

网格降水预报客观检验订正方法研究进展

潘留杰^{1,2} 薛春芳³ 梁绵^{1,2} 高星星^{1,2} 祁春娟¹ 刘嘉慧敏^{1,2} 王建鹏¹

(1 陕西省气象台, 西安 710014; 2 秦岭和黄土高原生态气象环境重点实验室灾害性天气研究与应用中心, 西安 710044; 3 陕西省气象局, 西安 710014)

摘要: 降水在网格要素预报中最为关键和重要, 降水的预报表现直接体现了网格化要素的预报能力和水平。首先回顾了数值天气预报中针对降水的各种检验方法, 主要包括: 基于二分法列联表的经典检验, 基于属性和尺度特征的空间检验, 集合预报检验以及针对极端稀有事件的检验技术。其次归纳了降水统计后处理订正技术: 一是基于模式输出降水产品的直接统计后处理和模式输出各种要素基础上客观诊断的间接后处理; 二是针对集合预报的参数化和非参数化降水以及和预报变量结构相关联的后处理订正方法; 三是气象工作者基于人工智能和大数据技术对降水订正的探索和尝试。最后, 讨论了各种检验方法的优缺点、客观性、适用性和业务使用中需要关注的问题, 对网格降水后处理的订正方法进行了总结和讨论。

关键词: 网格降水预报, 预报检验, 统计后处理, 客观订正

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.03.004

Research Progress on Objective Verification and Correction Methods of Grid Precipitation Forecast

Pan Liujie^{1,2}, Xue Chunfang³, Liang Mian^{1,2}, Gao Xingxing^{1,2}, Qi Chunjuan¹, Liu Jiahui^{1,2}, Wang Jianpeng¹,

(1 Shaanxi Meteorological Observatory, Xi'an 710014 2 Disaster Weather Research and Application Center of Key Laboratory of Ecological Meteorological Environment in Qinling and Loess Plateau, Xi'an 710014 3 Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an 710014)

Abstract: Precipitation is the most critical and important in grid element prediction. The prediction performance of precipitation directly reflects the prediction ability and level of grid elements. Firstly, various test methods for precipitation in numerical weather forecast are reviewed, mainly including: classical test based on dichotomy contingency table, spatial test based on attribute and scale characteristics, ensemble forecast verification and verification for extremely rare events. Secondly, the post-processing techniques of precipitation statistics are summarized: first, the direct statistical post-processing of precipitation products based on model output and the indirect post-processing of objective diagnosis based on various elements of model output; Second, for parameterized and nonparametric precipitation of ensemble prediction and post-processing correction method associated with the structure of prediction variables; The third is the exploration and attempt of meteorologists on precipitation correction based on artificial intelligence and big data technology. Finally, the advantages and disadvantages, objectivity, applicability and problems needing attention in the operation of various test methods are discussed, and the revised methods of grid precipitation post-processing are summarized and discussed.

Keywords: grid precipitation forecast, forecast test, statistical post-processing, objective correction

0 引言

降水不仅是公众最为关心的气象要素, 同时也是政府、工业、农业、水文等部门和气象地质灾害预警各领域的关注重点^[1]。数值模式是降水预报的基础, 然而, 所有的数值天气预报模式都是对真实大气状态

的抽象表示^[2], 受初始场、边界条件、模式框架结构、物理过程和参数化的影响, 从而不可避免的产生各种误差, 就降水预报来说, 除去随机性误差外, 还有强度、位置、形态以及时间等各种系统性误差。因此, 模式输出的降水产品, 在很大程度上还不能直接提供给用户或者公众使用。

数值模式释用或者说数值模式统计后处理^[3] (Model Output Statical) 将模式直接输出的要素预报和观测资料联系起来, 在保留模式原始预报技巧的基础上, 修正模式中的预报偏差和离散性误差, 降尺度输出适合用户需求的预报产品, 是多年来世界各国广泛

收稿日期: 2020年9月15日; 修回日期: 2021年3月22日

第一作者: 潘留杰, Email: pljmtgh57245@sina.com

资助项目: 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J023);

陕西省自然科学基金 (2021JM-595, 2022JQ-249);

陕西省社会发展关键领域项目 (2022SF-360)

使用的数值预报后处理方法。事实上，数值模式释用包括模式产品检验和客观订正两部分，尽管检验对模式开发者来说，其目的和意义更多的在于模式框架或参数化方案的调整，但客观检验是产品使用者监控模式预报性能，理解预报误差，找出提高预报质量的订正方法的前置工作和有效途径，对期望通过统计后处理，提高预报表现的用户来说，检验和订正方法密不可分。降水是气象要素检验中最为重要的部分，其检验的复杂度随着模式网格分辨率的提高快速上升，这一方面是由于时空尺度越精细，降水在时空上的个体表现差异更加突出^[4]，另一方面，数值模式本身的参数化方案或物理过程对小尺度刻画不完善，可能导致更多的相位或随机误差^[5]，客观上增加了降水检验的难度。针对模式网格降水的时空分辨率和产品差异化等不同特性，主要发展了三种检验技术：一是针对粗网格数值预报模式的传统检验方法或者称为经典检验方法^[6]；二是降水空间检验技术，由于传统检验方法不能对降水系统的位置、形态的预报表现进行判定，在降水位置细微偏离的情况下，可能出现双重惩罚的现象，因此，随着高分辨率细网格模式的快速发展，基于空间位置、降水空间形态以及时间偏差特征的空间检验方法快速发展；三是集合预报检验技术，集合预报给出不同初始扰动条件下的多个预报结论，其预报结果不唯一，因此可靠性、辨识度或称之为解析度是集合预报的主要评估指标。此外，针对极端降水事件，还发展起来了基于预报和观测降水依赖性的极端天气评分EDS (Extreme Dependency Score)、EDI (Extreme Dependency Index) 和SEDS (Symmetric Extreme Dependency Score) 等极端天气事件的检验评分方法。

从数值模式原始输出产品出发到最终发布的降水客观预报产品，降水的统计后处理或者说客观订正对预报质量至关重要。生成客观降水预报产品的原始模式产品可以是来自于单模式的统计后处理，也可以是全球模式、区域模式和预报员主观订正降水产品的集成，还可以是集合预报产品的融合统计^[7]。针对单模式的统计后处理，发展了基于预报因子和观测降水的回归模型的订正方法^[8]、依据预报要素和模式输出物理量统计关系的强降水配料法预报^[9]、利用观测和预报的频率分布特征的降水频率匹配订正技术^[10]、人工神经网络降水^[11]和降水偏差订正^[12]等一系列技术方法。在多模式集成方面^[13]，有多模式集合平均、消除偏差集合平均、加权消除偏差集合和多模式超级集合等多种方法；也有研究^[14]在岭回归、随机森林、深度学习等机器学习基础上建立多模式集合预报后处理模

型改进预报质量。

上述的降水预报检验和降水统计后处理技术，大多数是基于气象站点观测资料建立起来的检验和订正方法，这些方法的检验结果和预报产品的表现形式也多为站点形式。事实上，当实况格点再分析满足用户需求时，这些方法中的大多数也适合于网格降水预报的检验和订正。在实况格点再分析不能有效获取的情况下，将站点误差在预报场上合理分配，也是一种有效的释用方法。本文的主要目的是回顾近年来针对网格预报检验订正技术发展起来的一些新的方法和新应用，文章也展望了网格降水预报检验订正技术的发展方向。

