苏翔,孙泓川,蔡凝昊,等.2024.一种改进的数值模式降水预报时间降尺度方法[J].暴雨灾害,43(5):542-550. SU Xiang, SUN Hongchuan, CAI Ninghao, et al. 2024. An improved time downscaling method for numerical model precipitation forecast [J]. Torrential Rain and Disasters, 43(5):542-550 (in Chinese). doi:10.12406/byzh.2023-210

一种改进的数值模式降水预报时间降尺度方法

苏翔[1,2,3],孙泓川[1],蔡凝昊[1],李杨[1],宗培书[1]

(1. 江苏省气象台,南京 210041;2. 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210041;
3. 中国气象局水文气象重点开放实验室,北京 100081)

摘　要:数值模式降水预报时间降尺度的目的是将较低时间分辨率的模式降水预报通过统计方法降尺度到较高的时间分辨率上,以近似代替较高时间分辨率的模式降水预报。将现有的基于三次样条插值逐点拆分、位置订正、光流动态重构、频率匹配、逐点总量约束的网格降水预报时间降尺度方法(以下简称为“现有方法”)应用于未经订正的数值模式降水预报时,其中的订正步骤受制于数值模式预报的总降水量的约束,所生成的降水预报时间降尺度产品在强度上存在明显的不合理波动。因此,改进设计了一种适用于数值模式降水预报的时间降尺度方法(以下简称为“改进方法”),包含分段三次Hermite插值逐点拆分、金字塔LK光流动态重构、均衡的逐点总量约束三个步骤,不依赖于降水实况订正,且保留了原始模式的系统偏差。利用2020年4—10月中国气象局华东区域中心模式逐1 h降水预报场和其累加生成的逐3 h降水预报场,分别将其作为数值模式降水预报时间降尺度方法的验证场和输入场,评估对比了单纯的逐点拆分、“现有方法”和“改进方法”的时间降尺度效果,并使用匀速运动的圆形雨带理想模型和真实个例分析分别加以验证。结果表明:(1)“改进方法”所生成的逐1 h降水预报在强度分布上更加均衡合理,短时强降水的平均TS评分和BIAS偏差的波动幅度仅为“现有方法”的27%和9%。(2) 使用“改进方法”所生成的逐1 h降水预报与真实的数值模式生成的逐1 h降水预报场更为相似,平均TS评分和BIAS偏差幅度分别提升13%和下降31%以上,且在理想模型中均方根误差相比于“现有方法”总体下降10%。改进的数值模式降水预报时间降尺度方法同时满足运动合理、强度波动合理和降水总量约束的基本要求,可通用于任意网格降水预报的时间降尺度。

关键词:数值模式降水预报;时间降尺度;金字塔LK光流法;动态重构

中图法分类号: P456　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.12406/byzh.2023-210

An improved time downscaling method for numerical model precipitation forecast

SU Xiang[1,2,3], SUN Hongchuan[1], CAI Ninghao[1], LI Yang[1], ZONG Peishu[1]

(1. *Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing* 210041; 2. *China Meteorological Administration, Key Laboratory of Transportation Meteorology, Nanjing* 210041; 3. *China Meteorological Administration Hydro-Meteorology Key Laboratory, Beijing* 100081)

Abstract: The goal of time downscaling for numerical model precipitation forecast is to downscale the model precipitation forecast with lower time resolution to higher time resolution through statistical methods, which serve as an approximate substitution of model precipitation forecast with higher time resolution. Currently, the steps of split by point with cubic spline interpolation, position calibration, optical flow dynamic reconstruction, frequency matching, and total amount constraint by point (hereinafter referred to as “existing method”) are applied to the existing time downscaling method for grid precipitation forecast. However, when applying them to uncalibrated numerical model precipitation forecast, the calibration steps are limited by the total precipitation amount constraint, leading to obviously unreasonable fluctuation in intensity for the generated precipitation forecast time downscaling product. Therefore, an improved time downscaling method for numerical model precipitation forecast is designed (hereinafter referred to as “improved method”). The “improved method” includes the steps of split by point

收稿日期: 2023-10-01;**定稿日期:**2024-02-19

资助项目: 国家重点研发计划(2021YFC3000905);国家自然科学基金气象联合基金项目(U2342218);国家自然科学基金项目(41805078);中国气象局水文气象重点开放实验室开放研究课题(23SWQXM010)

