预报时的参数即为模型最优方案的参数,此时该步则省略。从众多方案 $M=m_1 \times m_2 \times \dots \times m_k$ 中挑选预报效果 TS 评分最高者,作为 TC 降水预报的最优预报方案;其中, m_1, m_2, \dots, m_k 分别为 k 个参数取值的个数。目前 LTP_DSEF 模型有 7 个参数:起报时刻、TSAI 中的三个参数(相似区域、纬度极

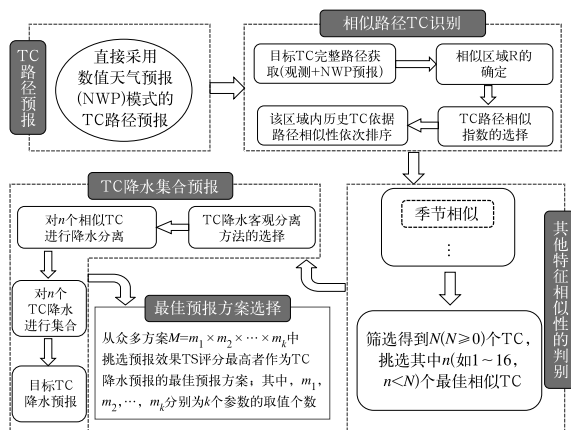


图 1 基于路径相似的路径相似性判别、TC 降水集合预报模型(LTP_DSEF)建模思路

Fig. 1 Flow chart of LTP_DSEF model

值点分割度临界值和重叠度临界值)、季节相似、最佳相似 TC 个数和集合预报方案(采用“平均”或“最大值”)。

表 1 中列出了 LTP_DSEF 模型中目前所用到的七个参数,在当前的参数组合情况下,单个目标 TC 理想状态下可以有 103680 套预报方案。

表 1 LTP_DSEF 模型参数表
Table 1 Parameter list of the LTP_DSEF model

| 参数名称 | 取值方式 | 取值个数 |
|------------|---|-------------------|
| 起报时刻 | 陆面出现 TC 降水前两日的 12:00 和 00:00 UTC | $2 \times 2 = 4$ |
| 相似区域 | TSAI 中的一个参数,首先选取起报时刻和最大预报时效对应预报时刻的 TC 位置作为相似区域(矩形框)的两个对角点;起报时刻对应的顶点可以变为提前 12、24、36 h 或 48 h 的 TC 观测位置,而另一个顶点可以变为时效缩短 6 或 12 h 的 TC 预报位置 | $3 \times 5 = 15$ |
| 纬度极值点分割度阈值 | TSAI 的一个参数,可取值 0.1, 0.2, 0.3 | 3 |
| 重叠度阈值 | TSAI 的一个参数,可取值 0.9, 0.8, ..., 0.4 | 6 |
| 季节相似 | 可取值 1—12、5—11 和 7—9 月 | 3 |
| 最佳相似 TC 数 | 可取值 1~16 | 16 |
| 集合预报方案 | 可取值平均值或最大值 | 2 |
| 方案总数 | $4 \times 15 \times 3 \times 6 \times 3 \times 12 \times 2$ | 103680 |

2 预报问题及试验设计

利用中国气象局上海台风所 1958—2016 年 TC 最佳路径资料(6 h 一次观测结果)、国家气象信息中心 1958—2016 年华南(广东、广西和海南)191 个观测站(图 2)逐日降水资料(20 时至次日 20 时)和国家气象中心官方主观综合预报资料,通过 LTP_DSEF 模型对历史 TC 进行过程降水预报试验。为了检验 LTP_DSEF 模型的预报效果,选取了三个动力模式(EC、GFS 和 T639)的预报结果(不考虑模式分辨率升级对结果的影响),采用 TS 评分进行对比。

根据三个动力模式现有预报资料的情况,选取 2012—2016 年在华南地区造成单站最大日降水超过 100 mm 的历史 TC 进行过程降水预报试验。共筛选出 27 个 TC,其中有 6 个 TC 生成后迅速在陆地造成降水,考虑到这些短路径 TC 因起报时刻仅有 1 个而严重影响到模型方案的数量,故将其剔除,对余下的 21 个 TC 进行预报试验。21 个 TC 中,对 2012—2014 年的样本(15 个)进行建模样本试验(表 2),而对 2015—2016 年的样本(6 个)进行独立样本试验(表 2);两者的区别在于,建模样本试验筛选出的最佳相似 TC 可包含目标 TC 之后生成的 TC,而独立样本试验筛选出的最佳相似 TC 则不能包含目标 TC 之后生成的 TC。