1 降水客观检验方法

1.1 经典检验

经典检验方法是基于二元列联表建立的点对点的检验，也称之为传统检验方法。降水作为离散型变量，可以简单将降水分为肯定或否定预报的二元事件，也可作为多分类预报进行检验。

早在1884年，Donaldson^[15]提出两种性能指标，一种是临界成功指数CSI (Critical Success Index)，被用来衡量预测的准确性，特别是在罕见事件或不可预测、不可观测频率的情况下的稀有事件；第二种是由Schaefer^[16]根据历史优先原则命名的Gilbert评分 (Gilbert Skill Score)。到1965年，Brounlee等^[17]通过两变量的列联表计算命中率POD，虚警率FAR，误警率FOM等。1987年，Flueck^[18]在Hanssen-Kuipers评分的基础上再次提出了真实技巧评分TSS (True Skill Statistic)。1990年，Doswell^[19]针对小概率事件的TSS预报评分常趋于零的极端情况，修改TSS评分为HSS评分，随后在此基础上发展了预报偏差Bias^[20]、OR^[21]指数、预报准确率ACC等多个检验指标，并发展出了预报性能评分综合图 (图1)。

除了二分类预报事件以外，利用 $2 \times K$ 的列联表可以用来检验多分类事件的确定性预报，也可以用来检验多分类事件中发生概率的准确性。2010年，Rodwell等^[22]基于 $2 \times K$ 列联表设计概率空间的稳定公平误差 (SEEPS) 评分，用于识别降水量模式预报误差，适应短期内降水量的概率分布检验。

1.2 降水空间检验

经典检验方法的主要缺陷在于以点对点的方式进行对比，尽管其检验结果最为精确，然而点对点的检验物理意义不清晰，在识别高分辨率模式预报性能的小尺度变化方面，经典检验方法无能为力^[23]。空间诊断检验方法是伴随着高分辨率模式而产生的，按其对应

变量空间结构的描述方式，可以分为滤波和位移法两大类，在具体的检验方式上又可以细分为邻域法和尺度分离法，以及基于属性特征的方法和变形场法。

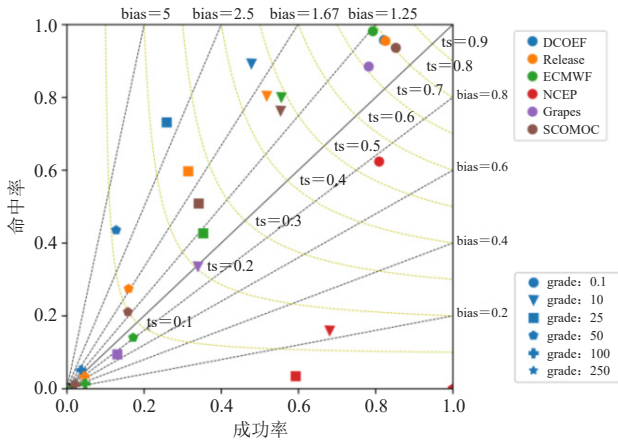


图1 降水预报性能传统评分综合示意图^[24]

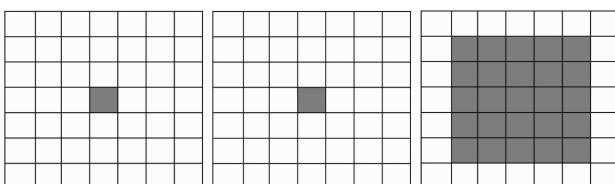
Fig. 1 Rainfall prediction skill score distribution^[24]

邻域法是在观测样本稀疏条件下检验高分辨率网格模式的一种折衷方法。图2为邻域法的概念示意图^[24]。邻域法的预报评分一般会随着邻域尺寸的增大及较小尺度被有效滤除而提高，对于达到可接受的水平尺度，将其看做“尺度技巧”^[25]。FSS (Fractions Skill Score) 是邻域法的主要检验指标^[26]，具体方法为利用阈值对有降雨的网格定义，比较预报和观测降雨网格降水匹配情况，得到分数技巧评分 (FSS)：

$$FSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_N (P_f - P_o)^2}{\frac{1}{N} [\sum_N P_f^2 + \sum_N P_o^2]}, \quad (1)$$

式中： P_f 和 P_o 分别为选定半径网格内观测事件发生的概率和预报事件的频率， N 为域内邻域的数量。

有研究^[27]表明当样本量较大时TS评分检验结果与FSS评分类似，但针对小概率事件，TS评分不能表现真实的预报技巧，FSS评分考察邻域半径内的降水预报表现，随着邻域半径的增大，表现出稳定的变化趋势，在评估不同模式对小概率事件的预报能力方面具有优势，不足之处在于模糊了空间范围，降低了评估精度。



(a) 观测场；(b) 传统方法检验的匹配模式；(c) 邻域法匹配

图2 邻域法示意图^[24]

Fig. 2 The diagram of neighborhood section method

尺度分离法可评估由于空间尺度不同导致的误差问题，按照降水的尺度特性进行尺度分离。1997年，Briggs等^[28]使用二维小波分解衡量尺度依赖的预报误差，之后Casati等^[29]综合运用降水强度和尺度，提出了“强度-尺度检验方法”，强度-尺度检验利用强度阈值将预报场和观测场转为1和0的二进制场，再使用Haar小波进行二维分解，从而得到降水强度在不同尺度上的预报评分 SS_L ：

$$SS_L = 1 - \frac{MSE_L}{[B_e(1-f_{obs}) + f_{obs}(1-Bf_{obs})]/L}, \quad (2)$$

式中： L 为空间尺度， MSE_L 为在尺度 L 上预报相对于观测的均方根误差， f_{obs} 为观测场中第 L 个尺度上预报相对于观测的预报偏差， B 为预报相对观测的尺度偏移量。

基于特征的方法是最直观的空间检验方法，可以诊断预报特征属性如位置、大小、平均强度等误差。Ebert等^[24]提出的CRA (Contiguous Rain Area) 方法能够将特征识别为指定闭合阈值范围内，符合最小相连区域的尺度标准。Wernli等^[30]提出通过计算三个无量纲误差衡量指标 S (结构误差)、 A (振幅误差)、 L (位置误差) 来表征预报质量，此方法进一步证实高分辨模式对降雨结构预测的有效性。Davis等^[31]提出了通过卷积识别出预报场和观测场中降水对象的诊断评估方法 (MODE)，近年来广泛应用于模式降水预报性能的个例分析 (图3)^[32]、不同空间检验方法适用性的对比^[33]、强对流降水对象的识别和检验^[34]以及MODE方法相对传统检验的优缺点。最近在空间对象检验的基础上，还发展出了三维空间时域对象追踪检验方法，评估模式降水的时间偏差 (图4)^[35]。

变形场方法是通过拟合预报场到观测场的空间降水强度、位置等变化幅度对预报场进行检验的方法。2009年，Gilleland等^[36]将变形场法定义为关注范围内预报场的整体位置误差。Keil等^[37]通过反向处理方法将预报场变形为观测场，再利用位移-振幅评分变形得到振幅误差和位移误差，此外还有图像变形技术^[38]、优化似然函数变形度方法^[39]。

