

李颖,方伟华,叶妍婷,等.2024.热带气旋气候持续性降水模型R-CLIPER本地化研究[J].暴雨灾害,43(6):723-732. LI Ying, FANG Weihua, YE Yanting, et al. 2024. Study on the localization of tropical cyclone rainfall climatology and persistence model R-CLIPER [J]. *Torrential Rain and Disasters*,43(6):723-732 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-085

热带气旋气候持续性降水模型R-CLIPER本地化研究

李颖^{1,2},方伟华³,叶妍婷⁴,黎玥君^{1,2},陈晔峰^{1,2}

(1. 浙江省气象科学研究所,杭州310057;2. 中国气象科学研究院浙江分院,杭州310017;3. 北京师范大学
减灾与应急管理研究院,北京100875;4. 金华市气象局,金华321000)

摘要:热带气旋(简称TC)气候持续性降水模型(简称R-CLIPER)是基于对北大西洋TC或全球TC观测的一种TC降水统计参数模型,具有输入简单、计算快捷的优点,可实现气候尺度TC降水模拟,并为TC降水预报和风险预估提供技术支持。以西北太平洋地区TC为研究对象,对R-CLIPER模型进行本地化研究。首先,基于热带测雨卫星(TRMM)及风云卫星(FY2C/2E)降水数据,提取TC不同强度等级(即超强台风、强台风、台风、强热带风暴、热带风暴、热带低压共6个)的降水径向平均廓线;其次,结合R-CLIPER模型框架,研究面向全局最优的TC降水廓线参数化拟合方法,分别构建基于TRMM和FY2C/2E降水数据的西北太平洋R-CLIPER,即TRMM-R-CLIPER-WNP(模型1)和FY-R-CLIPER-WNP(模型2);最后,针对2012—2013年西北太平洋62个TC及2009—2021年影响浙江的26个TC,从拟合误差、降水落区两个方面对模型进行评估。结果表明:(1)TC的TRMM降水廓线在峰值区相对尖锐,而FY2C/2E廓线则更平滑、细节刻画更精细,可能原因是后者分辨率更高;(2)TRMM廓线和FY廓线参数化的均方根误差(RMSE)分别为 $0.28\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $0.51\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$;(3)基于站点数据TC降水落区评分表明,当降水阈值小于 $3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,模型1模拟值的ETS评分优于模型2,当阈值大于 $3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时模型2结果更优,两者均表现出TC中心海上比陆上评分更优,即两者均表现出热带气旋的中心降水强度预报海上准确率比陆上更高。(4)使用参数化拟合方法,可将R-CLIPER模型在西北太平洋地区TC降水模拟的准确度提升5.5%;同时还揭示出TC降水模拟误差受模型数据源、模型框架、参数化方案等因子影响。

关键词:热带气旋;参数化;热带测雨卫星;风云卫星;气候持续性降水模型

中图分类号:P444

文献标志码:A

DOI: 10.12406/byzh.2023-085

Study on the localization of tropical cyclone rainfall climatology and persistence model R-CLIPER

LI Ying^{1,2}, FANG Weihua³, YE Yanting⁴, LI Yuejun^{1,2}, CHEN Yefeng^{1,2}

(1. Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310057; 2. Zhejiang Branch, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Hangzhou 311300; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing 100875; 4. Jinhua Meteorological Bureau, Jinhua 321000)

Abstract: The Tropical Cyclone (TC) Rainfall Climatology and Persistence Model (R-CLIPER) is a statistical parametric model for TC precipitation based on observations of North Atlantic TCs or global TCs. It boasts simple inputs and quick calculations, enabling climate-scale TC precipitation simulations, thus providing technical support for TC precipitation forecasting and risk assessments. This study focuses on TCs in the Western North Pacific region and performs localization of the R-CLIPER model. Firstly, based on precipitation data from Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite and Fengyun satellite (FY2C/2E) precipitation data, the radial average profiles of precipitation from TCs of 6 different intensity levels (i.e., super typhoon, strong typhoon, typhoon, severe tropical storm, tropical storm, tropical depression) are extracted. Secondly, combined with the R-CLIPER model framework, a globally optimal parameterization fitting method for TC precipitation profiles is developed. Two models are constructed, including the R-CLIPER for the Western North Pacific Ocean based on TRMM data/

收稿日期: 2023-04-28;定稿日期: 2024-01-05

资助项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2024C03256);浙江省基础公益研究计划项目(LGF21D010001);浙江省气象局科技计划项目(2020ZD05)

第一作者: 李颖,主要从事气象灾害建模与风险评估研究。E-mail: liyingsdzb@163.com

通信作者: 方伟华,主要从事自然灾害风险评估研究。E-mail: weihua.fang@bnu.edu.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

FY data, namely TRMM-R-CLIPER-WNP (Model 1) and FY-R-CLIPER-WNP (Model 2). Finally, based on the 62 tropical cyclones in the Northwest Pacific from 2012 to 2013 and the 26 cyclones that affected Zhejiang from 2009 to 2021 the models are evaluated in terms of fitting error and precipitation falling area. The results are as follows. (1) The TC rainfall profiles derived from TRMM data are relatively sharp near the maximum rainfall, while those from FY2C/2E satellite data are smoother and more detailed due to its higher spatial resolution. (2) The RMSE of TRMM parameterized profiles is $0.28 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, and that of FY2C/2E profiles is $0.51 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$. (3) Based on the ground-based station data evaluation, when the rainfall threshold is less than $3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, the ETS score of Model 1 is better than that of Model 2. But when the threshold is greater than $3 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, Model 2 is better. Both models perform better when the TC is centered over the sea than over land, indicating higher accuracy of TC central rainfall intensity prediction over the ocean than over land. In conclusion, using the parameterized fitting method, the accuracy of the R-CLIPER model in simulating TC precipitation in the Northwest Pacific region can be improved by 5.5%. Additionally, it was revealed that the error in TC precipitation simulations is influenced by factors such as model data sources, model framework, and parameterization schemes.

Key words: tropical cyclone; parameterization; TRMM; FY; R-CLIPER

引言

热带气旋(Tropical Cyclone, TC)降水可引发内涝、山洪、泥石流和滑坡等次生灾害,严重威胁TC影响区内人民生命财产安全。相关研究表明,到2100年,温室效应引起的气候变化将导致全球平均TC强度增加2%~11%,平均频率减少6%~34%,风暴中心100 km范围内降水率会增加约20% (Knutson et al., 2010)。我国中东部受TC降水影响大,例如,2021年7月17—22日,受偏强偏北副热带高压、台风“烟花”和台风“查帕卡”共同影响,河南郑州等地出现特大暴雨,造成河南全省1 478.6万人受灾,因灾死亡、失踪398人,直接经济损失1 200.6亿元(新华社, 2022); 2019年,超强台风“利奇马”在浙江、山东多次登陆,多地暴雨及次生灾害共造成死亡、失踪70人(中国气象局, 2020); 2016年,超强台风“莫兰蒂”在福建登陆,降水诱发次生山洪灾害,因灾死亡、失踪44人(中国气象局, 2017)。因此,加强TC降水气候风险预测评估,加强TC降水引发的极端灾害事件防御与响应,对于坚守气象防灾减灾第一道防线具有重要意义。

