

李易芝, 罗伯良, 彭莉莉, 等, 2023. 湖南 6 月区域持续性暴雨概率预报模型及应用[J]. 气象, 49(11):1384-1395. Li Y Z, Luo B L, Peng L L, et al, 2023. Probabilistic forecasting model of regional persistent rainstorm in June in Hunan and its application[J]. Meteor Mon, 49(11):1384-1395(in Chinese).

## 湖南 6 月区域持续性暴雨概率预报模型及应用<sup>\*</sup>

李易芝<sup>1,2</sup> 罗伯良<sup>1,2</sup> 彭莉莉<sup>1,2</sup> 张超<sup>1,2</sup> 彭晶晶<sup>3</sup>

1 湖南省气象科学研究所, 长沙 410118

2 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 长沙 410118

3 长沙市气象局, 长沙 410205

**提 要:** 利用 1979—2016 年 6 月 EAR5 再分析资料, 选取湿热力平流参数、热力螺旋度、散度通量、水汽散度通量和热力波作用密度 5 个综合因子, 采用核密度估计方法, 基于 TS 评分最优为检验标准筛选确立最优因子和权重组合, 构建了湖南区域持续性暴雨概率预报模型, 并进行了独立样本检验与业务试用。结果表明: 2017—2019 年独立样本回代检验, 平均 TS 评分达到 29.9%, 相比于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)细网格(平均 TS 评分为 22.4%)为正技巧。在 2021 年、2022 年汛期两次区域持续性暴雨个例的预报试验中, 提前 24 h 的暴雨预报优于 ECMWF、CMA-GFS 等大尺度模式和 CMA-SH、CMA-GD 等区域中尺度模式, 对湖南区域持续性暴雨有较强的预报能力。

**关键词:** 核密度估计, 概率预报, 区域持续性暴雨, 湖南

**中图分类号:** P456

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.051602

## Probabilistic Forecasting Model of Regional Persistent Rainstorm in June in Hunan and Its Application

LI Yizhi<sup>1,2</sup> LUO Bailiang<sup>1,2</sup> PENG Lili<sup>1,2</sup> ZHANG Chao<sup>1,2</sup> PENG Jingjing<sup>3</sup>

1 Hunan Institute of Meteorological Sciences, Changsha 410118

2 Hunan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Changsha 410118

3 Changsha Meteorological Bureau, Changsha 410205

**Abstract:** Based on the EAR5 reanalysis data in June from 1979 to 2016, the moist thermodynamic advection parameter, thermal helicity, divergence flux, moisture divergence flux and the thermodynamic wave-activity density are selected as five comprehensive factors. The probability prediction model of regional persistent rainstorm in Hunan is constructed by the means of nuclear density estimation and based on the optimal factor and weight combination which is established with the best TS score as the test standard. The results show that the average TS of independent samples from 2017 to 2019 reaches 29.9%, which is a positive skill relative to the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) fine grid forecast (with an average TS score of 22.4%). During the two regional persistent rainstorm operational experiments in the 2021 and 2022 flood seasons, the rainstorm forecast with a 24 h leadtime by the Hunan regional persistent rainstorm probability prediction model is superior to the forecasts of ECMWF and CMA-GFS large-scale model as well as CMA-SH and CMA-GD regional mesoscale model. Therefore, the

<sup>\*</sup> 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50318)资助

2022 年 11 月 1 日收稿; 2023 年 6 月 19 日收修定稿

第一作者: 李易芝, 主要从事灾害性天气气候诊断分析与预测研究. E-mail: girl.lyz@163.com

通讯作者: 罗伯良, 主要从事气象灾害诊断分析与预测研究. E-mail: luobailiang@163.com

Hunan regional persistent rainstorm probability prediction model has a strong ability to forecast the regional persistent rainstorm in Hunan.

**Key words:** nuclear density estimation, probabilistic forecasting, regional persistent rainstorm, Hunan

## 引 言

暴雨是湖南省汛期主要的灾害性天气之一,其中持续性暴雨过程由于其持续时间长、影响范围广,常给人民群众带来巨大的生命财产损失(陈红专等,2019;戴泽军等,2019;彭莉莉等,2018;王钦和曾波,2022;杨志军等,2018)。因此,如何准确及时地做好持续性暴雨落区预报,建立客观暴雨落区概率预报系统,对预报业务能力提升和防灾减灾工作具有重大现实意义(张萍萍等,2012)。

降水是一定气候背景下各种尺度系统相互作用所形成的结果,同时也受下垫面的影响,因此相对于温度、气压等气象要素场的预报,降水本身具有较大的随机性与不确定性(周晓敏等,2023)。降水呈偏态分布,用能描述其出现可能性大小的形式即降水概率进行预报,较传统的确定性预报可提供更丰富的预报信息(林春泽等,2013;赵琳娜等,2015)。近年来,国内很多学者在降水概率预报方面做了大量的研究,一部分研究基于实况的概率分布提取降水预报指标,如高洁和漆梁波(2015)针对上海市短时强降水分析了其地理分布和概率分布特征,得到降水极端性与暴雨红色预警标准的对应关系。李文娟等(2017)以杭州市区为例,利用探空资料分析不同量级小时雨强出现的环境指标,并基于核密度估计方法提取短时强降水预报指标。一部分研究利用单模式分布函数生成概率预报,如张宇彤等(2016)利用 T213 模式的集合预报历史资料探讨了极端降水的概率预报方法,指出经过贝叶斯方法修订后,提高了极端降水预报的正确率,但是空报也有所增加。徐姝等(2021)动态建立了海河流域内基于 ECMWF 集合预报 289 个格点的贝叶斯产品处理技术降水概率预报模型,预报评分结果优于集合预报的直接概率预报结果。有研究指出多模式集成提升了预报可靠性,预报技巧优于单模式,如:祁海霞等(2020)基于 TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) 资料中的四套模式逐日降水集合预报资料,结合清江流域 10 个国家基准站观测数据,建立了流域贝叶斯模型平均(Bayesian model averaging,

BMA) 概率预报模型,开展流域多模式集合 BMA 技术的概率预报试验与评估,结果表明 BMA 模型预报比原始集合预报有更高预报技巧。Vigaud et al(2017)对单模式逐点预报结果进行扩展逻辑回归,通过对多个模式预报概率等权平均,得到可靠性高但锐度较低的概率预报结果,发现多模式集成在很大程度上消除了单模式的负面预报技巧。赵渊明和漆梁波(2021)应用分位数频率匹配法对模式 1 h 降水预报分别订正,基于上游关键区域检验结果,采用动态权重多模式集成技术,对下游地区开展多模式短时强降水集成概率预报,结果提高了预报的准确性和稳定性。此外,另有部分研究基于诊断要素的概率分布,结合数值模式产品制作降水概率预报。如钟敏等(2022)基于 CMA-MESO 模式,统计不同等级短时强降水样本的物理量数值分布特征,基于升、降半岭隶属函数建立短时强降水概率预报模型,为分级短时强降水预报提供技术支撑和参考依据。李明(2017)针对陕南短时强降水,优选对流参数,确定其权重和对流参数历史概率分布特征值,建立基于数值模式基本产品的短时强降水分月的客观概率预报模型。

