

高星星,潘留杰,王瑾,等.基于频率匹配和融合法的多种网格降水预报产品订正[J].陕西气象,2021(6):9-14.

文章编号:1006-4354(2021)06-0009-06

基于频率匹配和融合法的多种 网格降水预报产品订正

高星星^{1,2},潘留杰^{1,2},王瑾^{2,3},张煦庭^{1,2},梁绵^{1,2}

(1. 陕西省气象台,西安 710014;

2. 陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室,西安 710016;

3. 陕西省人工影响天气中心,西安 710016)

摘要:为进一步提高陕西省精细化网格降水预报能力,利用EC细网格(下简称EC)、Grapes_Meso 3 km(下简称Grapes)和SCMOC(中国气象局下发指导产品)降水预报产品,采用卡尔曼滤波、频率匹配和融合方法,研发了一套降水预报新产品。结果表明:频率匹配可明显提高各降水预报产品晴雨预报质量,但对强降水预报改善效果不稳定,融合方法可解决该问题;较订正前的EC、Grapes和SCMOC降水预报产品,新产品24 h晴雨预报准确率分别提高了15.06%、8.68%和1.50%,强降水预报TS评分分别提高了42.61%、76.00%和1.27%,强降水预报TS评分的提高是以增加空报率为代价的;新产品3 h晴雨预报准确率较订正前EC、Grapes、SCMOC分别提高了10.28%、4.07%和0.54%,强降水预报TS评分较订正前EC、SCMOC分别提高了54.44%和9.65%,与Grapes基本持平,强降水预报BIAS偏差幅度较订正前EC、SCMOC分别降低了56.65%和51.88%;新产品1 h晴雨预报准确率较Grapes和SCMOC分别提高了2.29%和2.10%,强降水预报TS评分和强降水预报BIAS偏差幅度与Grapes和SCMOC持平。

关键词:卡尔曼滤波;频率匹配;融合;客观订正

中图分类号:P456

文献标识码:A

由于模式本身的不足,包括降水在内的许多气象要素预报都存在着系统性的偏差。气象工作者发展了一系列后处理技术来量化降水预报中的不确定性和减少预报的系统性偏差。频率匹配是近年来发展的模式降水预报后处理技术中最为有效的方法之一。本质上来说,频率匹配是通过调整降水预报值,使其在特定的阈值范围内的降水预报频率与观测频率一致来实现的。已有的工作中,李莉和朱跃建^[1]、李俊等^[2-3]采用频率匹配方法分别对T213和AREM模式降水预报进行了

订正,结果表明该方法对T213和AREM模式降水预报的偏差有明显改善。在此基础上,周迪等^[4]和曹萍萍等^[5]均针对格点本身进行了频率匹配订正,解决了整个研究区域采用相同订正系数时,会使得预报偏湿地方订正后空报率减小的同时预报偏干地方漏报率增加的问题。Zhu and Luo^[6]、智协飞和吕游^[7]为了寻找更合理的累计分布函数,将卡尔曼滤波应用到降水的频率统计上,然后进行频率匹配订正,提高了模式对降水的预报技巧。在原理上,频率匹配方法能通过改变

收稿日期:2021-01-14

作者简介:高星星(1991—),女,陕西咸阳人,博士,工程师,从事网格气象要素预报客观订正研究。

通信作者:潘留杰(1978—),男,陕西石泉人,硕士,正研,主要从事天气预报及其研究。

基金项目:陕西省气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2020G-4);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JQ-976)