第一作者: 苏翔,主要从事预报检验和客观预报技术研究。E-mail: suxiang01@163.com

通信作者: 孙泓川,主要从事数值模式释用、客观预报研究。E-mail: hchsun@mail.iap.ac.cn

© Editorial Office of *Torrential Rain and Disasters*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

based on piecewise cubic Hermite interpolation, pyramid LK optical flow dynamic reconstruction, and balanced total amount constraint by point, which does not depend on calibration with precipitation observation and retains the systematic deviation of the original model. In this study, the 1 h precipitation forecast field and the cumulative 3 h precipitation forecast field of the CMA-SH9 model from April to October 2020 were used as the validation field and input field of the numerical model precipitation forecast time downscaling method, respectively. The effects of time downscaling methods of simple split by point, "existing method", and "improved method" were evaluated, compared, and verified by the ideal model of a circular rain belt with constant speed and real case analysis. The results are as follows. (1) The 1 h precipitation forecast generated by the "improved method" is more balanced and reasonable in intensity distribution. The amplitude of fluctuation of average TS and BIAS for short-time heavy precipitation is only 27% and 9% of the "existing method", respectively. (2) The 1 h precipitation forecast generated by the "improved method" is more similar to the 1 h precipitation forecast field generated by the real numerical dynamic model. The average TS and BIAS improved by more than 13% and reduced by more than 31%, respectively, and the root mean square error generally reduced by 10% compared with the "existing method" in the ideal model. The improved numerical model time downscaling method for precipitation forecast meets the basic requirements of reasonable movement, reasonable intensity fluctuation, and total precipitation constraint at the same time, and can be generally used for time downscaling of any grid precipitation forecast.

Key words: numerical model precipitation forecast; time downscaling; pyramid LK optical flow method; dynamic reconstruction

引　言

降水预报是我国最核心的天气预报业务之一(宗志平等，2012)。随着气象科学和计算机技术飞速发展，我国的降水预报业务已从基于传统天气学主观分析的等级落区预报逐渐转变为基于数值模式的定量降水预报(Quantitative Precipitation Forecast，QPF) (李泽椿等，2019)。为满足社会对精细化降水预报服务的需求，中央气象台自2014年起开展智能网格QPF业务，并逐步形成水平分辨率5 km，未来1 d逐1 h、未来2~10 d逐3 h间隔的智能网格QPF产品(谌芸等，2021)。当前智能网格QPF的制作流程，通常是先通过单模式偏差订正(Zhu and Luo，2015；吴启树等，2017；代刊等，2018)、多模式集成(危国飞等，2020；Wang et al.，2021)、主客观融合(唐健等，2018)等订正技术实现逐日QPF准确率的提升，再将订正后的24 h网格降水预报时间降尺度到逐3 h或逐1 h细分时段，实现精细化水平提升。

在网格降水预报时间降尺度技术方面，曹勇等(2016)以欧洲中期天气预报中心(ECMWF)模式逐3 h降水预报为分配依据，将主客观融合订正后的24 h网格降水预报逐点按比例分配到逐3 h。由于当前业务下发的全球模式降水预报的时间分辨率为3 h，若要时间降尺度到更高的1 h分辨率，通常需要使用三次样条插值等方法进行逐点拆分。然而业务实践中发现，基于三次样条插值的逐点拆分方法所生成的逐1 h降水预报不仅雨带范围偏大、强度偏弱，还存在明显的移动不合理问题，具体表现为同一3 h时段内逐1 h雨带的相似度较高，而不同3 h时段的相邻1 h雨带存在位置和形态上的突变(刘凑华等，2021)。为解决上述问题，刘凑华等(2021)对单纯基于逐点拆分的降水预报时间降尺度方法进行了改进，增加了基于Lucas-Kanade (LK)光流法(曹春燕等，2015)的动态重构和频率匹配订正步骤，用于改进逐1 h降水雨带移动不合理问题和雨带强度的不合理波动(以下简称为"刘2021方法")，显著提升了逐1 h降水预报在不同等级下的公正预兆得分(Equitable Threat Score，ETS)。

然而在智能网格降水预报的对比检验和技术研发过程中，也常需要对未经订正的数值模式降水预报进行时间降尺度，以生成与高时间分辨率的数值模式降水预报更接近的QPF产品(不依赖于降水实况)。而"刘2021方法"包含偏差订正步骤(位置订正和频率匹配订正)，主要用于对订正后的网格降水预报进行时间降尺度，目的是生成与高时间分辨率的降水实况更接近的QPF产品(依赖于降水实况)。由于原始数值模式降水预报可能存在系统偏差，而其时间降尺度产品必须满足数值模式总降水量的约束，因此基于降水实况的订正步骤无法改进数值模式降水预报时间降尺度产品相对于降水实况的准确性，因此不应该以降水实况作为检验数值模式降水预报时间降尺度的依据。虽然"刘2021方法"可以较好地应用于主客观融合订正后的网格降水预报场，但应用在未经订正的全球模式逐3 h降水预报的时间降尺度时，所生成的产品存在3 h时段内中间1 h降水预报场的强度明显高于相邻两侧1 h的不合理波动，该现象也可以从刘凑华等(2021)文章的图6中得到印证。虽然"刘2021方法"中的频率匹配订正步骤可以暂时平衡动态重构后3 h时段内逐1 h降水预报场的强度，但受制于数值模式总降水量的约束，进一步增加逐点总量约束步骤以后，不合理的强度波动依然存在。此外，"刘2021方法"还存在两个可改进之处：一是逐点拆分步骤采用的三次样条插值并不能保证不同预报时效累积降水量的单调性，可能导致逐点拆分过程中生成部分负值的1 h降水预报；二是动态重构步骤中采用的经典LK光流法所设定的小幅运动假设在实际的逐1 h降水预报场