高守亭等(2013)、冉令坤等(2014)在暴雨预报热力动力诊断研究中,研究了能够准确描述湿空气热力状态的广义位温理论以及表征中尺度系统发展演变的中尺度波流相互作用理论,在这个基础上,建立了多个包含动力、热力和水汽等信息的综合性动力因子(以下简称综合因子)。其中,湿热力平流参数能够较好地反映降水区上空垂直暖平流和等熵面水平梯度显著的动力和热力垂直结构特点,与观测降水的空间分布形态有较好的对应关系(高守亭等,2013);热力螺旋度体现了垂直热量通量与相对垂直涡度的耦合作用,也包含了大气湿斜压性等信息,适用于分析垂直上升运动强烈、涡旋运动显著并伴有水平气流的辐合辐散以及湿斜压性明显的降水系统(高守亭等,2013);散度通量代表水平散度的垂直通量,为了体现水汽效应,引入了水汽散度通量,表征垂直上升运动和水汽通量的辐合效应,该综合因子可以弱化对流层高层和非雨区的动力场结构(冉令坤和楚艳丽,2009);热力波作用密度能够反映偏离

大气平均态的波动效应,利用该综合因子可以进行夏季局地化的暴雨预报(高守亭等,2018)。这些综合因子对暴雨落区的预报能力,已在多个地区、多个个例中得到了验证(杨帅等,2013;汪亚萍等,2015;李琴等,2016;苏冉等,2019)。李易芝等(2020)研究湖南持续性暴雨动力因子诊断分析时发现,湿热力平流参数、热力螺旋度、散度通量、水汽散度通量、热力波作用密度 5 个综合因子对湖南暴雨具有指示意义。彭莉莉等(2018)研究指出湖南区域持续性暴雨主要发生在 6 月,其占比达 40.2%。因此本文针对湖南 6 月区域持续性暴雨,采用核密度估计方法,构建基于湿热力平流参数、热力螺旋度、散度通量、水汽散度通量、热力波作用密度这 5 个综合因子的湖南区域持续性暴雨落区概率预报模型,为湖南区域持续性暴雨概率预报提供客观技术支持。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文所用资料包括:(1)1979—2022 年 6 月湖南省 88 个国家气象站(以下简称国家站)逐日降水数据;(2)背景场资料为 1979—2019 年 6 月 ERA5 再分析资料,计算预报因子所用的资料为 2021—2022 年 6 月欧洲中心全球中期数值天气预报(ECMWF,以下简称 EC)细网格逐日 08 时(北京时间,下同)发布的逐 6 h 间隔的资料,水平分辨率均为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ,包括 1000~100 hPa 共 19 层的位势高度、气温、相对湿度、水平风速、垂直风速等;(3)数值模式资料选取 2017—2022 年 6 月 EC 细网格、中国气象局全球同化预报系统(以下简称 CMA-GFS)、中国气象局上海数值预报模式系统(以下简称 CMA-SH)、中国气象局广东快速更新同化数值预报系统(以下简称 CMA-GD)逐日 08 时发布的资料,预报时效为未来 24~48、48~72、72~96 h。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 核密度估计

核密度估计由 Rosenblatt (1956) 和 Parzen (1962) 提出,是由样本去估计总体的概率分布密度函数,属于非参数检验方法之一。与参数估计方法相比,其优点在于对观测资料的分布不附加任何假定,也不需要了解分布的先验知识,利用样本数据直

接得到函数的密度估计,从而对数据进行可视化的解释(阚亚进,2020)。通过密度分布可对比不同组数值的分布形状以及不同组之间的重叠程度,是一种观察连续型变量分布的有效方法(李文娟等,2017)。假设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  为独立分布的  $n$  个样本点,设其概率密度函数为  $f$ ,则某一个样本点  $x_i$  的概率密度  $f(x)$  可由式(1)计算:

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x-x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式中:  $K\left(\frac{x-x_i}{h}\right)$  为核密度估计函数(核函数),  $h$  为窗宽,其决定核函数的方差。核函数有很多种形式,本文采用数学性质较好的标准高斯函数作为核函数,取:

$$K(u) = (1/\sqrt{2\pi})e^{-\frac{u^2}{2}} \quad (2)$$

窗宽的选择在非参数核密度估计中非常重要,窗宽选择过小,会使密度函数呈不规则的形状,可能掩盖样本的重要特征;窗宽选择过大,会使密度函数过度平均化,导致样本较细致的特征不能显露(聂明秋等,2020)。当选择高斯型核函数拟合样本时,最优窗宽值可以用式(3)计算(马明卫和宋松柏,2011):

$$h_d = \left[ \frac{4}{n(p+2)} \right]^{\frac{1}{p+4}} \sigma_d \quad (3)$$

式中:  $h_d$  为最优窗宽;  $\sigma_d$  为  $d$  维变量分布的标准差;  $p$  表示变量的维度,单变量、双变量的核密度估计分别取  $p=1$ 、 $p=2$ 。

#### 1.2.2 检验方法

选用 TS 评分、命中率、空报率和漏报率(刘松楠等,2022;牛淑贞等,2021),对湖南区域持续性暴雨概率预报进行检验。

#### 1.2.3 区域持续性暴雨过程定义

彭莉莉等(2018)根据湖南汛期区域持续性暴雨致灾性临界要求,提出了湖南汛期区域持续性暴雨过程的标准。即:①湖南境内至少 9 个国家站出现日降水量超过 50 mm 的区域性暴雨;②区域性暴雨持续 2 d 及以上。

