

文章编号: 2096-1618(2024)04-0464-06

# 基于华东区域模式云南短时强降水客观预报技术研究

朱莉<sup>1,2</sup>, 许彦艳<sup>1,2</sup>, 许迎杰<sup>1,2</sup>, 邱学兴<sup>3</sup>, 闵颖<sup>1,2</sup>

(1. 云南省气象台, 云南 昆明 650034; 2. 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心, 云南 昆明 650034; 3. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**为提高云南短时强降水的预报效率和预报准确率,使用华东区域模式基础物理量数据,计算云南短时强降水发生前1 h 700 hPa相对湿度、700 hPa比湿、 $K$ 指数和6 km垂直风切变,对短时强降水的历史个例进行物理量阈值训练和单物理量的敏感性实验,确定物理量阈值。使用阈值判定法,对华东区域模式实时预报数据进行后处理,得到基于小时雨量和物理量的云南本地化短时强降水客观预报产品。研究表明:使用阈值判定法研发的基于华东区域模式云南短时强降水客观预报产品能较好地预报云南短时强降水的落区和走向,但是基于小时雨量的短时强降水客观预报产品漏报明显,基于物理量阈值的客观预报产品能有效降低云南短时强降水的漏报率。

**关键词:**短时强降水;华东区域模式;阈值判定法;云南;客观预报产品

**中图分类号:**P456.5

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2024.04.011

## 0 引言

短时强降水是指1 h降水量达到或超过20 mm的对流性降水,该类型降水突发性强、历时短、降水效率高,是一种主要的强对流天气类型。短时强降水致灾性大,往往会造成重大的经济损失和人员伤亡,但其预报难度大,一直是气象领域研究的重点。近年来,对短时强降水的研究从常规的机理分析转向客观预报方法的研究:张武龙等<sup>[1]</sup>使用西南区域模式预报资料,通过时间滞后集合预报方法构建多个集合成员,使用SAL评分值计算相应集合成员的权重系数,进行不等权集合平均,得到新的逐小时降水预报,对短时强降水的预报有较好的订正效果。江金昊等<sup>[2]</sup>应用Himawari-8卫星资料和数值预报模式资料,采取神经网络算法反演与短时强降水密切相关的整层可降水量。王丽芳等<sup>[3]</sup>采用频率匹配技术对江淮流域夏季降水预报进行模式偏差订正及改进,有效提高了强降水预报的TS评分。赵华生等<sup>[4]</sup>利用卷积神经网络和随机森林回归模型,提出一种新的基于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)预报模式资料的降水订正预报方法,明显提高了强降水的TS评分。朱岩等<sup>[5]</sup>使用EC细网格模式的再分析场计算诊断参量,通过K均值聚类和Relief算法分别重建了类别平衡的训练集,建立一个以Xgboost算法为核心的重庆地区短时强降水预报模

型。周方媛等<sup>[6]</sup>提出了基于关键对流参数进行分级的强对流潜势预报方法,分级建立了短时强降水等强对流天气的潜势预报方程,预报效果较好。

云南特殊的地理位置和复杂的地形使得汛期短时强降水天气频繁发生且时空分布不均匀,预报难度大,气象工作者在短时强降水的时空分布特征和形成机理方面进行了研究:李华宏等<sup>[7-8]</sup>使用自动雨量站资料统计分析了云南短时强降水的空间分布特征、日变化及月变化特征,并按照影响系统和天气形势配置将昆明市短时强降水进行分型研究;朱莉等<sup>[9-10]</sup>分析了冷锋切变线和西行台风背景下云南短时强降水的形成机理;何钰等<sup>[11]</sup>利用“配料法”的思路对云南短时强降水过程进行中尺度分析,建立了云南短时强降水的概念模型。目前,云南短时强降水客观预报技术的研究成果还不多,朱莉等<sup>[12]</sup>使用云南本地化WRF模式输出资料对云南短时强降水发生前的物理量特征进行统计分析,尝试用物理量阈值来反算短时强降水的落点,试验表明该方法对云南本地化WRF模式短时强降水的预报性能有改进作用。

