

SWCWARMS 模式小时降水量时间 滞后集合预报研究

张武龙^{1,2} 王彬雁^{1,2} 陈朝平^{1,2*} 冯汉中^{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 SWCWARMS 模式 9 km×9 km 分辨率逐小时降水预报, 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, 从而得到新的逐小时降水预报。利用 SAL、TS 和 BIAS 检验方法对四川省 2019 年 8 月的逐小时降水量时间滞后集合预报及相应的 SWCWARMS 模式最新时次预报进行对比分析, 结果表明: ①时间滞后集合预报 SAL 检验的 L 值和 A 值都较模式预报更接近于 0, 较好地改善了降水位置和强度的整体预报水平; ②时间滞后集合预报对逐小时降水晴雨 TS 评分提升明显, 评分提高百分率在 10% 左右, 有效地减小了模式在晴雨方面的空报; ③临近预报时效, 时间滞后集合预报方法对于大量级降水预报也有较好的订正效果。

关键词 时间滞后; 不等权集合; 小时降水量; SAL 检验

中图分类号: P456 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20200376 **文献标识码:** A

引言

为满足社会生产生活、防灾减灾、政府部门的应急决策等日益增长的天气预报需求, 中国气象局提出了无缝隙精细化网格化预报的业务要求, 短时降水预报成为了业务发展中的重点和难点。目前, 降水的 0~2 h 临近预报技术方法主要包括外推预报、经验预报、统计预报、概率预报等^[1-4]。随着预报时效的增长, 基于雷达、卫星等资料的简单外推预报准确率会大大降低, 更长时效的降水预报需要依赖于高时空分辨率的中尺度数值模式来解决^[5]。因此, 国内外客观降水短时预报的主要思路是外推预报和数值预报相结合, 即 1~3 h 预报需要结合外推预报和数值预报, 3~6 h 预报则以数值预报为主, 而 6~12 h 基本上完全依靠数值预报或利用后处理手段进行订正和释用^[1,5]。随着数值预报技术的迅速发展, 高分辨率中尺度数值预报模式的准确率不断提高, 并广泛地应用于短时临近天气预报预警中^[6-9]。但由于模式初始场的误差, 使得模式预报存在一定

的不确定性。为了最大程度地减小这种不确定性, 集合预报的方法在近年来得到了高度重视和应用发展^[10-13]。

Hoffman 等^[14] 提出了时间滞后集合 (Time-Lagged Ensemble) 的预报方法, 即对不同时刻起报的某一时刻的预报结果进行集合, 形成新的预报结果。Hou 等^[15] 和 Walser 等^[16] 利用时间滞后集合预报方法使高分辨率数值预报模式的短时预报效果有了较好的改善。王婧等^[17] 利用 GRAPES-RAFS 系统 3 h 的 2 m 温度和降水资料进行时间滞后集合产品研究, 发现 2 m 温度和降水集合平均的结果均优于单个集合成员。兰红平等^[18] 对比分析了欧洲中心 TL799 L91 模式对于深圳单点气温的时间滞后集合预报与传统确定性预报的预报能力, 得到时间滞后集合预报总体上优于确定性预报, 而且参与集合的成员数量越多则预报准确率大体上越高的结论。傅娜等^[19] 基于华东区域中尺度快速更新同化系统, 应用时间滞后法进行集合预报, 发现小-大雨量级集合平均优于各集合成员预报。唐文苑等^[20]

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

四川省重点实验室项目(省重点实验室 2018-重点-06、SCQXKJZD2019001、SCQXKJZD202101-3)、中国局预报员专项(CMAYBY2020-110)和中国局气象关键技术项目(YBGJXM(2020)2A-14)共同资助

作者简介: 张武龙, 男, 1988 年生, 工程师, 主要从事降水短时预报研究, Email: zwl_scqx@163.com

收稿日期: 2020 年 9 月 10 日; 定稿日期: 2020 年 12 月 29 日

* 通信作者, Email: 77760543@qq.com

基于 GRAPES-RAFS 模式使用时间滞后集合和频率匹配订正方法,显著提升了逐时降水量的预报效果。

西南区域中尺度数值预报系统(SouthWest Center-WRF ADAS Real-time Modeling System, SWCWARMS)是基于 WRF(3.5.1)和 ARPS5.3.3(ADAS)建立的高分辨率中尺度数值预报系统。近年来,随着 SWCWARMS 模式的不断优化调整,其降水预报效果相较 GRAPES、ECWMF 等全球模式有着自身的优势,在四川省降水预报中发挥着越来越重要的指导作用^[21-24]。Wernli 等^[25]于 2008 年提出一种面向对象的检验方法 SAL,它以研究区域内的降水为目标物,从结构 S (Structure)、强度 A (Amplitude)和位置 L (Location)3 个最关键的因素进行降水预报效果检验,检验结果为 S 、 A 和 L 3 个数值。由于 SAL 方法计算相对简单,能避免双惩罚效应,且能从天气学角度评价整体的预报效果,目前已有不少国内学者对该检验方法开展解释应用^[26-31]。本文在 SWCWARMS 模式逐小时降水预报基础上,通过时间滞后的集合方法构建多个集合成员,使用 SAL 评分值计算相应集合成员权重系数,进行不等权集合平均,形成新的预报结果,并通过 SAL、TS 和 BIAS 检验探讨时间滞后集合预报方法在改进 SWCWARMS 模式预报效果方面的作用。

