

刘莹,陈朝平,陈莹,等. 基于 CMA-REPS 小时降水的邻域集合预报应用试验[J]. 气象研究与应用,2022,43(2):98-104.

Liu Ying, Chen Chaoping, Chen Ying, et al. Application experiment of neighborhood ensemble forecasting based on CMA-REPS hourly precipitation[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2022, 43(2): 98-104.

基于 CMA-REPS 小时降水的邻域集合预报应用试验

刘莹^{1,2}, 陈朝平^{1,2*}, 陈莹^{1,2}, 龙柯吉^{1,2}, 周秋雪^{1,2}

(1.四川省气象台, 成都 610072; 2.高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 成都 610072)

摘要: 基于四川 2020 年汛期 CMA 区域集合模式的小时降水产品开展了集合预报邻域法订正试验, 试验方案分为四种: 邻域平均的集合平均预报 (ENM)、邻域平均的集合成员最大预报 (MNM)、邻域概率的集合平均概率预报 (ENP)、邻域概率的集合最大概率预报 (MNP)。结果表明, 小时降水超过 $0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 ENM 在部分预报时效内 TS 评分略优于原集合平均预报; 小时雨强分级检验的结果均显示出邻域概率预报优于原概率预报, 随小时降水阈值的增大, 最优 TS 评分越趋于更高邻域半径和更低的概率, 且 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上 MNP 预报更具参考性; MNP 能显示集合预报的大范围降水中心, 可以从另一个角度给预报员预报提供一定的参考。

关键词: 小时降水; 集合预报; 邻域法

中图分类号: P456

文献标识码: A

doi: 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2022.2.17

引言

为满足人们对气象预报时间和空间的精细化要求, 随着计算机技术的发展, 全球出现了各种高分辨率模式的开发和应用, 美国、法国、英国、日本等气象局目前使用的区域中尺度模式空间分辨率达到了 $1\sim 4\text{km}^{[1]}$, 我国自主研发的高分辨率模式 GRAPES_3km 模式也被证明能反映降水过程的日变化特征^[2], 张小雯等使用传统点对点 TS 评分方法和新型空间检验方法对 GRAPES_3km 模式进行检验, 认为模式对对流风暴的预报具有一定的参考价值^[1]。成都高原气象研究所开发的水平分辨率为 9km 的 SWCWARMs 模式于 2014 年投入业务化应用, 曹萍萍等^[3]指出在高原暖区暴雨及斜压锋生型暴雨预报中, SWCWARMs 模式对大暴雨及以上量级的降水预报性能优于 ECMWF 模式, 张琪等^[4]也指出尽管 SWCWARMs 模式存在一定的偏差, 但无论在降水量级还是其他物理量方面, 尤其是对大雨以上量级的强降水过程预

报, 都体现出了较好的预报性能。中国气象局广州热带海洋气象研究所的热带区域数值天气预报模式 (TRAMS-V3.0), 预报系统包括区域 9km 、区域 3km 、区域 1km 投入业务使用后, 在台风、降水、地面要素的预报等方面都提供了很好的参考作用^[5]。

同时, 为了捕捉更多的模式预报不确定性, 我国自主研发的分辨率为 15km 的 CMA 区域集合预报系统于 2014 年进入业务化运行, 王静等^[6]通过实验认为模式对西南涡降水有一定的预报能力。随着预报模式分辨率的不断提高, 无论是高分辨率模式的确定性预报还是集合预报对小尺度天气现象的捕捉均已表现出明显的预报能力, 对高分辨率输出产品进行检验订正用以指导预报业务, 有其现实意义。

对于模式降水而言, 高分辨率数值预报系统虽然能预报出较好的对流特征和较强的降水量级, 而在具体落区上经常会出现一定的偏移, 特别对于一些出现概率较低的短时强降水事件, 即使有很好

收稿日期: 2022-01-17

基金项目: 四川省气象局重点实验室重大项目 (2018-重点-06)、四川省气象局重点实验室研究型业务面上专项 (SCQXKJYJXMS202201)、

国家重点研发计划重点专项项目 (2017YFC1502000)、(2017YFC1502004)