中并不容易满足，增加了光流矢量的计算误差。

针对上述问题，本文对“刘2021方法”中的时间降尺度步骤(以下简称为“现有方法”，不包含位置订正和频率匹配订正)进行改进：在逐点拆分步骤中采用分段三次Hermite插值代替三次样条插值以保证插值的单调性，避免负降水的产生；在光流动态重构步骤中采用金字塔LK光流法(Bouguet，2001)，通过构造高斯卷积和多分辨率数据结构，可较好地识别不同位移大小的目标运动，提升光流法的鲁棒性(Liu et al.，2015)；设计了均衡的逐点总量约束步骤，将光流动态重构后的较高时间分辨率降水预报场与时间降尺度前的较低时间分辨率降水预报场在每个格点上满足降水量守恒，同时通过循环排序映射使得较高时间分辨率降水预报场的强度在时间序列上分布更加均衡合理。“改进方法”不依赖于降水实况订正，保留原始模式的系统偏差，可实现全球模式和区域模式降水预报产品时间分辨率的统一，为智能网格降水预报的对比检验和技术研发提供参考。

1 资料说明

由于目前难以获取1 h时间分辨率的全球模式降水预报产品用于验证全球模式逐3 h降水预报时间降尺度的效果，因此选用中国气象局华东区域中心模式(CMA-SH9) 2020年4—10月每日08和20时(北京时，下同)起报的逐1 h降水预报作为检验数值模式降水预报时间降尺度方法的真值，并将其累加生成的逐3 h降水预报场作为数值模式降水预报时间降尺度的输入场，用于生成逐1 h的数值模式降水预报时间降尺度产品。CMA-SH9模式降水预报原始数据为水平分辨率9 km的兰伯特投影，采用临近点插值法将其转换为江苏地区(116°—122°E，30.7°—35.2°N) 0.1°×0.1°水平分辨率的矩形网格预报数据。

需要说明的是，虽然本文采用区域模式对不同时间降尺度方法的效果进行验证，但在实际工作中本文提出的“改进方法”也可应用于ECMWF等全球模式降水预报的时间降尺度。目前，基于“改进方法”的ECMWF模式降水预报时间降尺度产品已在江苏省气象台业务试运行，将逐3 h降水预报实时降尺度到逐1 h。

2 时间降尺度方法

数值模式降水预报时间降尺度方法的目的是在总量约束的前提下，生成一套移动和强度相对合理的高时间分辨率的降水预报场。假定现在有一套逐3 h的数值模式降水预报场，通过逐点拆分、光流动态重构、均衡的逐点总量约束共三个步骤对其进行时间降尺度，生成12~36 h (对应智能网格降水预报的0~24 h)时效内逐1 h的降水预报产品。

第一步：逐点拆分步骤。基于分段三次Hermite插值，将每个格点上不同预报时效的3 h降水预报拆分成3个1 h降水预报。具体步骤如下：

(1) 记数值模式3 h降水预报场为 $R_t^{3\,\mathrm{h}}$，从0开始累积的累积降水预报场为 A_t，其中 t 为预报时效，单位为h。首先，通过输入的数值模式逐3 h降水预报场 $R_3^{3\,\mathrm{h}}$、$R_6^{3\,\mathrm{h}}$、…、$R_{39}^{3\,\mathrm{h}}$ 计算累积降水预报场 A_3、A_6、…、A_{39}，例如 $A_{39}=R_3^{3\,\mathrm{h}}+R_6^{3\,\mathrm{h}}+\cdots R_{39}^{3\,\mathrm{h}}$。(2) 在每个格点上，以预报时效0、3、6、…、39 h为横坐标(覆盖12~36 h时效，避免插值出现外插的情况)，相应的累积降水预报值为纵坐标(预报时效0对应的累积降水预报值为0)，构建一组3 h间隔的样本点。(3) 基于分段三次Hermite插值拟合样本点，插值计算预报时效12、13、…、36 h对应的累积降水预报值；当所有格点计算完毕，可得1 h间隔的累积降水预报场 A_{12}、A_{13}、…、A_{36}。(4) 将1 h间隔的相邻累积降水预报场两两相减，可得逐1 h降水预报场 $R_{13}^{1\,\mathrm{h}}$、$R_{14}^{1\,\mathrm{h}}$、…、$R_{36}^{1\,\mathrm{h}}$，例如 $R_{13}^{1\,\mathrm{h}}=A_{13}-A_{12}$。需要说明的是，逐点拆分步骤生成的逐1 h降水预报场本身满足总量约束关系，因此可作为一种基础参考方法用于不同时间降尺度方法的对比检验。