随着数值预报模式的发展,模式预报产品时空分辨率日益提高,降水预报产品从单一的雨量预报发展为降水性质预报、降水相态预报等,同时增加了多种诊断物理量的输出,让预报员在进行短时强降水主观预报方面更有据可依。然而在预报业务中发现,短时强降水的主观预报存在漏报率高、时间提前量少、预报效率低的缺点,在云南地形复杂的山脉及河谷地区,全球模式的预报性能不佳<sup>[13]</sup>,并且全球模式对区域性强降水及对流性降水的预报效果逊于中尺度模式,因此中

收稿日期:2023-03-30

基金项目:中国气象局创新发展专项资助项目(CXFZ2022J021);云南省科技计划资助项目(202203AC100005、202203AC100006、202201AS070069);国家自然科学基金资助项目(42075013、42375043)

通信作者:许彦艳. E-mail:13009188@qq.com

尺度区域模式也逐渐应用在短时强降水的预报中,从以往的模式检验评估中发现,华东区域模式对云南强降水的整体预报性能优于其他中尺度模式,且漏报率较低<sup>[14]</sup>。为发挥短时强降水预报在气象防灾减灾中的作用,并提高云南短时强降水的预报效率和预报准确率,本研究对华东区域模式进行释用,研发云南本地化的短时强降水客观预报产品应用于预报业务。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究资料

研究所用的资料为华东区域数值模式 (SMS-WARMS) 逐小时雨量和基础物理量预报资料,源数据为 grib2 格式,空间分辨率为 9 km×9 km,网格范围是 90 °E ~ 140 °E,10 °N ~ 50 °N,起报时间为北京时 08 时和 20 时,预报时效为 72 h (表 1)。研发过程中所用到的模式预报要素有累积降水量、700 hPa 相对湿度、600 hPa 露点温度、700 hPa 露点温度、400 hPa 温度、600 hPa 温度、700 hPa 温度、500 hPa 经纬向风、10 m 经纬向风。

表 1 华东区域中尺度数值模式 (SMS-WARMS) 数据说明

| 数值模式        | 模式数据说明  |
|-------------|---|
| 数据格式        | grib2   |
| 空间分辨率       | 9 km  |
| 范围          | 90 °E ~ 140 °E,10 °N ~ 50 °N  |
| 起报时次 (北京时)  | 08 时、20 时   |
| 预报时效        | 72 h  |
| 多层要素产品      | 位势高度、相对湿度、露点温度、温度、经纬向风  |
| 多层要素产品时间分辨率 | 3 h   |
| 单层要素产品      | 2 m 温度、2 m 相对湿度、2 m 露点温度、地面温度、10 m 经纬向风、地面气压、海平面气压、对流有效位能、对流抑制能量、能见度、综合雷达回波、累积降水量、累积降雪量、总云量 |
| 单层要素产品时间分辨率 | 1 h   |

### 1.2 研究方法

研发的短时强降水客观预报产品主要运用的是小时雨量和物理量的阈值判定方法,具体如下:

(1) 降水量阈值判定。短时强降水的标准是 1 h 雨量 ≥ 20 mm,华东区域模式有逐小时累积雨量这一要素,可直接使用 1 h 降水大于或等于 20 mm 的短时强降水标准对华东区域模式逐小时降水预报资料进行判定,满足标准的格点赋值为“1”,表示有短时强降水发生,不