TC气候持续性降水模型属于TC降水统计参数模型,是基于历史TC降水数据,采用统计学方法对TC降水空间结构特征参数化而构建的TC降水估计模型。相较于动力学模式预报降水,TC降水统计参数模型具有输入简单、计算快捷、结果空间异质性小且符合气候特征的优势,往往可进行大样本的TC序列的降水估计,进而进行TC降水风险评估等。国内外TC风险管理实践表明:客观、快捷的确定性TC降水统计参数模型具有重要的风险管理应用价值(李颖和方伟华, 2013; FEMA, 2022; Gu et al., 2022)。例如,美国国家应急管理局开发的HAZUS飓风模型(FEMA, 2022),风险建模与解决方案公司热带气旋降水模型(Risk Management Solution Ltd. Tropical Cyclone -Rain Model, RMS TC-Rain model) (Grieser and Jewson, 2012),美国国家

海洋和大气局开发的气候持续性降水模型(Rainfall Climate and Persistence Model, R-CLIPER) (Marks et al., 2002)以及依托此框架从地形、不对称性、登陆衰减和水汽等角度发展的PHRaM模型等(Lonfat et al., 2007; Kim et al., 2022)。其中,R-CLIEPR是基于气候统计学研发的一种气象业务模型,其本质是通过构建TC径向降水廓线模型,模拟TC小时降水率场,经时间积分得到过程累积降水场。R-CLIPER只需TC路径、强度等信息,即可较快地预测TC具有气候特征的降水部分,极大提升业务预报检验和灾害风险评估效率。一方面,对于单场TC降水模拟而言,其可作为气候标尺用于数值预报降水的检验与评估,另一方面,对于长期序列TC降水模拟而言,其可兼顾气候情景,以蒙特卡洛、随机TC路径模拟结果为输入,获取千万次级的不确定性TC降水场模拟结果,进而进行未来长期TC降水灾害风险评估,而数值模拟受限于运算复杂、耗时长、随时间推移解的不稳定性增加等原因对此是难以实现的。

以R-CLIPER为代表的TC降水统计参数模型常作为检验各类TC定量降水模型准确率及适用性的标尺(Tuleya et al., 2007; Brackins and Kalyanapu, 2020; Fernández-Alvarez et al., 2020)。例如,Tuleya等(2007)利用地面站点的TC降水实况研究比较了R-CLIPER与GFS、GFDL、NAM三种数值模式对登陆美国的25场TC降水预报,用以检验数值模式预报效果,统计评分表明R-CLIPER能够快速较好把握总体降水模态,评分相当但速度较快,为快速决策提供了条件。Brackins和Kalyanapu(2020)以R-CLIPER、IPET、PHRaM和P-CLIPER四种TC降水统计参数模型模拟结果为输入,用以洪水预报比较研究。另外,经向国内部分预报员问卷调查得知,TC降水统计模型可减轻主观判别压力,辅助支持TC降水预报业务。因此,将R-CLIPER模型在西北太平洋地区进行本地化研究和应用,对于强化我国TC降水异常态监测及动态客观检验评估、提高预报准确率或具积极作用。

然而,R-CLIPER模型是针对北大西洋TC或全球TC观测的平均统计结果建立,未见专门针对其他海域TC适用的模型参数。观测表明,西北太平洋TC降水结构与北大西洋或全球TC平均降水结构均有差异(Lonfat et al., 2004),因而,发展符合西北太平洋TC降水结构特点的R-CLIPER模型对更好服务于我国TC降水预报及风险管理具有重要意义。为此,本文采用西北太平洋地区TC最佳路径数据集及卫星反演降水数据集,以R-CLIPER框架为依托,发展TC降水廓线参数化方法,形成R-CLIPER西北太平洋地区本地化模型,以期对TC降水预报客观评估及风险管理提供技术支撑。

1 资料说明

本文研究区域为西北太平洋地区(100°—180°E, 0°—50°N)。所用的资料包括:

(1) 热带测雨卫星(Tropical Rain Measurement Mission, TRMM) TMPA3B42数据集的3 h降水率估计数据。该数据取自美国自戈达德地球科学数据和信息服务网(<https://disc.gsfc.nasa.gov/>)。空间范围为(180°W—180°E, 50°S—50°N),时间分辨率均为3 h,空间分辨率为0.25°×0.25°。该数据主要用于本地化模型TRMM-R-CLIPER-WNP(以下简称模型1)的建立及评估,其中,模型建立所用的时间范围为1998—2011年;模型评估2012—2013年62个TC。

(2) 风云系列卫星降水估计数据。该数据取自中国国家卫星气象中心风云卫星遥感数据服务网(<https://satellite.nsmc.org.cn/>),时间范围为2007—2009年(FY2C)、2010—2011年(FY2E),空间范围为(55°—155°E, 0°—50°N),时间分辨率为1 h,空间分辨率为0.1°×0.1°,该数据主要用于本地化模型FY-R-CLIPER-WNP(以下简称模型2)的建立。

(3) 地面气象站观测降水数据。该数据取自浙江省气象信息网络中心,为经质控(邱金晶等,2014)后的1 900余个自动气象站点的逐小时降水资料,资料年限为2009—2021年,该数据主要用于模型1和模型2的检验评估。

(4) CMA台风最佳路径数据集。该数据取自中国气象局热带气旋资料中心(<https://tcdata.typhoon.org.cn/>),含西北太平洋(含南海,赤道以北,东经180°以西)海域TC每6 h的中心点经度、纬度、近中心底层最大风速和中心最低气压等指标,资料年限为1998—2021年。

2 模型改进方案

R-CLIPER模型的本地化方案流程如图1所示。首先,基于卫星降水估计数据及TC路径参数,提取TC

平均降水廓线。然后,结合R-CLIPER模型框架,利用参数拟合方法,提取本地化模型参数,进而构建本地化模型。

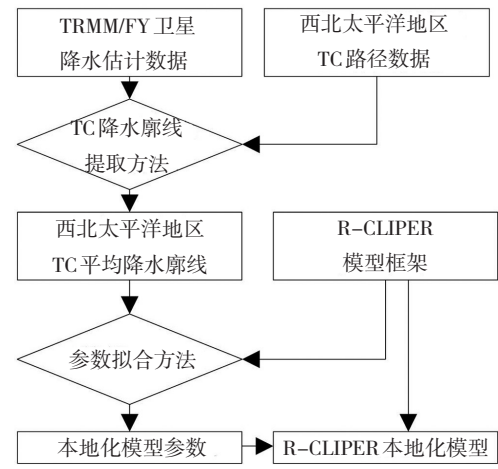


图1 R-CLIPER模型本地化方案流程图

Fig. 1 Flow chart of the R-CLIPER model localization scheme

2.1 R-CLIPER模型

R-CLIPER模型在开发过程中,先后利用地面站点数据和TRMM卫星雷达观测数据进行建模,两个阶段的模型框架也有不同(Marks et al., 2002; Tuleya et al., 2007)。2001年前后,在美国国家海洋和大气局与科罗拉多州立大学合作的大气研究所支持下,利用1948—2000年登陆美国的125个TC的雨量站数据,对登陆时为飓风强度等级的TC径向降水廓线及登陆后降水率变化特征进行统计建模,建立了基于站点的gauge R-CLIPER(DeMaria and Tuleya, 2001)。然而,由于小时站点观测数据稀疏,特别是在风暴中心100 km范围内,很难获得足够大的降水样本对不同强度TC进行分层建模,而卫星遥感观测的发展解决了这一瓶颈,研究团队进一步基于TRMM卫星微波成像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)降水估计数据对1998—2002年的全球3 979个风暴进行了3个不同强度(热带风暴、飓风1~2级、飓风3级以上)的TC降水气候学统计,并发展了基于卫星数据的TMI R-CLIPER模型(Lonfat et al., 2004)。该模型主要考虑了TC的强度、尺度和登陆时间对降水分布的影响。