针对这 21 个 TC 共同的参数方案,开展了预报

试验,并评估给出不同降水阈值以上(≥ 0.1 , ≥ 10 , ≥ 25 , ≥ 50 , ≥ 100 , ≥ 250 mm)降水预报结果的 TS 评分,同时给出三个动力模式相应的对照结果。重点关注强的过程降水,采用三步法筛选 LTP_DSEF

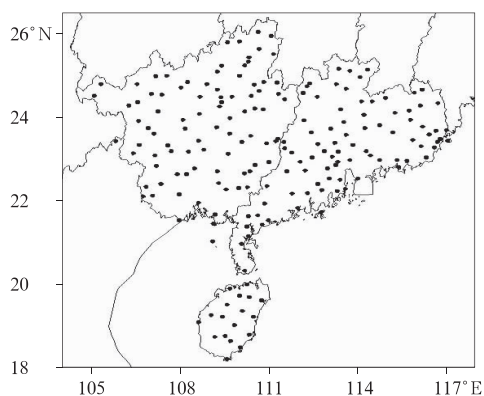


图 2 华南地区 191 个观测站的地理分布
Fig. 2 Distribution of the 191 gauges in South China

表 2 建模样本与独立样本之热带气旋列表
Table 2 List of tropical cyclones in modeling sample and independent sample

| 样本分类 | 热带气旋名称 |
|---------------------|---|
| 建模试验样本 (15 个 TC) | 2012 年: Talim, Doksuri, Kai-Tak, Son-Tinh |
| | 2013 年: Bebinca, Soulik, Rumbia, Jebi, Utor, Trami, Usagi, Haiyan |
| | 2014 年: Rammason, Matmo, Kalmaegi |
| 独立试验样本 (6 个 TC) | 2015 年: Noul, Linfa, Mujigae |
| | 2016 年: Nida, Sarika, Haima |

模型最优方案,依次从过程降水量 ≥ 250 , ≥ 100 , ≥ 50 mm 的级别中,逐级挑选出最佳预报方案。

3 预报效果评估

21 个目标 TC 中,因个别 TC 在起报时刻和相似区域两个参数上不能完整取值,使得共同方案数仅为 15552 个。图 3a 给出 LTP_DSEF 模型 15552 个方案在建模样本试验和独立样本试验中对 ≥ 250 mm 过程降水预报的 TS 评分分布。横坐标($TS_{m_{250}}$)为建模样本试验 TS 评分,纵坐标($TS_{i_{250}}$)为独立样本试验 TS 评分,其中“m”和“i”分别代表建模样本和独立样本,“250”表示 ≥ 250 mm;每个点代表一个方案,其坐标分别为相应样本平均的 TS 评分;黄色点和灰色点分别代表两种集合方案(最大值集合和算术平均值集合),蓝色点代表三个动力模式,紫色点为当前条件下最佳方案 BEST1,其方案参数在表 3 中给出。从图 3a 中可以看出,三个动力模式在两类试验中对 ≥ 250 mm 过程降水预报表现最好的是 GFS,坐标为(0.0429, 0),于是最优方案的选择将只限于考虑建模样本试验和独立样本试验 TS 评分均高于 GFS 的方案,即图中位于虚线右侧范围内的点。15552 套方案中满足该条件的方案数为 4798 套,其中,最佳方案 BEST1 的坐标为(0.0773, 0.1),入选标准为 $TS_{m_{250}} + TS_{i_{250}}$ 之最大者。

针对 4798 套方案就过程降水量 ≥ 100 mm 做进一步筛选,图 3b 给出这些方案在建模样本试验和独立样本试验中对 ≥ 100 mm 过程降水预报的 TS 评分分布,说明与图 3a 类似。其中紫色点为当前条件下最佳方案 BEST2,其方案参数在表 3 中给出。该降水阈值级别下,三个动力模式在两类试验中降水预报表现最好的依然是 GFS,其坐标为(0.1681, 0.2375)。类似图 3a,最优方案的选择只限于考虑建模样本试验和独立样本试验平均 TS 评分均高于 GFS 的方案,即图中位于竖直虚线右侧、水平虚线上方范围内的点;入选方案数为 202 套,最佳方案 BEST2 的坐标为(0.2038, 0.2594),选择标准为 $TS_{m_{100}} + TS_{i_{100}}$ 之最大者。

之后,对 202 套方案再次进行第三步筛选,图 3c 给出这 202 套方案在建模样本试验和独立样本试验中对 ≥ 50 mm 过程降水预报的 TS 评分分布,说明与图 3a 和 3b 类似。其中紫色点为当前条件下