作者简介: 刘莹, 工程师, 主要从事强对流天气预报和相关技术研究。E-mail: liuyingwy@163.com

* 通讯作者: 陈朝平, 正研级高级工程师, 主要从事数值预报产品释用和天气预报诊断研究。E-mail: 77760543@qq.com

的落区形态和强度的预报,但仍会受到漏报加空报的“双重惩罚”。针对这个问题,Schwartz等^[7]用“相邻格点法”(neighborhood approach)进行了集合预报试验,通过增加尺度来估计预报的不确定性,进而产生概率预报。杜俊等^[8]也指出此方法可通过增尺度来增加预报的可靠性,但关键在于如何根据实际的模式预报能力来确定一个合理的增尺度半径。降水的邻域概率方法近年来获得了越来越多人的关注,很多研究证明降水邻域概率可以改进确定性预报和集合预报直接输出的概率预报技巧,Theis等^[9]的研究结果表明,降水邻域概率预报在一致性、预报质量等方面优于确定性预报,国外还有一系列针对邻域法概率预报的检验和订正的研究^[10-13]。吴志鹏等^[14]对风暴尺度模式12h降水预报结果进行升尺度预报方法研究,认为邻域概率预报能给出更好的概率分级信息,36km升尺度窗区既能消除一定程度的强降水预报不确定性,同时也可以保留适当的对流尺度特征。刘雪晴等^[15]通过降水邻域集合概率方法试验,指出采用了邻域计算方案的降水概率预报评分均优于传统的集合概率方法,该方法具有较好的应用前景。

自2019年12月CMA区域集合预报正式通过业务准入后,四川省气象台利用该模式预报的逐小时降水资料开展了集合预报短时强降水的检验,通过2020年汛期的天气学检验发现,该模式产品在一定程度上对小时雨强有一定的预报能力。但利用邻域法来增加CMA区域集合预报小时降水预报可靠性的研究较少。本文将利用该模式资料针对2020年8月开展小时降水的集合预报邻域法试验,试图通过试验选取和评估四川区域CMA区域集合预报合理的邻域半径,以及更优的捕捉对流尺度信息的集合预报邻域预报方法,探索CMA区域集合预报在小时雨量预报中的应用方法。

1 资料与方法

1.1 资料来源与处理

预报资料选取中国气象局数值预报中心开发的CMA区域集合模式(简称CMA-REPS)降水产品,共15个成员,模式的空间分辨率为20km×20km,时间分辨率为1h。观测资料选取国家气象中心开发的格点化降水三源融合产品,观测资料的空间分辨率为5km×5km,时间分辨率为1h。试验时间长度为2020年5月1日至9月30日。为使预报和实况能在相同

分辨率条件下进行检验,分析前将观测资料使用双线性插值方法插值到20km,与CMA-REPS的空间分辨率保持一致。

1.2 研究方法和试验设计

邻域法是在确定尺度半径内,考虑相邻格点的预报情况来估计预报的空间不确定性,从而得到集合平均预报或者降水概率预报,其本质是一种升尺度方法。试验分别针对确定性预报和概率预报,使用传统的等权重邻域方法,设计四个预报方案。

针对确定性预报,将半径范围内的格点值作为一个集合预报,对集合预报做等权重平均,在选定R半径大小的基础上,定义单个集合成员的邻域平均:

$$NM_{ij} = \frac{1}{N_b} \sum_{m=1}^{N_b} F_{ijm} \quad (1)$$

其中, i 表示第 i 个格点, j 表示第 j 个集合成员, m 表示 R 邻域范围内的第 m 个格点, N_b 为 R 邻域范围内的格点总数, F_{ijm} 第 i 个格点第 j 个集合成员在 R 为邻域内的第 m 个格点的预报降水量, R 为邻域半径。 R 的理论范围是0到无穷大,主要受到模式本身误差的影响,Schwartz等^[7]通过北美集合预报试验,对0~200km的范围进行了试验,北美集合预报业务系统采用45km为最佳半径,吴志鹏等^[9]对重庆SSRAFS系统进行试验后,确定36km为最佳半径。

得到单个集合成员的等邻域平均预报(NM)后,计算邻域平均后的集合平均预报(ENM)和集合成员最大预报(MNM),定义为:

$$ENM_i = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} NM_{ij} \quad (2)$$

$$MNM_i = \max(NM_{ij}) (j=1, 2, 3 \cdots N_m) \quad (3)$$

N_m 为总的集合成员数, NM_{ij} 为第 i 个格点第 j 个集合成员的邻域平均值。

针对概率预报,首先将单个集合成员的确定性预报转为概率预报,使用降水的二分类事件概率,即单个格点上事件发生为1,事件不发生为0。二分类概率预报即:

$$BP_{ij} = \begin{cases} 1 & F_{ij} \geq r \\ 0 & F_{ij} < r \end{cases} \quad (4)$$