1.3 集合预报和极端天气事件检验

集合预报通过为初始场加入扰动误差，增加成员预报来把握预报结论的不确定性，从而提高对降水的预报能力。集合预报评估中最通用的方法是计算Brier评分，它反映的是预报概率与通过给定阈值将观测划分为0或1两种情况下的平方差。Brier评分的主要不足在于尽管它能反映概率预报系统的优劣，但在实际业务中很难提供简明的判别标准。1973年，Murphy^[40]将Brier评分分解为可靠性、分辨能力、不确定项三部

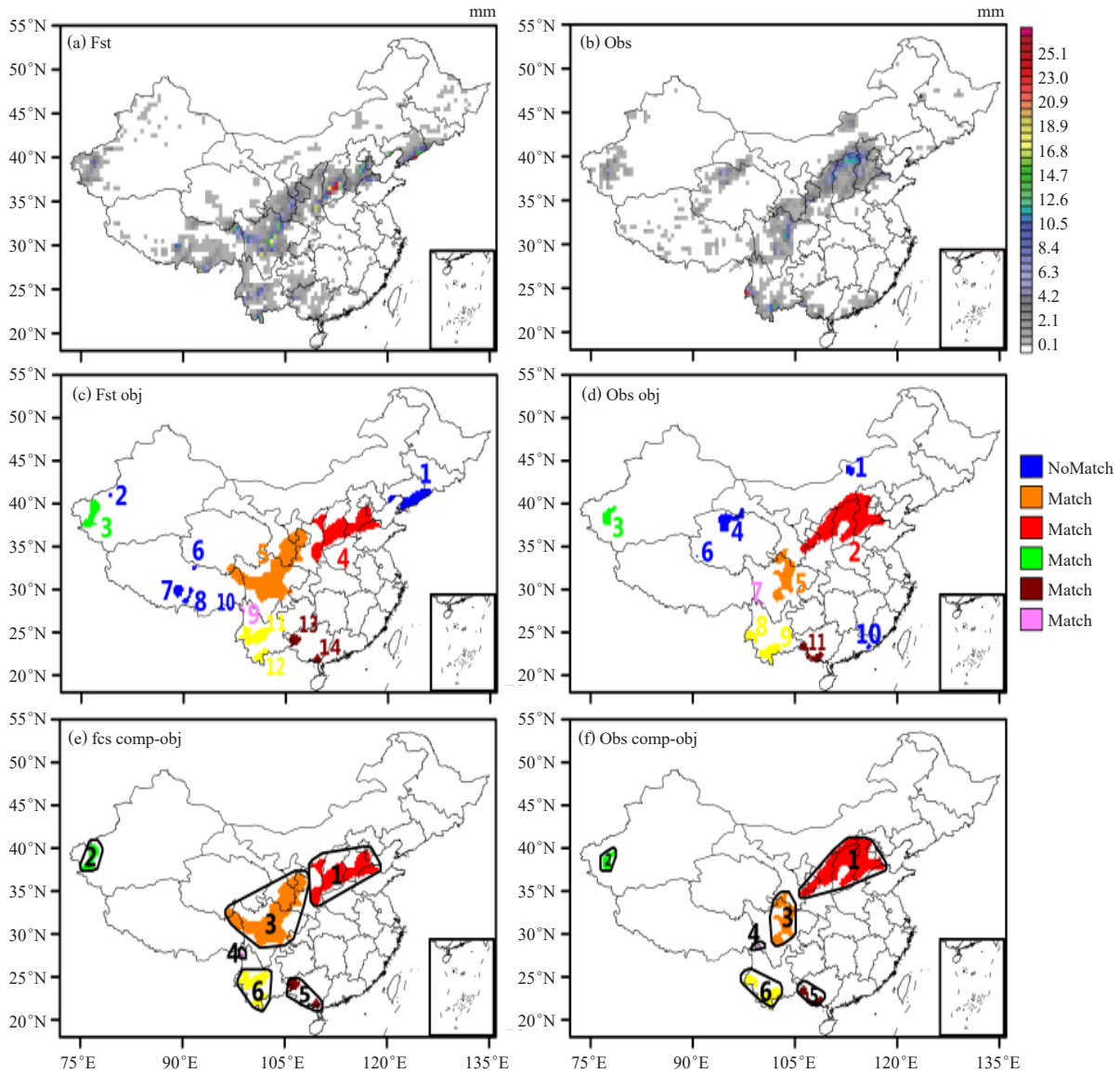


图3 MODE检验个例^[32]

(a, b) 个例预报和观测降水; (c, d) 预报和观测场提取的独立对象; (e, f) 预报和观测场中的预报组合匹配对象

Fig 3 MODE Test Cases

(a) and (b) forecast and observed precipitation, (c) and (d) independent objects extracted from forecast and observation, (e) and (f) forecast combination matching objects in forecast and observation

分, 从而使其物理意义更加清晰。在实际应用中, 首先是发展了反映预报概率相对于观测频率的可靠性图^[41]; 其次是出现了区分预报概率和空报率的ROC分析图^[42], ROC分析是信号探测原理在预报检验评估中的应用, 它通过计算预报的命中率和空报率来区分预报系统对事件发生或者不发生的分辨能力, 从而使用户能够定量把握命中率和空报率所占比重。其他还有分级概率评分RPS^[43]、无知评分IS^[44]、连续分级概率评分CRPS^[45]等。

研究适合极端降水的检验方法, 对于提高高影响

灾害天气预报水平至关重要, 目前这一领域仍处于起步阶段, 面临诸多挑战。以往的经典传统检验评分随着极端事件稀有性的增加会趋向衰减为一个极小值, 有学者专家提出解决方法, 在计算估计预报性能衰减率的基础上, 重新校正极端降水预报计算极端依赖指数EDI^[46], 具体如下:

$$EDI = \frac{\log F - \log H}{\log F + \log H}, \quad (3)$$

式中, H 、 F 为分别为预报命中率和空报率。 EDI 阈值为 $[-1, 1]$, 0为区分随机预报好与坏的分界点, 与基

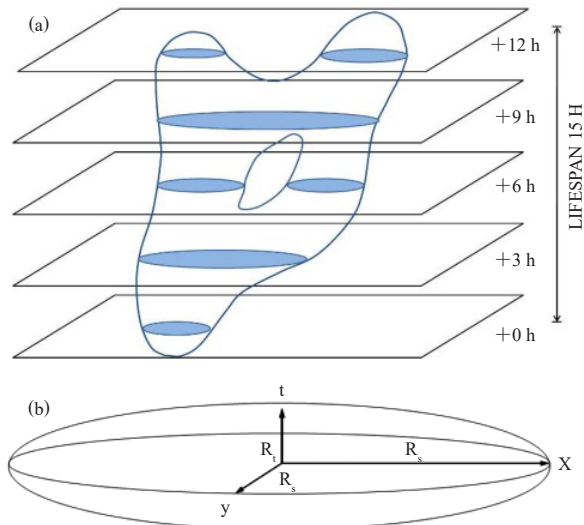


图4 时间三维卷积检验概念示意图^[35]

- (a) 时间生命周期15 h的降水对象演变; (b) 卷积对象椭球体
 Fig. 4 Conceptual scheme of Time 3D convolution test
 (a) Evolution of precipitation with a time life cycle of 15 h;
 (b) Ellipsoid of convolution object