1 SWCWARMS 模式

SWCWARMS 模式分辨率为 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$,垂直方向为 51 层,中心位置为 32°N 、 100°E ,格点数为 630×400 ,使用 NCEP GFS 全球分析预报资料作为模式初始场和边界条件,同化地面观测、探空、飞机报、卫星亮温和雷达反射率等资料,之后计算 $0 \sim 72\text{ h}$ 逐小时多要素预报,每天运行 4 次(周期 6 h),起报时间分别为北京时间 $02:00$ 、 $08:00$ 、 $14:00$ 、 $20:00$ 。实际业务中模式产品可保证在起报时间后约 $8 \sim 9\text{ h}$ 左右提供至服务器,供预报员调用^[21-22]。

2 方法及原理

2.1 SAL 检验

SAL 检验方法最关键的部分是降水体的识别,其中阈值的确定是识别的基础。在前期对 SAL 检验方法的本地应用中,发现公颖^[26]提出的降水阈值

确定方法并不适用,计算所得阈值在四川省存在偏小的情况^[29]。因此,在前人研究的基础上,提出一种改进后的阈值确定方法,即首先对检验范围内的降水量进行去重处理,将 $\geq 0.1\text{ mm}$ 的降水量从小到大排列得到新的序列,再将最大降水量序号乘以 0.95 后,将最接近该整数序号对应量的 $1/15$ 作为降水阈值,将大于此阈值的格点作为降水主体成员,主体成员内不连续的小降水区域作为降水主体内的降水个体,然后再计算结构(S)、强度(A)和位置(L)值^[29]。 S 、 A 和 L 3 个参数均为无量纲数,计算公式如下^[26]:

$$V_R = \frac{\sum_{n=1}^m R_n V_n}{\sum_{n=1}^m R_n} \quad (1)$$

$$V_n = R_n / R_n^{\max} \quad (2)$$

$$S = \frac{V_{R_{\text{mod}}} - V_{R_{\text{obs}}}}{0.5(V_{R_{\text{mod}}} + V_{R_{\text{obs}}})} \quad (3)$$

式中, n 表示降水水体数($n = 1, 2, 3, \dots, m$); R_n 为第 n 个降水体内的总降水量(mm); R_n^{\max} 为第 n 个降水体内的最大降水量; V_n 为第 n 个降水体内总降水量与最大降水量比值; V_R 为 m 个降水体以体内总降水量 R_n 为权重的 V_n 的加权平均; $V_{R_{\text{mod}}}$ 为预报场的加权平均; $V_{R_{\text{obs}}}$ 为实况场的加权平均。

$S > 0$ 表示预报范围较实况偏大,或者预报降水中心降水量较实况偏小,或者两种情况同时存在; $S < 0$ 表示意义则相反。例如,若实况为大范围强降水,预报为小范围的对流性强降水,此时 $S < 0$ ^[29]。 S 值取值范围为 $[-2, 2]$ 。

$$A = \frac{D_{R_{\text{mod}}} - D_{R_{\text{obs}}}}{0.5(D_{R_{\text{mod}}} + D_{R_{\text{obs}}})} \quad (4)$$

$$D_R = \frac{1}{N} \sum_{(i,j)}^D R_{i,j} \quad (5)$$

式中, D_R 表示研究区域 D 内的非缺测格点降水平均值(mm); $D_{R_{\text{mod}}}$ 为预报场的平均值; $D_{R_{\text{obs}}}$ 为实况场的平均值; $R_{i,j}$ 为格点降水量。

$A > 0$ 表示预报较实况偏强, $A < 0$ 表示预报较实况偏弱, A 绝对值越接近 0 , 表明预报强度与实况越接近^[29]。 A 取值范围为 $[-2, 2]$ 。

$$L = L_1 + L_2 \quad (6)$$

$$L_1 = \frac{|x_{R_{\text{mod}}} - x_{R_{\text{obs}}}|}{d} \quad (7)$$

$$L_2 = \frac{2|r_{R_{\text{mod}}} - r_{R_{\text{obs}}}|}{d} \quad (8)$$

$$r = \frac{\sum_{n=1}^m R_n |x - x_n|}{\sum_{n=1}^m R_n} \quad (9)$$

式中, x_{Rmod} 表示研究区域 D 内预报场降水主体的重心位置; x_{Robs} 表示实况场降水主体的重心位置; d 为研究区域内非缺测格点间的最大距离; x 为降水主体重心; x_n 为第 n 个降水体的重心; r 为 m 个降水体以体内总降水量 R_n 为权重的 $|x - x_n|$ 的加权平均, r 值越大, 表示降水体的降水量越大、离降水主体重心越远; r_{Rmod} 为预报场的加权平均; r_{Robs} 为实况场的加权平均。