雨区范围大小有效减小降水预报误差,降水的分布型也更加准确,但不能订正降水落区偏差。这就意味着该方法对于局地降水或小范围降水的订正效果往往较差,而暴雨具有较强的局地性,对于暴雨降水落区预报的改进,则需要靠模式自身预报能力的改善^[8-9]。集合预报可获得其它模式的优点,打破预报技巧受模式本身预报性能的瓶颈限制。传统多模式集成或集合有可能平滑掉天气过程中的异常信号,特别是在集合(集成)成员过多的情况下,确定每个格点上每个成员的权重系数变得十分复杂^[10]。正是由于这些原因,陕西省气象局精细化气象格点预报攻关团队在时空检验的基础上,提出了一种多种产品融合的网格降水预报释用方法(下简称融合方法)。本研究将卡尔曼滤波应用到降水的频率统计上,然后分别针对 EC 细网格(下简称 EC)、Grapes_Meso 3 km(下简称 Grapes)和 SCMOC(中国气象局下发的指导产品)降水预报产品每个格点本身进行频率匹配订正,选取前期检验预报效果最优的 SCMOC 降水产品为背景,对基于频率匹配技术订正后的 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品进行融合,进一步订正暴雨预报,以期得到一套较高质量的降水预报新产品,提高精细化网格降水产品对实际预报业务的支撑能力。

1 资料与方法

1.1 资料

选取 2020 年 7 月 1 日至 12 月 31 日每日 00 时和 12 时起报的 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品(时间均为世界时)。EC、Grapes 和 SCMOC 空间分辨率分别为 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 、 $0.03^{\circ} \times 0.03^{\circ}$ 和 $0.025^{\circ} \times 0.025^{\circ}$,时间分辨率分别为 3 h、1 h 和 1 h,预报时效分别为 240 h、36 h 和 240 h。所有降水预报资料统一处理到 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 网格,所用 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报资料预报时效分别为 36 h、36 h 和 24 h。降水实况数据选取 2020 年 7 月 1 日至 12 月 31 日陕西省境内逐 1 h 的累计 24 h 站点降水观测资料,共 1 546 个站。

1.2 方法

新产品涉及方法:首先基于频率匹配技术对 EC、Grapes 和 SCMOC 24 h 降水预报产品进行

客观订正,然后通过前期检验的最优降水预报产品 SCMOC 为背景,对基于频率匹配技术订正后的 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品进行融合,即可得到新产品 24 h 降水预报;新产品 3 h 晴雨预报按订正后 EC 3 h 降水预报值占订正后 EC 24 h 降水预报值比例从新产品 24 h 降水预报中获取,新产品 3 h 强降水预报同 SCMOC 3 h 强降水预报产品,订正后 EC 3 h 降水预报产品是按照订正前 EC 3 h 降水预报值占订正前 EC 24 h 降水预报值比例从订正后 EC 24 h 降水预报产品中获取;新产品 1 h 降水预报按 EC 1 h 温度露点差预报值占 EC 3 h 温度露点差预报值比例从新产品 3 h 降水预报中分取,其中,EC 1 h 温度露点差按照线性比例从 EC 3 h 温度露点差中获取。

频率匹配方法:按照升序给出一系列降水阈值,并分别计算出他们对应的一系列观测降水频率和预报降水频率,由此构建观测降水频率随降水强度变化曲线和预报降水频率随降水强度变化曲线,两曲线均呈单调递减。对于任一格点预报降水量,在观测曲线上均存在某一点的频率值与其频率值相等,这个点对应的观测降水量为该格点预报降水量订正后的值。从求任一格点预报降水量对应的降水频率到完成订正需经过两次线性内插,累积分布函数 f 为某一给定空间内降水量超过某一阈值的站点数,降水频率为 f 与总站点数的比值,观测与预报的 f 通过卡尔曼滤波方法迭代更新,表达式为

$$\overline{f_{i,j}} = (1-W)\overline{f_{i,j-1}} + W(f_{i,j}), \quad (1)$$

式中, $f_{i,j}$ 为第 j 天阈值为 i 的 f , $\overline{f_{i,j}}$ 为第 j 天阈值为 i 的递减平均 f , $\overline{f_{i,j-1}}$ 为第 j 天前一天的递减平均 f , $f_{i,0}$ 为第 0 天阈值为 i 的 f ,该值取气候态平均值。 W 是递减权重系数,变化范围为 $0 \sim 1$,表达式为

$$W = \frac{1}{n_d}, \quad (2)$$

n_d 为训练期长度,本研究 n_d 为 30 d。

融合方法:该方法分为高阈值限定和低阈值隔离两步。以通过前期检验的最优降水预报 SCMOC 模式为背景场,当经频率匹配技术订正后的 EC、Grapes 和 SCMOC 与背景场出现分歧,背