## 2 湖南区域持续性暴雨概率预报因子选取及模型建立

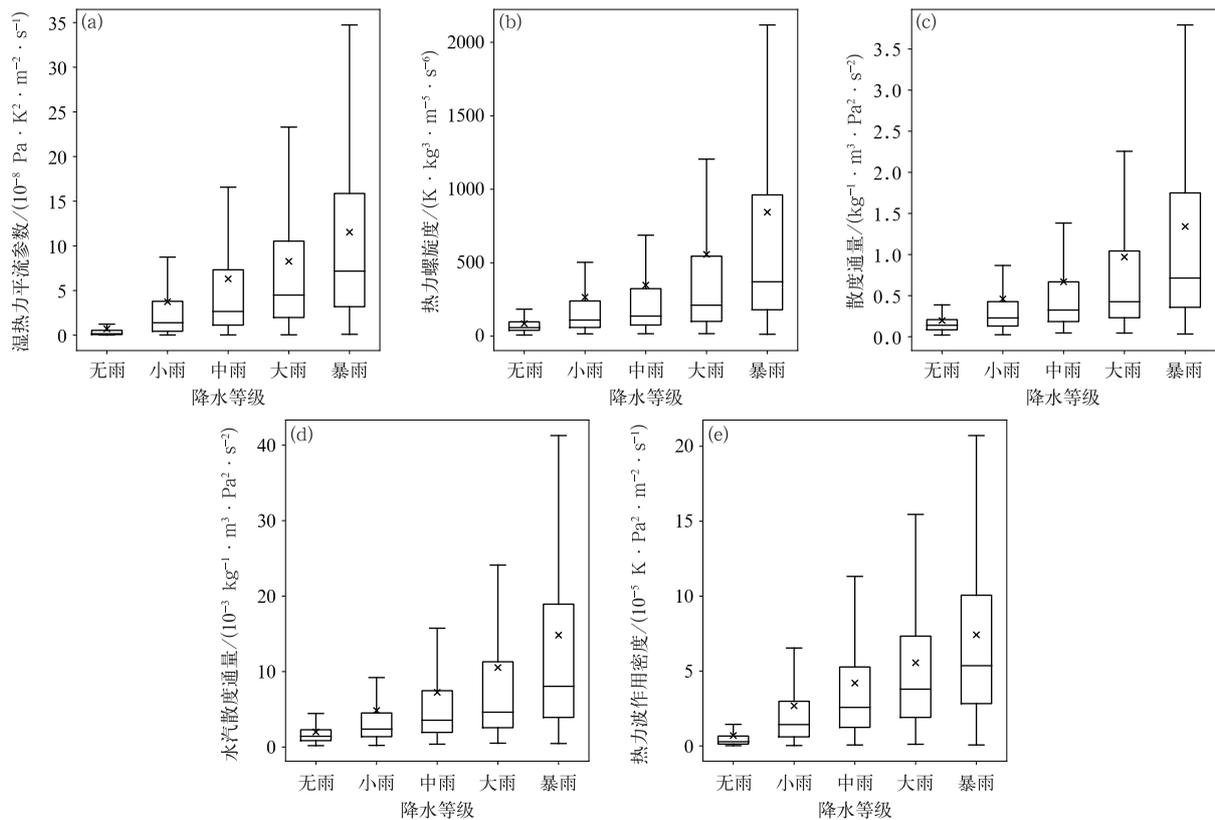
### 2.1 湖南区域持续性暴雨预报因子特征分析

暴雨的形成必须具有一定的宏观物理条件,其

中降水时间也非常重要(程庚福和曾申江,1987)。有时仅 1 小时就能出现暴雨,有时可持续几十小时,如果将每日间隔 6 h、5 个时次的要素值进行日平均,会平滑一些极大值,滤除短时强降水造成的暴雨过程;若是取 5 个时次的最大值,则会对持续时间长但短时强降水不大的暴雨造成漏报。因此,预报因子选择每日 5 个时次中最大的 2 个时次的平均作为逐日要素值(陈圣劼等,2016)。每天选取 5 个时次是由于动力因子是瞬时量,为了更全面地捕捉 24 h 内引起降水的动力因子信息,增加了第二日的起始时间作为前一日的结束时间。

本文预报因子选取与暴雨系统密切相关的湿热力平流参数、热力螺旋度、散度通量、水汽散度通量、

热力波作用密度 5 个综合因子。图 1 给出 1979—2016 年湖南 6 月 33 个区域持续性暴雨过程中(共 86 个暴雨日)不同等级降水站点 5 个综合因子的箱线图,可以看出 5 个综合因子在不同等级降水的分布不同。即:无雨时,综合因子的平均值及各百分位阈值均集中在 0 附近;降水量级越大,综合因子的平均值及各百分位值(包括下四分位数、中位数、上四分位数及最大值)也越大;尤其在发生区域持续性暴雨时,5 个综合因子的平均值及各百分位的阈值均明显大于发生其他等级降水时的相应值。这说明,选取的 5 个综合因子可以在区域持续性暴雨过程中作为区分暴雨与其他等级降水的预报因子。



注:箱线图中竖线的上下端分别表示统计的最大值和最小值,箱体内的三条横线自下而上依次为下四分位数、中位数、上四分位数,“×”为平均值。

图 1 1979—2016 年 6 月湖南区域持续性暴雨过程中不同等级降水站点的各综合因子箱线图

(a)湿热力平流参数,(b)热力螺旋度,(c)散度通量,(d)水汽散度通量,(e)热力波作用密度

Fig. 1 Box plots of each comprehensive factor for stations with different levels of precipitation during regional persistent rainstorm events in Hunan in June from 1979 to 2016

(a) moist thermodynamic advection parameter, (b) thermal helicity, (c) divergence flux, (d) moisture divergence flux, (e) thermodynamic wave activity density

## 2.2 湖南区域持续性暴雨概率预报模型构建和检验

### 2.2.1 概率密度估计

利用 ERA5 再分析资料,插值计算出 1979—2016 年 6 月湖南发生区域持续性暴雨的站点上的

5 个综合因子值,并利用核密度估计确定出现区域持续性暴雨时各综合因子的累积概率密度函数。确定后,可计算超过任意给定综合因子阈值的累积概率,及相应累积概率超过某百分位值对应的综合因子值。图 2 为湖南区域持续性暴雨过程中出现不同等级降水时各综合因子的累积概率密度图。如图 2a