其中, F_{ij} 表示第 i 个格点第 j 个集合成员预报的累计降水量, r 为某个累计降水阈值。

得到事件概率预报后,计算单个集合成员的等权重邻域概率预报,定义为:

$$NP_{ij} = \frac{1}{N_b} \sum_{m=1}^{N_b} BP_{ijm} \quad (5)$$

其中, m 表示 R 邻域范围内的第 m 个格点, N_b 为 R 邻域范围内的格点总数, BP_{ijm} 第 i 个格点第 j 个集合成员在 R 邻域范围内第 m 个格点的二分类概率预报。得到单个集合成员的邻域概率预报(NP)后, 计算邻域概率的集合平均概率预报(ENP)和集合最大概率预报(MNP)。

$$ENP_i = \frac{1}{N_m} \sum_{j=1}^{N_m} NP_{ij} \quad (6)$$

$$MNP_i = \text{Max}(NP_{ij}) (j=1, 2, 3 \cdots N_m) \quad (7)$$

由于邻域窗口形状的选择对结果几乎无影响^[16], 因此本文采用圆形邻域窗口, 试验邻域半径 R 选择 1 至 5 倍格距。试验 1 和试验 2 分别为使用等权重邻域平均后计算邻域平均的集合平均预报 (简称 ENM) 和集合成员最大预报 (简称 MNM), 试验 3 和试验 4 分别为得到单个集合成员的领域概率后计算邻域概率的集合平均概率预报 (简称 ENP) 和集合最大概率预报 (简称 MNP)。

1.3 预报检验方法

传统检验将降水事件分为如表 1 所示的四种结果。

A、B、C、D 分别为预报有且实况有 (命中), 预报有实况无 (空报), 预报无实况有 (漏报), 预报无实况无 (正确拒绝) 的次数, TS 评分公式如下:

表 1 二分类事件列联表

预报	实况	
	有降水	无降水
有降水	A (命中)	C (空报)
无降水	B (漏报)	D (正确拒绝)

$$TS = \frac{A}{A+B+C} \quad (8)$$

其中 TS 评分取值范围 0~1, 取值越高表示预报效果越好, TS 等于 1 为完美预报。

2 试验结果

2.1 典型过程

2020 年 8 月 10 日 20 时至 11 日 20 时四川省出现了一次区域性暴雨过程, 盆地西部降了暴雨到大暴雨, 局部地方降了特大暴雨, 过程中小时雨强强, 短时强降水持续时间长 (见图 1b), 选择此次过程中短时强降水时次作为典型过程进行检验。2020 年 8 月 11 日 11 时, 四川盆地西部沿山一带出现了短时强降水, 小时强降水的分布较为集中, 总体雨带呈现西南-东北向, 小时降水强度大, 降水中心位于绵阳、德阳西部, 最大小时雨量出现在绵阳北川擂鼓镇 131.5mm (图 1a)。

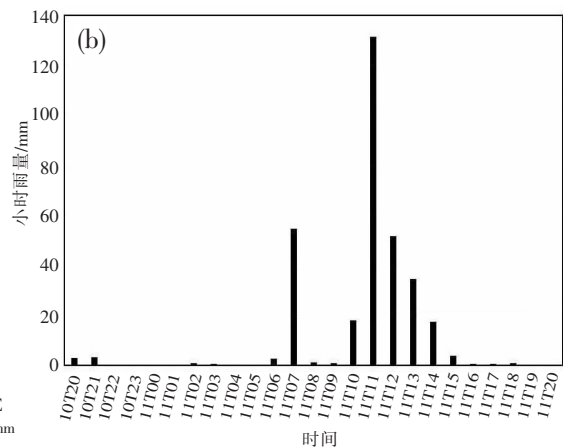
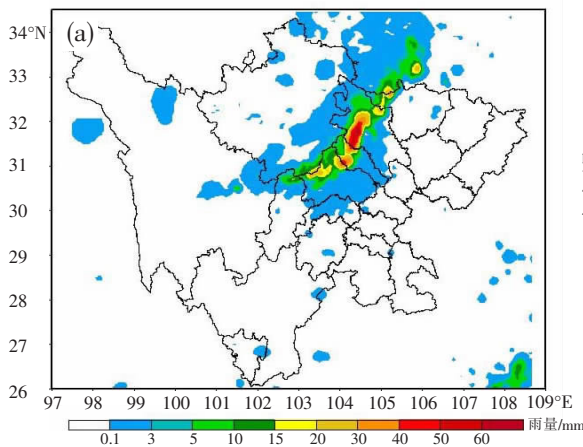