满足标准的格点赋值为“0”,表示没有短时强降水发生,形成基于小时雨量的短时强降水客观预报产品。

(2) 物理量阈值判定。朱莉等<sup>[12]</sup>使用云南本地化 WRF 中尺度数值模式对 2016 年主汛期云南 5 次短时强降水过程进行数值模拟,计算统计出 5 次过程中 85 个短时强降水样本格点在短时强降水发生前的物理量阈值并进行反算实验,表明物理量阈值判定对云南短时强降水的预报有改进作用。研究在前期工作得出的物理量阈值基础上,使用华东区域模式输出的基础物理量计算 700 hPa 相对湿度 (RH)、700 hPa 比湿 (Q)、K 指数和 6 km 垂直风切变 (SHEAR),其中相对湿度为华东区域模式输出的基础物理量,不需要计算,其他物理量的计算方法如下:

$$Q = 622 \cdot \frac{e}{p} \tag{1}$$

式中,  $e$  为 700 hPa 水汽压,  $p$  为气压 (取 700 hPa)。

700 hPa 水汽压  $e$  的计算方法为  $e = \frac{f \cdot E}{100}$ ,其中  $f$  为 700 hPa 相对湿度,  $E$  为 700 hPa 饱和水汽压。饱和水汽压  $E$  的计算方法为  $E = 6.112 \exp(\frac{17.67t}{t+243.5})$ ,其中  $t$  为 700 hPa 温度<sup>[15]</sup>。

$$K = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700} \tag{2}$$

式中,  $T_{850}$  为 850 hPa 温度,  $T_{500}$  为 500 hPa 温度,  $T_{d850}$  为 850 hPa 露点温度,  $(T - T_d)_{700}$  为 700 hPa 温度露点差<sup>[15]</sup>。由于云南处于高原地区,需抬高等压面高度进行计算,850 hPa 用 700 hPa 代替,500 hPa 用 400 hPa 代替,700 hPa 用 600 hPa 代替。

$$SHEAR = \int_0^z \frac{\partial V}{\partial z} dz / \int_0^z dz \tag{3}$$

式 (3) 可理解为  $(V_1 - V_0) / (Z_1 - Z_0)$ <sup>[15]</sup>,本研究中用 500 hPa 全风速与 10 m 全风速的差除以气层厚度来计算近地面至 6 km 的垂直风切变。

由于云南本地化 WRF 模式和华东区域模式均基于 WRFV3 模式,并且参数化方案相似,为提高研发效率,在前期工作<sup>[12]</sup>得出的物理量阈值表的基础上,研究使用华东区域模式输出的物理量预报资料,对 2019 年主汛期 (6–8 月) 云南 24 次短时强降水个例进行物理量阈值训练和单物理量的敏感性实验,确定判别效果最好的数值作为最终的物理量阈值,得出基于华东区域模式云南短时强降水发生前 1 h 的物理量阈值表 (表 2)。大多物理量在短时强降水发生前 1 h 会发生明显变化<sup>[12]</sup>,为提高短时强降水的预报准确度,研究仅使用短时强降水发生前 1 h 的物理量阈值进行阈值判定,形成基于物理量的短时强降水客观预报产品 (分别用“1”、“0”表示“有”、“无”)。

表 2 华东区域模式短时强降水发生前 1 h 物理量阈值表

| 物理量      | RH/%        | $Q/(g/kg)$ | $K/^{\circ}C$ | $SHEAR/(m/s)$ |
|----------|-------------|------------|---------------|---------------|
| 前 1 h 阈值 | $\geq 93.4$ | $\geq 11$  | $\geq 35$     | 2.7~10.4      |

2 程序设计和客观预报产品数据说明

程序设计流程如图 1 所示,应用 FORTRAN 程序设计语言建立短时强降水客观预报模型,预报模型由小时雨量判定、物理量阈值判定两个模块构成。首先使用 procShNWP.exe 解码程序将 grib2 格式的华东区域模式数据解码成 MICAPS 四类数据格式。1 h 雨量判定通过运行 shrain1.f90 程序来实现,使用 1 h 雨量 $\geq 20$  mm 的短时强降水标准对华东区域模式逐小时雨量预报数据进行判定,将满足标准的格点赋值为“1”,不满足标准的格点赋值为“0”,分别表示短时强降水的“有”和“无”。物理量阈值判定通过运行 shphysic.f90 程序来实现,依据式(1)、(2)、(3)计算表 2 中的物理量,使用阈值表 2 对华东区域模式物理量预报数据进行判定,将同时满足多个物理量阈值的格点赋值为“1”,不满足标准的格点赋值为“0”,分别表示短时强降水的“有”和“无”。