景场某个网格点上降水量 < 降水量高阈值, 而 EC、Grapes 或 SCMOC 降水量 \geq 降水量高阈值时, 则采用高阈值限定, 将降水量高阈值融合到背景场中。在高阈值限定处理完成后, 针对背景场预报的弱降水, 采用低阈值隔离方法。当背景场降水量 < 降水量低阈值, 其他模式未预报降水, 且其他模式在给定格点上的晴雨预报准确率高于 80%, 将其隔离, 不预报降水。通过高阈值限定和低阈值隔离形成预报产品后, 将最终预报产品纳入逐日检验, 如果评分降低, 则根据检验结果重新调整高、低阈值。

选择最近的网格点与各检验站点进行匹配。检验指标包括 24 h、3 h、1 h 晴雨预报准确率、强降水预报 TS 评分、强降水预报 BIAS 偏差幅度。晴雨阈值、24 h 强降水阈值、3 h 强降水阈值和 1 h 强降水阈值分别为 0.1 mm、50 mm、20 mm 和 20 mm。

预报准确率 $P_c = (N_A + N_D) / (N_A + N_B + N_C + N_D) \times 100\%$, (3)

强降水预报 TS 评分 $T_s = N_A / (N_A + N_B + N_C) \times 100\%$, (4)

强降水预报 BIAS 偏差幅度 $B = \left| \frac{N_A + N_B}{N_A + N_C} - 1 \right|$ 。 (5)

式中, N_A 为有降水预报正确站(次)数, N_B

为空报站(次)数, N_C 为漏报站(次)数, N_D 为无降水预报正确的站(次)数。

2 结果与分析

2.1 订正前各降水预报产品检验结果

2020 年 7 月 1 日至 12 月 31 日各降水预报产品每日 00 时和 12 时起报的未来 24 h 逐 24 h 间隔降水综合检验结果见表 1, 有效样本数共 296 个。SCMOC 24 h 降水预报产品晴雨预报准确率和强降水 TS 评分分别为 79.92% 和 0.17, 均高于 EC 和 Grapes; Grapes 晴雨预报准确率和 EC 强降水 TS 评分仅次于 SCMOC, 分别为 74.63% 和 0.12; EC 晴雨预报准确率和 Grapes 强降水 TS 评分最小, 分别为 70.50% 和 0.10。表明就 24 h 晴雨预报准确率和 24 h 强降水预报 TS 评分这 2 项指标来看, SCMOC 降水预报产品质量最好。Grapes 和 SCMOC 强降水预报偏差都大于 1, EC 强降水预报偏差小于 1, 表明 Grapes 和 SCMOC 对强降水的空报次数均多于漏报次数, 而 EC 相反; Grapes 强降水预报 BIAS 偏差幅度最大, 为 0.48, EC 强降水预报 BIAS 偏差幅度最小, 为 0.04。各降水预报产品 00 时和 12 时分别起报的未来 24 h 逐 24 h 间隔降水检验结果与综合检验结果类似。

表 1 2020-07-01—12-31 各降水预报产品每日 00 时和 12 时起报的未来 24 h 逐 24 h 间隔降水订正前后综合检验结果

检验指标	EC		Grapes		SCMOC		新产品
	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后	
晴雨预报准确率/%	70.50	81.41	74.63	78.08	79.92	80.88	81.11
强降水预报 TS 评分	0.12	0.12	0.10	0.12	0.17	0.14	0.17
强降水预报 BIAS 偏差幅度	0.04	0.03	0.48	0.21	0.40	0.18	0.61

2020 年 7 月 1 日至 12 月 31 日各降水预报产品每日 00 时和 12 时起报的未来 24 h 逐 3 h 和 1 h 间隔降水综合检验结果分别见表 2 和表 3, 有效样本数分别为 2 374 和 2 371 个。SCMOC 3 h 和 1 h 降水预报产品晴雨预报准确率均最高, 分别为 88.72% 和 93.18%, EC 3 h 降水预报产品晴雨预报准确率和 Grapes 1 h 降水预报产品晴