图 1 2020 年 8 月 11 日 11 时实况格点雨量 (a) 和绵阳北川擂鼓镇小时雨量随时间变化 (b)

图 2 为 2020 年 8 月 11 日 11 时的原集合平均预报 (图 2a)、原集合最大预报 (图 2g) 以及不同邻域半径对应的 ENM (图 2b、c、d、e、f) 和 MNM (图 2h、i、j、k、l)。可以看出, 邻域半径为 20km 的 ENM 雨带 (图 2b) 与原集合平均预报较一致, 但中心位置都较

实况 (图 1a) 偏南, 强度较实况显著偏弱, 随着邻域半径的增大, 0.1~3mm 降水范围逐渐增大, 5mm 以上降水范围开始减小, 强降水中心逐渐消失, 降水区边缘逐渐平滑, 较零散的降水趋于减弱消失, 表明 ENM 对短时强降水的预报能力随着半径的变大而

变差。邻域半径为 20km 的 *MNM* 与原集合最大预报较一致, 但中心位置也都较实况(图 1a)偏南, 量值上对成都西部小时降水量预报可达到 20~40mm, 与实况更为接近, 同时在德阳和绵阳 2 市西部个别地

方报出了 15~30mm 以上的降水, 这对当地小时强降水预报有一定的指示意义。随着邻域半径的增大, *MNM* 降水量级的变化和 *ENM* 类似, 同样出现中小尺度降水特征减弱的特征。