后文所述R-CLIPER指上述TMI R-CLIPER模型。模型中,TC小时降水率TRR(TMI Rain Rates,记为 T_{RR})是以最大降水半径(r_m)为界、以半径(r)和TC最大风速(V_m)为变量的分段函数, r 为径向半径,即热带气旋任意一点到台风中心(原点)的距离。当 r 在 $0 \sim r_m$ 范围内,降水率随半径增大呈线性增大;当 $r \geq r_m$ 时,降水率沿半径向外呈指数衰减。参数化过程中,将最大风速(V_m)标准化得到标准化风速(U),并假设台风眼处降水(T_0)、最大降水半径处降水(T_m)、最大降水半径(r_m)和表

征降水尺度的参数(r_e)均与标准化风速(U)呈线性相关。R-CLIPER模型框架如式1~6所示(Tuleya et al., 2007)。

$$T_{RR}(r, V_m) = \begin{cases} T_0 + (T_m - T_0)(r/r_m) & (r < r_m) \\ T_m \exp[-(r - r_m)/r_e] & (r \geq r_m) \end{cases} \quad (1)$$

$$T_0 = a_1 + b_1 U \quad (2)$$

$$T_m = a_2 + b_2 U \quad (3)$$

$$r_m = a_3 + b_3 U \quad (4)$$

$$r_e = a_4 + b_4 U \quad (5)$$

$$U = 1 + (V_m - 35)/33 \quad (6)$$

式中, T_0 为在 $r=0$ 处的降水率($\text{in} \cdot \text{d}^{-1}$), T_m 为在 $r=r_m$ 处的最大降水率($\text{in} \cdot \text{d}^{-1}$), V_m 为最大风速(knot, 本文分析时已转化为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), $a_i, b_i (i=1, 2, 3, 4)$ 为常参数。

$a_1 \sim b_4$ 常参数是将4个降水相关物理变量用最大风速变量 V_m 表达的桥梁,也是R-CLIPER模型将TC复杂降水结构简化的关键所在。Tuleya等(2007)给出了TMI R-CLIPER的两组参数(表1),原始参数为基于全球260个TC的分强度等级(TS, Cat1-2, Cat3-5, 即热带风暴TS, 飓风1-2级, 飓风3-5级)平均降水廓线拟合得到的,其均方根误差为 $0.28 \text{ in} \cdot \text{d}^{-1}$,该组参数从2001年开始在美国国家飓风中心(National Hurricane Center, NHC)试用。试用过程中, Marks等(2002)使用地面站点数据对R-CLIPER模拟结果进行了评估,结果显示R-CLIPER预测降水偏小,为此对模型进行校验修正,得到表1NHC调整参数。

表1 TMI R-CLIPER模型参数表

Table 1 Parameters table for the TMI R-CLIPER model

参数	单位	原始参数	NHC调整参数
a_1	$\text{in} \cdot \text{d}^{-1}$	-2.11	-1.1
a_2	$\text{in} \cdot \text{d}^{-1}$	-2.73	-1.6
a_3	km	69.1	64.5
a_4	km	215	150
b_1	$\text{in} \cdot \text{d}^{-1}$	3.63	3.96
b_2	$\text{in} \cdot \text{d}^{-1}$	4.24	4.8
b_3	km	-8.49	-13
b_4	km	-35.8	-16

2.2 TC降水廓线提取方法

2.2.1 TC降水率场判别与提取

以1000 km为半径,逐TC、逐时自TC中心向外搜寻卫星降水格点,从而获取TC降水率场。具体为:(1)路径数据插值。为与卫星降水数据相匹配,利用线性插值方法,将中国气象局CMA台风最佳路径数据集插值为1 h分辨率。(2)提取TC降水。分别基于TRMM与FY2C/2E卫星估测降水数据,利用TC云系边缘提取

算法(廖小露, 2011),提取每一个TC路径点对应的TC降水率数据。

2.2.2 TC径向平均降水廓线提取

TC径向降水廓线,指以台风眼为中心,沿任一半径向外的降水率曲线。采取TC降水径向分层结构剖析方法提取以TC半径为横轴、以TC降水率为纵轴的TC降水廓线,具体如下:(1)圈层平均降水率。根据逐时TC降水率,以TC中心为原点,以10 km为间隔,统计各径向圈层的平均降水率。(2)基于上述结果,根据《热带气旋等级》(GB/T 19201-2006)标准,得到超强台风(Super TY)、强台风(STY)、台风(TY)、强热带风暴(STS)、热带风暴(TS)、热带低压(TD)6个TC强度等级的TC径向平均降水廓线。

2.3 参数拟合方法

TC降水率参数化可采用全局或分段处理的方法(浙江省气象科学研究所等, 2022; 金华市气象局等, 2023)。全局方法不是对 r_m 单独进行参数化处理,而是通过拟合遍历 a_i, b_i 共8个参数,其结果更接近全局最优解,但耗时较长;分段处理的方法是采用统计学或图形学方法将 r_m 参数化,然后分别用线性函数、指数函数对两段降水廓线进行拟合,速度快但只能达到分段局部最优。为尽量提升全局拟合精度,本文采用最小二乘法思路,为了提高拟合效率,对参数迭代过程进行了监控(浙江省气象科学研究所等, 2022)。具体步骤如图2所示。

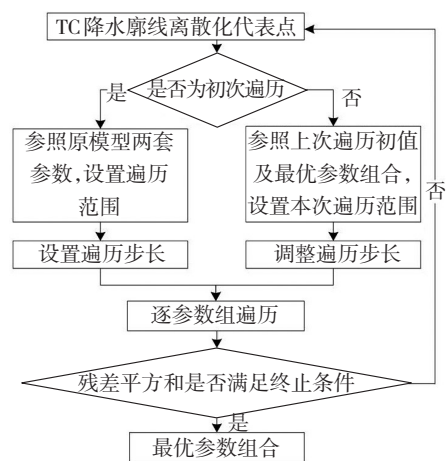


图2 参数拟合方法流程图

Fig. 2 Flow chart of the parameters fitting method

(1) TC降水廓线离散化代表点设定。取各强度等级 V_m 范围的中值作为该等级 V_m 的代表值,例如TS的 V_m 范围为 $17.2 \sim 24.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,则取 $20.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 为TS等级 V_m 的代表值,其中,因Super TY的风速无上限,为避免取值溢出,设定该等级上限值为 $110 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。取各径向圈层 r 的中值作为该径向圈层 r 的代表值。