第二步：光流动态重构步骤。先将逐点拆分后每3 h降水预报场中前后1 h降水预报场删除，保留中间1 h降水预报场，再基于金字塔LK光流法，用相邻两个3 h时段的中间1 h降水预报场重新构建两者之间的2个1 h降水预报场。本文采用三层金字塔结构，高斯卷积核大小为3×3，具体步骤如下：

记相邻2个3 h降水预报场逐点拆分后的6个1 h降水预报场分别为 $R_1^{1\,\mathrm{h}}$、$R_2^{1\,\mathrm{h}}$、$R_3^{1\,\mathrm{h}}$、$R_4^{1\,\mathrm{h}}$、$R_5^{1\,\mathrm{h}}$、$R_6^{1\,\mathrm{h}}$，删除 $R_1^{1\,\mathrm{h}}$、$R_3^{1\,\mathrm{h}}$、$R_4^{1\,\mathrm{h}}$、$R_6^{1\,\mathrm{h}}$，保留 $R_2^{1\,\mathrm{h}}$、$R_5^{1\,\mathrm{h}}$。基于金字塔LK光流法计算正向平移矢量 $M_{2\to5}$ 和反向平移矢量 $M_{5\to2}$，对 $R_3^{1\,\mathrm{h}}$，$R_4^{1\,\mathrm{h}}$ 进行重构，公式如下

$$R_3^{1\,\mathrm{h}'}=\frac{2}{3}F\left(\frac{1}{3}M_{2\to5},R_2^{1\,\mathrm{h}}\right)+\frac{1}{3}F\left(\frac{2}{3}M_{5\to2},R_5^{1\,\mathrm{h}}\right) \quad (1)$$

$$R_4^{1\,\mathrm{h}'}=\frac{1}{3}F\left(\frac{2}{3}M_{2\to5},R_2^{1\,\mathrm{h}}\right)+\frac{2}{3}F\left(\frac{1}{3}M_{5\to2},R_5^{1\,\mathrm{h}}\right) \quad (2)$$

其中 F 代表金字塔LK光流平移函数。

第三步：均衡的逐点总量约束步骤。记光流动态重构后生成3个1 h降水预报场分别为 $W_1^{1\,\mathrm{h}}$、$W_2^{1\,\mathrm{h}}$、$W_3^{1\,\mathrm{h}}$，对应的3 h降水预报场为 $R^{3\,\mathrm{h}}$，具体步骤如下：

(1) 将二维降水预报场为 $W_1^{1\,\mathrm{h}}$、$W_2^{1\,\mathrm{h}}$、$W_3^{1\,\mathrm{h}}$ 展开变成一维数组，分别按各自元素从小到大排序，得到一维

数组 $S_1^{1\,h}$、$S_2^{1\,h}$、$S_3^{1\,h}$。(2) 对中间的一维数组 $S_2^{1\,h}$ 用 $S_1^{1\,h}$ 和 $S_3^{1\,h}$ 的均值替换，得到新的一维数组 $S_2^{1\,h'}$。(3) 将二维降水预报场 $W_2^{1\,h}$ 中的所有元素按从小到大的顺序排序映射到一维数组 $S_2^{1\,h'}$ 上，用一维数组 $S_2^{1\,h'}$ 中的所有元素替换二维降水预报场 $W_2^{1\,h}$ 中的所有元素，得到新的二维降水预报场 $W_2^{1\,h'}$。(4) 对 $W_1^{1\,h}$、$W_2^{1\,h'}$、$W_3^{1\,h}$ 逐点按比例分配可得3个1 h降水预报场 $Q_1^{1\,h}$、$Q_2^{1\,h}$ 和 $Q_3^{1\,h}$。

$$Q_1^{1\,h}=\frac{W_1^{1\,h}}{W_1^{1\,h}+W_2^{1\,h'}+W_3^{1\,h}}\times R^{3\,h} \tag{3}$$

$$Q_2^{1\,h}=\frac{W_2^{1\,h'}}{W_1^{1\,h}+W_2^{1\,h'}+W_3^{1\,h}}\times R^{3\,h} \tag{4}$$

$$Q_3^{1\,h}=\frac{W_3^{1\,h}}{W_1^{1\,h}+W_2^{1\,h'}+W_3^{1\,h}}\times R^{3\,h} \tag{5}$$