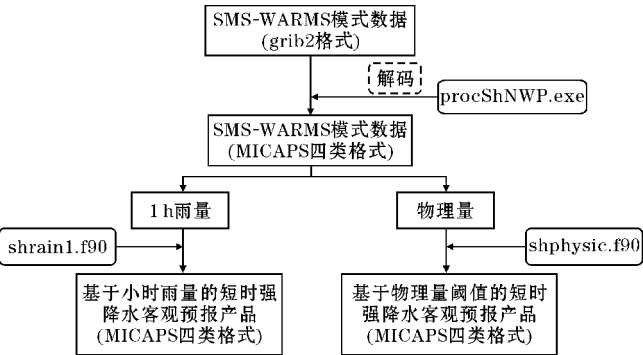


图 1 基于华东区域模式小时雨量和物理量阈值的短时强降水客观预报产品程序流程图

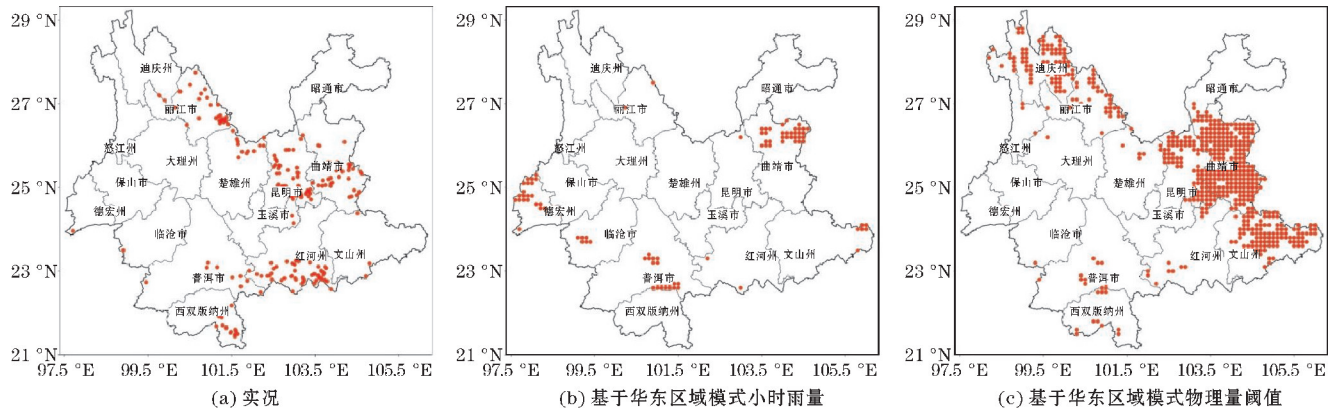


图 2 2022 年 7 月 19 日 08 时-20 日 08 时云南区域自动站短时强降水实况以及基于华东区域模式小时雨量和物理量阈值的短时强降水客观预报产品落点对比图

2022 年 7 月 27 日,滇西北东部、滇中、滇东、滇东北和滇西南局地出现了短时强降水(图 3a),基于华东区域模式小时雨量的云南短时强降水客观预报产品仅

模型建立后,将 3 个可执行程序挂载计划任务,实现短时强降水客观预报产品的自动化输出,预报数据写入指定服务器。基于小时雨量客观预报产品存储为 MICAPS 四类格式数据,产品时间分辨率为 1 h,空间分辨率为 9 km $\times$ 9 km。基于物理量阈值的客观预报产品同样存储为 MICAPS 四类格式数据,产品时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 9 km $\times$ 9 km。