(2) 参数初始遍历范围设定。以R-CLIPER模型

参数(表1)为基准,设置初始遍历范围。首先,将 a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 单位由 $\text{in}\cdot\text{d}^{-1}$ 转化为 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。然后,计算两套参数中各对应参数差值,其中设定初始下限为原参数最小值下 j 倍差值,而其上限则上调 k 倍差值,文中设定 j 、 k 为0.5。

(3) 参数遍历初始步长设定。假设遍历步长为遍历范围的 $1/n$,则每一次遍历需计算 $(n+1)^8$ 次, n 每增加1都会引起运算量骤增。权衡遍历精度和遍历效率,经试验,建议初始 n 取4。

(4) 遍历过程结束条件设定。因模型框架与被拟合曲线必定存在差异性,故遍历结束条件设定:给定残差平方和阈值,①当拟合残差平方和小于阈值,则可终止;②当残差平方和高于阈值但趋于稳定,则亦可终止。经测试,本文设定残差平方和阈值为20,设定残差平方和收敛条件为:相邻残差平方和波动小于0.001到达10次。

(5) 非首轮遍历过程的参数遍历范围、步长调整原则设定。在每一轮参数遍历过程后,可得到 $(n+1)^8$ 个残差平方和,并进而得到最小残差平方和及其对应的最优参数组合。如未达到遍历结束条件,则进行下一轮参数遍历。为了在下一轮遍历中得到更优结果,则需适当调整参数遍历范围、步长条件等。

首先,检查是否需要扩大遍历范围。逐一排查参数,判断上一轮得到的最优组合中的参数是否紧邻其遍历范围边缘,若某参数与其遍历上/下限之差 ≤ 1 倍

步长,则扩大该参数的遍历范围。又分两种情况:一是遍历下限偏大,则将上一轮最优组合中该参数取值往小值方向延伸 p 个步长,相应的上限缩减 q 个步长,并以更新后的遍历范围为基准变更步长;二是遍历上限偏小,则将上一轮最优组合中该参数取值往大值方向延伸 p 个步长,相应的下限增加 q 个步长,并变更步长。为保证范围按既定方向扩大,取值时应保证 $p > q \geq 1$ 。经试验,本文 p 取2, q 取1, n 取4。

3 结果与分析

3.1 TC降水场

根据黄萍(2015)的研究,在TC降水监测方面,TRMM和FY降水产品均能较好抓住强降水中心位置,较好分辨螺旋雨带结构。TRMM具有时间序列长和数据覆盖面较广等优势,但也对降水率有一定低估;FY降水估测精度因融入了地面观测信息而较TRMM略高(黄萍,2015),但也存在降水高值估测偏高的现象。为了更准确刻画影响西北太平洋TC降水特征,本文利用两套数据并行比较研究。采用2.2.1方法分别提取基于TRMM与FY的TC降水场。以2008年9月25日21时(世界时,下同)0815号超强台风“蔷薇”降水场为例(图3),结果显示两者在整体降水包络线形态上具有一致性,但在降水量值大小、降水内部结构等方面存在差异,这种差异来自于卫星分辨率、降水估测算法等方面。

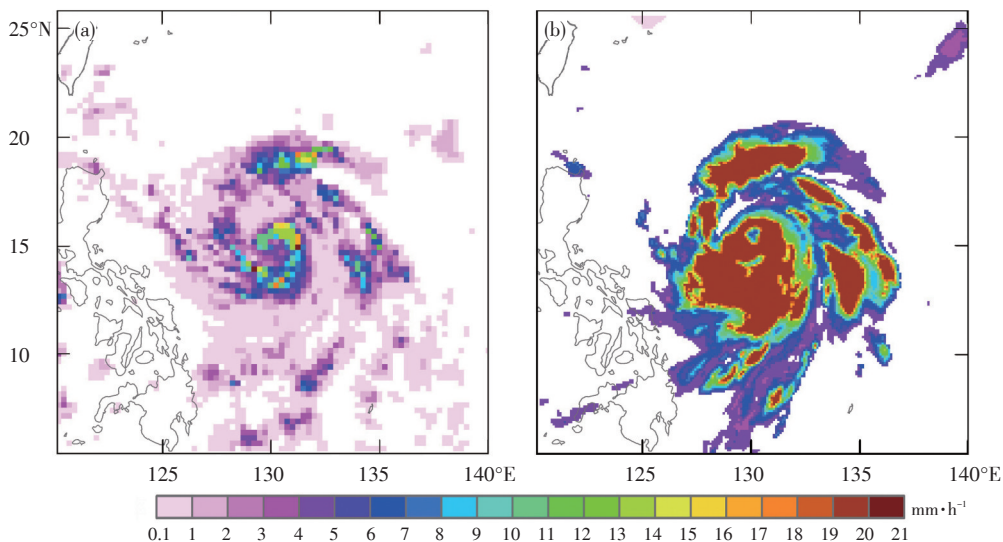


图3 2008年9月25日21时TRMM (a)和FY2C (b)反演的超强台风“蔷薇”降水率分布

Fig. 3 Maps of the rainfall rate associated with Super Typhoon "Jangmi" at 21:00 on 25 September, 2008 estimated from (a) TRMM and (b) FY2C

3.2 TC径向平均降水廓线

采用前文2.2.2节介绍的方法,基于上述TC降水率场,以SuperFY、TY、TD为例,绘制了西北太平洋TC不同强度等级下径向平均降水廓线(图4实线),后文简称TRMM廓线与FY廓线,结果显示:(1)两套降水廓线

均基本呈现出随TC强度增大,降水廓线峰值越高的特征。(2)FY廓线大致呈现出随TC强度增大,最大降水半径越大的特征,而TRMM廓线的该特征不明显。(3)由TRMM廓线分析得到的最大降水半径约在0~50 km;FY廓线分析得到的最大降水半径约在0~100 km。(4)台

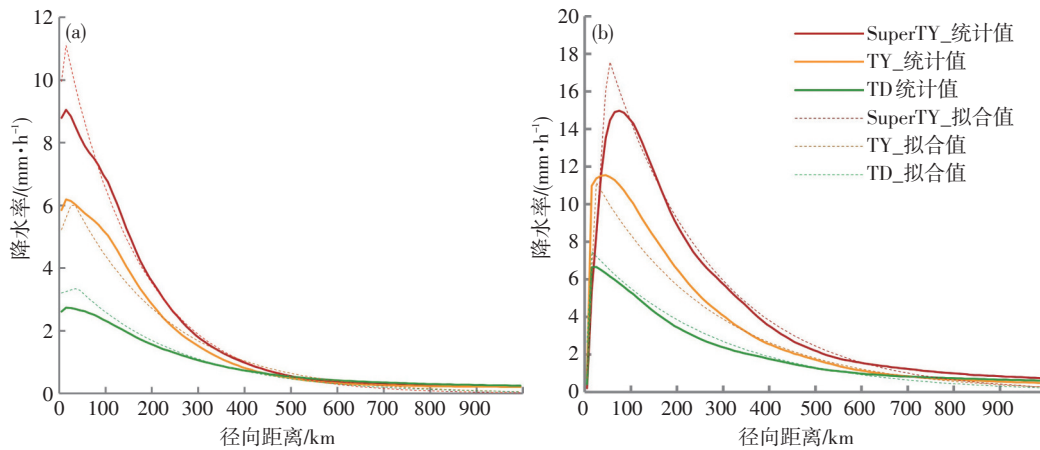


图4 基于TRMM (a)、FY2C/2E (b) 降水估计数据的西北太平洋TC降水径向廓线统计值(实线)和拟合值(虚线)对比图

Fig. 4 Comparison of statistical (solid line) and fitting (dashed line) rain rate radial profile for tropical cyclone over