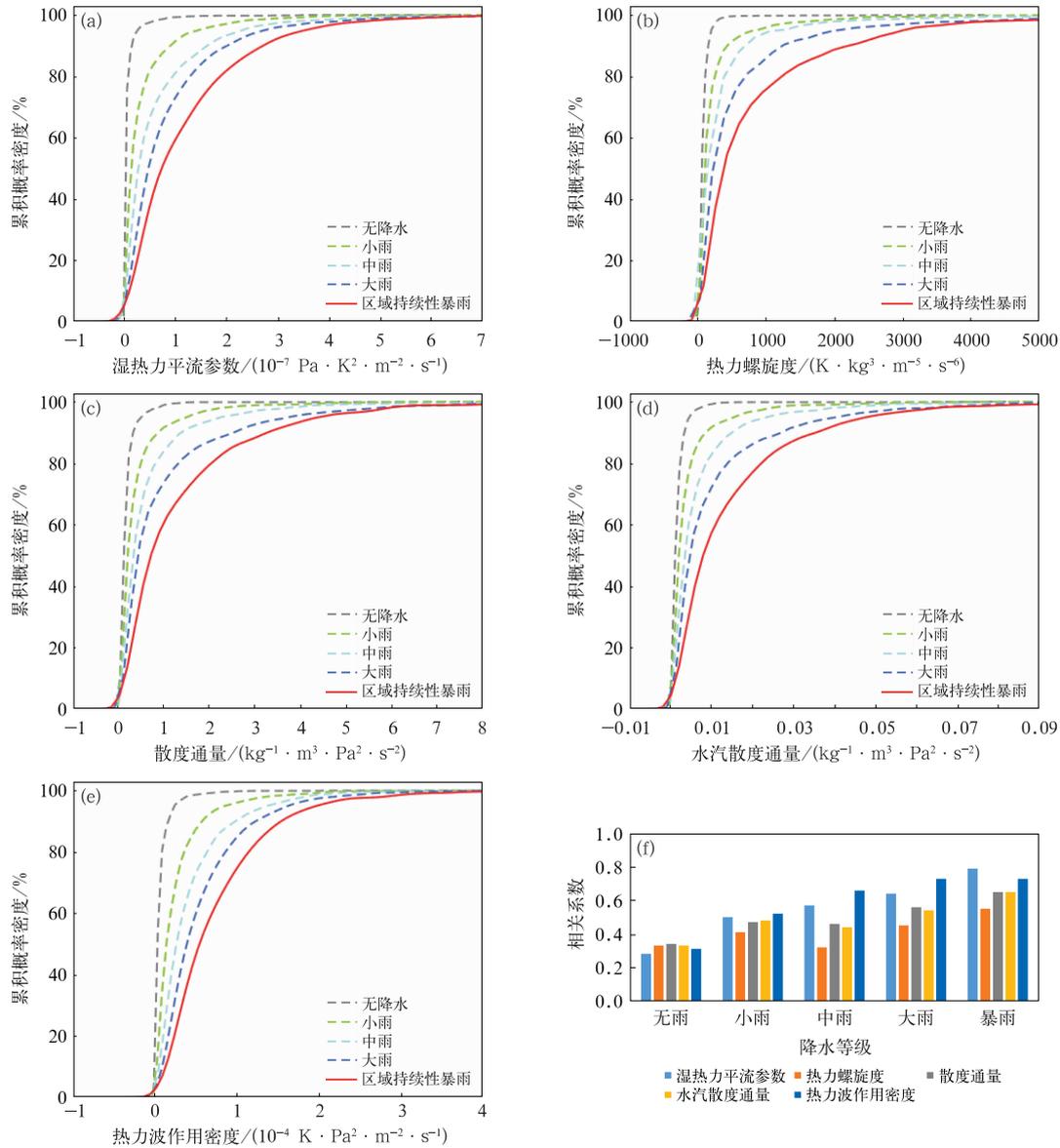


图 2 1979—2016 年 6 月湖南区域持续性暴雨过程中出现不同等级降水时(a~e)各综合因子的累积概率密度,及(f)各综合因子和累积概率密度的相关系数

(a)湿热力平流参数,(b)热力螺旋度,(c)散度通量,(d)水汽散度通量,(e)热力波作用密度

Fig. 2 (a–e) Cumulative probability density diagram of each comprehensive factor and (f) correlation coefficient of each comprehensive factor and cumulative probability density for different levels of rainfall in Hunan regional persistent rainstorm in June from 1979 to 2016

(a) moist thermodynamic advection parameter, (b) thermal helicity,

(c) divergence flux, (d) moisture divergence flux, (e) thermodynamic wave-activity density

所示,对于区域持续性暴雨样本,超过 63.5%的湿热力平流参数值小于发生持续性暴雨时湿热力平流参数的均值( $1.14 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{K}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 图 1)。由图 2 可见,当综合因子在同一值上时,随着降水等级的降低,发生各等级降水的累积概率密度变大。例如,当湿热力平流参数值为  $1.14 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{K}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时,发生区域持续性暴雨、大雨、中雨、小雨、无降水的累积概率密度分别为 63.5%、80.3%、86.1%、94.1%、99.2%。

图 2f 为湖南区域持续性暴雨过程中出现不同等级降水时各综合因子和累积概率密度的相关系数分布,可以看出随着降水量级的增大,各综合因子与累积概率密度值的相关系数也增大,在发生暴雨时,湿热力平流参数与累积概率密度值的相关系数最大,达到 0.79,其他综合因子与累积概率密度值的相关系数也均达到了 0.55 以上,通过了 0.001 的显著性水平检验。这说明在发生区域持续性暴雨过程中,各综合因子的累积概率密度值和综合因子的相关性较高,可以表征发生暴雨的概率。

2.2.2 权重和阈值的确定

基于 5 个综合因子的区域持续性暴雨累积概率

密度函数,可以确定 1979—2016 年 6 月区域持续性暴雨过程全省所有站点上发生暴雨的 5 个概率值,同时赋予 5 个概率值所有可能的动态权重,且分别从 20%至 80%逐 5%地增加概率值作为出现暴雨的阈值,计算发生区域持续性暴雨过程的 TS 评分。通过大样本验算,以平均 TS 评分为判别标准,最终筛选确立概率阈值、最优因子和权重组合,构建湖南区域持续性暴雨概率预报模型。由表 1 可知,当概率阈值取 40%时,所有区域持续性暴雨过程最优因子和权重组合计算出的平均 TS 评分最大。因此,本文确立了由湿热力平流参数、热力螺旋度、水汽散度通量和热力波作用密度 4 个因子构成的最优因子组合,其最优系数搭配为 0.1、0.6、0.1 和 0.2,并以概率值 40%作为暴雨发生的阈值。第三个预报因子散度通量在每个概率阈值下的最优权重组合中,其权重系数均为 0.0,说明该因子相比于其他 4 个综合因子对区域持续性暴雨的预报能力明显不足。这可能由于散度通量仅体现出水平散度的垂直通量,而区域持续性暴雨过程还需要足够的水汽作用,因此,相较之下体现了水汽通量散度垂直输送状况的第四个因子水汽散度通量更能发挥预报优势。

表 1 湖南区域持续性暴雨最优预报因子权重及预报效果

**Table 1 Optimal forecast factor weights and forecast effects of regional persistent rainstorms in Hunan**

概率阈值/%	TS 评分/%	湿热力平流参数	热力螺旋度	散度通量	水汽散度通量	热力波作用密度
80	18.68	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
75	20.92	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
70	23.08	0.0	0.0	0.0	8.0	0.2
65	24.46	0.0	0.1	0.0	9.0	0.0
60	25.50	0.0	0.1	0.0	0.3	0.6
55	26.41	0.1	0.2	0.0	0.7	0.0
50	27.17	0.1	0.2	0.0	0.4	0.3
45	27.83	0.2	0.7	0.0	0.0	0.1
40	27.93	0.1	0.6	0.0	0.1	0.2
35	27.53	0.2	0.3	0.0	0.3	0.2
30	26.79	0.3	0.5	0.0	0.1	0.1
25	25.60	0.5	0.4	0.0	0.0	0.1
20	24.51	0.6	0.1	0.0	0.0	0.3

2.2.3 独立样本检验

基于综合因子的湖南区域持续性暴雨概率预报模型,以 2017—2019 年 6 月的 4 次区域持续性暴雨过程(12 个暴雨日)作为独立样本,进行回代检验。图 3 为针对 12 个暴雨日湖南区域持续性暴雨概率预报模型和 EC 细网格提前 12 h 的暴雨预报 TS 评分、命中率、漏报率和空报率柱状分布。由图可知,

针对这 12 个暴雨日,湖南区域持续性暴雨概率预报平均命中率为 62.3%,EC 细网格降水预报产品平均命中率为 33.0%(图 3b),同时,在两者在空报率相差不大的情况下(图 3d),区域持续性暴雨概率预报模型的暴雨漏报率偏低明显(图 3c)。因此,从暴雨 TS 评分上看,湖南区域持续性暴雨概率预报模型(平均 TS 评分为 29.9%)相比于 EC 细网格(平