最佳方案 BEST3,其方案参数在表 3 中给出。该降水强度下三个动力模式在建模样本试验和独立样本试验中降水预报 TS 评分最高值分别是 0.3287 (GFS)和 0.3595(EC)。在 202 套方案中,两类试验平均 TS 评分均高于动力模式最好水平的方案只有一套,该方案为最佳方案 BEST3,其坐标为(0.3298, 0.3635)。

图 4 给出了这三个最佳方案与三个动力模式预报效果的 TS 评分对比折线图。可以看出在两类试验中,对于较低阈值级别以上(≥ 0.1 , ≥ 10 , ≥ 25 mm)的 TC 过程降水,LTP_DSEF 模型的三个最佳方案预报效果与动力模式预报效果相当。但是,对于较大阈值级别以上(≥ 50 , ≥ 100 , ≥ 250 mm)的 TC 过程降水,LTP_DSEF 模型的三个最佳方案预报效果总体优于三个动力模式。其中,就 BEST1 方案而言,在两类试验中相较 BEST2、BEST3 和动力模式其优势主要体现在 ≥ 250 mm 过程降水预报,尤其是在独立样本试验中优势最为突出,TS 评分平均值为 0.1;而三个动力模式此时的 TS 评分平均值都为 0,即对于 ≥ 250 mm 过程降水没有预报能力。BEST2 方案在两类试验中对于 ≥ 100 mm 过程降水预报相较于 BEST1、BEST3 和动力模式表现较好,且相对于三家动力模式而言优势明显。BEST3 方案较 BEST1 及 BEST2 方案与动力模式预报效果相比而言,在较大阈值级别以上(≥ 50 , ≥ 100 , ≥ 250 mm)的过程降水中预报效果都优于动力模式,总体表现是最为稳定的,且随着降水强度的增大,预报效果的优势也有增大的趋势。因此,为最终确立的最优方案,该方案各参数即实际运用 LTP_DSEF 方法进行 TC 过程降水预报时的固定参数方案。

表 3 中给出了三个最佳方案(BEST1, BEST2, BEST3)的参数取值。可以看出,针对不同参数,其取值有较好的一致性,三者取值完全一致的参数有 3 个:起报时刻、重叠度阈值和集合方案。三个最佳方案的起报时刻取值都为 1(含义为 TC 在陆地产生降水的前一日 12:00 UTC)。这表明对于 LTP_DSEF 模型而言,起报时刻越接近 TC 对陆地产生影响的时间,预报准确性越高。集合预报方案取值都为 2(含义为取最大值集合预报方案),表明对于较强过程降水(≥ 250 , ≥ 100 , ≥ 50 mm)的 TC,集合参数取最大值时预报效果稳定趋好。

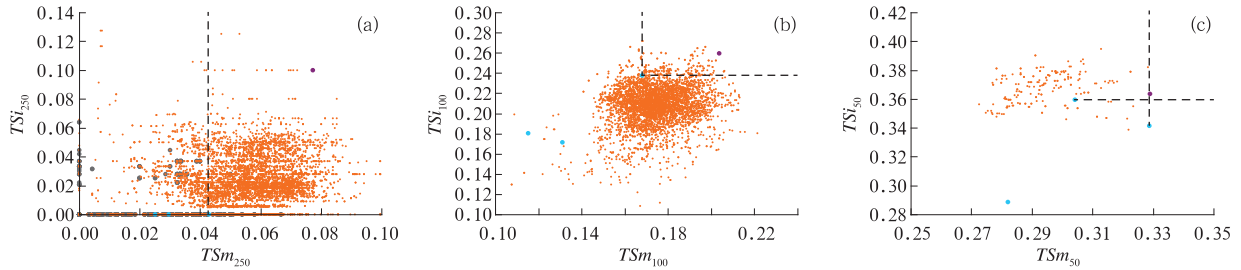


图 3 三步法筛选 LTP_DSEF 模型最优方案过程中逐级多方案建模样本试验-独立样本试验 TS 评分分布
(a) ≥ 250 mm, (b) ≥ 100 mm, (c) ≥ 50 mm

Fig. 3 Modeling sample-independent sample threat score distributions for the 15 552 schemes during the three-step selecting the LTP_DSEF model's best scheme
(a) ≥ 250 mm, (b) ≥ 100 mm, (c) ≥ 50 mm