准确率无关, 较为合理, 相比Stephenson等^[47]提出的极端依赖评分EDS更加客观。

2 网格降水客观释用技术

网格降水客观释用技术主要包括单模式订正和多模式集成^[48]以及数据预处理的降尺度技术^[49]。针对集合预报还有特定的概率预报释用, 主要目的是对集合预报进行后处理, 用来提高预报可靠性和概率预报的技巧^[50]。此外, 近年来在降水订正中, 机器学习和人工智能也得到了一些发展应用, 文章也做了一些简单的归纳和总结。

2.1 经典MOS间接后处理

MOS方法是1972年Glatthorn等^[51]提出的。经典MOS后处理大体上可归纳为两种, 一种是基于数值模式输出的各种产品建立统计模型, 得到订正降水量, 即经典MOS的间接后处理; 另一种是直接订正模式输出降水, 提高预报准确率, 即经典MOS的直接后处理^[52]。配料法不是简单的回归分析, 它根据不同变量之间的物理联系, 建立预报方程。该方法是Doswell等^[53]1996年提出的一种致洪暴雨预报方法, 在冬季降水预报研究^[54]、地形降雨预报^[55]、雷暴和龙卷分析预报^[56]都有广泛应用。有研究认为构建配料法的要素对预报效果有关键影响^[57]。国内天气预报对配料法也做了深入研究, 张小玲等^[58]使用显著配料要素进行暴雨预报, 并在国家级降水预报业务中应用。来小芳等^[59]基于配料法设计趋势的强降水指数, 并在长江下游地区暴雨预报中应用。张萍萍等^[60]提出流型辨识法与配料法相

结合的暴雨预报方法。唐晓文等^[61]以中尺度数值模式MM5的预报场作为原始资料计算配料综合指数与强降水之间的关系, 进而输出降水预报。刘勇等^[62]利用ECMWF高分辨率数值模式产品, 选取相关要素作为配料因子对陕西省暴雨进行预报, 结果表明配料法能够减小模式的暴雨预报偏差。其他研究还包括配料法在梅雨锋暴雨预报中的应用^[63]、东北冷涡暴雨“配料法”的预报模型^[64]、区域暴雨配料法研究应用^[65]等, 在实际暴雨预报中取得了较好效果。

2.2 经典MOS的直接后处理

频率匹配方法、逻辑回归方法、最优TS(ETS)评分订正法等是经典MOS直接后处理的典型方法。频率匹配方法的出发点是使预报降水频率与观测降水频率达到一致, 该方法类似于分段订正函数, 对模式预报偏差显著偏大的降水有较好的预报效果。一般时效较长的预报降水量偏差大于时效较短的预报, 所以该方法对时效较长降水预报的改进效果更加显著, 应用表明对模式小量级降水和暴雨预报的订正效果显著。在原理上, 该方法只能对模式原有降水预报区域的强度进行调整, 并不能凭空增加降水区域, 对强降水的位置预报无订正能力。目前在T213降水预报订正^[66]、AREM模式降水预报订正试验^[67]、AREM模式集成员降水量概率匹配订正^[68]等方面应用广泛。这些研究确定的订正系数在整个研究区域内是相同的, 因此合理的区域划分是频率订正的关键问题, 针对这一缺点, 对格点本身进行频率匹配是研究的一个方向^[69]。此外, 一些工作还应用卡尔曼滤波动态训练^[70]、分位数映射的方法进行频率匹配订正^[71], 在保持模式降水空间分布的同时提高了降水的预报技巧。

逻辑回归方法是针对二分类相应变量建立的一种概率回归模型, 可以将定量降水预报看成不同量级上降水“有”和“无”的分类预报问题。该方法模型设计相对简单, 在雷电、短时强降水、概率降水预报、路面结冰风险预警、地质灾害概率预报等业务中都有应用。但在降水预报中多用于短时强降水的“有、无”判断或是概率降水预报^[72], 开展分等级定量降水试验的较少。针对逻辑回归模型过拟合问题, 主成分分析^[73]、二元逻辑回归法和综合多指标叠加法^[74]对降水预报有明显改进。但逻辑回归中仍然存在多元线性回归的缺点, 当变量之间高度线性相关时回归系数不稳定, 且可能存在模型和实际业务预报效果不一致的情况。

训练期对提高预报质量至关重要。理想状态预报和观测完全匹配, 预报偏差为一, 事实上由于位置预

报偏离, 预报偏差为一的情况下并不能得到最高的预报评分。一些研究^[75]基于TS (ETS) 评分最大化的方法来订正模式降水预报。典型的做法如下:

$$y = \begin{cases} 0, x < F_1 \\ O_k + (O_{k+1} - O_k) \times \frac{x - E_k}{F_{k+1} - F_k}, & F_k \leq x < F_{k+1} (k = 1 \dots 9) \\ x \times \left(\frac{O_{10}}{F_{10}}\right), x \geq F_{10} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: 预报值和订正值分别标记为 x 和 y , 降水阈值为 O_k (k 为1, 2, ..., 10), F_k 为预报降水量和观测降水量的对应订正值。 $x < F_1$ 时, y 为0, 从而消除小量级降

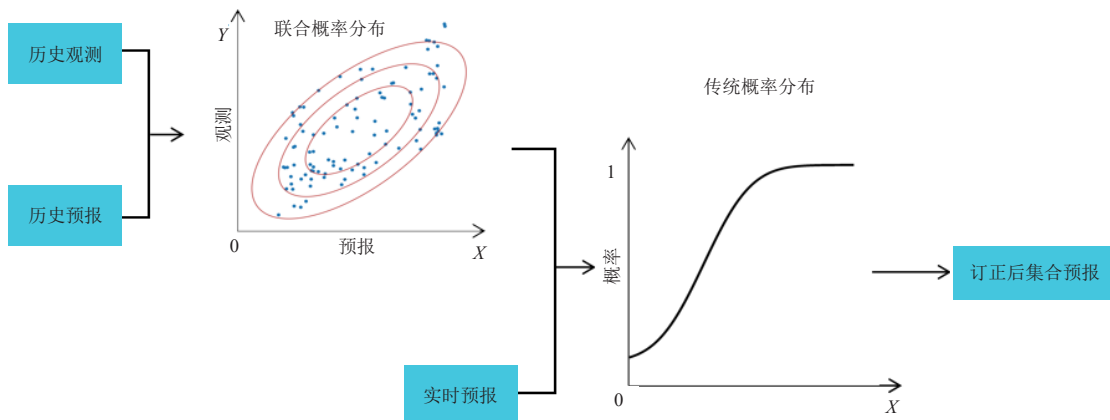


图5 集合预报后处理流程^[76]

Fig. 5 Post-processing outline of ensemble forecast

非参数化方法即不预先设定统计模型的降水订正方法, 主要通过大量的样本统计训练来改善降水预报表现。该方法详细可以分为三类: 集合定量降水预报订正、集合定量降水集成以及空间分析等方法^[78]来改善降水的预报表现。事实上, 非参数化方法中的大多数与单模式确定性降水预报订正方法类似, 在定量降水订正方面, 传统的频率匹配法、偏差订正在集合预报降水订正中都有广泛的应用。对集合预报自身来说, 由于拥有多个成员, 基于多成员优势发展了分位值映射、降水分级、直方图排序、概率可靠性曲线以及成员相似分析等多种订正方法。