雨预报准确率均最低, 分别为 80.88% 和 93.02%; Grapes 3 h 降水预报产品强降水预报 TS 评分最高, 为 0.03, 强降水预报 BIAS 偏差幅度最小, 为 0, EC 3 h 降水预报产品强降水预报 TS 评分最低, 为 0.02, 强降水预报 BIAS 偏差幅度最大, 为 0.58; Grapes 和 SCMOC 1 h 降水预报产品强降水预报 TS 评分和强降水预报 BIAS 偏

差幅度均为 0。由此可见,EC、Grapes 和 SCMOC 3 种降水预报产品中,3 h 降水预报产品晴雨预报 SCMOC 质量最好,EC 质量最差,3 h 强降水预报 Grapes 质量最好,EC 质量最差;Grapes 和 SCMOC 降水预报产品中,1 h 降水预报产品晴雨预报 SCMOC 质量最好,Grapes 质量最差,1 h 降水预报产品强降水预报 Grapes 和 SCMOC 质量持平。

表 2 2020-07-01—12-31 各降水预报产品每日 00 时和 12 时起报的未来 24 h 逐 3 h 间隔降水综合检验结果

检验指标	EC	Grapes	SCMOC	新产品
晴雨预报准确率/%	80.88	85.71	88.72	89.20
强降水预报 TS 评分	0.02	0.03	0.03	0.03
强降水预报 BIAS 偏差幅度	0.58	0	0.53	0.25

表 3 2020-07-01—12-31 各降水预报产品每日 00 时和 12 时起报的未来 24 h 逐 1 h 间隔降水综合检验结果

检验指标	Grapes	SCMOC	新产品
晴雨预报准确率/%	93.02	93.18	95.15
强降水预报 TS 评分	0	0	0
强降水预报 BIAS 偏差幅度	0	0	0

2.2 经频率匹配订正后各降水预报产品检验结果

经频率匹配技术订正后的 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品 24 h 晴雨预报准确率均较订正前有所提高,分别提高了 15.47%、4.61% 和 1.21%,其中,EC 24 h 晴雨预报准确率提升幅度最大,SCMOC 提升幅度最小(表 1);仅订正后的 Grapes 降水预报产品的 24 h 强降水 TS 评分较订正前有所提高,提高了 18.69%(表 1),订正后的 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品 24 h 强降水预报 BIAS 偏差幅度较订正前更趋近于 0(表 1),且订正后的 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品小雨空报率也分别降低了 26.71%、9.73% 和 1.39%。由此可见,频率匹配订正技术可明显提升 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品晴雨预报的准确率,尤其是 EC 晴雨预报准确率;同时,还可降低 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品的强降水预报 BIAS 偏差幅度,仅对

Grapes 预报产品强降水 TS 评分有改进作用;此外,该订正技术还可解决 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品小雨空报的问题。频率匹配订正技术对强降水预报的改善效果不稳定,这主要与方法无法订正降水落区有关。当降水落区错报时,经该方法订正后的效果改变不大甚至变差,而现有的降水预报产品对强降水落区的预报水平要远差于晴雨预报,因而频率匹配订正技术对强降水的改善效果差于晴雨预报。

2.3 经频率匹配订正再经融合后各降水预报产品检验结果

考虑到频率匹配订正技术对强降水改善效果不稳定,接下来在频率匹配订正技术订正基础上,采用多种降水预报产品融合方法以期实现对强降水预报效果的改善。融合后新产品 24 h 晴雨预报准确率和 24 h 强降水预报 TS 评分均高于订正前的 EC、Grapes 和 SCMOC,其中,新产品 24 h 晴雨预报准确率较订正前 EC、Grapes 和 SCMOC 分别提高了 15.06%、8.68% 和 1.50%;24 h 强降水预报 TS 评分较订正前 EC、Grapes 和 SCMOC 分别提高了 42.61%、76.00% 和 1.27%(表 1);新产品 24 h 强降水预报 BIAS 偏差幅度较订正前 EC、Grapes 和 SCMOC 均有了明显增加,分别增加了 1 496.20%、28.67% 和 53.41%(表 1)。由此可见,新产品 24 h 强降水预报 TS 评分提高是以增加强降水空报率为代价的;相对于 24 h 晴雨预报,融合方法主要可改善各降水预报产品中强降水的预报效果。