NWP based on the observations from (a) TRMM, (b) FY2C/2E

风眼附近区域, FY廓线呈现随半径增大, 降水值呈现出由近似零值向最大值剧增的特点; TRMM廓线则呈起始降水值较高且降水随半径递增率相对较小。(5) 除台风眼附近区域外, 各强度等级下TRMM降水均值较FY降水均值低。总体来看, TRMM廓线较FY廓线在眼区附近细节偏少、在降水峰值区域变化相对剧烈, 或因TRMM卫星产品分辨率较FY卫星产品分辨率较低有关。

3.3 TC降水廓线本地化参数

依据上述TRMM廓线和FY廓线结果, 采用2.3节参数拟合方法, 得到R-CLIPER模型西北太平洋地区本地化模型模型1和模型2的最优参数(表2)。其中, 模型1的均方根误差(RMSE)为 $0.28 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 模型2的RMSE为 $0.51 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

表2 基于西北太平洋TC降水平均径向廓线的R-CLIPER本地化模型的参数值

Table 2 Parameters of two R-CLIPER localized models based on the average radial profile of TC rainfall over the Western North Pacific

参数	单位	模型1	模型2
a_1	$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	0.42	-3.18
a_2	$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	0.34	5.56
a_3	km	165.63	1.73
a_4	km	187.45	288.69
b_1	$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	2.82	0.53
b_2	$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$	2.41	2.62
b_3	km	-38.64	10.36
b_4	km	-1.65	-13.66

基于TRMM数据TC廓线的各参数拟合的最优参数变化如图5所示, 具有如下特点: ①参数 a_i 和 b_i 的最优取值, 近似呈负相关。②参数最优取值变化并不完全是单向变化, 表明8个参数间存在制约关系, 即 T_0 、 T_m 、 r_m 、 r_c 四个量是相互影响的, 也反证了分段处理参数

化方法是不易达到全局最优的。③各参数均经历了遍历范围先扩后缩、遍历步长先增后减的过程, 除 a_4 、 b_4 外, 最优取值均不在初始遍历范围内, 表明北大西洋模型参数不完全适用西北太平洋TC情况, 本地参数化是必要的。基于FY数据的参数拟合过程有类似特点, 本文不再赘述。

3.4 TC降水模拟

分别利用模型1和模型2, 对1949年以来西北太平洋TC降水进行了模拟。以0908号台风“莫拉克”为例, 模拟小时降水、累积降水与卫星反演降水效果对比如图6、7所示, 以1909号超强台风“利奇马”为例, 模拟累积降水与浙江地面观测降水效果对比如图8所示。

由图6可见, 对于TC小时降水率, 由TRMM卫星反演降水产品提取的TC降水范围及降水强度均小于FY卫星反演降水所提取的TC降水范围及降水强度; 由模型1得到的TC降水强度亦小于模型2得到的同半径下的降水强度。由图7可见, 对于TC累积降水, 除印证图6所示结果, 可以看出模型1得到的TC累积降水范围与TRMM卫星反演降水产品提取的范围相当, 类似地, 模型2得到的TC累积降水范围与FY卫星提取的范围相当; 模型2得到的TC累积降水的极值更接近卫星反演降水产品得到的降水极值。由图8可见, 在陆地上, 模型2得到的TC累积降水的极值更接近观测极值。

4 检验与评估

4.1 拟合效果评估

选取RMSE作为评价指标。如图4虚线所示, 当半径大于等于200 km时, 各强度等级的TC廓线拟合效果均较好; 当半径小于200 km时, TY的峰值降水量值估计较好, SuperTY和TD的峰区降水均有高估现象。基于TRMM廓线拟合和基于FY廓线拟合的RMSE分别为 $0.28 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $0.51 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。已有研究(Tuleya et