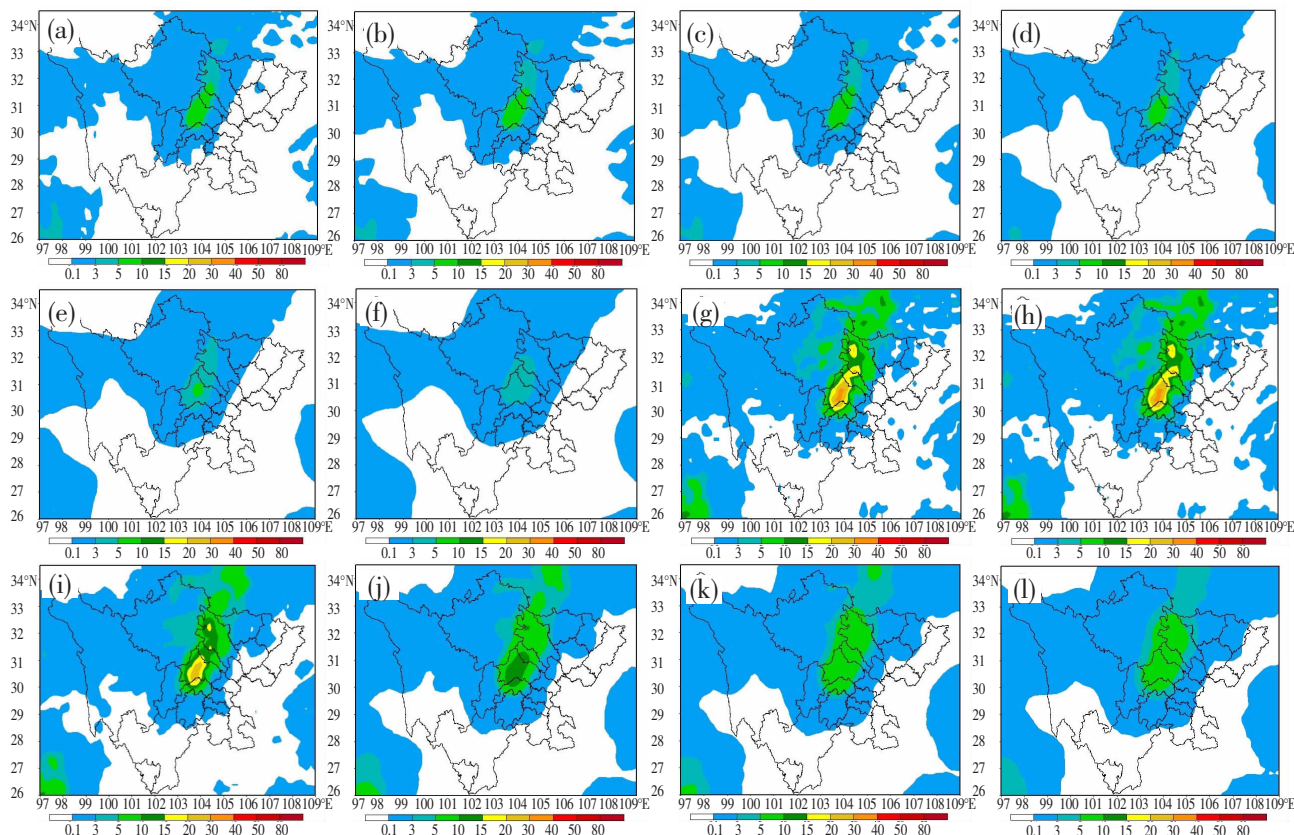


图2 原集合平均预报(a), 邻域半径 20km(b)、40km(c)、60km(d)、80km(e)、100km(f)的 *ENM* 和原集合最大预报(g), 邻域半径 20km(h)、40km(i)、60km(j)、80km(k)、100km(l)的 *MNM*

图 3 为雨量为 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的原概率预报(图 3a)、原集合成员预报出大于 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的范围(图 3g)以及不同邻域半径对应的 *ENP*(图 3b、c、d、e、f)和 *MNP*(图 3h、i、j、k、l)。*ENP* 和 *MNP* 随着邻域半径的增大, 低概率值范围则逐步增大, 而高概率值范围开始减小, 高概率中心逐渐消失。原集合成员预报出大于 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的范围较实况明显偏大, *MNP* 的预报概率普遍高于 *ENP* 预报概率。不同半径 *ENP* 预报概率的高概率中心均较实况降水的大值中心位置明显偏南。邻域半径 80km 以下的 *MNP* 预报, 50% 预报概率的降水范围均较实况明显偏大, 但 80km 的 *MNP* 预报出绵阳西部的高概率中心与实况降水的大值中心有很好的对应, 表明虽然原 CMA-REPS 集合成员在绵阳西部预报出 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 降水的成员个数较少, 但相应集合成员预报的降水范围较大, 这也可以为

预报员预报提供一定的提示。

$10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 *ENP* 和 *MNP* 随着邻域半径的变化规律跟 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 相似(图 4), 邻域半径为 20km 时 *MNP* 预报概率 40% 以上的范围与实况较一致, 对预报有一定的参考价值, 说明选择合适的邻域半径以平衡精细化带来的误差和预报允许的误差, 以此来量化不确定性, 可以为预报挖掘更多的参考信息。

2.2 邻域平均预报检验

对四川地区 2020 年汛期 5 月至 9 月的 CMA-REPS 模式 20 时起报的小时降水产品进行邻域法 *ENM*、*ENM* 试验, *ENM*、*ENM* 以及原集合平均预报、原集合最大预报对 $0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $3\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 预报的 TS 评分显示: *ENM*、*MNM* 的 TS 评分有明显的昼夜变化, 夜间评分要高于白天, 这与四川夜雨多的气候特点相关。随着邻域