(5) 判断3 h时段内中间1 h降水预报场 $Q_2^{1\,h}$ 的全场降水总量是否满足以下条件

$$\sum\sum Q_2^{1\,h}\leqslant\frac{1}{3}\sum\sum R^{3\,h} \tag{6}$$

式(6)中 ∑∑ 代表二维降水预报场中所有格点降水预报值的总和；若上式不成立，则用 $Q_1^{1\,h}$、$Q_2^{1\,h}$、$Q_3^{1\,h}$ 分别替换 $W_1^{1\,h}$、$W_2^{1\,h}$、$W_3^{1\,h}$，回到步骤(1)中重新计算；若上式成立，则数值模式3 h降水预报场 $R^{3\,h}$ 最终时间降尺度为3个1 h降水预报场 $Q_1^{1\,h}$、$Q_2^{1\,h}$、$Q_3^{1\,h}$。

该步骤部分参考了概率匹配平均方法(Ebert,2021)的思路，对降水场 $W_1^{1\,h}$、$W_2^{1\,h}$、$W_3^{1\,h}$ 排序后再进行均值替换的目的是为了保证对 $W_2^{1\,h}$ 降水场进行变换后，元素之间的相对大小保持不变，即仅改变 $W_2^{1\,h}$ 降水场的强度，使其逐步逼近两侧的降水场 $W_1^{1\,h}$ 和 $W_3^{1\,h}$，从而减小降水强度的不合理波动，但不改变 $W_2^{1\,h}$ 降水场的形态。

3 理想模型检验

首先，设计了如图1所示的匀速运动的圆形雨带作为理想模型，从理论上验证“改进方法”相比于“现有方法”和单纯的逐点拆分方法的优势。其中图 a_1—a_6 代表在12~18 h预报时段内真实的逐1 h降水预报场，由6个半径为1°的圆形雨带组成，雨强为单位1，并以每小时0.5°的速度向东匀速移动。将 a_1—a_3 和 a_4—a_6 分

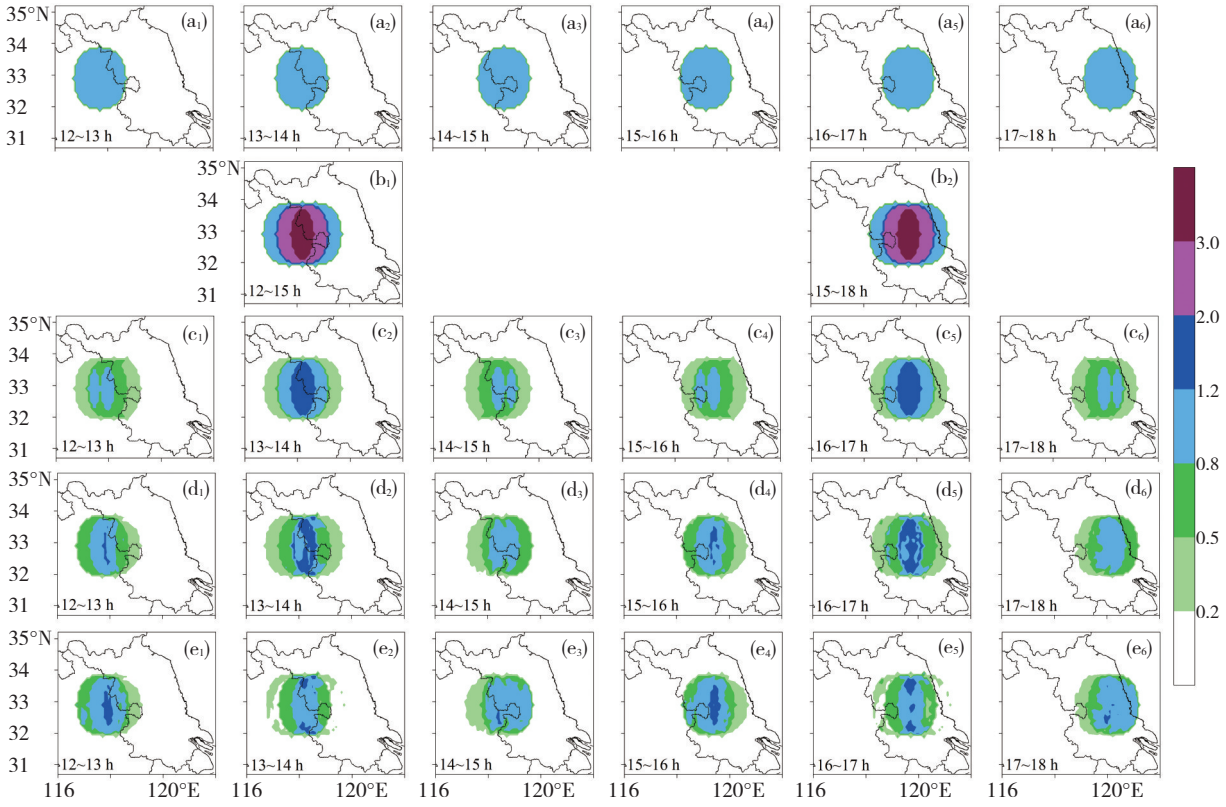


图1 时间降尺度方法理想模型构造的原始12~18 h逐1 h降水预报场(a_1—a_6)、原始逐1 h降水预报场累加得到的用于时间降尺度的12~15 h (b_1)和15~18 h (b_2)逐3 h降水预报场、单纯的逐点拆分方法生成的12~18 h逐1 h降水场(c_1—c_6)、“现有方法”生成的12~18 h逐1 h降水预报场(d_1—d_6)和“改进方法”生成的12~18 h逐1 h降水预报场(e_1—e_6)