集合定量降水集成通常是针对自身成员开展的预报订正。在确定性单模式降水预报中, 利用不同的模式预报而不扰动成员开展集成研究也有广泛应用。广义上来看, 集合预报定量降水集成方法可以看做是多模式集成的一个特例, 概率匹配平均法、多模式相似集成法、最优百分位法和集合伪偏差校正法是典型的集合定量降水预报集成方法。其中, 概率匹配平均法在某种程度上平滑掉小尺度预报信息^[79], 对预报

水; y 与 x 比值为订正系数。该方法和频率匹配^[70]计算订正系数的思路整体类似, 不同点在于获取订正系数的判别指标。

2.3 集合预报后处理

与单模式确定性预报不同, 集合预报统计后处理通过分析预报成员统计量及其概率预报与观测的对应关系, 来获取模式最佳预报结果。图5给出了集合预报后处理概念示意图^[76]。代刊等^[77]针对集合模式定量降水预报进行了系统的总结和回顾, 后处理方法归纳为: 不基于统计模型的非参数化后处理方法、基于概率分布统计模型参数化后处理方法、考虑变量结构的后处理方法。

来说是一把“双刃剑”, 可能会提高预报评分, 但真实的预报效果, 需要更加精细的评定。多模式相似集成法是定量降水集成的主要方法, 它依据历史上成员之间分布和量级的相似性对比分析, 但大多数集成结果都存在小雨的预报面积偏大, 强降水极值偏低的情况^[80]。最优百分位法针对不同等级降水, 利用历史样本确定最优百分位值进行集成, 有效提高各等级降水预报评分^[81]。随着高分辨率模式的发展, 邻域法、对象概率预报法在降水预报订正中普遍应用。但这些方法不特定针对于集合预报, 确定性降水预报中也有广泛应用。总体来说邻域法主要是在空间尺度上改善预报表现^[82], 在某种程度上是样本过少的一种替代, 通过邻域法改善预报表现也是评价标准不同的具体体现, 真实的预报能力仍然需要检验。

参数化后处理方法假定模式成员的预报降水满足某种概率分布, 基于概率分布进行统计订正, 概率分布或参数模型直接影响参数化后处理方法的预报质量, 主要优点在于已有参数模型不需要进行大样本训练。集合模式统计输出法^[83]和贝叶斯模型平均^[84]是参

数化后处理的典型方法。相对于贝叶斯模型平均, 集合模式输出统计方法相对简单, 非均匀回归方法、逻辑回归方法和分位数回归方法是集合模式输出统计方法的代表。

2.4 大数据和人工智能

动态交叉取优^[85]和多产品融合降水(图6)预报释用^[86]是在海量模式产品基础上发展的类似大数据降水订正释用方法。网格降水后处理中常用的人工智能机器学习算法有神经网络、支持向量机方法和Logistics判别方法等。Yuan等^[87]将人工神经网络(ANN)应用于NCEP区域谱模式集合预报系统, 改善了BS评分, 提高了预报技巧。农吉夫等^[88]基于主成分径向基函数神经网络建立了降水预报模型。黄健敏等^[89]和吴凡等^[90]建立了Logistics回归的区域地质灾害和铁路水害预报模型。

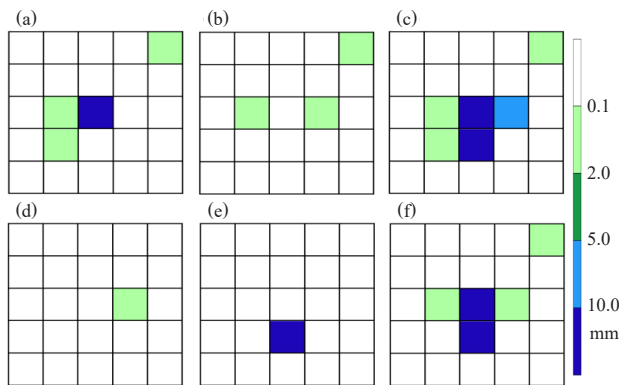


图6 多产品融合降水预报释用方法概念示意图^[86]

(a~c) 分别为模式预报; (d)、(e) 为低阈值消空和高阈值限定后结果; (f) 为融合预报结果

Fig. 6 Conceptual scheme of multi-product fusion precipitation forecast and interpretation method ^[86]

(a and c) are model forecast; (d) and (e) are the results of low threshold elimination and high threshold restriction; (f) is the fusion forecast results

SVM方法能够处理非线性特征的要素预报^[91]。一些研究^[92]在多模式集成的基础上, 采用相关加权、多元线性回归以及SVM回归方法, 结果发现SVM回归方法的多模式集成预报得到的均方根误差比多模式集合平均小, 有正预报效果, 但均方根误差并不能全面表现模式的降水预报能力, 通常情况下, 模式降水预报的标准差小于观测, 即降水的量级分布相对集中, SVM的效果需要进一步分析。孙俊奎等^[93]基于概率神经网络(PNN)、SVM和Logistics判别的3种机器学习算法建立了3 h间隔的累计降水量预报模型, 并分别采用遗传算法优化预报模型和修正的Logistics判别方法构建了3种降水量预报模型, 经过对比检验综合了3种

预报模型的优点, 在时间上实现发布了逐3 h分辨率的降水量短期预报。黄威等^[94]基于多模式降水预报资料, 采用SVM回归方法构建降水预报模型, 发现在中期预报时效大雨和暴雨量级上SVM多模式集成预报方法效果最优。

机器学习K最近邻(KNN)模型的主要思想是在特征空间中, 如果一个样本周围的 k 个最近样本的大多数属于某一个类别, 则该样本也属于这个类别, 这一思想对不同量级降水的预报有应用意义, 特别是在晴雨和暴雨预报特征清晰的分类中, 有明显的正向效果。已有工作中, 王玉丹等^[95]通过KNN模型, 建立了环境、气象因子和日降水量的关系, 订正了青藏高原的CMORPH日降水数据集, 结果表明, 采用KNN模型订正后的CMORPH降水数据优于原始数据和采用概率密度函数匹配法订正的CMORPH数据; 陈浩等^[96]选择了5种机器学习模型, 即KNN、多元自回归样条方法(MARS)、SVM、多项对数线性模型(MLM)和ANN, 订正再分析降水数据集, 结果表明, KNN的订正精度最高。

3 结论和讨论

降水是网格天气预报中最为关键和重要的要素, 文章系统总结了降水预报中的检验技术和统计后处理订正方法。在降水预报检验方面可以归纳为经典检验、空间检验、集合预报检验三类。经典检验通过二分法列联表计算各种预报评分来判别模式预报性能的优劣, 是点对点的对比分析, 主要优点在于定量化、易于比较; 不足之处一是部分评分指标物理意义不清晰, 难以理解和应用, 二是经典检验不能从系统的角度判定预报场的预报表现。相比经典检验, 空间检验是伴随高分辨率模式发展起来的检验方法, 可以看做是经典检验方法的拓展和延伸, 它能够从多个视角提供模式性能优劣的比较和判定, 大多数空间检验方法在给出自身独特检验指标的同时, 也给出经典检验评分。降水空间检验有尺度检验、属性检验、变形场等多种检验形式。空间检验方法能够模拟预报员的视角给出天气预报系统的快慢、位置偏差、形态预报偏差等降水的多方面预报表现。不足之处在于一些检验结果难以转化为实际的定量指标从而改进降水场的预报表现。与确定性预报相比, 降水的集合预报检验除了可以在每个预报成员、集合平均、集合预报统计量上应用经典检验方法和空间检验方法之外, 还有针对自身特征的独特检验方法, 主要包括集合成员的离散度和概率分布函数以及Brier评分、可靠性图、ROC分析等概率预报的检验方法。