3 客观产品预报性能的对比检验

基于华东区域模式小时雨量和物理量阈值的云南短时强降水客观预报模型于 2019 年建立完成,对当年的短时强降水个例进行回算,并将回算结果与 ECMWF 模式对流性降水预报产品的预报效果进行对比评估,发现该客观产品对云南短时强降水的落区预报较优,漏报区域也较小。2020 年汛期,该预报模型正式应用于预报业务,各模块运行稳定。选取云南 2022 年汛期部分短时强降水个例,将客观预报产品的预报性能进行对比检验。

2022 年 7 月 19 日,滇西北南部、滇中、滇东、滇西边缘、滇南出现了短时强降水(图 2a),基于华东区域模式小时雨量的云南短时强降水客观预报产品预报出了滇东、滇西和滇南的小范围短时强降水,预报格点数明显少于实况,丽江、楚雄、昆明、曲靖南部、玉溪东部、红河南部、西双版纳地区的短时强降水出现了明显漏报(图 2b)。基于华东区域模式物理量阈值的短时强降水客观预报产品的预报格点数明显增多,且弥补了基于小时雨量短时强降水客观预报产品漏报的区域,但是在云南西北部的迪庆、怒江出现了空报(图 2c)。

预报出了滇东北、滇中北部、滇西北南部、滇西边缘小范围的短时强降水,中部和东部的预报格点数明显少于实况,并且迪庆、大理北部、普洱、西双版纳境内的局

地短时强降水出现漏报(图 3b)。基于华东区域模式物理量阈值的短时强降水客观预报产品弥补了基于小

时雨量漏报的区域,但在迪庆、怒江北部、玉溪北部和文山中部出现空报(图 3c)。

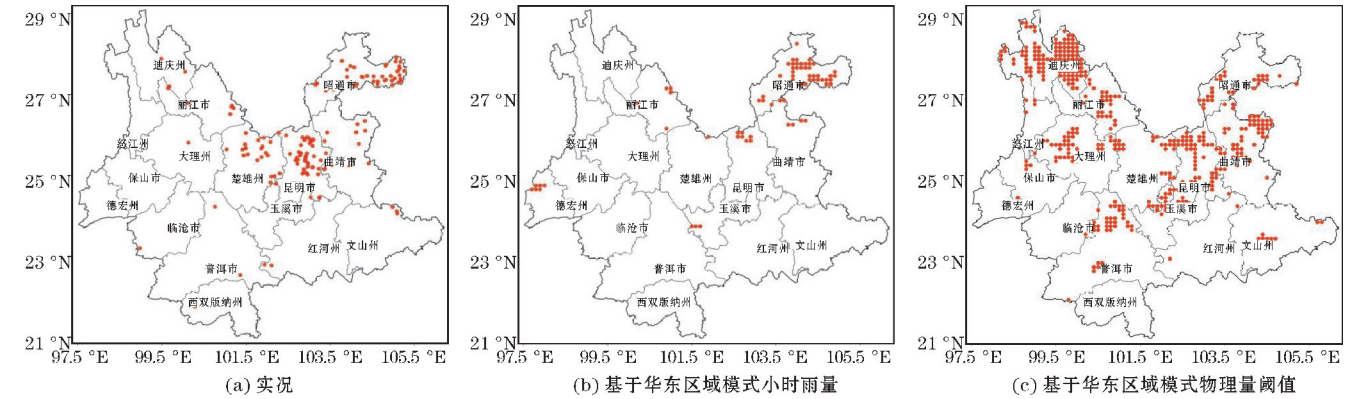


图 3 2022 年 7 月 27 日 08 时-28 日 08 时云南区域自动站短时强降水实况以及基于华东区域模式小时雨量和物理量阈值的短时强降水客观预报产品落点对比图