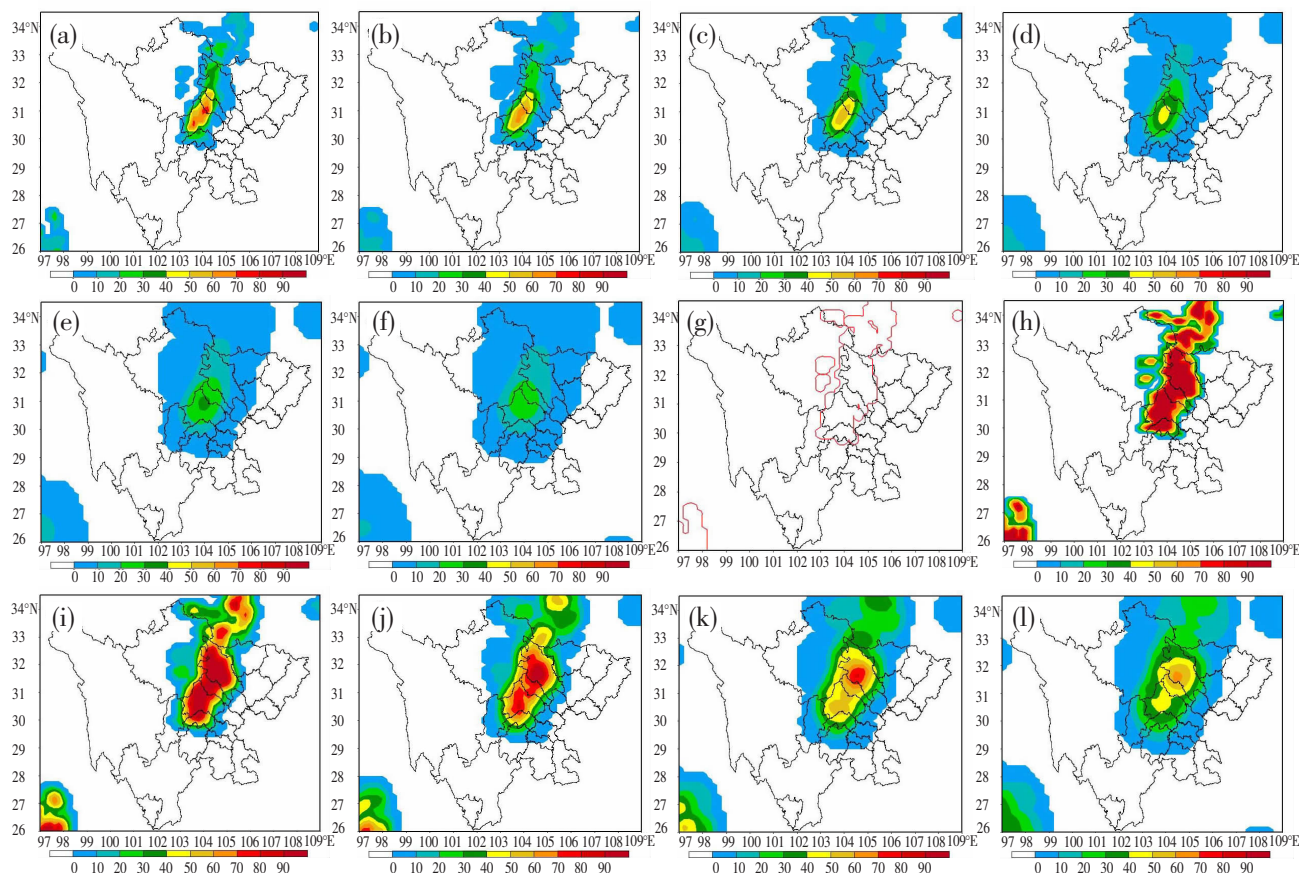


图3 5mm·h⁻¹ 原概率预报(a),邻域半径为20km(b)、40km(c)、60km(d)、80km(e)、100km(f)的5mm·h⁻¹ ENP,原集合成员预报出大于5mm·h⁻¹的范围(g),邻域半径为20km(h)、40km(i)、60km(j)、80km(k)、100km(l)的5mm·h⁻¹ MNP

半径的增大 TS 减小。小时降水超过 $0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 ENM 在部分预报时效内 TS 评分略优于原集合平均预报,其余情况均与原集合平均预报 TS 评分相当或低于原集合平均预报。不同邻域半径 MNM 的 TS 评分随着邻域半径的增加逐渐减小,但几乎均与原集合最大预报相当。对于强小时降水的格点,平均预报使得降水值被平滑,是导致 ENM 、 MNM 的 TS 评分在强小时雨强预报中无法优于原模式预报、难以反应出极端小时降水的主要原因。

2.3 邻域概率预报检验

对四川地区2020年汛期5月至9月的CMA-REPS模式20时起报的小时降水产品进行邻域法试验得到 $0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $3\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 ENP 和 MNP ,检验不同邻域半径、不同概率阈值条件下最优 TS 评分结果。以概率预报产品每隔10%的预报范围作为确定性预报(即分别以 $\geq 0\%$ 、 $\geq 10\%$ 、 $\geq 20\%$ 、 $\geq 30\%$ 、 $\geq 40\%$ 、 $\geq 50\%$ 、 $\geq 60\%$ 、 $\geq 70\%$ 、 $\geq 80\%$ 、 $\geq 90\%$ 的预报范围作为确定性预报)进行 TS 评分,评分结果如表2所示: $0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $3\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 ENP 、

MNP 最优 TS 评分均优于原概率预报的最优 TS 评分, $0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以100km邻域半径、预报概率为40%的 ENP 方案 TS 评分最优, $3\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 、 $5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的 TS 评分则是取邻域半径80km时分别以20%和10%的 ENP 为最优。 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以80km邻域半径、预报概率10%时的 MNP 最优, $20\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以80km邻域半径,预报概率0%的 MNP (MNP 和 ENP 预报0%以上范围一致,评分相等)最优。小时雨强分级检验的结果均显示出邻域概率预报的 TS 评分优于原概率预报,而随小时降水阈值的增大,最优 TS 评分越趋于更高邻域半径和更低的概率,说明小时雨强更大,漏报可能性更高,同时 MNP 的预报评分逐渐优于 ENP , $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上量级 MNP 的预报结果更具参考性。