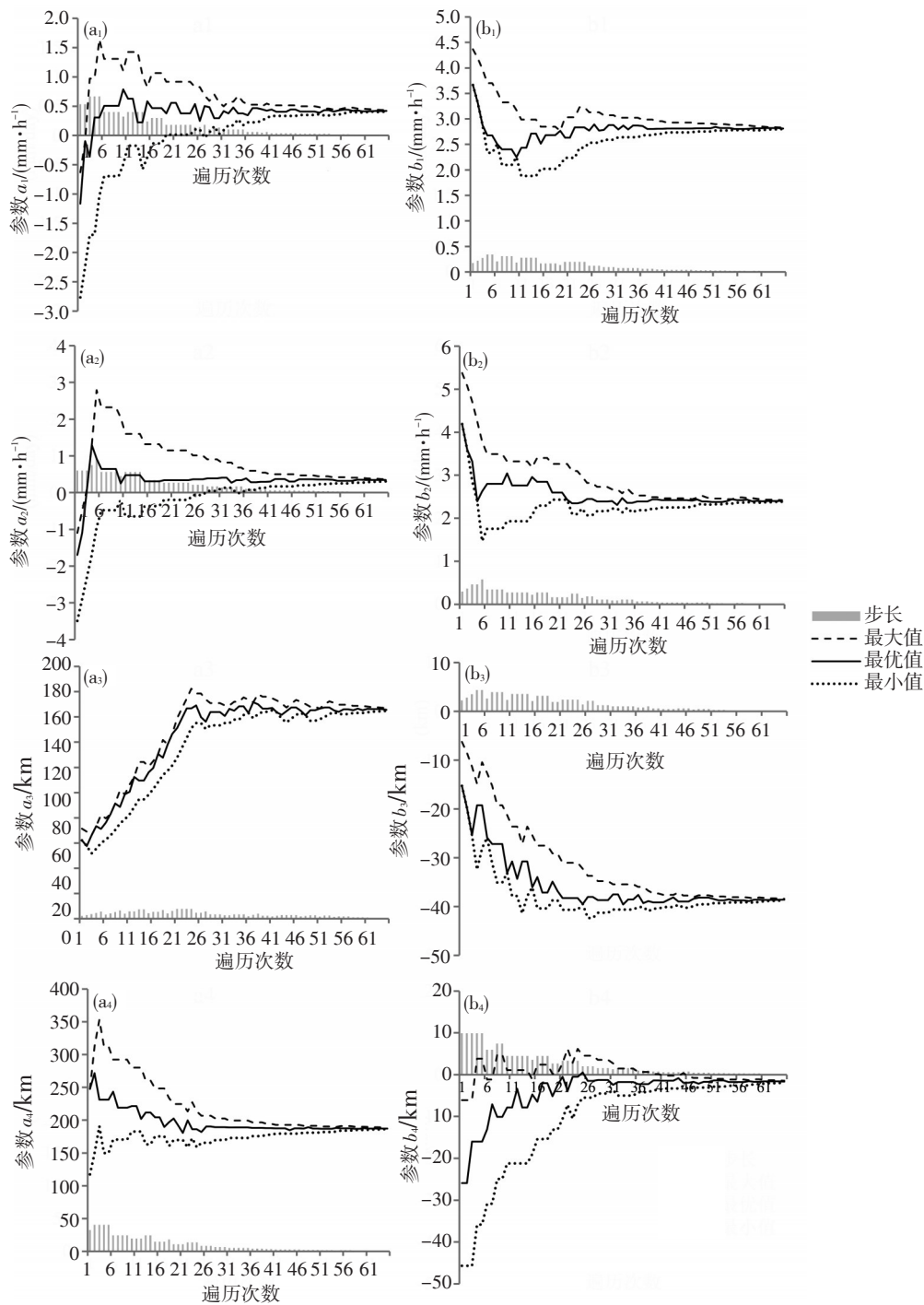


图 5 针对 TRMM TC 径向平均降水廓线参数拟合的最优参数变化(a₁—b₄)

Fig. 5 The optimal parameter change for (a₁—b₄) fitting the TRMM TC radial average rainfall profile parameters

al., 2007) 针对 TRMM 廓线拟合的 RMSE 为 0.28 in·d⁻¹ (合 0.296 3 mm·h⁻¹), 本文拟合准确率与其量级相当, 其中, 针对 TRMM 廓线的拟合准确率较前述文献提高 5.5%。

4.2 降水落区评分

4.2.1 评分方法

采用国际上常用的两种评分方法: BS (Bias score) 和 ETS (Equitable threat score), 对降水落区模拟效果进行评估。其中, BS 用来判断模型整体是否高(低)估降水,

若 BS < 1, 表明模型整体对降水有低估趋势; 若 BS > 1, 表明模型整体对降水有高估趋势; 若 BS = 1, 表明模型整体降水估计理想。ETS 用来表示模拟降水发生频次与实测频次的匹配程度, ETS = 1 表示模拟效果理想。

4.2.2 评估试验

为了对模型 1 和模型 2 降水落区模拟能力进行总体比较, 分别以卫星数据、地面站点为真值, 进行评估检验, 评估试验设计见表 3。其中, 陆面降水部分, 主要以浙江为检验区, 结合《中国气象灾害年鉴》(中国

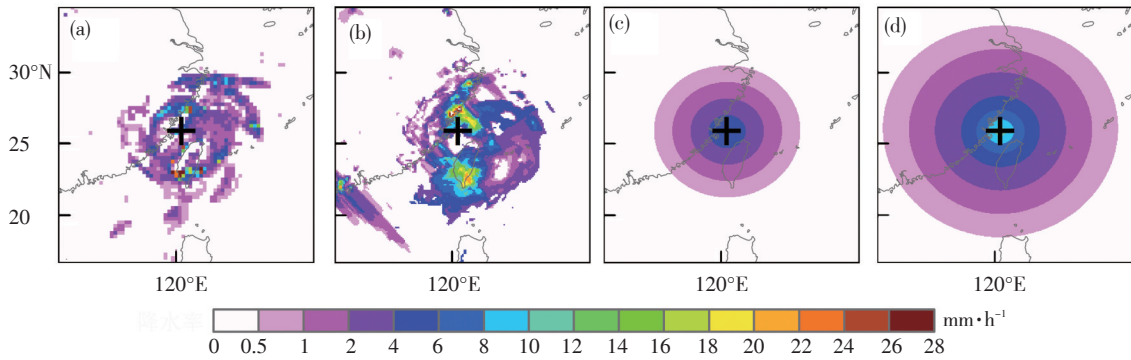


图6 2009年8月9日00时TRMM (a)和FY (b)反演、模型1 (c)和模型2 (d)模拟的台风“莫拉克”降水率
Fig. 6 Spatial distribution of TC rainfall rate of Typhoon Morakot retrieved by (a) TRMM and (b) FY satellite, and simulated by (c) Model 1 and (d) Model 2 at 00:00 UTC on 9 August 2009

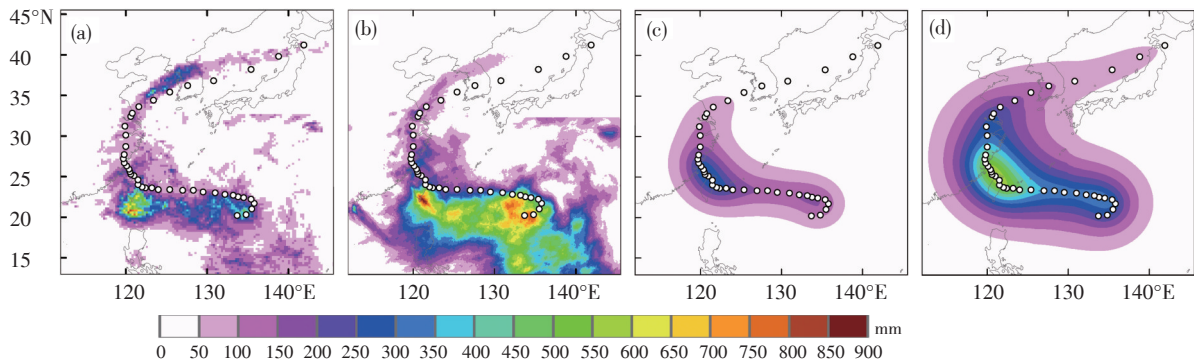


图7 2009年8月3日—13日台风“莫拉克”累积降水量(a: TRMM反演降水量, b: FY卫星反演降水量, c: 模型1模拟, d: 模型2模拟) (白色圆圈代表台风移动路径, 下同)
Fig. 7 Accumulated rainfall (unit: mm) of Typhoon Morakot retrieved from August 3 to 13, 2009 (a: inverted by TRMM, b: inverted by FY, c: simulated by simulated by model 1, d: simulated by model 2) (The white circle represents the track of Typhoon)