新产品 3 h 晴雨预报准确率和 3 h 强降水预报 TS 评分均高于或等于订正前的 EC、Grapes 和 SCMOC,其中,新产品 3 h 晴雨预报准确率较订正前 EC、Grapes、SCMOC 分别提高了 10.28%、4.07% 和 0.54%(表 2),3 h 强降水预报 TS 评分较订正前 EC、SCMOC 分别提高了 54.44% 和 9.65%,与 Grapes 基本持平(表 2)。新产品 3 h 降水空报率小于漏报率,3 h 强降水预报 BIAS 偏差幅度较订正前 EC 和 SCMOC 分别降低了 56.65% 和 51.88%,而较 Grapes 明显增加(表 2)。就 3 h 晴雨预报准确率、3 h 强降水预报 TS 评分和 3 h 强降水预报 BIAS 偏差幅度这 3 项检

验指标而言,新产品 3 h 降水优于 EC 和 SCMOC。

新产品 1 h 降水预报晴雨预报准确率较 Grapes 和 SCMOC 均有明显提高,分别提高了 2.29%和 2.10%(表 3);1 h 强降水预报 TS 评分和 1 h 强降水预报 BIAS 偏差幅度均为 0,与 Grapes 和 SCMOC 均持平,这主要与参与检验样本(Grapes 1 h 降水预报产品、SCMOC 1 h 降水预报产品及新产品 1 h 降水预报)降水量级均小于 1 h 强降水阈值有关。

2.4 个例检验结果

2020 年 8 月陕西共发生了 2 次强降水过程,分别发生在 4—7 日和 12—19 日。由表 4 可知,各 24 h 降水预报产品在 4—7 日降水过程中的强降水预报质量均好于 12—19 日降水过程,而晴雨

预报质量均差于 12—19 日降水过程;就 EC、Grapes 和 SCMOC 24 h 降水预报产品而言,SCMOC 在 2 次降水过程中的晴雨预报质量均最好,EC 和 SCMOC 分别在 4—7 日和 12—19 日降水过程中的强降水预报质量最好,Grapes 在 2 次降水过程中的晴雨预报和强降水预报质量均最差;经频率匹配技术订正后的 EC、Grapes 和 SCMOC 24 h 降水预报产品在 2 次强降水过程中的晴雨预报准确率均高于订正前,订正后的各降水预报产品强降水 TS 评分在 2 次强降水过程中的改善不稳定;新产品在 2 次强降水过程中的晴雨预报准确率和强降水 TS 评分均高于订正前后的 EC、Grapes 和 SCMOC,且强降水预报 BIAS 偏差幅度也较大。

表 4 各 24 h 降水预报产品在 2020 年 8 月陕西两次强降水过程中检验结果

产品名称	4—7 日过程			12—19 日过程			
	晴雨预报	强降水预报	强降水预报	晴雨预报	强降水预报	强降水预报	
	准确率/%	TS 评分	BIAS 偏差幅度	准确率/%	TS 评分	BIAS 偏差幅度	
EC	订正前	74.47	0.28	0.13	84.56	0.13	0.06
	订正后	77.11	0.29	0.06	85.89	0.10	0.11
Grapes	订正前	70.79	0.20	0.03	82.88	0.10	1.11
	订正后	71.71	0.21	0.10	82.95	0.12	0.94
SCMOC	订正前	77.11	0.27	0.11	86.18	0.15	0.77
	订正后	77.89	0.25	0.24	86.39	0.11	0.06
新产品		78.03	0.30	0.43	86.95	0.17	0.77