降水产品检验其目的对模式开发者来说是认识模式框架、物理过程、参数化方案的不足,进而加以改进,但对大多数模式产品释用者来说,通过检验可以认识到模式产品的系统性偏差,寻找适合的订正方法,进而提高预报质量,因此模式检验和释用订正密不可分。降水统计订正释用方法主要归纳为三个方面:

1) MOS方法的本质是建立在多元线性回归基础上的统计方法。针对降水单模式确定性预报来说,有直接后处理和间接后处理两种技术,直接后处理技术中最有代表性的为降水频率匹配,其他还有降水偏差订正、位置订正等。配料法则是间接后处理技术中的典型方法。MOS方法不仅可以用在确定性预报中,也可以用在集合预报中。与单模式统计后处理不同,多模式集成则是期望吸收多家模式的优点,提高降水预报能力,近年来一些新方法快速发展,主要包括动态交叉最优要素预报、多产品融合降水、最优TS评分、逻辑回归等,一些工作还在单模式统计后处理后进行二次集成,总体来说,这些方法属于MOS方法的延伸或者拓展。从业务适用性来说,直接后处理方法易于实现,诸如降水频率匹配、多产品降水融合、动态交叉最优要素预报等,方法物理意义清晰,技术实现难度较低,订正正效果明显,易于推广应用。特别是降水频率匹配方法在国内部分省份逐渐开展应用,对改善网格降水预报质量非常有意义。相对而言,间接后处理技术(譬如配料法)推广应用比较困难,这一方面是由于选定的物理量能够在多大程度上表现降水的特征难以确定,导致不容易获得有针对性的计算指标;另一方面不同物理量在不同的地区、不同的时段有明显的差异,一个地区的可用指标不能直接应用到另一个区域。

2) 相对于确定性预报来说,集合预报用更多的成员预报来考虑模式预报的不确定性,事实上,针对集合预报单成员或者多成员集成后的确定性预报来说,MOS统计订正方法都可以应用,不同的是集合预报针对多成员转换成概率预报的过程以及对概率预报结果的统计订正。目前在集合预报的基础上开展的网格降水订正相对少一些,这一方面是由于集合预报成员存在优选的过程,通过集合预报进行网格降水订正更加复杂,另一方面相对于确定性预报,集合预报系统的时空分辨率整体偏低,利用粗分辨率集合预报降水进行降尺度,进而开展网格降水预报订正,不如在高分辨率模式降水预报上开展订正工作直接。

3) 释用订正技术很难处理模式固有的缺陷,多模

式集成或集合预报能够吸收其他模式的优点,但同时也混淆了模式的误差分布,可以在一定程度上提高预报评分,但是也有增大预报员主观判别预报降水缺陷的难度。大数据人工智能和机器学习为降水订正释用提供新的思路 and 方向。气象工作者基于大数据人工智能开展了一些有益的探索试验,主要包括:神经网络方法、支持向量机和逻辑回归方法,其释用订正效果相对模式输出产品有不同程度提高,但从改进总量上来看,相对MOS释用没有跃变性的改进。现阶段,成熟有效和能够广泛推广应用的人工智能网格降水订正算法还不多见,基于大数据人工智能提高网格降水的预报准确率还需要进行深入的探索和研究。

参考文献

- [1] 毕宝贵,代刊,王毅,等. 定量降水预报技术进展. 应用气象学报, 2016, 27(5): 534-549.
- [2] 王宁,平凡. 垂直分辨率对广州“5·7”特大暴雨数值模拟影响的研究. 大气科学, 2019, 43(6): 1245-1264.
- [3] 包红军,王莉莉,沈学顺,等. 气象水文耦合的洪水预报研究进展. 气象, 2016, 42(9): 1045-1057.
- [4] 封国林,赵俊虎,支蓉,等. 动力-统计客观定量汛期降水预测研究新进展. 应用气象学报, 2013, 24(6): 656-665.
- [5] 高丽,陈静,郑嘉雯,等. 极端天气的数值模式集合预报研究进展. 地球科学进展, 2019, 34(7): 706-716.
- [6] 丁金才. 天气预报评分方法评述. 南京气象学院学报, 1995, 18(1): 143-150.
- [7] 高丽,任鹏飞,周放,等. GRAPES-GEPS对西太平洋副热带高压和南亚高压的集合预报评估与集合方法研究. 地球科学进展, 2020, 35(7): 715-730.
- [8] 陈璇,游小宝,郑崇伟,等. 一种新的线性回归模型及其应用示例. 大气科学, 2019, 43(2): 389-400.
- [9] 杨雪艳,秦玉琳,张梦远,等. 基于“配料法”的东北冷涡暴雨预报研究. 大气科学学报, 2018, 41(4): 475-482.
- [10] 俞小鼎,郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展. 气象学报, 2020, 78(3): 391-418.
- [11] 吴香华,蒙芳秀,熊萍萍,等. 基于自组织映射神经网络的吉林省春夏期降水统计模拟研究. 大气科学学报, 2018, 41(6): 829-837.
- [12] 张宏芳,潘留杰,杨新. ECMWF、日本高分辨率模式降水预报能力的对比分析. 气象, 2014, 40(4): 424-432.
- [13] 冯慧敏,智协飞,崔慧慧,等. 基于多模式集成技术的地面气温精细化预报. 气象与环境科学, 2016, 39(4): 73-79.
- [14] 门晓磊,焦瑞莉,王鼎,等. 基于机器学习的华北气温多模式集合预报的订正方法. 气候与环境研究, 2019, 24(1): 116-124.
- [15] Donaldson R J, Dyer R M, Kraus M J. An objective evaluator of techniques for predicting severe weather events. American Meteorological Society, 1975.
- [16] Schaefer J T. The critical success index as an indicator of warning skill. Weather and Forecasting, 1990, 5(4): 570-575.
- [17] Brownlee K A. Statistical theory and methodology in science and engineering. New York: John Wiley & Sons Wiley, 1965.
- [18] Flueck J A. A study of some measures of forecast verification. American Meteorological Society, 1987.
- [19] Doswell C A, Jones R D, Keller D L. On summary measures of skill in rare event forecasting based on contingency tables. Weather and Forecasting, 1990, 5(4): 576-585.
- [20] Brier G W. Verification of forecasts expressed in terms of probability. Monthly Weather Review, 1950, 78(1): 1-3.
- [21] Stephenson D B. Use of the “odds ratio” for diagnosing forecast skill. Weather and Forecasting, 2000, 15(7): 221-232.
- [22] Rodwell M J, Richardson D S, Hewson T D, et al. A new equitable score suitable for verifying precipitation in numerical weather prediction. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,