2022 年 8 月 17 日,滇东北、滇中、滇西和滇南出现了分散的短时强降水(图 4a),基于华东区域模式小时雨量的云南短时强降水客观预报产品仅预报出了西部及南部少数几个点的短时强降水,中部、西南部和东北部的短时

强降水漏报(图 3b)。基于华东区域模式物理量阈值的短时强降水客观预报产品体现了本次短时强降水落区分散的特点,并且弥补了基于小时雨量漏报的区域,但在云南西北部、东部和东南部出现了空报(图 3c)。

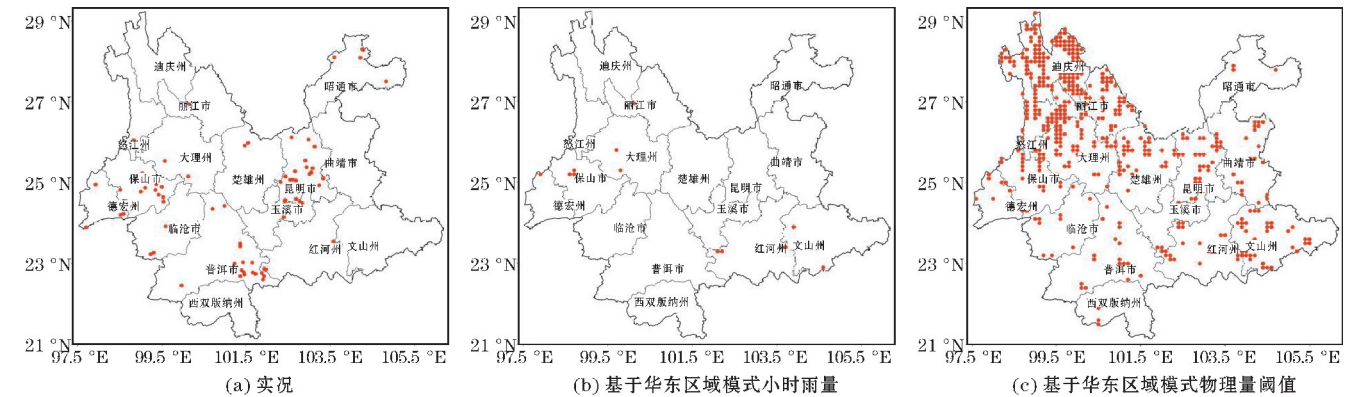


图 4 2022 年 8 月 17 日 08 时-18 日 08 时云南区域自动站短时强降水实况以及基于华东区域模式小时雨量和物理量阈值的短时强降水客观预报产品落点对比图

2022 年 9 月 15 日,滇西北南部、滇中、滇东、滇西边缘、滇南出现了短时强降水(图 5a),基于华东区域模式小时雨量的云南短时强降水客观预报产品预报出了滇中、滇东、滇南、滇西边缘的部分短时强降水,但预报格点数少于实况,丽江、大理北部、昆明南部、玉溪南

部、红河南部、普洱、临沧西部的短时强降水出现漏报(图 5b)。基于华东区域模式物理量阈值的短时强降水客观预报产品弥补了基于小时雨量漏报的区域,短时强降水的落区与实况基本对应,但滇西北的迪庆、怒江北部仍出现空报(图 5c)。