Fig. 1 (a_1–a_6) Original 12–18 h hourly precipitation forecast field, (b_1) 12–15 h and (b_2) 15–18 h 3-hourly precipitation forecast field accumulated from the original 1 h precipitation forecast field for time downscaling, (c_1–c_6) 12–18 h hourly precipitation forecast field generated by simple split by point method, (d_1–d_6) 12–18 h hourly precipitation forecast field generated by “existing method”, (e_1–e_6) 12–18 h by hourly precipitation forecast field generated by “improved method” constructed by ideal model of time downscaling methods

别累加得到12~15 h (图1b_1)和15~18 h (图1b_2)时段的2个3 h降水预报场，作为降水预报时间降尺度方法的输入场。分别采用单纯的逐点拆分方法(图1c_1—c_6)、“现有方法”(图1d_1—d_6)、“改进方法”(图1e_1—e_6)生成12~18 h预报时段内逐1 h降水预报场。可以看出，单纯的逐点拆分方法(图1c_1—c_6)所生成的逐1 h降水预报场存在3 h时段内雨带重心相对集中的问题，而增加光流动态重构步骤以后(图1d_1—d_6)，雨带的重心变得相对分散，逐1 h雨带的移动变得更为合理。单纯的逐点拆分方法(图1c_1—c_6)和“现有方法”(图1d_1—d_6)都存在3 h时段内中间1 h降水预报场明显强于相邻两侧1 h降水预报场的不合理现象，而“改进方法”所生成的逐1 h降水雨带(图1e_1—e_6)在强度上分布更加均衡合理。此外，“改进方法”所生成的逐1 h降水中的虚假雨带范围进一步缩小，在降水分布上与真实的逐1 h降水预报场(图1a_1—a_6)更为相似。

表1为理想模型中不同降水预报时间降尺度方法的均方根误差(RMSE)。可以看出，在12~18 h时段内，单纯的逐点拆分所生成的1 h降水预报场的RMSE最大，“现有方法”通过增加光流动态重构步骤提升了逐1 h降水雨带运动的合理性，RMSE总体减小18%。“改进方法”则在“现有方法”的基础上，进一步降低了降水强度的不合理波动，RMSE相比于“现有方法”总体降低10%，所生成的逐1 h降水预报场与真实的逐1 h降水预报场也更为接近。

表1 理想模型中不同降水预报时间降尺度方法在不同降水时段的均方根误差(RMSE)

Table 1 Root mean square error of different time downscaling methods of precipitation forecast in the ideal model in different precipitation periods

降水时段/h	单纯的逐点拆分方法	现有方法	改进方法
12~13	0.148	0.109	0.102
13~14	0.135	0.130	0.112
14~15	0.148	0.112	0.100
15~16	0.148	0.108	0.102
16~17	0.135	0.134	0.119
17~18	0.148	0.110	0.098

4 三种不同时间降尺度方法效果检验

上述理想模型为理论角度的对比检验，下面将通过真实的数值模式降水预报场分别构建时间降尺度方法的真值场和输入场，用于对比检验单纯的逐点拆分、“现有方法”和“改进方法”的时间降尺度效果。选取CMA-SH9模式2020年4—10月每日08和20时起报的12~36 h逐1 h (对应智能网格的0~24 h逐1 h)降水预报作为检验数值模式降水预报时间降尺度方法的真值，并将逐1 h降水预报累加生成的0~39 h (覆盖12~36 h时效，避免插值出现外插的情况)逐3 h降水预报场作为时间降尺度的输入场，用于生成逐1 h的数值模式降水预报时间降尺度产品。