- 2010, 136: 1344-1363.
- [23] Jolliffe I T, Stephenson D B. Forecast verification: A Practitioner's guide in atmospheric science. Chichester: Wiley and Sons, 2003.
- [24] Ebert E E, McBride J L. Verification of precipitation in weather systems: Determination of systematic errors. *Journal of Hydrology*, 2000, 239: 179-202.
- [25] Mittermaier M, Roberts N. Inter-comparison of spatial forecast verification methods: Identifying skillful spatial scales using the Fractions Skill Scores. *Weather and Forecasting*, 2010, 25: 343-354.
- [26] Roberts N M, Lean H W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 78-97.
- [27] 赵滨, 张博. 邻域空间检验方法在降水评估中的应用. *暴雨灾害*, 2018, 37(1): 1-7.
- [28] Briggs W M, Levine R A. Wavelets and field forecast verification. *Monthly Weather Review*, 1997, 125: 1329-1341.
- [29] Casati B. New developments of the intensity-scale technique within the Spatial Verification Methods Inter-Comparison Project. *Weather and Forecasting*, 2010, 25: 113-143.
- [30] Wernli H, Paulat M, Hagen M, et al. SAL-A novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(11): 4470-4487.
- [31] Davis C A, Brown B G, Bullock R G, et al. The method for object-based diagnostic evaluation (MODE) applied to WRF forecasts from the 2005 NSSL/SPC Spring Program. *Weather and Forecasting*, 2009, 24: 1252-1267.
- [32] 薛春芳, 潘留杰. 基于MODE方法的日本细网格模式降水预报的诊断分析. *高原气象*, 2016, 35(2): 406-418.
- [33] 潘留杰, 张宏芳, 袁媛, 等. 基于T639细网格模式的陕西省秋淋天气预报效果评估. *气象与环境学报*, 2015, 31(6): 9-17.
- [34] 李佳, 陈葆德, 徐同. 目标检验方法在高分辨率数值天气预报检验中的应用. *沙漠与绿洲气象*, 2016, 10(5): 1-9.
- [35] 张宏芳, 潘留杰, 卢珊, 等. 基于时域对象的网格降水预报的追踪诊断分析. *高原气象*, 2021, 40(3): 559-568. <https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00021>.
- [36] Gilleland E, Ahijevych D, Brown B G, et al. Inter-comparison of spatial verification methods. *Weather and Forecasting*, 2009, 24: 1416-1430.
- [37] Keil C, Craig G C. A displacement and amplitude score employing an optical flow technique. *Weather and Forecasting*, 2009, 24: 1297-1308.
- [38] Aberg S, Lindgren F, Malmberg A, et al. An image warping approach to spatio-temporal modelling. *Environmetrics*, 2005, 16: 833-848.
- [39] Gilleland E, David A, Brown G. Intercomparison of Spatial Forecast Verification Methods. *Weather and Forecasting*, 2009, 24(6): 1416-1429.
- [40] Murphy A H. Scalar and vector partitions of the ranked probability score. *Monthly Weather Review*, 1972, 100: 701-708.
- [41] Anderson J L. A method for producing and evaluating probabilistic forecasts from ensemble model integrations. *Journal of Climate*, 1996, 9: 1518-1530.
- [42] Talagrand O, Vautard R, Strauss B. 1998. Evaluation of probabilistic prediction systems. In: Preceeding of ECMWF Workshop on Predictability, 20-22 October 1997.
- [43] Hamill T M. Interpretation of rank histograms for verifying ensemble forecasts. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(2): 550-560.
- [44] Jolliffe I T, Cristina P. Evaluating rank histograms using decompositions of the chisquare test statistic. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(6): 2133-2139.
- [45] Epstein E S. A scoring system for probability forecasts of ranked categories. *Journal of Applied Meteorology*, 1969, 8: 985-987.
- [46] Ferro C A T, Stephenson D B. Extremal dependence indices: improved verification measures for deterministic forecasts of rare binary events. *Weather and Forecasting*, 2011, 26: 699-713.
- [47] Stephenson D B, Casati B, Ferro C A T, et al. The extreme dependency score: a non-vanishing measure for forecasts of rare events. *Meteorological Applications*, 2008, 15: 41-50.
- [48] 徐同, 杨玉华, 李佳, 等. SMS-WARMS V2.0模式对中国西南地区降水预报能力的客观检验. *气象*, 2019, 45(8): 1065-1074.
- [49] 潘留杰, 薛春芳, 张宏芳, 等. 两个集合预报系统对秦岭及周边降水预报性能对比. *应用气象学报*, 2016, 27(6): 676-687.
- [50] Bentzien S, Friederichs P. Generating and calibrating probabilistic quantitative precipitation forecasts from the high-resolution NWP model COSMO-DE. *Weather and Forecasting*, 2012, 27(4): 988-1002.
- [51] Glahn H, Lowry D. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. *Journal of Meteorology*, 1972, 11: 1203-1211.
- [52] Ananthakrishnan R, Soman M K. Statistical distribution of daily rainfall and its association with the coefficient of variation of rainfall series. *International Journal of Climatology*, 2010, 9(5): 485-500.
- [53] Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology. *Weather and Forecasting*, 1996, 11(4): 560-581.
- [54] Wetzel S W, Martin J E. An operational ingredients-based methodology for forecasting midlatitude winter season precipitation. *Weather and Forecasting*, 2002, 16(1): 160-167.
- [55] Lin Y L, Chiao S, Wang T A, et al. Some common ingredients for heavy orographic rainfall. *Weather and Forecasting*, 2001, 16(6): 633-660.
- [56] Brooks H E, Lee J W, Craven J P. The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, 2003, 67: 73-94.
- [57] 俞小鼎. 基于构成要素的预报方法——配料法. *气象*, 2011, 37(8): 3-8.
- [58] 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 基于“配料法”的暴雨预报. *大气科学*, 2010, 34(4): 754-756.
- [59] 朱小芳, 张艳玲, 陆汉城. “配料法”用于长江中下游暴雨预报. *南京气象学院学报*, 2007, 30(4): 556-560.
- [60] 张萍萍, 龙利民, 张宁, 等. “分型配料法”在湖北省暴雨预报中的应用研究. *热带气象学报*, 2012, 28(5): 771-776.
- [61] 唐晓文, 汤建平, 张小玲. 基于业务中尺度模式的配料法强降水定量预报. *南京大学学报*, 2010, 3(46): 277-283.
- [62] 刘勇, 郭大梅, 姚静, 等. 配料法在暴雨精细化预报中的应用. *干旱气象*, 2015, 33(3): 514-520.
- [63] 李俊, 李武阶, 廖移山. 基于“配料”的梅雨锋强降水预报方法. *气象*, 2006, 32(9): 3-8.
- [64] 杨雪艳, 秦玉琳, 张梦远, 等. 基于“配料法”的东北冷涡暴雨预报研究. *大气科学学报*, 2018, 41(4): 475-482.
- [65] 李强, 纪晓玲, 薛宏宇, 等. 配料法在宁夏暴雨预报中的应用. *沙漠与绿洲气象*, 2019, 13(6): 20-28.
- [66] 李莉, 朱跃建. T213降水预报订正系统的建立与研究. *应用气象学报*, 2006, 17(B08): 130-134.
- [67] 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. *气象*, 2014, 40(5): 580-588.
- [68] 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. *气象*, 2015, 41(6): 674-684.
- [69] 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. *暴雨灾害*, 2015, 34(2): 97-104.
- [70] Zhu Y, Luo Y. Precipitation calibration based on the frequency-matching method. *Weather and forecasting*, 2015, 30(5): 1109-1124.
- [71] 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. *大气科学学报*, 2019, 42(6): 814-823.
- [72] Hamill T M, Engle E, Myrick D, et al. The U. S. National blend of models for statistical postprocessing of probability of precipitation and deterministic precipitation amount. *Monthly Weather Review*, 2017, 145(9): 3441-3463.
- [73] 万夫敬, 袁慧玲, 宋金杰, 等. 南京地区降水预报研究. *南京大学学报(自然科学)*, 2012(4): 513-525.
- [74] 白晓平, 靳双龙, 王式功, 等. 基于Logistic回归和多指标叠加的短时强降水预报模型. *气象科学*, 2018, 38(4): 135-140.
- [75] 吴启树, 韩美, 刘铭, 等. 基于评分最优化的模式降水预报订正算