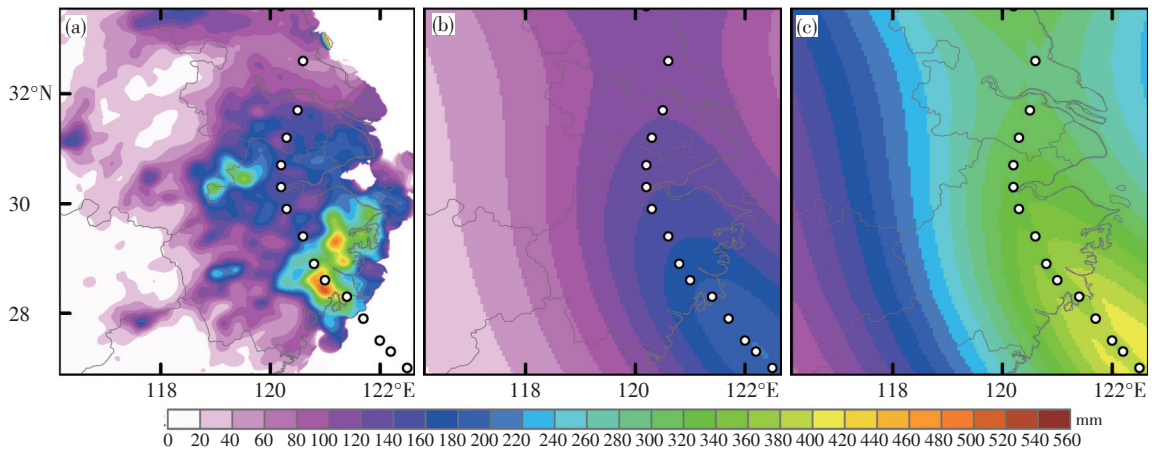


图8 2019年8月3日—14日超强台风“利奇马”导致的华东地区累积降水量
(a: 实况, b: 模型1模拟, c: 模型2模拟)
Fig. 8 Accumulated rainfall of Super Typhoon Lekima in eastern China from August 3 to 14, 2019 (a: observed cumulative rainfall, b: precipitation simulated by Model 1, c: precipitation simulated by Model 2)

表3 模型1和模型2评估检验设计表

Table 3 Evaluation test design table for model 1 and model 2

假设真值	时间范围	空间范围	检验重点
TRMM反演值	2012—2013年西北太平洋62个TC	海陆所有格点	(面)降水落区总体形态刻画情况
站点观测值	2009—2021年影响浙江的26个TC	浙江地面站点所对应格点	(点)降水量值准确度

气象局, 2011—2020)等资料, 选取2012—2021年浙江有灾情记录的26个TC, 其中央气象台编号分别为0908、1010、1105、1211、1307、1312、1323、1410、1416、

1509、1513、1521、1614、1617、1720、1808、1810、1812、1814、1818、1909、1913、1918、2004、2106、2112。

因TRMM卫星数据已经被广泛使用和认可, 尽管

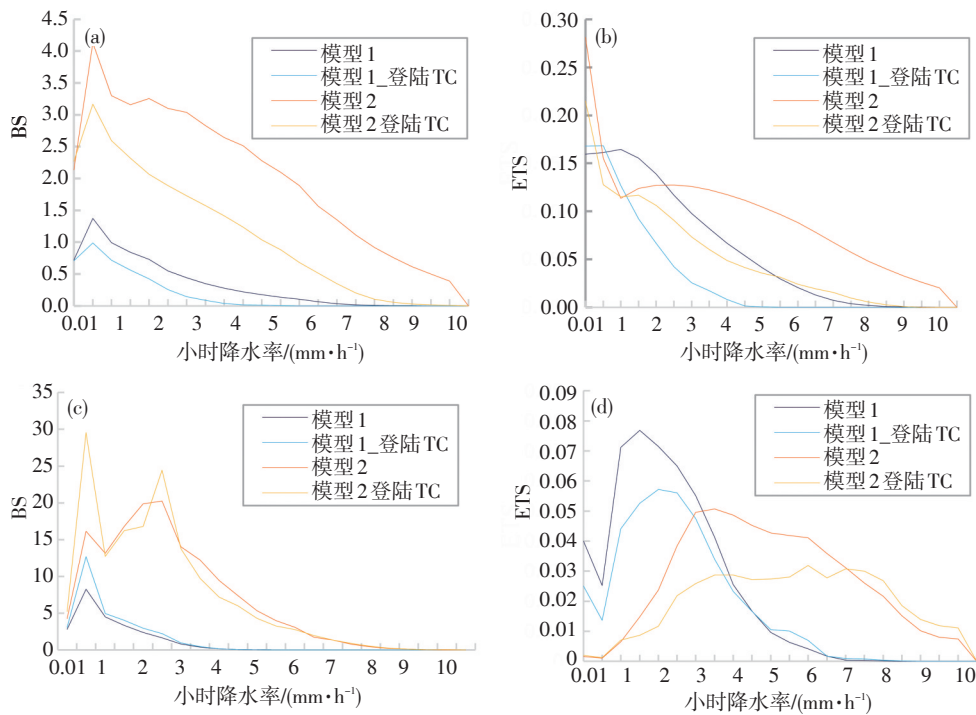


图9 2012—2013年模型1和模型2模拟降水与TRMM卫星反演降水的BS评分(a)和ETS评分(b)以及2009—2021年模型1和模型2模拟降水与浙江省地面观测降水的BS评分(c)和ETS评分(d)

Fig. 9 The (a) BS and (b) ETS evaluation scores of simulated rainfalls by Model 1 and Model 2 with TRMM satellite retrieval rainfall as the true values from 2012 to 2013 and (c) BS and (d) ETS evaluation scores of simulated rainfalls by Model 1 and Model 2 observed rainfall at ground stations in Zhejiang Province as the true values from 2009 to 2021

其对平均降水略有低估,但为弥补海上降水地面观测点的缺失,在不影响评估曲线趋势前提下,本研究选择以TRMM卫星反演降水为真值。样本选取2012—2013年62个TC逐3小时降水场,分别对模型1和模型2降水预测值进行评估(图9a、b)。由图9a可见,模型1降水预测值的BS评分明显优于模型2降水预测值,后者存在明显的高估现象,然而,随着降水阈值增大,模型1降水预测值低估程度越明显。从ETS评分(图9b)可见,模型2降水预测值总体优于模型1,且两者均当TC中心在海上表现更优。

当以浙江地面站点观测降水为真值,样本选取2009—2021年26个TC逐小时降水场,可以看出,模型1降水预测值的BS评分明显优于模型2降水预测值,两者均存在高估现象,当降水率阈值大于 $3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,模型1模拟值高估现象得到明显改善,当阈值大于 $7\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,模型2模拟值高估现象也得到改善(图9c)。从ETS评分(图9d)可见,当阈值小于 $3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,模型1模拟值的ETS评分优于模型2,当阈值大于 $3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,反之。同时,当TC中心在海上时两种模型均表现更优。

5 结论与讨论

基于1998—2011年CMA台风最佳路径数据集、1998—2011年TRMM和2007—2011年FY2C/2E卫星

降水数据资料,利用全局参数拟合化方法提取热带气旋(TC)降水场和径向平均降水廓线,得到R-CLIPER在西北太平洋地区本地化的最优参数解;然后,以2009—2021年CMA台风最佳路径数据集资料为输入,利用本地化降水模型(模型1和模型2)对TC降水进行模拟,结合2012—2013年TRMM和2009—2021年地面雨量计观测降水数据,对模型拟合效果评估及降水落区评估。得出主要结论如下:

(1) 基于TRMM卫星反演降水率估计数据(空间分辨率 0.25° , 19 647幅)统计得到TC径向廓线在 r_m 附近的降水峰值区变化相对剧烈,而基于FY2C/2E卫星降水估计数据(空间分辨率 0.01° , 10 877幅)的空间分辨率更高,其降水廓线峰值区更平滑。