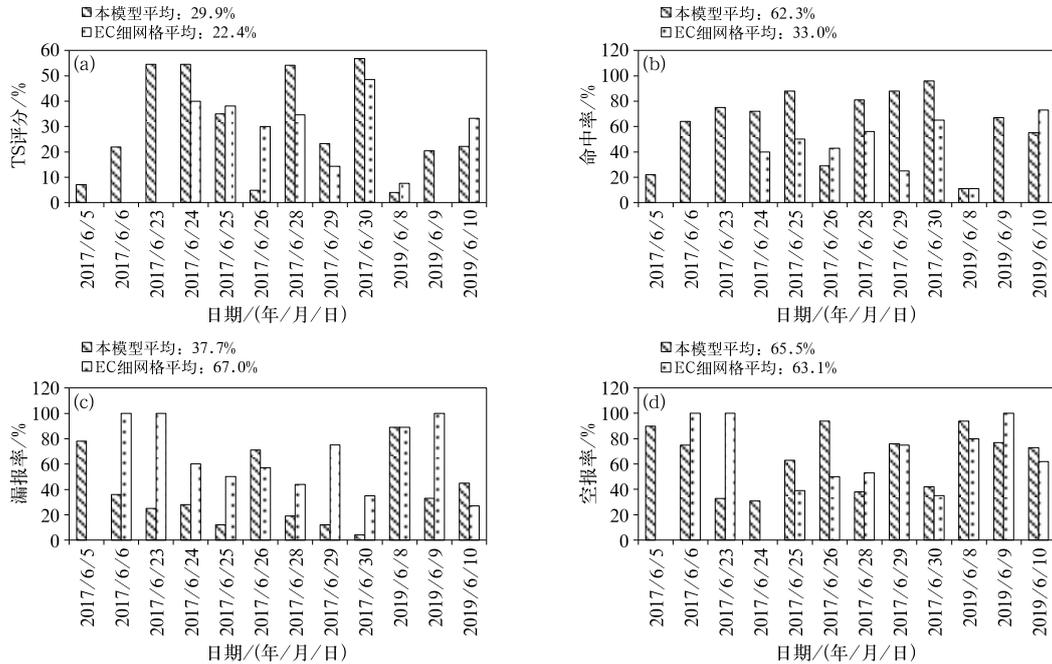


图3 2017—2019年12个暴雨日湖南区域持续性暴雨概率预报模型和EC细网格提前12h的暴雨预报(a)TS评分,(b)命中率,(c)漏报率,(d)空报率  
Fig. 3 (a) TS score, (b) accuracy rate, (c) miss rate, (d) false alarm rate of rainstorm for the regional persistent rainstorm probability prediction model and ECMWF fine mesh numerical forecast with lead time of 12 h from 2017 to 2019

均TS评分为22.4%)为正技巧(图3a)。尤其在2017年6月6日、2017年6月23日、2017年6月28日和2019年6月9日等暴雨日中,湖南区域持续性暴雨概率预报模型对暴雨的预报能力提高比较明显;其中,在2017年6月6日、2017年6月23日、2019年6月9日的暴雨日中,EC细网格预报评分为0.0%,而湖南省区域持续性暴雨概率预报模型评分均高于20%,漏报率和空报率均明显较低。

同时,增加选取2017—2019年6月9个站日降水量超过50mm的区域性暴雨过程(9个暴雨日)进行检验分析,发现利用湖南区域持续性暴雨概率预报模型的平均暴雨TS评分为12.5%,而EC细网格降水预报产品提前12h暴雨预报TS评分为10.6%(图略),说明该模型对于区域性暴雨过程也有一定的预报技巧,但是对湖南区域持续性暴雨过程的预报效果要明显优于区域性暴雨过程。由此说明利用ERA5再分析资料建模的预报优于EC模式自身的预报。

### 3 应用效果检验

基于前面构建的区域持续性暴雨落区概率预报

模型,选取发生在2021年6月29日至7月1日和2022年6月1—2日的两次区域持续性暴雨过程,开展和EC细网格及CMA-GFS、CMA-SH、CMA-GD模式降水预报产品的对比分析,检验该模型的业务应用效果。

#### 3.1 2021年6月29日至7月1日区域持续性暴雨过程

2021年6月29日至7月1日受西南暖湿气流和中低层低涡切变线共同影响,湘中及以北地区出现了一次区域持续性暴雨过程。对比湖南区域持续性暴雨概率预报模型和EC细网格08时起报的不同预报时效暴雨预报TS评分(表2),区域持续性暴雨概率预报模型提前72h和24h暴雨预报TS评分均高于EC细网格模式降水产品的暴雨预报评分,尤其是7月1日,该模型在三个预报时效的结果均优于EC细网格。

为了分析湖南区域持续性暴雨概率预报模型相比于其他大尺度模式和区域中尺度模式预报性能差异,分别对08时起报的24~48h的暴雨预报及TS评分进行分析(图4)。6月29日08时至30日08时,湖南省出现分散性暴雨和大暴雨天气,湘西州、

表 2 两次区域持续性暴雨过程的湖南区域持续性暴雨概率预报模型和 EC 细网格  
08 时起报 72~96、48~72、24~48 h 的暴雨预报 TS 评分 (单位: %)

Table 2 The TS scores of 72~96, 48~72, 24~48 h rainstorm forecast from 08:00 BT by Hunan regional persistent rainstorm probabilistic prediction model and ECMWF fine mesh numerical forecast model for the two regional persistent rainstorm processes (unit: %)

区域持续性暴雨过程	日期	湖南区域持续性暴雨概率预报模型			EC 细网格		
		72~96 h	48~72 h	24~48 h	72~96 h	48~72 h	24~48 h
2021 年 6 月 29 日至 7 月 1 日	6 月 29 日	14.0	16.2	9.9	10.6	18.3	5.9
	6 月 30 日	27.4	27.8	25.5	12.4	34.6	20.0
	7 月 1 日	21.2	22.4	23.6	5.8	21.4	11.5
2022 年 6 月 1—2 日	6 月 1 日	11.4	12.1	6.1	16.7	4.3	11.1
	6 月 2 日	29.0	23.0	30.6	9.6	0.0	3.3