L 由 L_1 、 L_2 两部分组成, L_1 为研究区域内预报与实况降水主体重心之间的距离, L_2 为降水主体重心与每个降水体重心之间的平均距离。 L 越接近 0, 预报与实况降水位置越接近^[29]。 L_1 、 L_2 的取值范围均为 $[0, 1]$, L 取值范围为 $[0, 2]$ 。

2.2 TS 和 BIAS 检验

采用邻近插值的方法将格点预报插值到站点上, 得到站点的降水预报结果, 形成基于所有站点的实况与预报一一对应的数据序列, 并以此统计预报准确站数 (N_A)、空报站数 (N_B)、漏报站数 (N_C), 计算 TS (T_S) 和 BIAS (B_{IAS}) 评分值^[32]。

$$T_S = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \quad (10)$$

$$B_{IAS} = \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C} \quad (11)$$

TS 评分在 0~1 之间, TS 评分越大, 预报效果越好。 BIAS 评分范围在 0~∞, BIAS 越接近于 1, 预报效果越好。

2.3 时间滞后集合预报方法

本文所采用的时间滞后集合预报生成方法如图 1 所示, 对于未来某个具体时刻, 选取最近的 4 个起报时次对于该时刻的预报作为集合成员。同时, 为了充分发挥预报效果较好成员的作用, 利用 SAL 检验评估不同起报时次小时降水量的预报性能, 并以此确定不同集合成员的权重系数, 获取最终的集合预报结果。以当前能获得最新的模式预报场 08:00 起报为例, 该起报时次模式资料到达服务器的时间约为当日 17:00 左右。对于当日 18:00, 距离其最近的 4 个起报时次分别为当日的 08:00、02:00, 以及前一天的 20:00、14:00。于是, 将这 4 个起报时次对于当日 18:00 的降水预报, 作为时间滞后预报集

合成员。其次, 按照 4 个起报时次对于当日 17:00 降水预报的 SAL 检验评分值, 对相应的 4 个集合成员分配权重系数, 进行不等权重集合平均, 从而得到新的逐小时降水预报。



图 1 时间滞后集合预报生成方法

Wernli 等^[25]、公颖^[26]、茅懋等^[30]及曲巧娜等^[31]的研究表明, 在 SAL 检验中对降水的预报效果指示意义最好的是位置值 L , L 值越小, 则预报效果好的可能性就越大, 强度值 A 其次, 结构值 S 再次。考虑在实际短时降水预报中, 预报员更关注雨带位置以及强度, 因此在进行成员权重计算时, 结合各参数值取值范围及其数值意义, 对 L 、 A 、 S 值分别赋以 0.5、0.3 和 0.2 的系数, 按照下式计算 SAL 综合评分值, 以便为各集合成员分配权重。

$$I_i = 0.5(2 - L_i) + 0.3(2 - |A_i|) + 0.2(2 - |S_i|) \quad (12)$$

式中, I_i 即为第 i 个集合成员的 SAL 综合评分值; L_i 、 A_i 和 S_i 分别为第 i 个集合成员的位置值、强度值和结构值。

获取各成员综合评分值后, 采用不等权重进行集合平均, 得到最终的时间滞后不等权重集合预报结果。

$$\omega_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (13)$$

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i p_i \quad (14)$$

式中, n 为集合成员个数 4; I_i 为第 i 个集合成员的 SAL 综合评分值; ω_i 为第 i 个集合成员的权重系数; p_i 为第 i 个集合成员的预报结果; P 为不等权重集合平均, 即时间滞后不等权重集合预报结果。需要说明的是, 若在 SAL 检验时, 实况未出现降水, 则无法获取 SAL 检验结果, 此时 ω_i 取 0.25。

3 结果分析

由于 SWCWARMS 模式资料的运算传输时间滞后起报时间约 8~9 h, 本研究以最新模式资料提

供至服务器的时间作为时间滞后集合预报的起报时间,计算未来 1~24 h 时效逐小时降水预报结果。选取 2019 年 8 月 1—31 日逐小时降水量时间滞后集合预报及 SWCWARMs 模式最新时次预报进行对比分析,考虑每隔 6 h 滚动更新,形成新的时间滞后集合预报结果,本文主要针对 1~6 h 时效进行检验分析。检验评分站点选取四川省范围内包括国家级自动气象站以及区域加密自动站共计 4164 个站点(图 2)。

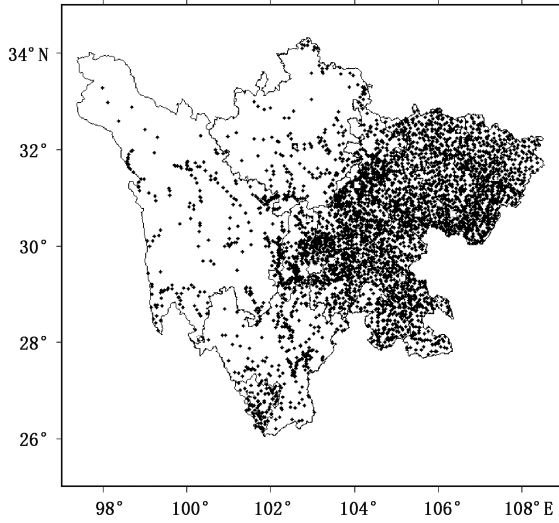


图 2 四川省 4164 个检验评分站点分布

3.1 SAL 评分

考虑 SAL 检验结果中, L 值和 A 值对降水预报效果指示意义较大,而 S 值很大程度上是由模式自身特点(分辨率、预报偏差等)决定,因此本文主要探讨时间滞后集合预报对 SWCWARMs 模式小时降水预报 L 值和 A 值的改进情况。