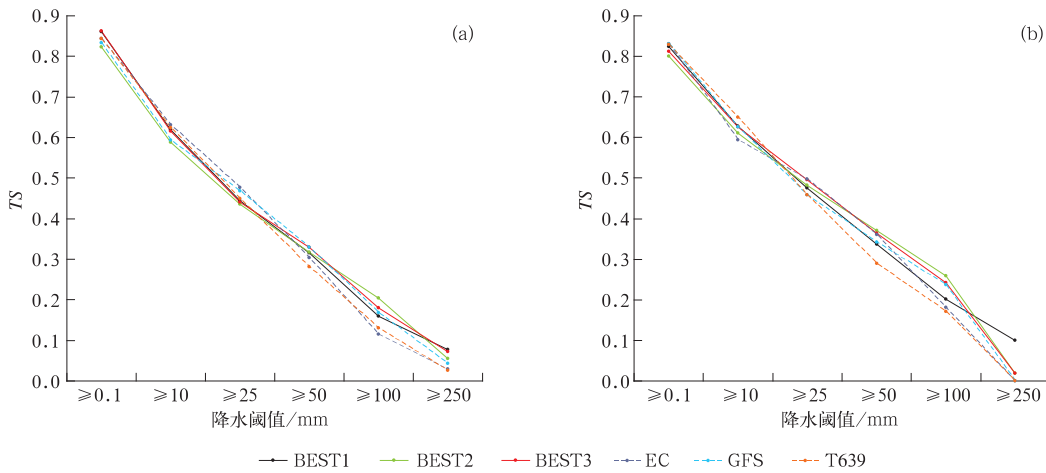


图 4 LTP_DSEF 模型三个最佳方案与三个动力模式 TC 过程降水预报的 TS 评分对比
(a) 建模样本试验, (b) 独立样本试验

Fig. 4 Comparison of threat scores among the three best schemes of LTP_DSEF models (BEST1, BEST2, BEST3) and the three dynamical models (EC, GFS, and T639)
(a) modeling sample, (b) independent sample

表 3 不同条件下三种 LTP_DSEF 模型最佳方案

| 参数名称 | BEST1 | BEST2 | BEST3 |
|------------|---------|----------|---------|
| 起报时刻 | 1 | 1 | 1 |
| 相似区域 | 6 | 7 | 6 |
| 纬度极值点分割度阈值 | 1(0.1) | 3(0.2) | 2(0.2) |
| 重叠度阈值 | 3(0.7) | 3(0.7) | 3(0.7) |
| 季节相似 | 3(7—9月) | 2(5—11月) | 3(7—9月) |
| 相似 TC 个数 | 5 | 8 | 7 |
| 集合方案 | 2(最大值) | 2(最大值) | 2(最大值) |

图 5a 给出的是 21 个 TC 在华南地区造成最大单站过程降水的散点分布。21 个 TC 中有 9 个 TC 最大过程降水量超过 250 mm, 其中最大值为 581.1 mm, 为 2014 年的威马逊。图 5b, 5c, 5d 分别

为最优方案 BEST3 在三个不同较强过程降水阈值级别下 (≥ 250 , ≥ 100 , ≥ 50 mm) 的 TS 评分分布。过程降水 ≥ 250 mm (图 5b) 的 9 个 TC 中, TS 评分最低为 0, 最高 0.5, 平均 TS 评分为 0.0514。在该阈值级别下, 9 个 TC 的 TS 评分标准差是 0.159。过程降水 ≥ 100 mm (图 5c) 的 21 个 TC 中, TS 评分最低为 0, 最高 0.4731, 平均 TS 评分为 0.1982, 21 个 TC 的 TS 评分标准差是 0.16658。过程降水 ≥ 50 mm (图 5d) 的 21 个 TC 中, TS 评分最低为 0.0405, 最高 0.6528, 平均 TS 评分为 0.339, 21 个 TC 的 TS 评分标准差是 0.1913。可见, 随着过程降水的增强, LTP_DSEF 模型对降水预报的 TS 评分值在降低, 同时标准差也表现为降低。