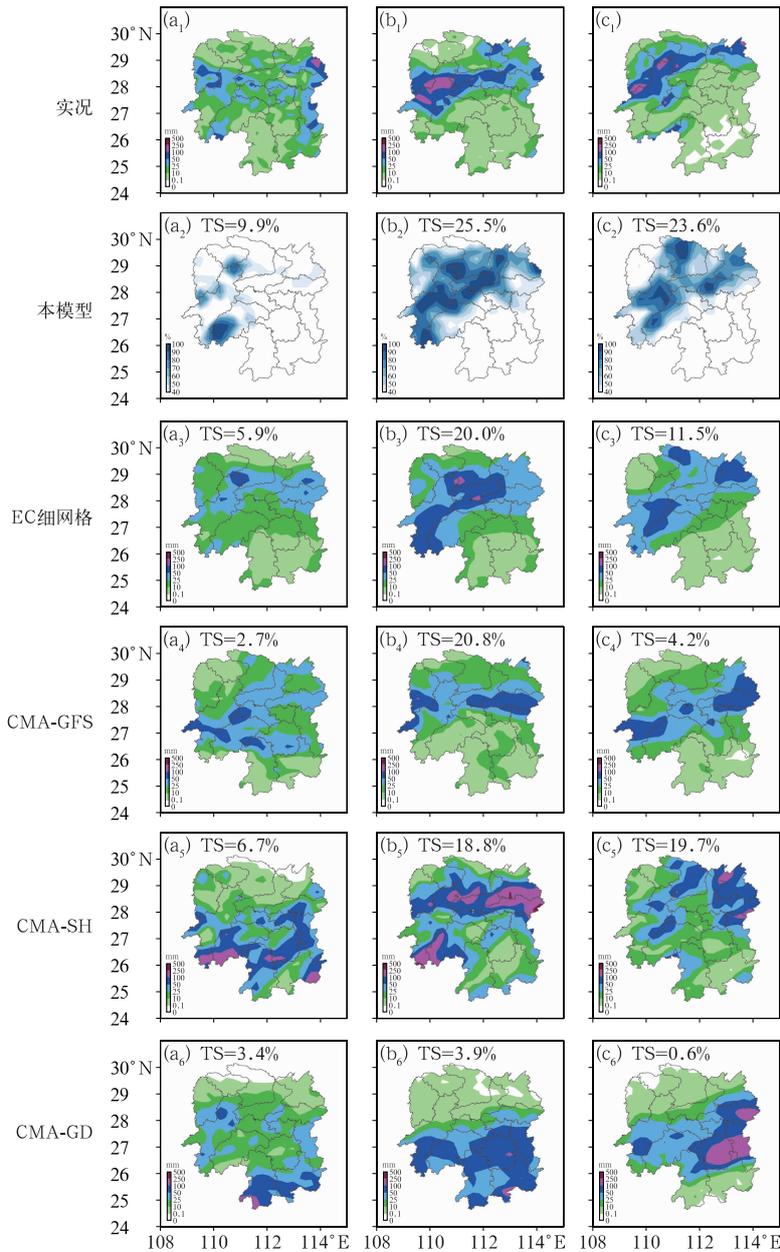


图 4 2021 年(a)6 月 29 日,(b)6 月 30 日,(c)7 月 1 日逐日(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>)降水实况,(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>)湖南区域持续性暴雨概率预报模型和(a<sub>3</sub>~ a<sub>6</sub>, b<sub>3</sub>~ b<sub>6</sub>, c<sub>3</sub>~ c<sub>6</sub>)不同模式 08 时起报的 24~48 h 的降水预报(填色)及 TS 评分  
Fig. 4 (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>) Daily precipitation on (a) 29 June, (b) 30 June and (c) 1 July 2021, as well as the 24-48 h rainstorm forecast starting from 08:00 BT and TS score forecasted by (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>) Hunan regional persistent rainstorm probability prediction model and (a<sub>3</sub>-a<sub>6</sub>, b<sub>3</sub>-b<sub>6</sub>, c<sub>3</sub>-c<sub>6</sub>) other models

常德等地区共 9 个国家站降水超过 50 mm(图 4a<sub>1</sub>), 对比预报结果, 区域持续性暴雨概率预报模型提前 24 h 暴雨预报评分均优于各模式降水产品, 但由于降水分散, 该模型对湘东一带的暴雨有漏报。6 月 30 日 08 时至 7 月 1 日 08 时, 降水加强, 雨带主要集中在湘中以北(图 4b<sub>1</sub>), 共 19 个国家站出现暴雨、3 个国家站出现大暴雨, 该模型对暴雨落区把握较好(TS 评分为 25.5%, 图 4b<sub>2</sub>), 比 EC 预报暴雨 TS 评分(20.0%)提高了 5.5%, 同时也优于 CMA-GFS、CMA-SH、CMA-GD 等模式(图 4b<sub>3</sub>~4b<sub>6</sub>)。7 月 1 日 08 时至 2 日 08 时, 雨带略有北抬, 湘西南部分地区也出现暴雨(图 4c<sub>1</sub>), 模型提前 24 h 预报暴雨 TS 评分最高, 为 23.6%(图 4c<sub>2</sub>), CMA-SH 模式次之, 为 19.7%(图 4c<sub>3</sub>), 其他模式提前 24 h 暴雨预报评分均低于 12%。

由此可知, 除 29 日和 30 日提前 48 h 预报, 其

余预报评分湖南区域持续性暴雨概率预报模型均高于 EC 细网格模式降水产品; 对比其他模式, 该模型在本次区域持续性暴雨过程中对暴雨落区的预报效果较好, 提前 24 h 的暴雨预报优于 EC、CMA-GFS 等大尺度模式和 CMA-SH、CMA-GD 等区域模式, 对湖南区域持续性暴雨的预报有明显的预报技巧。

### 3.2 2022 年 6 月 1—2 日区域持续性暴雨过程

2022 年 6 月 1—2 日, 受高空槽和低层低涡切变的影响, 湖南出现了一次区域持续性暴雨过程。由表 2 可知, 1 日提前 48 h 预报湖南区域持续性暴雨概率预报模型表现较好, 高出 EC 细网格 7.8%; 2 日湖南区域持续性暴雨概率预报模型三个预报时效的表现均优于 EC 细网格预报产品。

图 5 为 2022 年 6 月 1—2 日逐日降水实况及湖南区域持续性暴雨概率预报模型和 EC 细网格、

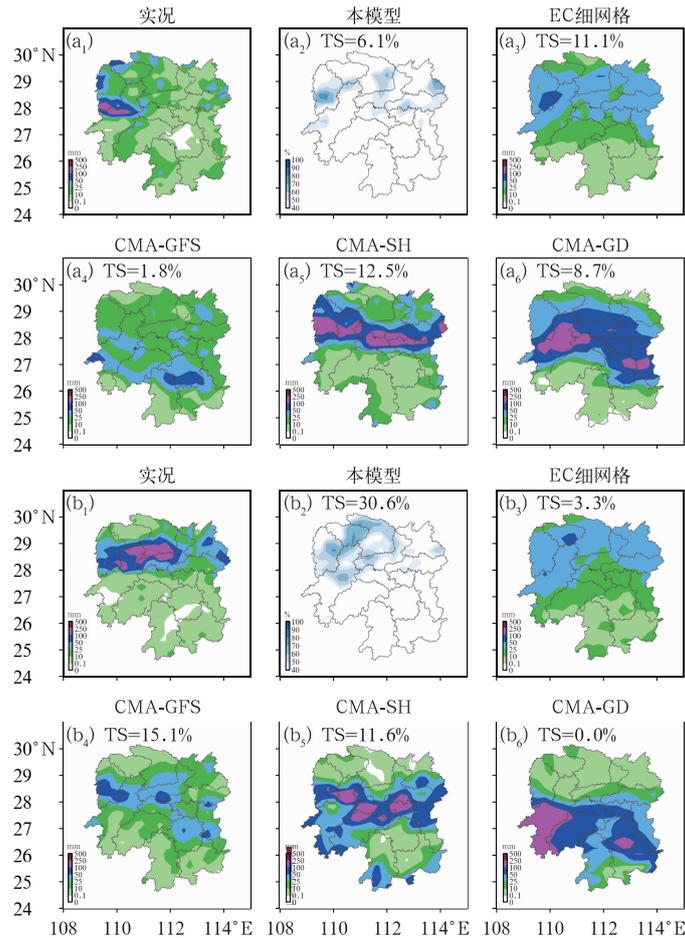


图 5 2022 年 6 月(a)1 日,(b)2 日逐日(a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>)降水实况,(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>)湖南区域持续性暴雨概率预报模型和(a<sub>3</sub>~a<sub>6</sub>, b<sub>3</sub>~b<sub>6</sub>)不同模式 08 时起报的 24~48 h 的降水预报(填色)及 TS 评分

Fig. 5 (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>) Daily precipitation on (a) 1 and (b) 2 June 2022, as well as the 24-48 h rainstorm forecast starting from 08:00 BT and TS score forecasted by(a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>) Hunan regional persistent rainstorm probabilistic prediction model and (a<sub>3</sub>-a<sub>6</sub>, b<sub>3</sub>-b<sub>6</sub>) other models

CMA-GFS、CMA-SH、CMA-GD 模式 08 时起报的 24~48 h 的暴雨预报及 TS 评分。1 日 08 时至 2 日 08 时暴雨主要分布在湘西地区(图 5a<sub>1</sub>),模型 1 日提前 24 h 暴雨预报对湘西州北部和张家界西北部的局地暴雨有所漏报,TS 评分仅为 6.1%(图 5a<sub>2</sub>),低于 EC 细网格(11.1%)、CMA-SH(12.5%)及 CMA-GD(8.7%)(图 5a<sub>3</sub>,5a<sub>5</sub>,5a<sub>6</sub>),但是 CMA-SH 和 CMA-GD 两家中尺度模式对暴雨落区范围预报偏大,强度偏强;2 日 08 时至 3 日 08 时随着切变线北抬,暴雨雨带也向北移动到湘北地区,并且降水加强,雨带范围扩大(图 5b<sub>1</sub>),针对 2 日的预报,模型提前 24 h 预报雨带落区位置较为准确,TS 评分为 30.6%(图 5b<sub>2</sub>),相对其他模式表现最优,其中 EC 细网格(图 5b<sub>3</sub>)和 CMA-GFS(图 5b<sub>4</sub>)预报暴雨落区和强度偏小,CMA-SH(图 5b<sub>5</sub>)和 CMA-GD(图 5b<sub>6</sub>)预报暴雨雨带落区较实况偏南。