为进一步了解较强小时降水预报效果随预报时效的变化情况,针对 $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 分析 $ENP\geq 0\%$ 、 $MNP\geq 10\%$ 时, TS 评分随邻域半径和预报时效的变化。从 TS 的评分上看, ENP 和 MNP 均能实现 TS 评分优于原概率预报的最优 TS , 同时 TS 评分有一定的日变化,下午评分低于其他时段, $ENP\geq 0\%$ 的预报

表 2 原概率预报、ENP 和 MNP 最优 TS 评分

阈值 (mm · h ⁻¹)	预报	预报概率	邻域半径 (km)	最优 TS
0.1	原概率	40	—	0.3076
	ENP	40	100	0.3283
	MNP	70	100	0.3257
3	原概率	20	—	0.1028
	ENP	20	80	0.1136
	MNP	40	100	0.1090
5	原概率	10	—	0.0698
	ENP	10	80	0.0791
	MNP	30	100	0.0762
10	原概率	0	—	0.0298
	ENP	0	20	0.0314
	MNP	10	80	0.0341
20	原概率预报	0	—	0.0027
	ENP	0	80	0.0095
	MNP	0	80	0.0095

随着邻域半径越大 *TS* 评分越低,空报的增大使得 *TS* 评分降低,且在前 18h 左右最为明显,提高半径无法继续提高预报效果,而 *MNP*≥10%时,随着邻域半径的增大,*TS* 评分略有提高,但评分差距不大,降低漏报仍能提高 *TS* 评分,且在 28h 以后更为明显。

由于 20mm·h⁻¹ 原集合预报的漏报较多,以≥0%的概率最优,因此 *ENP*、*MNP* 概率预报≥0%时的 *TS* 评分随邻域半径和预报时效的变化一致,大部分时间段邻域半径增大 *TS* 略有提升,但不同邻域半径 *TS* 评分差距不大,特别是 40~100km,随预报时效的延长,27 小时之后,邻域半径从 20km 增大到 40km 的 *TS* 提升较为明显。

总体看来,10mm·h⁻¹ 以上 *MNP* 概率预报更有参考价值,且随着邻域半径提高,在一定程度上可以提升 *TS* 评分,20mm·h⁻¹ 以上漏报明显,*ENP*、*MNP* 概率预报≥0%的预报结果在邻域半径大于 80km 时,空报增大,无法再通过提高邻域半径降低漏报来提升 *TS* 评分。

3 结论与讨论

利用 CMA-REPS 区域集合预报资料对 2020 年 8 月的邻域法预报试验,设计四种试验方案,即邻域平均的集合平均预报(*ENM*)、邻域平均的集合成员最大预报 (*MNM*)、邻域概率的集合平均概率预报

(*ENP*)、邻域概率的集合最大概率预报(*MNP*),并选取了四个邻域窗口进行试验。选取短时强降水典型个例进行分析,并使用传统 *TS* 检验方法,对预报结果进行检验分析。主要结论和讨论如下:

(1)小时降水超过 0.1mm·h⁻¹ 的 *ENM* 在部分预报时效内 *TS* 评分略优于原集合平均预报,但 *ENM*、*MNM* 难以反应出极端小时降水。

(2)对四川地区 2020 年汛期的 CMA-REPS 预报进行邻域法试验,概率预报最优 *TS* 评分结果表明小时雨强分级检验的结果均显示出邻域概率预报优于原概率预报,而随小时降水阈值的增大,最优 *TS* 评分越趋于更高邻域半径和更低的概率。10mm·h⁻¹ 以上量级 *MNP* 的预报结果更具参考性。

(3)*MNP* 预报能显示集合预报的大范围降水中心,可以从另一个角度给预报员预报提供一定的参考。

由于资料的限制,本文仅针对 2020 年汛期(5—9 月)20 时起报的预报结果进行了讨论,得出了初步的结论,下一步需要利用更多的样本对降水季节、起报时间、不同天气形势和天气系统等方面的差异进行深入讨论分析。