- 法对比. 应用气象学报, 2017, 28(3): 306-317.
- [76] LI W, Duan Q, Miao C, et al. A review on statistical postprocessing methods for hydrometeorological ensemble forecasting. WIREs Water 2017, e1246.
- [77] 代刊, 朱跃建, 毕宝贵. 集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述. 气象学报, 2018, 76(4): 493-510.
- [78] Gebhardt C, Susanne T, Peter K, et al. Experimental ensemble forecasts of precipitation based on a convection-resolving model. Atmospheric Science Letters, 2008, 9(2): 67-72.
- [79] Ebert E E. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation. Monthly Weather Review, 2000, 129(10): 2461.
- [80] 林建, 宗志平, 蒋星. 2010-2011年多模式集成定量降水预报产品检验报告. 天气预报, 2013, 5(1): 67-74.
- [81] Novak D R, Bailey C, Brill K F, et al. Precipitation and temperature forecast performance at the Weather Prediction Center. Weather and Forecasting, 2014, 29(3): 489-504.
- [82] Sobash R A, Schwartz C S, Romine G S, et al. Severe weather prediction using storm surrogates from an ensemble forecasting system. Weather and Forecasting, 2016, 31(1): 255-271.
- [83] Gneiting T, Raftery A E, Ili A H W, et al. Calibrated probabilistic forecasting using ensemble model output statistics and minimum CRPS estimation. Monthly Weather Review, 2005, 133(5): 1098-1118.
- [84] Raftery A E, Gneiting T, Balabdaoui F, et al. Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles. Monthly Weather Review, 2005, 133(5): 1155-1174.
- [85] 王建鹏, 薛春芳, 潘留杰, 等. 陕西省精细化网格预报业务系统技术方法. 气象科技, 2018, 46(5): 910-918.
- [86] 潘留杰, 薛春芳, 张宏芳, 等. 基于多模式和网格预报产品融合的降水预报释用方法. 气象, 2021, 47(5): 550-560.
- [87] Yuan H, Gao X, Mullen S L, et al. Calibration of probabilistic quantitative precipitation forecasts with an artificial neural network. Weather and Forecasting, 2007, 22(6): 1287-1303.
- [88] 农吉夫, 金龙. 基于MATLAB的主成分RBF神经网络降水预报模型. 热带气象学报, 2008(6): 713-717.
- [89] 黄健敏, 赵国红, 廖芸婧, 等. 基于Logistic回归的降雨诱发区域地质灾害易发性区划及预报模型建立——以安徽歙县为例. 中国地质灾害与防治学报, 2016(3): 98-105.
- [90] 吴凡, 阙志萍. 基于多分类logistic模型的铁路水害分级警戒概率预报研究. 灾害学, 2017, 32(1): 17-21.
- [91] 熊秋芬, 曾晓青. SVM方法在降水预报中的应用及改进. 气象, 2008, 34(12): 90-95.
- [92] 陈超辉, 李崇银, 谭言科, 等. 基于交叉验证的多模式超级集合预报方法研究. 气象学报, 2010(4): 464-476.
- [93] 孙俊奎, 王占良, 张颖. 3种修正的机器学习算法在逐3h降水量预报中的比较应用. 甘肃科学学报, 2020, 32(1): 46-51.
- [94] 黄威, 牛若芸. 基于集合预报和支持向量机的中期强降雨集成预报试验. 气象, 2017, 43(9): 1110-1116.
- [95] 王玉丹, 南卓铜, 陈浩, 等. 基于K最近邻模型的青藏高原CMORPH日降水数据的订正研究. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 607-617.
- [96] 陈浩, 宁忱, 南卓铜, 等. 基于机器学习模型的青藏高原日降水数据的订正研究. 冰川冻土, 2017, 39(03): 583-592.

(上接11页)

对于DMSP项目, 其仪器的探测高度均为80~100 km, 用于支撑未来可能的空间探测需求, 以及空间模式的发展, 而针对目前数值模式层顶约为80 km的需求, NOAA的气象卫星仪器探测高度一般为70 km左右。美国国防部也率先开展了立方体卫星和星座计划的技术尝试, 并将分散化、小型化、轻量化、低成本的理念应用到了国防气象卫星的研发中。DMSP的换代卫星, 将传统集成在一个平台上的多个仪器分散到多颗卫星上, 以降低项目运营风险、缩短研发周期。同时研发小型化的卫星观测仪器, 例如将传统的黑体定标发展为噪声源定标, 压缩卫星的体积, 以适用于更小型化的立方体卫星。

3 结果讨论和启示

美国国防气象卫星经过60年的发展, 已经成为了美国气象卫星布局中重要的组成部分, 共同构成了军民协同、政商互补、美欧联动的气象卫星生态。近年来, 国防气象卫星换代计划中, 在仪器小型化、平台分散化、研发市场化等方面的探索, 在一定程度上代表了美国气象卫星整体的发展趋势。美国国防气象卫星的发展经验, 对于我国整合气象卫星国家战略科技力量, 建立健康可持续的卫星研发机制, 实现不同部门卫星气象应用协同发展, 激活企业在科技创新方面的活力, 打通从科研到业务到产业的研发应用链条,

具有一定的参考价值。

致谢: 本文在写作过程中, 与多位专家进行了详实、有意义和广泛的讨论, 让作者得到很多启发性的思路。审稿专家提出的具体修改意见, 为完善本文起到积极作用, 特向这些专家致谢!

深入阅读

- 白彩全, 易行, 何晨. 夜间灯光遥感数据应用研究的文献计量分析——以美国国防气象卫星计划运行线扫描系统为例. 测绘科学, (8): 129-146.
- 杜智涛, 杜晓勇, 姜明波, 等. 美国极轨气象卫星的转型探索. 科技导报, 39(11): 77-83.
- 何兴伟, 冯小虎, 韩琦, 等. 2020. 世界各国静止气象卫星发展综述. 气象科技进展, 10(1): 22-29, 41.
- 李俊, 方宗义. 卫星气象的发展——机遇与挑战. 气象, 2012(2): 129-146.
- 吕达仁, 王普才, 邱金桓, 等. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 2003, (4): 552-566.
- 唐世浩, 邱红, 马刚. 2016. 风云气象卫星主要技术进展. 遥感学报, (5): 842-849.
- 许小峰. 2020. 气象小卫星: 拓展天基气象观测的新领域. 气象科技进展, 10(3): 2-7.
- 杨忠东, 刘健. 2016. 气象卫星可见光红外光学成像仪发展沿革. 应用气象学报, (5): 592-603.
- Weng F, Zou X, Yan B, et al. 2011. 卫星专用传感器微波成像仪/探测仪(SSMIS)观测资料在天气和气候研究中的应用. 气象科技进展, 1(1): 14-24.

(作者单位: 叶梦姝, 中国气象局气象干部培训学院; 樊奕茜, 中国气象局发展与规划研究院)