综合可见,湖南区域持续性暴雨概率预报模型对暴雨落区的预报把握较好,相对其他模式比较稳定,有一定的预报技巧。

## 4 结论与讨论

利用 1979—2016 年 6 月 ERA5 再分析资料,选取湿热力平流参数、热力螺旋度、散度垂直通量、水汽散度通量和热力波作用密度 5 个综合因子,采用核密度估计方法,基于 TS 评分最优为检验标准筛选确立最优因子和权重组合,构建了湖南 6 月区域持续性暴雨概率预报模型,得到如下结论:

(1)该模型确立了由湿热力平流参数、热力螺旋度、水汽散度通量和热力波作用密度 4 个因子的最优因子组合,其最优系数搭配为 0.1、0.6、0.1 和 0.2,且以概率值 40% 作为暴雨发生的阈值。2017—2019 年 6 月区域持续性暴雨过程独立样本进行回代检验,平均 TS 评分达到 29.9%,相比于 EC 细网格提前 12 h 暴雨预报(TS 评分为 22.4%)为正技巧。

(2)2021 年 6 月 29 日至 7 月 1 日和 2022 年 6 月 1—2 日两次区域持续性暴雨预报,该模型提前 24 h 的暴雨预报优于 ECMWF、CMA-GFS 等大尺度模式和 CMA-SH、CMA-GD 等区域中尺度模式,对湖南区域持续性暴雨有较强的预报能力。

但该方法对分散型暴雨过程落区预报效果较差,对成片的暴雨预报效果相对较好,还需要进一步提高该方法的预报性能。其次,鉴于湖南不同月份不同类型区域持续性暴雨过程发生影响系统和因子存在区别,有必要相应分别建立区域持续性暴雨概率预报模型,提高预报技巧,这有待今后深化研究。

## 参考文献

- 陈红专,叶成志,陈静静,等,2019. 2017 年盛夏湖南持续性暴雨过程的水汽输送和收支特征分析[J]. 气象,45(9):1213-1226. Chen H Z, Ye C Z, Chen J J, et al, 2019. Analysis of water vapor transport and budget during persistent heavy rainfall over Hunan Province in June 2017[J]. Meteor Mon, 45(9): 1213-1226 (in Chinese).
- 陈圣劼,孙燕,刘安宁,等,2016. 江苏暴雨概率预报及其业务应用[J]. 气象科学,36(2):269-274. Chen S J, Sun Y, Liu A N, et al, 2016. Application of the heavy rainfall probability forecast in Jiangsu[J]. J Meteor Sci, 36(2): 269-274 (in Chinese).
- 程庚福,曾申江,1987. 湖南天气及其预报[M]. 北京:气象出版社. Cheng G F, Zeng S J, 1987. Hunan weather and its forecast[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese).
- 戴泽军,蔡荣辉,彭莉莉,等,2019. 湖南持续性区域暴雨气候特征及暴雨落区分型[J]. 高原气象,38(3):573-582. Dai Z J, Cai R H, Peng L L, et al, 2019. Climatic characteristics of regional persistent heavy rain and heavy rainfall pattern over Hunan[J]. Plateau Meteor, 38(3): 573-582 (in Chinese).
- 高洁,漆梁波,2015. 上海地区短时强降水特点及其影响[J]. 气象与环境科学,38(3):52-60. Gao J, Qi L B, 2015. Characteristics and influence of short duration heavy rainfall in Shanghai[J]. Meteor Environ Sci, 38(3): 52-60 (in Chinese).
- 高守亭,冉令坤,李娜,等,2013. 集合动力因子暴雨预报方法研究[J]. 暴雨灾害,32(4):289-302. Gao S T, Ran L K, Li N, et al, 2013. The "ensemble dynamic factors" approach to predict rainstorm[J]. Torr Rain Dis, 32(4): 289-302 (in Chinese).
- 高守亭,周玉淑,冉令坤,2018. 我国暴雨形成机理及预报方法研究进展[J]. 大气科学,42(4):833-846. Gao S T, Zhou Y S, Ran L K, 2018. A review on the formation mechanisms and forecast methods for torrential rain in China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(4): 833-846 (in Chinese).
- 阚亚进,2020. 地面气温观测资料时空变化特征及其质量控制方法研究[D]. 南京:南京信息工程大学. Kan Y J, 2020. Research on spatio-temporal variation characteristics and quality control method for surface air temperature observations[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology (in Chinese).
- 李明,2017. 基于 ECMWF 细网格模式的短时强降水客观概率预报方法研究[J]. 热带气象学报,33(6):812-821. Li M, 2017. Study