图 3 为 2019 年 8 月逐日逐个起报时次 1 h、2 h 时效集合预报和模式最新时次预报 SAL 检验中位置值(L)的曲线分布。从图 3 可知,时间滞后集合预报的 L 值在大部分时段内较模式最新时次预报均有一定减小,更接近于 0,说明时间滞后集合预报对降水位置有一定改进。用时间滞后集合预报 L 值检验正订正的预报次数,除以总的预报次数可以得到 L 值检验的正订正百分率(图 4)。从图中可以看到,1~6 h 时效时间滞后集合预报 L 值检验正订正百分率在 60%左右,以 1 h 时效正订正百分率最大,订正效果最明显。

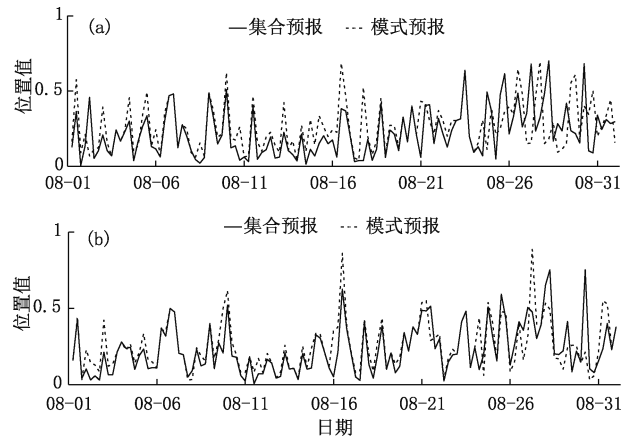


图 3 2019 年 8 月逐日间隔 6 h 起报 1 h(a)和 2 h(b)时效时间滞后集合预报与 SWCWARMs 模式最新时次预报 SAL 检验位置值 L

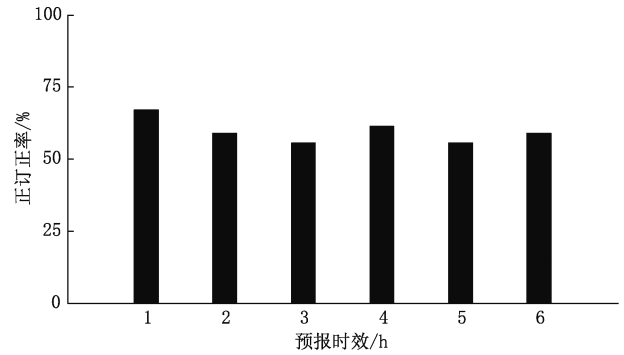


图 4 2019 年 8 月逐日间隔 6 h 起报 1~6 h 时效时间滞后集合预报位置值 L 检验正订正率

图 5 给出了 2019 年 8 月逐日逐个起报时次 1 h 和 2 h 时效集合预报和模式最新时次预报 SAL 检验中强度值(A)的曲线分布。明显地,时间滞后集合预报的 A 值较模式最新时次预报更接近于 0,说明时间滞后集合预报的降水强度与实况更为吻合。从时间滞后集合预报 A 值检验正订正百分率来看,1~6 h 时效的正订正百分率在 65%~100%之间,1 h 时效正订正百分率为 100%,2 h、3 h 均在 95%以上,正订正百分率随着预报时效的临近而增大(图 6)。

3.2 TS 和 BIAS 评分

由于 SAL 检验主要侧重降水预报的天气学检验,缺少降水量级预报方面的信息,因此加入 TS 和 BIAS 评分对小时降水量级进行检验。图 7 是 2019 年 8 月逐日逐个起报时次 1 h 和 2 h 时效集合预报和模式最新时次预报晴雨 TS 评分对比。大致上看,时间滞后集合预报评分要高于模式最新时次预

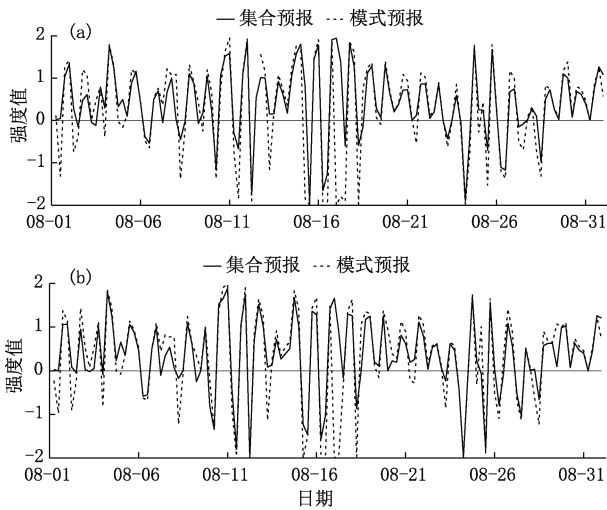


图 5 2019 年 8 月逐日间隔 6 h 起报 1 h(a)和 2 h(b)时效时间滞后集合预报与 SWCWARMS 模式最新时次预报 SAL 检验强度值 A