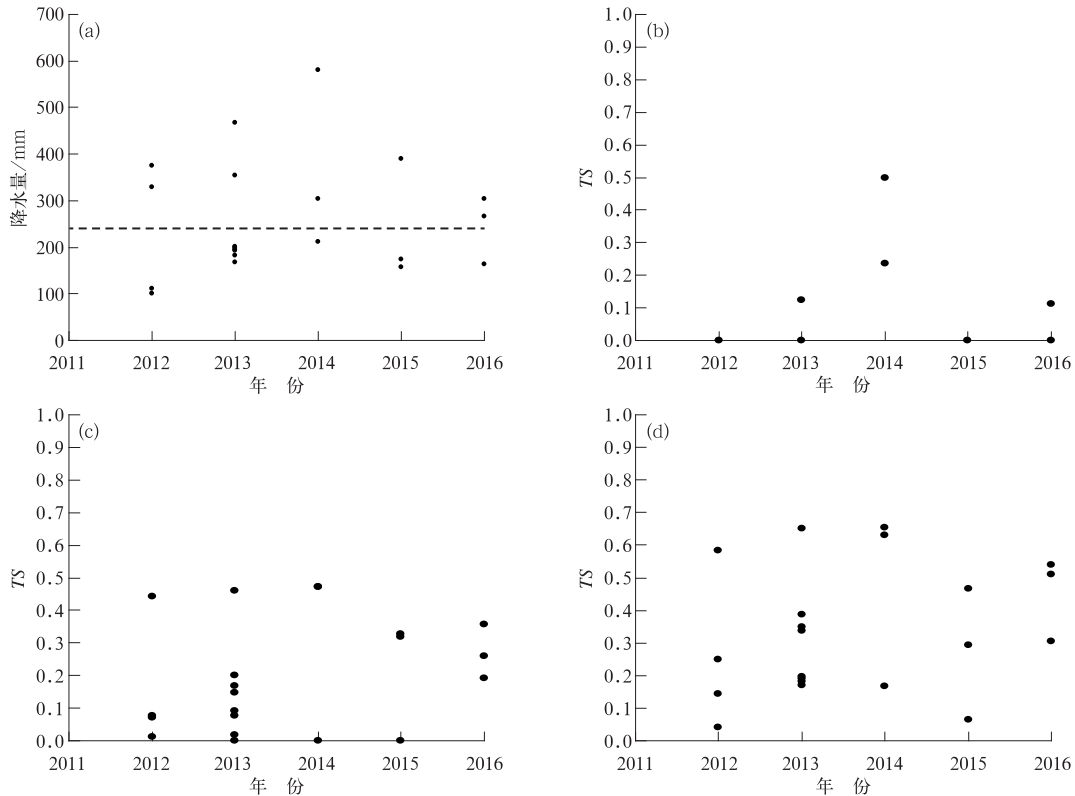


图 5 21 个 TC 最大过程降水及 BEST3 方案中超越不同降水阈值降水的 TS 评分分布
(a) 最大过程降水(观测), (b) ≥ 250 mm, (c) ≥ 100 mm, (d) ≥ 50 mm

Fig. 5 Maximum accumulated precipitation and threat scores of precipitation above different thresholds by BEST3 scheme for the 21 TCs

(a) maximum accumulated precipitation (observation), (b) ≥ 250 mm, (c) ≥ 100 mm, (d) ≥ 50 mm

4 结论与讨论

综合以上分析,结论如下:

(1) 发展了 LTC 降水预报的一种新方法,基于路径相似的 LTC 降水之动力统计集合预报模型(LTP_DSEF)。该方法包括五个步骤:TC 路径预报、相似路径 TC 识别、其他特征相似性的判别、TC 降水集合预报和最佳预报方案选择。

(2) LTP_DSEF 方法对 LTC 较强过程降水的预报整体优于动力模式。本文挑选的 LTP_DSEF 模型最优方案对于 ≥ 50 , ≥ 100 , ≥ 250 mm 过程降水预报,平均 TS 评分在建模样本试验和独立样本试验中均优于动力模式的最好水平。在独立样本试验中,对于 250 mm 及以上过程降水,三家动力模式几乎没有预报能力,而 LTP_DSEF 模型 TS 评分可达 0.1。

(3) 对于较强 LTC 过程降水(≥ 250 , ≥ 100 , ≥ 50 mm),起报时刻参数设定为最临近影响时刻即

TC 对陆地产生降水的前一日 12:00 UTC、集合参数取最大值时预报效果稳定趋好。

这一令人鼓舞的结果能给我们什么启示? 又该如何理解这一现象呢?