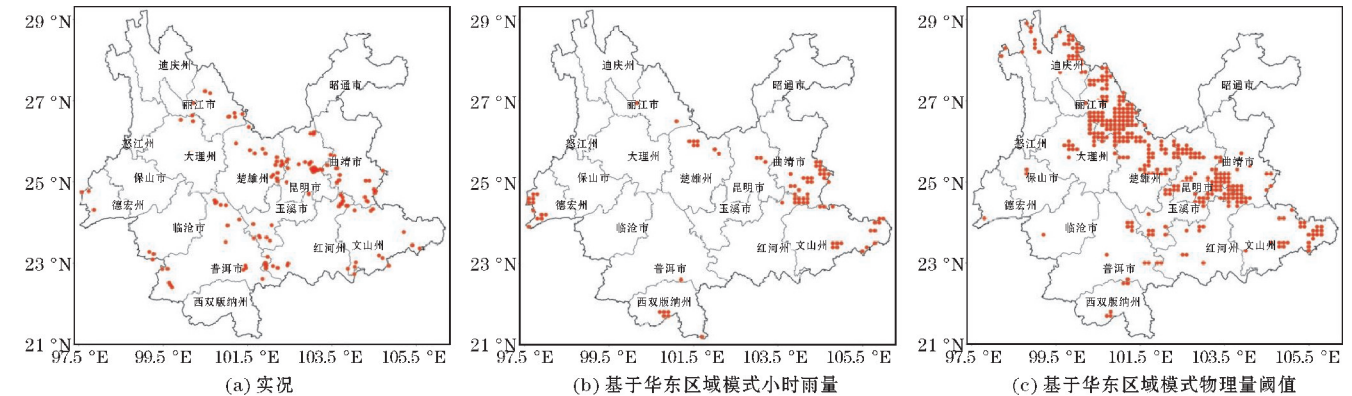


图 5 2022 年 9 月 15 日 08 时-16 日 08 时云南区域自动站短时强降水实况以及基于华东区域模式小时雨量和物理量阈值的短时强降水客观预报产品落点对比图

从以上对比检验分析可见,基于华东区域模式小时雨量的云南短时强降水客观预报产品能预报出短时强降水的大致落区,雨区走向与实况能基本对应,但是预报格点数较实况偏少,短时强降水的漏报现象突出。基于华东区域模式物理量阈值的短时强降水客观预报产品的落区与实况基本对应,并能有效地弥补基于小时雨量短时强降水客观预报产品漏报的区域,降低短时强降水的漏报率。

短时强降水属于对流性降水,往往是中小尺度天气系统造成的,发生发展迅速,局地性较强。对流参数能够揭示大气的水汽、能量和动力等特征,相对而言是一种量化和客观的诊断强对流降水的方法<sup>[16]</sup>。本研究发挥华东区域模式时空分辨率高、在云南省预报性能较好的优势,在模式小时雨量预报的基础上增加了水汽条件、动力条件和不稳定条件的判别,能有效减小云南短时强降水的漏报区域。

## 4 结论

使用华东区域模式小时雨量和物理量预报数据,采用阈值判定方法研发云南本地化的短时强降水客观预报产品,并对预报效果进行对比检验分析,得到如下结论:

(1)使用华东区域模式资料研发短时强降水客观预报产品,提高了客观产品的时空分辨率,为云南短时强降水的预报提供客观化的参考依据。

(2)基于华东区域模式小时雨量和物理量阈值的短时强降水客观预报产品能较好地体现云南短时强降水的落区和走向,但是基于小时雨量的短时强降水客观预报产品漏报明显,基于物理量阈值的客观产品能降低云南短时强降水的漏报率。

(3)需要指出的是,基于华东区域模式物理量阈值的短时强降水客观预报产品在云南西北部出现了系统性的空报区域,其原因可能与模式本身对横断山脉附近物理量的预报值偏大有关,如何消除系统性的空报,是今后改进短时强降水客观产品预报性能的方向之一。

## 参考文献:

[1] 张武龙,王彬雁,陈朝平,等. SWCWARMs 模式小时降水量时间滞后集合预报研究[J]. 气象科技,2021,49(4):561-568.