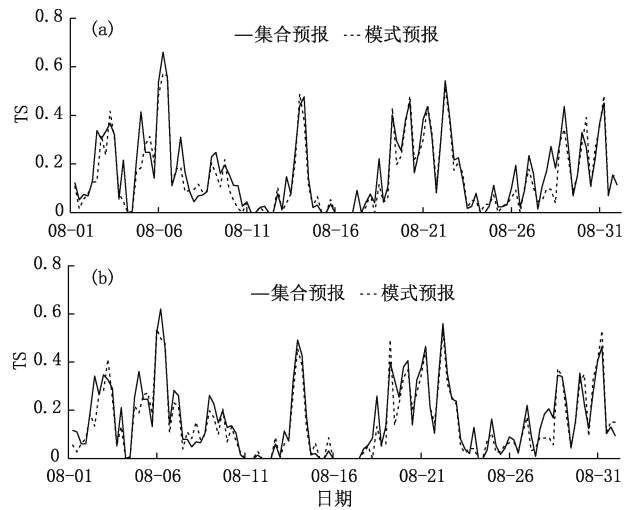


图 7 2019 年 8 月逐日间隔 6 h 起报 1 h(a)和 2 h(b)时效时间滞后集合预报与 SWCWARMS 模式最新时次预报晴雨 TS 评分

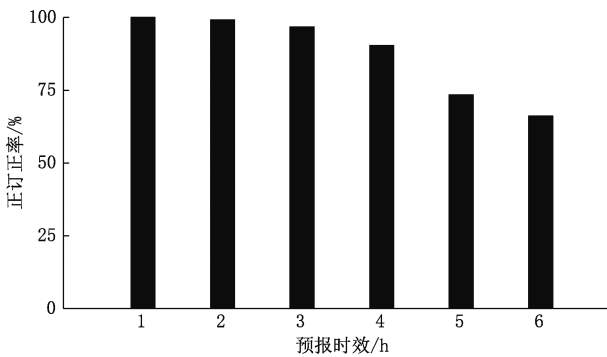


图 6 2019 年 8 月逐日间隔 6 h 起报 1~6 h 时效时间滞后集合预报强度值 A 检验正订正率

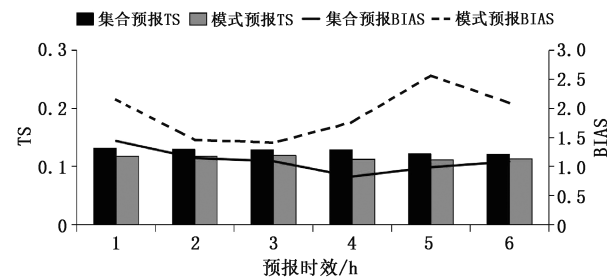


图 8 2019 年 8 月逐日间隔 6 h 起报 1~6 h 时效时间滞后集合预报与 SWCWARMS 模式最新时次预报晴雨 TS 评分和 BIAS 评分

报,特别是对于模式晴雨 TS 评分低于 0.2 的逐小时降水预报有明显的改进效果,对于模式晴雨 TS 评分较高的预报也有所提高。

时间滞后集合预报 1~6 h 时效平均晴雨 TS 评分在 0.121~0.132,相应的 SWCWARMS 模式最新时次的预报 1~6 h 时效平均晴雨 TS 评分在 0.111~0.119(图 8),评分提高百分率在 10%左右(图 9)。此外,SWCWARMS 模式最新时次的预报 1~6 h 时效平均 BIAS 评分均在 1.5 以上,模式预报过度,空报偏高。时间滞后集合预报的 BIAS 评分较模式最新时次预报有所降低,更接近于 1(图 8),有效地减小了模式在晴雨方面的空报。

为了衡量时间滞后集合预报方法对小时强降水预报是否有一定改进,分别对小时降水超过 5 mm、

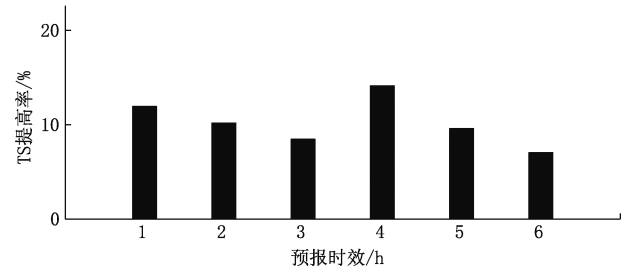


图 9 2019 年 8 月逐日间隔 6 h 起报 1~6 h 时效时间滞后集合预报 TS 评分提高率

20 mm 进行 TS 和 BIAS 评分检验。从图 10a 中可以看出,时间滞后集合预报的 5 mm 以上量级降水 TS 评分在多个时效与模式最新时次预报接近,其中在 2 h、4 h 时效高于模式最新时次预报。在 20 mm 以上量级降水 TS 评分对比中,时间滞后集合预报在 1 h、2 h 时效高于模式最新时次预报(图 10b)。同时,