动力统计结合是该方法成功的关键所在。但问题是如何结合? LTP_DSEF 模型吸收了动力模式在过去 30 年 TC 研究及其业务发展所取得的最大成功:越来越准确的 TC 路径预报;而且 TC 路径恰巧又是影响 TC 降水的首要因素;TC 主要降水分布于其路径两侧、只有 TC 出现才可能有 TC 降水!同时,充分挖掘了历史资料中的宝贵信息:TC 路径相似及其他特征相似,以及最佳相似 TC 的降水分布。在此基础上,对最佳相似 TC 的降水进行不同方案的集合。

LTP_DSEF 模型之所以优于动力模式,可能主要是由于对于关键物理过程表达上的差别所致。目前在动力模式对譬如地形作用、积云对流等物理过程通过参数化还不能精准表达真实过程的情况下,LTP_DSEF 模型尽管本身不包含这些物理过程的

具体表达,但最佳相似 TC 降水的引入,可能较之动力模式更好地重现了这些关键物理过程的作用。

LTP_DSEF 模型刚刚起步,现已表现出良好的预报能力,未来还有进一步提升的空间。目前就 LTP_DSEF 模型自身而言尚存在一些不足之处,如台风路径的主、客观预报误差可能会对预报结果产生一定影响;对于其他特征相似性方面,主要只引入了季节相似,许多 TC 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)都并未被考虑。除此之外,本文中试验样本数量相对偏少,还需进一步增多。对于较强过程降水(≥ 50 mm)而言,取最大值集合方案漏报率(0.2193)相对取平均值方案(0.6219)较低,但空报率相对较高(最大值方案 0.6113,平均值方案 0.4262),易造成空报。相信通过新的深入的研究,LTP_DSEF 模型能有更好的发展前景,并能在业务中发挥应有的作用。

致谢:该研究工作得到陈联寿院士、丑纪范院士、许映龙正研高工和程正泉正研高工的大力支持和鼓励,在此一并致谢。

参考文献

- 陈国民,白莉娜,万日金,2017. 2015 年西北太平洋热带气旋预报精度评定[J]. 气象,43(4):501-507. Chen G M, Bai L N, Wan R J, 2017. Verification on forecast of tropical cyclones over western North Pacific in 2015[J]. Meteor Mon, 43(4):501-507(in Chinese).
- 程正泉,陈联寿,徐祥德,等,2005. 近 10 年中国台风暴雨研究进展[J]. 气象,31(12):3-9. Cheng Z Q, Chen L S, Xu X D, et al, 2005. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. Meteor Mon, 31(12):3-9(in Chinese).
- 丑纪范,1986. 为什么要动力-统计相结合?——兼论如何结合[J]. 高原气象,5(4):367-372. Chou J F, 1986. Why a combination of dynamic and statistic?—How to combine them[J]. Plateau Meteor, 5(4):367-372(in Chinese).
- 冯利华,2000. 登陆台风降水预报[J]. 海洋通报,19(2):75-79. Feng L H, 2000. Precipitation forecast of landing typhoon[J]. Marine Sci Bull, 19(2):75-79(in Chinese).
- 贡九鼎,钮学新,李慧武,等,1995. 华东台风降水预报的一种集成[J]. 大气科学,19(1):101-110. Gong J D, Niu X X, Li H W, et al, 1995. Forecast epitomized of typhoon's precipitation in East China[J]. Sci Atmos Sinica, 19(1):101-110(in Chinese).
- 黄伟,余晖,梁旭东,2009. GRAPES-TCM 对登陆热带气旋降水的预报及其性能评估[J]. 气象学报,67(5):892-901. Huang W, Yu H, Liang X D, 2009. Evaluation of GRAPES-TCM rainfall forecast for China landfalling tropical cyclone in 2006[J]. Acta Meteor Sinica, 67(5):892-901(in Chinese).
- 李博,赵思雄,2009. 用 SMAT 建立台风暴雨预报模型的试验研究[J]. 气象,35(6):3-12. Li B, Zhao S X, 2009. Development of forecasting model of typhoon type rainstorm by using SMAT[J]. Meteor Mon, 35(6):3-12(in Chinese).
- 麻素红,吴俞,瞿安祥,等,2013. T213 与 T639 模式热带气旋预报误差对比[J]. 应用气象学报,23(2):167-173. Ma S H, Wu Y, Qu A X, et al, 2013. Comparative analysis on tropical cyclone numerical forecast errors of T213 and T639 models[J]. J Appl Meteor Sci, 23(2):167-173(in Chinese).