- of the objective probability forecast method for short-term heavy rain based on ECMWF fine-mesh model[J]. *J Trop Meteor*, 33(6):812-821(in Chinese).
- 李琴, 杨帅, 崔晓鹏, 等, 2016. 四川暴雨过程动力因子指示意义与预报意义研究[J]. *大气科学*, 40(2):341-356. Li Q, Yang S, Cui X P, et al, 2016. Diagnosis and forecasting of dynamical parameters for a heavy rainfall event in Sichuan Province[J]. *Chin J Atmos Sci*, 40(2):341-356(in Chinese).
- 李文娟, 赵放, 赵璐, 等, 2017. 基于单站探空资料的不同强度短时强降水预报指标研究[J]. *暴雨灾害*, 36(2):132-138. Li W J, Zhao F, Zhao L, et al, 2017. Study of the forecasting index for short-duration heavy rainfall with different intensities based on sounding data at Hangzhou[J]. *Torr Rain Dis*, 36(2):132-138(in Chinese).
- 李易芝, 罗伯良, 彭莉莉, 等, 2020. 2017年6月下旬湖南持续性暴雨动力因子诊断分析[J]. *暴雨灾害*, 39(1):10-19. Li Y Z, Luo B L, Peng L L, et al, 2020. Diagnostic analysis of dynamical parameters for Hunan persistent heavy rain event in late June 2017[J]. *Torr Rain Dis*, 39(1):10-19(in Chinese).
- 林春泽, 祁海霞, 智协飞, 等, 2013. 中国夏季降水多模式集成概率预报研究[J]. *暴雨灾害*, 32(4):354-359. Lin C Z, Qi H X, Zhi X F, et al, 2013. Study on multi-model ensemble probability forecast for summer precipitation in China[J]. *Torr Rain Dis*, 32(4):354-359(in Chinese).
- 刘松楠, 汪君, 王会军, 2022. 高分辨率卫星对“21·7”河南特大暴雨监测能力分析[J]. *气象学报*, 80(5):765-776. Liu S N, Wang J, Wang H J, 2022. Analysis of the monitoring ability of high-resolution satellites for the “21·7” heavy rain in Henan[J]. *Acta Meteor Sin*, 80(5):765-776(in Chinese).
- 马明卫, 宋松柏, 2011. 非参数方法在干旱频率分析中的应用[J]. *水文*, 31(3):5-12. Ma M W, Song S B, 2011. Nonparametric approach for drought frequency analysis[J]. *J China Hydrol*, 31(3):5-12(in Chinese).
- 聂明秋, 黄生志, 黄强, 等, 2020. 基于非参数法的气象-水文干旱风险评估及其动态演变探究[J]. *自然灾害学报*, 29(2):149-160. Nie M Q, Huang S Z, Huang Q, et al, 2020. Meteorological-hydrological drought risk assessment and dynamic evolution based on nonparametric method[J]. *J Nat Dis*, 29(2):149-160(in Chinese).
- 牛淑贞, 张一平, 王迪, 等, 2021. 河南省分类强对流天气概率预报方法研究与应用[J]. *气象与环境科学*, 44(1):1-12. Niu S Z, Zhang Y P, Wang D, et al, 2021. Probability forecasting method for classified severe convections in Henan Province and its objective product application[J]. *Meteor Environ Sci*, 44(1):1-12(in Chinese).
- 彭莉莉, 谢傲, 罗伯良, 等, 2018. 湖南汛期区域持续性暴雨环流型与暴雨落区关系[J]. *中国科学技术大学学报*, 48(7):580-593. Peng L L, Xie A, Luo B L, et al, 2018. Relations between circulation patterns and precipitation area of regional persistent torrential rain during flood season in Hunan[J]. *J Univ Sci Technol China*, 48(7):580-593(in Chinese).
- 祁海霞, 彭涛, 林春泽, 等, 2020. 清江流域降水的多模式 BMA 概率预报试验[J]. *气象*, 46(1):108-118. Qi H X, Peng T, Lin C Z, et al, 2020. Probabilistic forecasting of precipitation over the Qingjiang River Basin using BMA multimodel ensemble technique[J]. *Meteor Mon*, 46(1):108-118(in Chinese).
- 冉令坤, 楚艳丽, 2009. 强降水过程中垂直螺旋度和散度通量及其拓展形式的诊断分析[J]. *物理学报*, 58(11):8094-8106. Ran L K, Chu Y L, 2009. Diagnosis of vertical helicity, divergence flux and their extensions in heavy-rainfall events[J]. *Acta Phys Sin*, 58(11):8094-8106(in Chinese).
- 冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌, 2014. “7.21”暴雨过程动力因子分析和预报研究[J]. *大气科学*, 38(1):83-100. Ran L K, Qi Y B, Hao S C, 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters[J]. *Chin J Atmos Sci*, 38(1):83-100(in Chinese).
- 苏冉, 廖菲, 齐彦斌, 2019. 华南暖区暴雨过程集合动力因子的诊断分析[J]. *气象*, 45(11):1517-1526. Su R, Liao F, Qi Y B, 2019. Diagnostic analysis of ensemble dynamic factors during the warm-sector torrential rain in South China[J]. *Meteor Mon*, 45(11):1517-1526(in Chinese).
- 王钦, 曾波, 2022. 四川盆地两类区域持续性暴雨的环流物理量场特征及成因分析[J]. *高原气象*, 41(5):1175-1189. Wang Q, Zeng B, 2022. Analysis of circulations and physical variables in multi-levels associated with two types of regional persistent heavy rainfall events[J]. *Plateau Meteor*, 41(5):1175-1189(in Chinese).
- 汪亚萍, 崔晓鹏, 冉令坤, 等, 2015. 动力因子对 2006 年“碧利斯”台风暴雨的诊断分析[J]. *大气科学*, 39(4):747-756. Wang Y P, Cui X P, Ran L K, et al, 2015. Diagnosis of dynamical parameters in torrential rain associated with Typhoon “Bilis” in 2006[J]. *Chin J Atmos Sci*, 39(4):747-756(in Chinese).
- 徐姝, 熊明明, 陈法敬, 2021. 基于 ECMWF 集合预报的海河流域降水概率预报应用和检验[J]. *暴雨灾害*, 40(5):523-530. Xu S, Xiong M M, Chen F J, 2021. Application and verification of probabilistic precipitation forecasting in Haihe River Basin based on ECMWF ensemble prediction system[J]. *Torr Rain Dis*, 40(5):523-530(in Chinese).
- 杨帅, 陈斌, 高守亭, 2013. 水汽螺旋度和热力螺旋度在华北强“桑拿天”过程中的分析及应用[J]. *地球物理学报*, 56(7):2185-2194. Yang S, Chen B, Gao S T, 2013. Diagnostic analyses and applications of the moisture helicity and the thermal helicity for two strong “Sauna” weather processes in Northern China[J]. *Chin J Geophys*, 56(7):2185-2194(in Chinese).
- 杨志军, 向钢, 唐佐阳, 等, 2018. 湖南一次持续性极端暴雨过程成因分析[J]. *气象研究与应用*, 39(3):17-20. Yang Z J, Xiang G, Tang Z Y, et al, 2018. Cause analysis of a persistent extreme rainstorm in Hunan[J]. *J Meteor Res Appl*, 39(3):17-20, 47(in Chinese).

- 张萍萍,龙利民,张宁,等,2012.“分型配料法”在湖北省暴雨预报中的应用研究[J].热带气象学报,28(5):771-776. Zhang P P, Long L M, Zhang N, et al, 2012. Applications of typing ingredients-based methodology to heavy rainfall forecast in Hubei Province[J]. J Trop Meteor, 28(5):771-776(in Chinese).
- 张宇彤,矫梅燕,陈静,等,2016.基于贝叶斯方法的极端降水概率预报试验[J].气象,42(7):799-808. Zhang Y T, Jiao M Y, Chen J, et al, 2016. Probabilistic forecasting of extreme precipitation experiment based on Bayesian theory[J]. Meteor Mon, 42(7):799-808(in Chinese).
- 赵琳娜,董航宇,吴亮,等,2015.黄淮地区夏季日降水分区概率预报方法研究[J].气象,41(12):1503-1513. Zhao L N, Dong H Y, Wu L, et al, 2015. Daily precipitation probability forecast based on climatic region over Huang-Huai Region in summer[J]. Meteor Mon, 41(12):1503-1513(in Chinese).
- 赵渊明,漆梁波,2021.短时强降水概率预报的多模式集成技术研究[J].气象,47(5):529-538. Zhao Y M, Qi L B, 2021. Multi-model integration technology for probabilistic forecasting of short-time severe rainfall[J]. Meteor Mon, 47(5):529-538(in Chinese).
- 钟敏,肖安,许冠宇,2022.基于CMA-MESO的分级短时强降水概率预报方法研究[J].干旱气象,40(4):700-709. Zhong M, Xiao A, Xu G Y, 2022. Study on probability forecast method about graded short-term heavy rain based on CMA-MESO[J]. J Arid Meteor, 40(4):700-709(in Chinese).
- 周晓敏,田付友,郑永光,等,2023.中国短时强降雨对暴雨的贡献特征[J].气象,49(3):267-278. Zhou X M, Tian F Y, Zheng Y G, et al, 2023. Contribution of short-duration heavy rainfall to rain-storm in China[J]. Meteor Mon, 49(3):267-278(in Chinese).
- Parzen E, 1962. On estimation of a probability density function and mode[J]. Ann Math Statist, 33(3):1065-1076.
- Rosenblatt M, 1956. A central limit theorem and a strong mixing condition[J]. Proc N A S, 42(1):43-47.
- Vigaud N, Robertson A W, Tippett M K, 2017. Multimodel ensemble of subseasonal precipitation forecasts over North America [J]. Mon Wea Rev, 145(10):3913-3928.

(本文责编:戴洋)