从 BIAS 评分上可以发现,模式最新时次预报在 5 mm 和 20 mm 以上量级降水均存在空报偏高的问题(图 10)。相比模式最新时次预报,时间滞后集合预报 5 mm 以上量级降水的 BIAS 评分在 2 h、3 h 和 5 h 时效更接近于 1,20 mm 以上量级降水的 BIAS 评分在 1~5 h 时效更接近于 1,表明时间滞后集合预报对于大量级降水方面空报也有所改善。

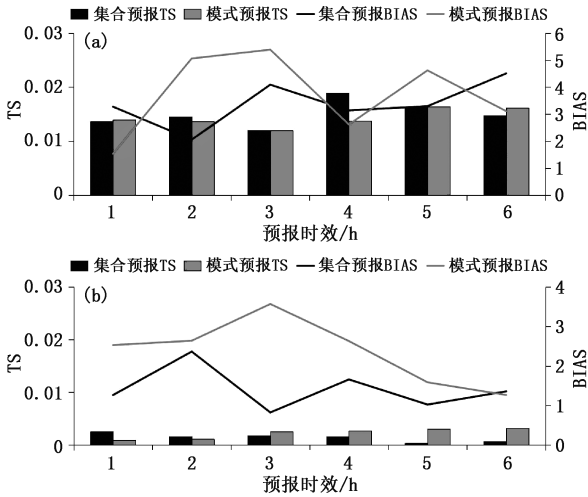


图 10 2019 年 8 逐日间隔 6 h 起报 1~6 h 时效时间滞后集合预报与 SWCWARMs 模式最新时次预报 TS 评分和 BIAS 评分:(a)5 mm 以上,(b)20 mm 以上降水

结合晴雨和分级 TS、BIAS 评分,可以看到时间滞后集合预报方法对于晴雨预报有较好的改进效果,在临近预报时效,可以有效提高大量级降水预报性能。但需要说明的是,随着降水量级的增大,预报时效的延长,时间滞后集合预报的订正效果越不明

显,这与前人的研究结论基本一致^[17,19-20]。造成这样的原因可能有 2 个:①集成员权重系数的选取是基于 SAL 检验评分值,主要考虑降水雨带整体位置、强度等预报效果,而缺乏对局地的大量级降水检验信息的反馈;②随着预报时效的延长,模式自身预报的准确性下降,集合预报对于大量级降水的平滑作用显得尤为突出,使得大量级降水 TS 评分可能不如单个集成员。

3.3 个例讨论

2019 年 8 月 22 日凌晨前后,受 500 hPa 高空槽及低层偏南暖湿气流影响,在四川盆地西部、川西高原以及攀西地区出现了雷阵雨天气,在盆地西南部及攀西地区个别地方出现了短时强降水。选取降水较强时段进行预报效果评估分析(图 11)。小时降水实况显示(图 11a),22 日 06:00,降水主体位于盆地西南部,最大小时雨量在 10~25 mm。对比 SWCWARMs 模式最新时次预报,降水量级预报与实况接近,但对于降水雨带位置的把握上,并没有表现出优势,整体上较实况偏北偏西(图 11b)。通过使用时间滞后集合方法后,降水主体的位置明显的向南向东进行了调整,与实况更为吻合(图 11c)。同时,时间滞后集合方法有效地减小了模式最新时次预报对于川西高原和攀西地区 0~2.5 mm 降水的空报和漏报,并且对于攀西地区较强降水的位置、形态也有很好的改进效果。该个例的 SAL 和 TS 评分如表 1 和 2 所示,从对降水预报效果指示意义较大的 L 值和 A 值来看,时间滞后集合预报均较模式最新时次预报更接近于 0(表 1);同时,对于不同