- [2] 江金昊,刘海磊,王乙竹,等. 基于 Himawari-8 卫星数据的青藏高原大气可降水量反演算法研究[J]. 成都信息工程大学学报,2022,37(5):494-500.
- [3] 王丽芳,漆梁波,周伟,等. 频率匹配技术在暴雨预报中的应用及改进分析[J]. 暴雨灾害,2021,40(4):352-361.
- [4] 赵华生,金龙,黄小燕,等. 基于 CNN 和 RF 算法的 ECMWF 降水分级订正预报方法[J]. 气象科技,2021,49(3):419-426.
- [5] 朱岩,翟丹华,吴志鹏,等. 基于 Xgboost 算法的短时强降水预报方法[J]. 气象科技,2021,49(3):406-418.
- [6] 周方媛,戴建华,陈雷. 基于关键对流参数分级的强对流潜势预报[J]. 气象科技,2020,48(2):229-241.
- [7] 李华宏,胡娟,闵颖,等. 云南短时强降水时空分布特征分析[J]. 灾害学,2017,32(3):57-62.
- [8] 李华宏,王曼,闵颖,等. 昆明市雨季短时强降水特征分析及预报研究[J]. 云南大学学报(自然科学版),2019,41(3):518-525.
- [9] 朱莉,张腾飞,李华宏,等. 云南一次短时强降水过程的中尺度特征及成因分析. 成都信息工程大学学报,2018,33(3):335-343.
- [10] 朱莉,王治国,李华宏,等. 西行台风背景下云南一次短时强降水过程的成因分析[J]. 热带气象学报,2020,36(6):744-758.
- [11] 何钰,陈小华,杨素雨,等. 基于“配料法”的云南短时强降水预报概念模型建立[J]. 气象,2018,44(12):1542-1554.
- [12] 朱莉,王曼,李华宏,等. 基于 WRF 模式的云南短时强降水物理量特征[J]. 大气科学学报,2019,42(5):755-768.
- [13] 张超,孙绩华,巩远发,等. ECMWF 高分辨率网格对云南区域降水预报性能的定量检验[J]. 成都信息工程大学学报,2018(6):688-703.
- [14] 赵宁坤,张秀年,孙俊奎,等. 高分辨率区域模式降水预报在云南的检验[J]. 暴雨灾害,2021,40(1):78-86.
- [15] 刘建文,郭虎,李耀东,等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社,2005:6-10.
- [16] 李明. 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,2017,33(6):812-821.

## Research on Objective Forecasting Technology of Short-term Strong Precipitation in Yunnan based on the East China Regional Model

ZHU Li<sup>1,2</sup>, XU Yanyan<sup>1,2</sup>, XU Yingjie<sup>1,2</sup>, QIU Xuexing<sup>3</sup>, MIN Ying<sup>1,2</sup>

(1. Yunnan Meteorological Observatory, Kunming 650034, China; 2. Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau, CMA, Kunming 650034, China; 3. Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031, China)

**Abstract:** To enhance the prediction efficiency and accuracy of short-term heavy precipitation in Yunnan province, this study utilized the basic physical quantity data from the East China regional model, calculate the 700 hPa relative humidity, 700 hPa specific humidity, K index and 6 km vertical wind shear in Yunnan, one hour prior to the occurrence of the short-term heavy precipitation, conduct physical quantity threshold training and single physical quantity sensitivity test on the historical cases of the short-term strong precipitation, and determine the physical quantity threshold. The threshold judgment method was employed to post-process the real-time forecast data of the East China regional model, and the objective short-term strong precipitation forecast product in Yunnan based on hourly rainfall and physical quantity was obtained. The research results show that the objective forecast product of Yunnan short-term heavy precipitation based on the East China regional model developed by the threshold judgment method can better predict the falling area and trend of Yunnan short-term heavy precipitation, but the objective forecast product of short-term heavy precipitation based on hourly rainfall has obvious omission, and the objective forecast product based on the physical quantity threshold can effectively reduce the omission rate of Yunnan short-term heavy precipitation.

**Keywords:** short-term heavy precipitation; East China regional model; threshold judgment method; Yunnan province; objective forecasting product