从2020年4—10月不同时间降尺度方法生成的逐1 h降水预报在0.1 mm、10 mm、20 mm和40 mm等级的TS评分和BIAS偏差随预报时效的变化(图2)可以看出，不同时间降尺度方法对应产品的TS评分和BIAS偏差在0.1 mm等级上差距不大，而随着降水等级的提升，评分的差异变得尤为明显。由此可见，不同时间降尺度方法性能的差异主要体现在强降水上。此外，还发现单纯的逐点拆分方法和“现有方法”存在3 h时段内中间1 h降水预报场的TS评分和BIAS偏差明显高于相邻两侧1 h降水预报场的情况，而这也从前文的理想模型中这两个时间降尺度方法对应降水预报强度的不合理波动现象中得到印证。随着降水等级的增大，单纯的逐点拆分方法和“现有方法”对应的逐1 h降水预报评分的波动也变得尤为显著。以代表短时强降水标准的20 mm等级阈值的1 h降水预报为例，单纯的逐点拆分方法和“现有方法”的3 h时段内中间1 h降水预报平均TS评分分别为0.41和0.38，而3 h时段内两侧1 h降水预报平均TS评分仅分别为0.19和0.20。考虑到真实数值模式逐1 h降水预报场强度演变的连续性，这种评分的剧烈波动显然超出了正常的波动范围。而“改进方法”中3 h时段内中间和两侧1 h降水预报的平均TS评分分别为0.31和0.29，随预报时效的变化相对均衡许多。BIAS偏差随预报时效的波动情况也是类似的，这里不再赘述。若以标准差衡量评分随预报时效的波动幅度，“改进方法”的TS评分和BIAS偏差的波动幅度仅分别为“现有方法”的27%和9%，明显优于“现有方法”。从不同时间降尺度方法生成的逐1 h降水预报的平均TS评分和BIAS偏差幅度随降水等级的变化(图3)来看，“改进方法”所生成的逐1 h降水预报场的平均TS评分和BIAS偏差幅度都明显优于“现有方法”和单纯的逐点拆分方法，尤其对于20 mm等级以上的强降水雨带，相比于“现有方法”的TS评分提升13%以上，BIAS偏差幅度下降31%以上。此外，为了验证“改进方法”的普适性，任意选取了近年来汛期的其他时段进行检验，例如2023年7月，也得到了相同的结论。

在对不同时间降尺度方法的综合性能进行检验之后，为了更好地展示不同方法的效果，选取CMA-SH9模式2020年7月28日08时起报的30~36 h时段内的一次强降水过程进行示例说明(图4)。从“现有方法”所生成的逐1 h降水预报场中可以看出，31~

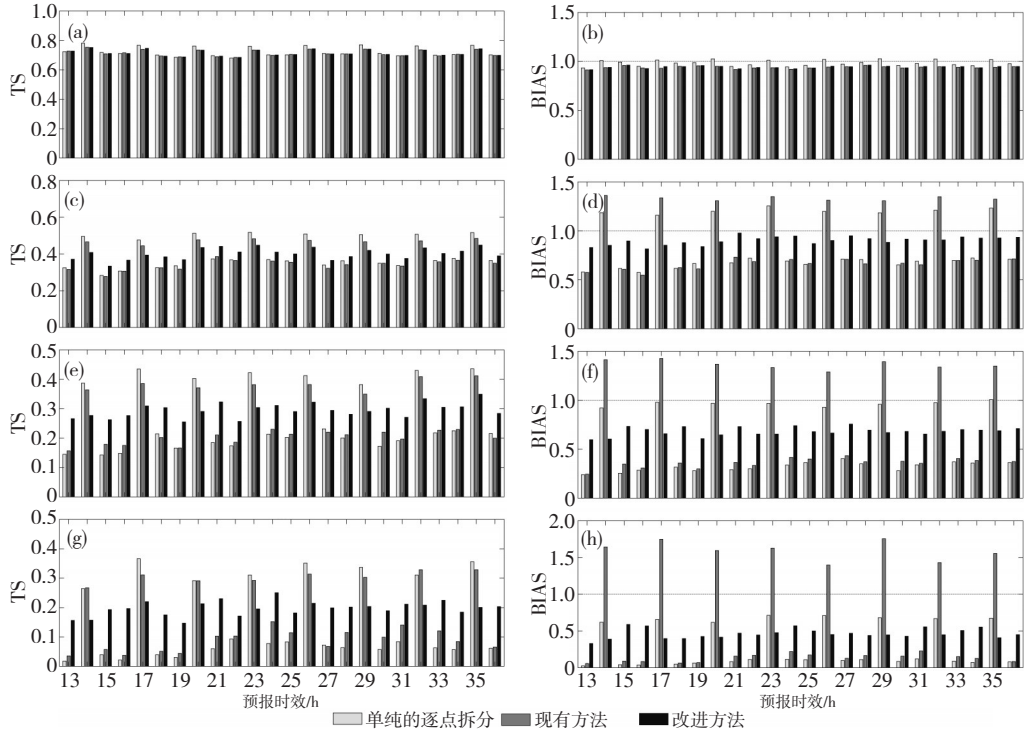


图2 基于CMA-SH9模式2020年4—10月08和20时起报的12~36 h预报时效内不同时间降尺度方法生成的逐1 h降水预报在0.1 mm (a、b)、10 mm (c、d)、20 mm (e、f)和40 mm (g、h)等级的TS评分(a、c、e、g)和BIAS偏差(b、d、f、h)随预报时效的变化

Fig. 2 Variations of the overall (a, c, e, g) TS and (b, d, f, h) BIAS of 1 h precipitation forecast generated by different time downscaling methods at (a, b) grade 0.1 mm, (c, d) 10 mm, (e, f) 20 mm and (g, h) 40 mm based on the 12~36 h forecast of CMA-SH9 model initialized from 08:00 BT and 20:00 BT from April to October in 2020