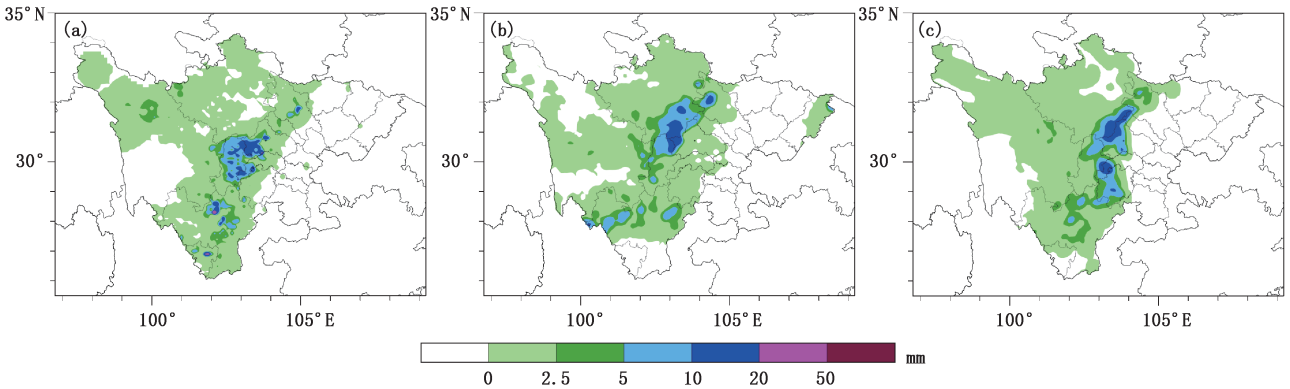


图 11 2019 年 8 月 22 日 06:00 降水实况(a)及 SWCWARMs 模式最新时次(b)、时间滞后集合(c)预报

量级降水的 TS 评分,时间滞后集合预报均高于模式最新时次预报(表 2)。因此,无论从主观对比,还是客观检验评分来看,时间滞后集合方法对 SWCWARMS 模式预报均有较好的订正效果。

表 1 2019 年 8 月 22 日 06:00 时间滞后集合预报与 SWCWARMS 模式最新时次预报 SAL 评分

	S	A	L
集合预报	1.14	-0.30	0.24
模式预报	1.01	-0.36	0.27

表 2 2019 年 8 月 22 日 06:00 时间滞后集合预报与 SWCWARMS 模式最新时次预报不同量级降水 TS 评分

	≥ 0.1 mm	≥ 1 mm	≥ 5 mm	10~25 mm
集合预报	0.58	0.36	0.17	0.08
模式预报	0.47	0.24	0.07	0.03

4 结论与讨论

基于 SWCWARMS 模式 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$ 分辨率逐小时降水预报,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权重系数,进行不等权集合平均,从而得到新的逐小时降水预报。利用 SAL、TS 和 BIAS 检验方法对 2019 年 8 月的逐小时降水量时间滞后集合预报及 SWCWARMS 模式最新时次的预报进行对比分析,结果表明:

(1)时间滞后集合预报 SAL 检验的 L 值和 A 值都较模式最新时次预报更接近于 0,较好地改善了逐小时降水位置和强度的整体预报水平。

(2)时间滞后集合预报对逐小时降水晴雨 TS 评分提升明显,总体晴雨 TS 评分提高百分率在 10%左右,有效地减小了模式在晴雨方面的空报。

(3)在临近预报时效,时间滞后集合预报方法对于大量级降水的预报性能也有所提升。但随着降水量级的增大,预报时效的延长,时间滞后集合预报的订正效果越不明显。

(4)对 2019 年 8 月 22 日凌晨前后四川盆地西南部出现的强降水过程检验分析表明,模式最新时次预报并不是最优选择,时间滞后预报方法有效地提升了降水雨带位置、形态的预报效果。

整体而言,时间滞后集合预报对 SWCWARMS 模式逐小时降水预报效果有一定的改进,可为四川

省降水短时业务预报提供客观技术产品支撑。下一步仍需通过优化选取不同集合成员权重或者结合雷达外推、频率匹配订正等方法,改善时间滞后集合预报对于大量级降水的订正效果。此外,本研究中的时间滞后集合预报是基于单一模式的集合,容易受到模式自身偏差的影响,可引入不同模式不同起报时次的预报结果,充实集合成员,并通过不同的权重系数自动挑选优势成员,并剔除预报效果较差的成员或减弱其影响,进一步提高集合预报的应用水平,提升逐小时降水预报准确率。

参考文献

- [1] 郑永光,周康辉,盛杰,等.强对流天气监测预报预警技术进展[J].应用气象学报,2015,26(6):641-657.
- [2] 丁建军,胡文东,赵光平,等.基于雷达跟踪外推及 Google Maps 的强对流天气临近预报[J].气象科技,2011,39(6):779-784.
- [3] 薛峰,王兴,吴双,等.雷达外推与数值模式动态融合降水概率预报方法[J].气象科技,2017,45(6):1036-1042.
- [4] 郑淋淋,邱学兴.一种改进的降水临近外推预报技术方法研究及效果检验[J].气象科技,2020,48(1):97-106.
- [5] 俞小鼎,周小刚,王秀明.雷暴与强对流临近天气预报技术进展[J].气象学报,2012,70(3):311-337.
- [6] 郭肖容.高分辨率业务数值预报模式的进展[J].气象科技,1990,18(2):1-6.
- [7] 漆梁波.高分辨率数值模式在强对流天气预警中的业务应用进展[J].气象,2015,41(6):661-673.
- [8] 程丛兰,陈明轩,王建捷,等.基于雷达外推临近预报和中尺度数值预报融合技术的短时定量降水预报试验[J].气象学报,2013,71(3):397-415.
- [9] 雷蕾,孙继松,王国荣,等.基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验[J].气象学报,2012,70(4):752-765.
- [10] 张小礼.集合预报简介[J].气象科技,1996,24(2):9-14.
- [11] 吴增茂,张新玲.大气系统集合预报方法及应用研究的发展[J].气象科技,2000,28(1):16-20.
- [12] 关吉平,张立凤,张铭.集合预报研究现状与展望[J].气象科学,2006,26(2):228-235.
- [13] 段明铿,王盘兴.集合预报方法研究及应用进展综述[J].大气科学学报,2004,27(2):279-288.
- [14] Hoffman R N, Kalnay E. Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting [J]. Tellus A, 1983, 35(2):100-118.
- [15] Hou D, Kalnay E, Droegemeier K K. Objective verification of the SAMEX 98 ensemble forecasts [J]. Mon Wea Rev, 2001, 129(1): 73-91.
- [16] Walser A, Lüthi D, Schär C. Predictability of precipitation in a cloud-resolving mode [J]. Mon Wea Rev, 2004, 132(2):