(2) 通过全局拟合参数化方法,得到适合西北太平洋TC降水特征的模型1和模型2的参数值。

(3) TRMM降水廓线参数化的RMSE为 $0.28\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, FY廓线参数化的RMSE为 $0.51\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。针对TRMM廓线拟合结果,使用参数化拟合方法,可将R-CLIPER通用模型降水预测准确度提升5.5%;同时,基于站点实测数据评估发现当降水率阈值小于 $3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$,模型1模拟值的ETS评分优于模型2,当阈值大于 $3\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时模型2模拟值的ETS评分优于模型1,且两种模型均表现出当TC中心位于海上时评分更优。

本文构建的方法可为TC降水数值预报客观评价和定量风险评估提供一定的支撑,但仅是对R-CLIPER模型本地化的初步研究。从评估结果可以看出,模型误差受模型数据精度、拟合方法、模型框架、参数化方案等综合作用影响,包括降水廓线统计过程产生的初始误差、数据源本身因观测仪器、观测方法、数据制作等方法产生的数据误差、参数化及拟合等过程产生的方法误差等。因此,为了使模型更适应预报预测业务,后续可以从模型框架、不对称性降水参数化、地形参数化、湿度参数化等方面持续改进,不断提升R-CLIPER-WNP的精度和适用性。

参考文献(References):

- 黄萍.2015.遥感降雨产品及其在极端降雨事件监测评估中的应用[D].北京:中国水利水电科学研究院. Huang P. 2015. Applications of remote sensing precipitation products in extreme rainfall event monitoring and assessment [D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research (in Chinese)
- 金华市气象局,浙江省气象科学研究所,杭州师范大学. 2023. 热带气旋径向降水模型构建方法及装置、存储介质和终端[P]. 中国:202310127948.2. Jinhua Meteorological Bureau, Zhejiang Meteorological Science Institute, Hangzhou Normal University. 2023. Method, device, storage medium and terminal for constructing tropical cyclone radial precipitation model [P]. China:202310127948.2
- 李颖,方伟华.2013.热带气旋降水模拟研究进展[J].地理科学进展,32(4):606-617. Li Y, Fang W H. 2013. Review on modeling of tropical cyclone rainfall [J]. Progress in Geography,32(4):606-617 (in Chinese). doi:10.11820/dlkxjz.2013.04.013
- 廖小露,田玉刚,刘嘉. 2011. 基于先验特征的台风云系影像分割方法研究[J]. 国土资源遥感,23(3):37-42. Liao X L, Tian Y G, Liu J. 2011. Research on the typhoon segmentation method with priori features [J]. Remote Sensing for Natural Resources,23(3):37-42. doi:10.6046/gtzyg.2011.03.07
- 邱金晶,陈锋,董美莹,等.2014.快速更新同化预报系统预报性能的检验与分析[J].浙江气象,35(4):1-6. Qiu J J, Chen F, Dong M Y, et al. 2014. Evaluation and analysis of the forecasting performance of the rapid refresh system [J]. Journal of Zhejiang Meteorology,35(4):1-6. doi:10.3969/j.issn.1004-5953.2014.04.001
- 新华社.2022.河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告公布[J].中国防汛抗旱,32(2):插页. Xinhua News Agency. 2022. Investigation report of "July 20" heavy rain disaster in Zhengzhou, Henan province [J]. China Flood and Drought Management,32(2):Insert (in Chinese)
- 浙江省气象科学研究所,金华市气象局,杭州师范大学. 2022. 热带气旋降水模型构建方法、终端及介质[P]. 中国:202211627422.2. Zhejiang Meteorological Science Institute, Jinhua Meteorological Bureau, Hangzhou Normal University. 2022. Method, terminal and medium for constructing tropical cyclone precipitation model [P]. China: 202211627422.2
- 中国气象局. 2011—2020. 中国气象灾害年鉴[M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration. 2011—2020. China meteorological disaster yearbook [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 中国气象局. 2017. 中国气象灾害年鉴(2017)[M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration. 2017. China meteorological disaster yearbook (2017) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 中国气象局. 2020. 中国气象灾害年鉴(2020)[M].北京:气象出版社. China Meteorological Administration. 2020. China meteorological disaster yearbook (2020) [M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- Brackins J T, Kalyanapu A J. 2020. Evaluation of parametric precipitation models in reproducing tropical cyclone rainfall patterns [J]. Journal of Hydrology,580:124255. doi:10.1016/j.jhydrol.2019.124255
- DeMaria M, Tuleya R E. 2001. Evaluation of quantitative precipitation forecasts from the GFDL hurricane model [C]//Precipitation Extremes: Prediction, Impacts, and Responses
- FEMA. 2022. HAZUS hurricane model technical manual (HAZUS 5.1) [R]. [2023-4-20]. www.fema.gov/flood-maps/products-tools/hazus
- Fernández-Alvarez J C, Pérez-Alarcon A, Batista-Leyva A J, et al. 2020. Evaluation of precipitation forecast of system: Numerical tools for hurricane forecast [J]. Advances in Meteorology,2020:8815949. doi:10.1155/2020/8815949
- Grieser J, Jewson S. 2012. The RMS TC-rain model [J]. Meteorologische Zeitschrift,21(1):79-88. doi:10.1127/0941-2948/2012/0265
- Gu J, Cui X, Hong H.2022. A statistical-based model for typhoon rain hazard assessment [J]. Atmosphere,13(8):1172. doi:10.3390/atmos13081172
- Kim D, Park D-S R, Nam C C, et al. 2022. The parametric hurricane rainfall model with moisture and its application to climate change projections [J]. Npj Climate And Atmospheric Science,5(1):86. doi:10.1038/s41612-022-00308-9
- Knutson T R, Mcbride J, Chan J, et al. 2010. Tropical cyclones and climate change [J]. Nature Geoscience,3:157-163. doi:10.1038/ngeo779
- Lonfat M, Marks Jr F D, Chen S S. 2004. Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) microwave imager: A global perspective [J]. Monthly Weather Review, 132(7):1645-1660. doi:10.1175/1520-0493(2004)132<1645:PDITCU>2.0.CO;2
- Lonfat M, Rogers R, Marchok T, et al. 2007. A parametric model for predicting hurricane rainfall [J]. Monthly Weather Review,135(9):3086-3097. doi:10.1175/MWR3433.1
- Lu X, Yu H, Ying M, et al. 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. Advances in Atmospheric Sciences,38:690-699. doi:10.1007/s00376-020-0211-7
- Marks F, Kappler G, DeMaria M. 2002. Development of a tropical cyclone rainfall climatology and persistence (R-CLIPER) Model [C]//Reprints of the 25th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. AMS. San Diego, CA:327-328
- Tuleya R E, Demara M, Kuligowski R J. 2007. Evaluation of GFDL and simple statistical model rainfall forecasts for U.S. landfalling tropical storms [J]. Weather and Forecasting,22(1):56-70. doi:10.1175/WAF972.1
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology,31:287-301. doi:10.1175/JTECH-D-12-00119.1