- 任福民, Gleason B, Easterling D, 2001. 一种识别热带气旋降水的数值方法[J]. 热带气象学报,17(3):308-313. Ren F M, Gleason B, Easterling D, 2001. A numerical technique for partitioning cyclone tropical precipitation[J]. J Trop Meteor, 17(3):308-313(in Chinese).
- 任福民, 吴国雄, 王小玲, 等, 2011. 近 60 年影响中国之热带气旋[M]. 北京:气象出版社:15-30. Ren F M, Wu G X, Wang X L, et al, 2011. Tropical Cyclones Affecting China over the Last 60 Years[M]. Beijing: China Meteorological Press: 15-30(in Chinese).
- 任福民, 向纯怡, 2017. 登陆热带气旋降水预报研究回顾与展望[J]. 海洋气象学报, 37(4):8-18. Ren F M, Xiang C Y, 2017. Review and prospect of researches on the prediction of precipitation associated with landfalling tropical cyclones[J]. J Marine Meteor, 37(4):8-18(in Chinese).
- 王太微, 陈德辉, 2007. 数值预报发展的新方向——集合数值预报[J]. 气象研究与应用, 28(1):6-12, 24. Wang T W, Chen D H, 2007. A brief overview of ensemble forecasts[J]. J Meteor Res Appl, 28(1):6-12, 24(in Chinese).
- 许映龙, 2009. 0908 号台风“莫拉克”数值模拟分析[C]//2009 年海峡两岸气象科学技术研讨会论文集. 北京:中国气象学会. Xu Y L, 2009. Numerical simulation analysis of Typhoon Morakot (0908)[C]//Proceedings of the Cross-strait Symposium on Meteorological Science and Technology (2009), Beijing: Chinese Meteorological Society(in Chinese).
- 薛根元, 张建海, 陈红梅, 等, 2007. 不同对流参数化方案在登陆浙闽台风降水预报中的比较试验[J]. 高原气象, 26(4):765-773. Xue G Y, Zhang J H, Chen H M, et al, 2007. The comparisons of different convective parameterization schemes applying precipitation's forecast of typhoon landing on Zhejiang and Fujian Provinces[J]. Plateau Meteor, 26(4):765-773(in Chinese).
- 袁炳, 费建芳, 王云峰, 等, 2010. 应用 ATOVS 资料和非对称 Bogus 资料对登陆台风韦帕的 4DVAR 数值模拟分析[J]. 气象, 36(5):13-20. Yuan B, Fei J F, Wang Y F, et al, 2010. 4DVAR numerical simulation analysis using ATOVS data and asymmetrical Bogus data on landing Typhoon Weipha[J]. Meteor Mon, 36(5):13-20(in Chinese).
- 岳彩军, 陈佩燕, 雷小途, 等, 2006. 登陆台风短时定量降水预报方法初探[J]. 气象科技, 34(1):7-11. Yue C J, Chen P Y, Lei X T, et al, 2006. Preliminary study of short-term quantitative precipitation forecast method for landfalling typhoon[J]. Meteor Sci Technol, 34(1):7-11(in Chinese).
- 张亚洲, 李盛林, 邓文彬, 等, 2011. 基于多模式短期集合预报技术的热带气旋降水预报试验[J]. 气象与减灾研究, 34(2):26-33. Zhang Y Z, Li S L, Deng W B, et al, 2011. Experiment of tropical cyclone precipitation forecast based on multi-model short-range ensemble forecasting technique[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 34(2):26-33(in Chinese).