- 560-577.
- [17] 王婧, 徐枝芳, 李泽椿. 基于 GRAPES-RAFS 系统的 Time-lagged 集合产品技术研究[C]//第 32 届中国气象学会年会 S3 军用数值天气预报技术及应用论文集, 2015:238-251.
- [18] 兰红平, 李磊, 马晓光. 深圳单点气温的时间滞后集合预报研究[J]. 气象科学, 2011, 31(2):200-204.
- [19] 傅娜, 陈葆德, 谭燕, 等. 基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验[J]. 气象, 2013, 39(10):1247-1256.
- [20] 唐文苑, 郑永光. 基于快速更新同化数值预报的小时降水量时间滞后集合订正技术[J]. 气象, 2019, 45(3):305-317.
- [21] 衡志炜, 程晓龙. 西南涡加密资料同化对西南区域模式降水预报的影响[J]. 高原山地气象研究, 2018, 38(2):3-10.
- [22] 屠妮妮, 何光碧, 衡志炜, 等. SWCWARMS 模式对西南区域预报能力的检验[J]. 高原山地气象研究, 2017, 37(3):21-30.
- [23] 屠妮妮, 衡志炜, 吴蓬萍, 等. SWCWARMS 模式及 GRAPES 模式对西南区域降水预报检验对比分析[J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(4):1-9.
- [24] 范江琳, 曹萍萍, 肖逸祥, 等. 西南区域中心模式 SWC-WARMS 降水偏差分析[J]. 气象科学, 2019, 39(3):349-358.
- [25] Wernli H, Paulat M, Hagen M, et al. SAL-A novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts [J]. Mon Wea Rev, 2008, 136(11): 4470-4487.
- [26] 公颖. SAL 定量降水预报方法的解释与应用[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(2):153-159.
- [27] 黄娟, 赵放, 李文娟, 等. “SAL”方法在短时融合降水检验评估中的应用[J]. 科技通报, 2019, 35(10):33-38.
- [28] 史小康, 刘健文, 李耀东, 等. SAL 方法改进及其在土壤湿度区域预报效果检验中的应用[J]. 中国科学:地球科学, 2014, 44(9):2039-2051.
- [29] 王彬雁, 陈朝平, 黄楚惠. SAL 方法在四川降水预报检验中的应用[J]. 干旱气象, 2020, 38(3):472-479.
- [30] 茅懋, 戴建华, 李佰平, 等. 不同类型强对流预报产品的目标对象检验与分析评价[J]. 气象, 2016, 42(4):389-397.
- [31] 曲巧娜, 盛春岩, 范苏丹, 等. 基于目标对象检验法的多种模式强降水能力的比较[J]. 气象, 2019, 45(7):908-919.
- [32] 李明, 袁凯, 翟红梅. 一种面向对象的强降水精细化预报质量检验方法及应用[J]. 暴雨灾害, 2017, 36(1):81-85.

Time-Lagged Ensemble Forecast of Hourly Precipitation Based on SWCWARMS Model

ZHANG Wulong^{1,2} WANG Binyan^{1,2} CHEN Chaoping^{1,2} FENG Hanzhong^{1,2}

(1 Sichuan Provincial Meteorology Observatory, Chengdu 610072; 2 Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072)

Abstract: Based on the hourly precipitation from the 9 km × 9 km resolution SWCWARMS model, ensemble members are formed by the time-lagged ensemble forecast method. A new hourly precipitation forecast is obtained from the ensemble average of differential weights, which are calculated by the SAL scores of ensemble members. This study verified the time-lagged ensemble and the model up-to-date forecast of hourly precipitation in Sichuan from 1 to 31 August 2019 by the SAL, TS and BIAS evaluation method. The results show: (1) The time-lagged ensemble method led to improvement on the overall level of the rainfall intensity and location forecast. The values *L* and *A* of SAL scores were both closer to 0. (2) The clear-rain TS score of time-lagged ensemble forecast was higher, and the percentage increase was about 10%. The method can reduce the false alarm of rain forecast. (3) In the lead time of nowcasting, the improvement of the high intensity precipitation forecast was also obvious.

Keywords: time lag; unequally weighted ensemble forecast; hourly precipitation; SAL evaluation