参考文献:
[1] 张小雯,唐文苑,郑永光,等.GRAPES_3km 数值模式对流风暴预报能力的多方法综合评估[J].气象,2020,46

- (3):367–380.
- [2] 许晨璐,王建捷,黄丽萍.千米尺度分辨率下 GRAPES_Meso4.0 模式定量降水预报性能评估[J].气象学报,2017,75(6):851–876.
- [3] 曹萍萍,肖递祥,王佳津,等.SWCWARMS 及 ECMWF 模式对四川盆地暖区型和斜压锋生型暴雨预报检验分析[J].高原山地气象研究,2018,38(1):22–29,47.
- [4] 张琪,肖递祥,肖红茹,等.SWCWARMS 模式对四川盆地强降水预报的检验分析[J].高原山地气象研究,2019,39(2):23–29.
- [5] 陈子通,徐道生,戴光丰,等.热带高分辨率模式(TRAMS-V3.0)技术方案及其系统预报性能[J].热带气象学报,2020,36(4):444–454.
- [6] 王静,陈静,钟有亮,等.GRAPES_REPS 西南低涡预报检验评估[J].气象,2017,43(4):385–401.
- [7] Schwartz C S, Kain J S, Bright D R, et al. Toward Improved Convection-Allowing Ensembles: Model Physics Sensitivities and Optimizing Probabilistic Guidance with Small Ensemble Membership[J]. Weather and Forecasting, 2010, 25(1):263–280.
- [8] 杜钧,李俊.集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用[J].气象科技进展,2014,4(5):6–20.
- [9] Theis S E, Hense A, Damrath U. Probabilistic Precipitation Forecasts from a Deterministic Model: A Pragmatic Approach[J]. Meteorological Applications, 2005, 12(3):257–268.
- [10] Clark A J, Kain J S, Stensrud D J, et al. Probabilistic Precipitation Forecast Skill as a Function of Ensemble Size and Spatial Scale in a Convection-Allowing Ensemble[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(5):1410–1418.
- [11] Johnson A, Wang X G. Verification and Calibration of Neighborhood and Object-Based Probabilistic Precipitation Forecasts from a Multimodel Convection-Allowing Ensemble[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(9):3054–3077.
- [12] Bouallègue Z B, Theis S E, Gebhardt C. Enhancing COSMO-DE Ensemble Forecasts by Inexpensive Techniques[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2013, 22(1):49–59.
- [13] Bouallègue Z B, Theis S E. Spatial Techniques Applied to Precipitation Ensemble Forecasts: from Verification Results to Probabilistic Products[J]. Meteorological Applications, 2015, 21(4):922–929.
- [14] 吴志鹏,国兵,张亚萍,等.基于风暴尺度模式产品的暴雨最优升尺度概率预报方法研究[J].暴雨灾害,2020,39(4):372–381.
- [15] 刘雪晴,陈静,陈法敬,等.降水邻域集合概率方法尺度敏感性试验[J].大气科学,2020,44(2):282–296.
- [16] Ebert E. Neighborhood Verification: A Strategy for Rewarding Close Forecasts[J]. Weather and Forecasting, 2009, 24(6):1498–1510.

Application experiment of neighborhood ensemble forecasting based on CMA-REPS hourly precipitation

Liu Ying^{1,2}, Chen Chaoping^{1,2*}, Chen Ying^{1,2}, Long Keji^{1,2}, Zhou Qiuxue^{1,2}

(1. Sichuan Meteorological Observatory, Chengdu 610072, China; 2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Heavy Rain, Drought and Flood Disasters in Plateaus and Basins, Chengdu 610072, China)

Abstract: Based on the hourly precipitation products of the CMA regional ensemble model in the flood season of Sichuan in 2020, the correction experiment of the ensemble forecast neighborhood method was carried out. There are four kinds of test schemes: neighborhood average ensemble average prediction (ENM), neighborhood average ensemble member maximum prediction (MNM), neighborhood probability ensemble average probability prediction (ENP), and neighborhood probability ensemble maximum probability prediction (MNP). The results show that the TS score of the ENM with hourly precipitation exceeding $0.1\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ is slightly better than the original ensemble average forecast within the partial forecast period. The results of the hourly rainfall intensity classification test all show that the neighborhood probability prediction is better than the original probability prediction. With the increase of hourly precipitation threshold, the optimal TS score tends to higher neighborhood radius and lower probability, and MNP prediction above $10\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ is more referential. MNP can display the large-scale precipitation center of ensemble forecast, and can provide a certain reference for forecasters from another angle.

Key words: hourly precipitation; ensemble forecast; neighborhood method