- 钟元,余晖,滕卫平,等,2009. 热带气旋定量降水预报的动力相似方案[J]. 应用气象学报,20(1):17-27. Zhong Y, Yu H, Teng W P, et al, 2009. A dynamic similitude scheme for tropical cyclone quantitative precipitation forecast[J]. J Appl Meteor Sci, 20(1): 17-27 (in Chinese).
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G, 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature, 525(7567): 47-55.
- Cangialosi J P, Franklin J L, 2015. 2014 National hurricane center forecast verification report[R]. NOAA/NWS/NCEP/National Hurricane Center.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q, 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones [J]. Adv Atmos Sci, 27(5): 967-976.
- Chou J F, 1974. A problem of using past data in numerical weather forecasting[J]. Sci Sin, 17(6): 814-825.
- Ebert E E, Turk M, Kusselson S J, et al, 2011. Ensemble tropical rainfall potential (eTRaP) forecasts[J]. Wea Forecasting, 26(2): 213-224.
- Fang X Q, Kuo Y H, 2013. Improving ensemble-based quantitative precipitation forecasts for topography-enhanced typhoon heavy rainfall over Taiwan with a modified probability-matching technique[J]. Mon Weat Rev, 141(11): 3908-3932.
- Fraedrich K, Raible C C, Sielmann F, 2003. Analog ensemble forecasts of tropical cyclone tracks in the Australian region[J]. Wea Forecasting, 18(1): 3-11.
- Hong J S, Fong C T, Hsiao L F, et al, 2015. Ensemble typhoon quantitative precipitation forecasts model in Taiwan[J]. Wea Forecasting, 30(1): 217-237.
- Hsiao L F, Yang M J, Lee C S, et al, 2013. Ensemble forecasting of typhoon rainfall and floods over a mountainous watershed in Taiwan[J]. J Hydrol, 506: 55-68.
- Kidder S Q, Knaff J A, Kusselson S J, et al, 2005. The tropical rainfall potential (TRaP) technique. Part I: description and examples[J]. Wea Forecasting, 20(4): 456-464.
- Langmack H, Fraedrich K, Sielmann F, 2012. Tropical cyclone track analog ensemble forecasting in the extended Australian Basin: NWP combinations[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 138(668): 1828-1838.
- Lee C S, Huang L R, Shen H S, et al, 2006. A climatology model for forecasting typhoon rainfall in Taiwan[J]. Nat Hazards, 37(1/2): 87-105.
- Li Q L, Lan H P, Chan J C L, et al, 2015. An operational statistical scheme for tropical cyclone induced rainfall forecast[J]. J Trop Meteor, 21(2): 101-110.
- Liu C C, 2009. The influence of terrain on the tropical rainfall potential technique in Taiwan[J]. Wea Forecasting, 24(3): 785-799.
- Lonfat M, Rogers R, Marchok T, et al, 2007. A parametric model for predicting hurricane rainfall[J]. Mon Wea Rev, 135(9): 3086-3097.
- Marchok T, Rogers R, Tuleya R, 2007. Validation schemes for tropical cyclone quantitative precipitation forecasts: evaluation of operational models for U. S. landfalling cases[J]. Wea Forecasting, 22(4): 726-746.
- Marks F D, Kappler G, Demaria M, 2002. Development of a tropical cyclone rainfall climatology and persistence (R-CLIPER) model [C]//Preprints of the 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. San Diego, CA: AMS: 327-328.
- National Hurricane Center, 2017. National hurricane center forecast verification[EB/OL]. <http://www.nhc.noaa.gov/verification/verify6.shtml?> [2017-04-04].
- Ren F M, Wang Y M, Wang X L, 2007. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations[J]. Adv Atmos Sci, 24(4): 700-711.
- Ren F M, Qiu W Y, Ding C C, et al, 2017. An objective index of tropical cyclone track similarity and its preliminary application in the prediction of the precipitation associated with landfalling tropical cyclones[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 33(6): 1725-1742.
- Tuleya R E, DeMaria M, Kuligowski R J, 2007. Evaluation of GFDL and simple statistical model rainfall forecasts for U. S. landfalling tropical storms[J]. Wea Forecasting, 22(1): 56-70.
- Wang Y, Shen X S, Chen D H, 2012. Verification of tropical cyclone rainfall predictions from CMA and JMA global models[J]. J Trop Meteor, 18(4): 537-542.
- Wei C C, 2012a. RBF neural networks combined with principal component analysis applied to quantitative precipitation forecast for a reservoir watershed during typhoon periods[J]. J Hydro-meteorol, 13(2): 722-734.
- Wei C C, 2012b. Wavelet support vector machines for forecasting precipitation in tropical cyclones: comparisons with GSVM, Regression, and MM5[J]. Wea Forecasting, 27(2): 438-450.
- Woo W C, Hogsett W, Mohapatra M, et al, 2014. Challenges and advances related to TC rainfall forecast[C]//Proceedings of the Third International Workshop on Tropical Cyclone Landfall Processes (IWTC-LP-III). Hong Kong: Hong Kong Observatory.
- Xiao Q N, Kou Y H, Sun Junzhen, et al, 2007. An approach of Radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of typhoon Rusa (2002) at landfall[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(1): 14-22.
- Yu X, Park S K, Lee Y H, et al, 2013. Quantitative precipitation forecast of a tropical cyclone through optimal parameter estimation in a convective parameterization[J]. Sci Online Lett Atmos, 9(1): 36-39.
- Zhang F Q, Weng Y H, Kuo Y H, et al, 2010. Predicting typhoon morakot's catastrophic rainfall with a convection-permitting mesoscale ensemble system[J]. Wea Forecasting, 25(6): 1816-1825.
- Zhang H L, Pu Z X, 2014. Influence of assimilating surface observations on numerical prediction of landfalls of hurricane Katrina (2005) with an ensemble Kalman Filter[J]. Mon Wea Rev, 142(8): 2915-2934.
- Zhao K, Li X F, Xue M, et al, 2012. Short-term forecasting through intermittent assimilation of data from Taiwan and mainland China coastal radars for Typhoon Meranti (2010) at landfall [J]. J Geophys Res, 117(D6): D06108.