3 结论与讨论

(1)2020 年 7 月 1 日—12 月 31 日各降水预报产品统计检验结果表明,相较于 EC 和 Grapes,SCMOC 降水预报产品 24 h 晴雨预报准确率(79.92%)和强降水 TS 评分(0.17)、3 h 晴雨预报准确率(88.72%)、1 h 晴雨预报准确率(93.18%)均最高,24 h 强降水预报 BIAS 偏差幅度(0.40)、3 h 强降水预报 TS 评分(0.03)和强降水预报 BIAS 偏差幅度(0.53)均居中,1 h 强降水预报 TS 评分和强降水预报 BIAS 偏差幅度与其持平,表明 SCMOC 降水预报产品质量最好。

(2)经频率匹配技术订正后的 EC、Grapes 和 SCMOC 24 h 降水预报产品,较订正前,其晴雨预

报准确率均有所提高,分别提高了 15.47%、4.61%和 1.21%,强降水预报 BIAS 偏差幅度均更趋近于 0,小雨空报率也均分别降低了 26.71%、9.73%和 1.39%,仅订正后 Grapes 强降水 TS 评分有所提高。由此可见,频率匹配订正技术可明显提升 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品有雨或无雨定性晴雨预报的准确率,尤其是 EC 晴雨预报准确率;同时,还可降低 EC、Grapes 和 SCMOC 强降水预报 BIAS 偏差幅度,对强降水预报的改善效果不稳定主要与方法无法订正降水落区有关;此外,该订正技术还可解决 EC、Grapes 和 SCMOC 降水预报产品小雨空报的问题。

(3)新产品 24 h 晴雨预报准确率较订正前 EC、Grapes 和 SCMOC 分别提高了 15.06%、8.68%和 1.50%，强降水预报 TS 评分分别提高了 42.61%、76.00%和 1.27%，强降水预报 TS 评分的提高是以增加强降水空报率作为代价的；新产品 3 h 晴雨预报准确率较订正前 EC、Grapes、SCMOC 分别提高了 10.28%、4.07%和 0.54%，强降水预报 TS 评分分别提高了 54.44%、0%和 9.65%，强降水预报 BIAS 偏差幅度较订正前 EC 和 SCMOC 分别降低了 56.65%和 51.88%；较 Grapes 和 SCMOC，新产品 1 h 晴雨预报准确率分别提高了 2.29%和 2.10%，强降水预报 TS 评分和强降水预报 BIAS 偏差幅度持平。可见，新产品对强降水的预报质量较融合前明显提升，表明融合方法可解决频率匹配技术对强降水预报改善效果不稳定的问题。

参考文献：

- [1] 李莉,朱跃建. T213 降水预报订正系统的建立与研究[J]. 应用气象学报, 2006, 17(增刊):130-134.
- [2] 李俊,杜钧,陈超君. 降水偏差订正的频率(或面积)匹配方法介绍和分析[J]. 气象, 2014, 40(5): 580-588.
- [3] 李俊,杜钧,陈超君. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究[J]. 气象, 2015, 41(6):674-684.
- [4] 周迪,陈静,陈朝平,等. 暴雨集合预报-观测概率匹配订正法在四川盆地的应用研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2):97-104.
- [5] 曹萍萍,肖递祥,徐栋夫,等. 基于概率匹配的西南区域模式定量降水订正试验[J]. 气象科技, 2018, 46(1):102-111.
- [6] ZHU Yuejian, LUO Yan. Precipitation Calibration Based on the Frequency - Matching Method [J]. Weather and Forecasting, 2015, 30 (5): 1109 - 1124.
- [7] 智协飞,吕游. 基于频率匹配法的中国降水多模式预报订正研究[J]. 大气科学学报, 2019, 42(6): 814-823.
- [8] 毕宝贵,代刊,王毅,等. 定量降水预报技术进展[J]. 应用气象学报, 2016, 27(5):534-549.
- [9] HAMILL T M, ENGLE E, MYRICK D, et al. The US National Blend of Models Statistical Post-Processing of Probability of Precipitation and Deterministic Precipitation Amount [J]. Monthly Weather Review, 2012, 145(9):3441-3463.
- [10] 金荣花,代刊,赵瑞霞,等. 我国无缝隙精细化网格天气预报技术进展与挑战[J]. 气象, 2019, 45 (4):445-457.