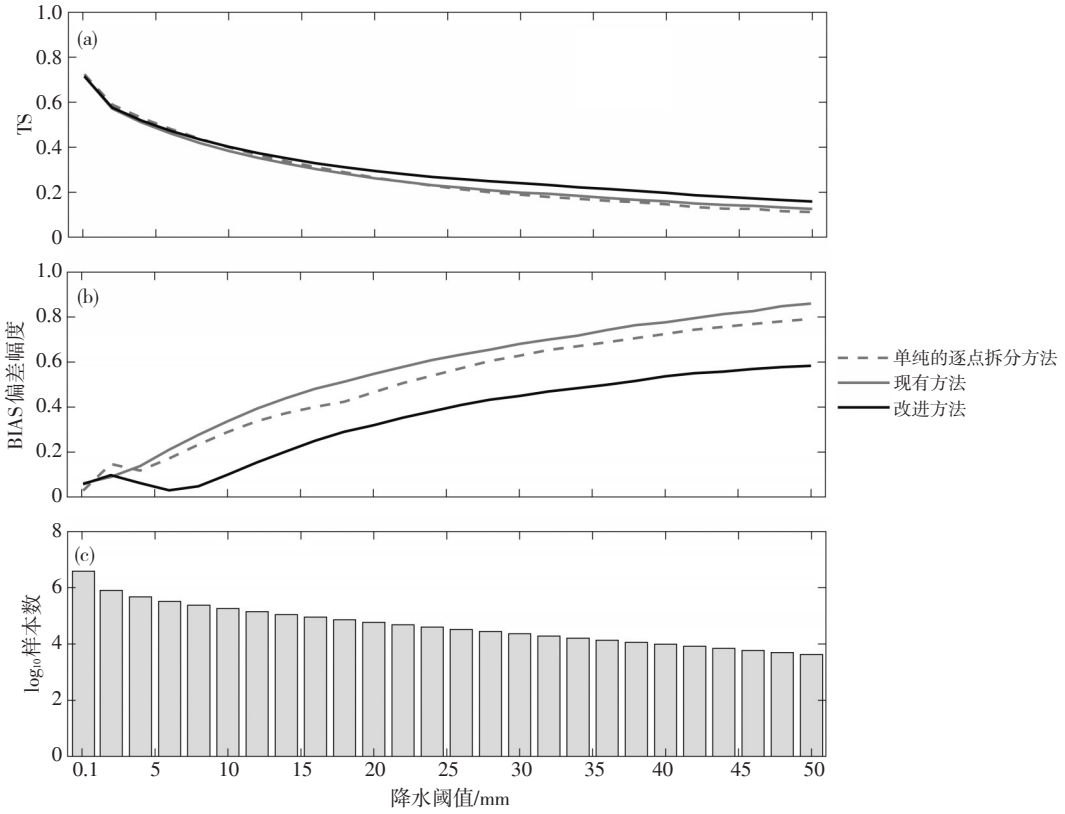


图3 三种不同时间降尺度方法所生成的逐1 h降水预报的平均TS评分(a)、平均BIAS偏差幅度(b)和对数样本数(c)随降水阈值的变化

Fig. 3 Variations of (a) average TS, (b) average amplitude of BIAS deviation and (c) the logarithmic number of samples of 1 h precipitation forecast generated by three different time downscaling methods with precipitation threshold

32 h (图4c_2)和34~35 h(图4c_5)降水预报场存在明显的50 mm h^{-1}以上的强降水中心，而相邻的30~31 h(图4c_1)和32~33 h (图4c_3)、33~34 h (图4c_4)和35~36 h (图4c_6)降水预报场的强度则明显较弱，不仅不存在50 mm h^{-1}以上的强降水中心，甚至连20 mm h^{-1}以上短时强降水的面积都明显偏小。单纯的逐点拆分方法(图4b_1—b_6)也同样存在3 h时段内中间1 h降水预报场明显强于相邻两侧1 h降水预报的情况。“改进方法”(图4d_1—d_6)通过均衡的逐点总量约束对“现有方法”进行了改进，以33~36 h时段为例，其中的逐1 h降水预报场均存在50 mm h^{-1}以上强降水中心，且强降水雨带的面积随预报时效的波动也相对平稳。进一步将不同时间降尺度方法的逐1 h降水预报场与真实的数值模式逐1 h降水预报场(图4a_1—a_6)进行对比，可以看出“改进方法”的时间降尺度产品与真实的数值模式逐1 h降水预报的降水分布总体上最为相似。通过计算30~36 h时段内单纯的逐点拆分方法、“现有方法”和“改进方法”所生成的逐1 h降水预报场相比于真实的数值模式逐1 h

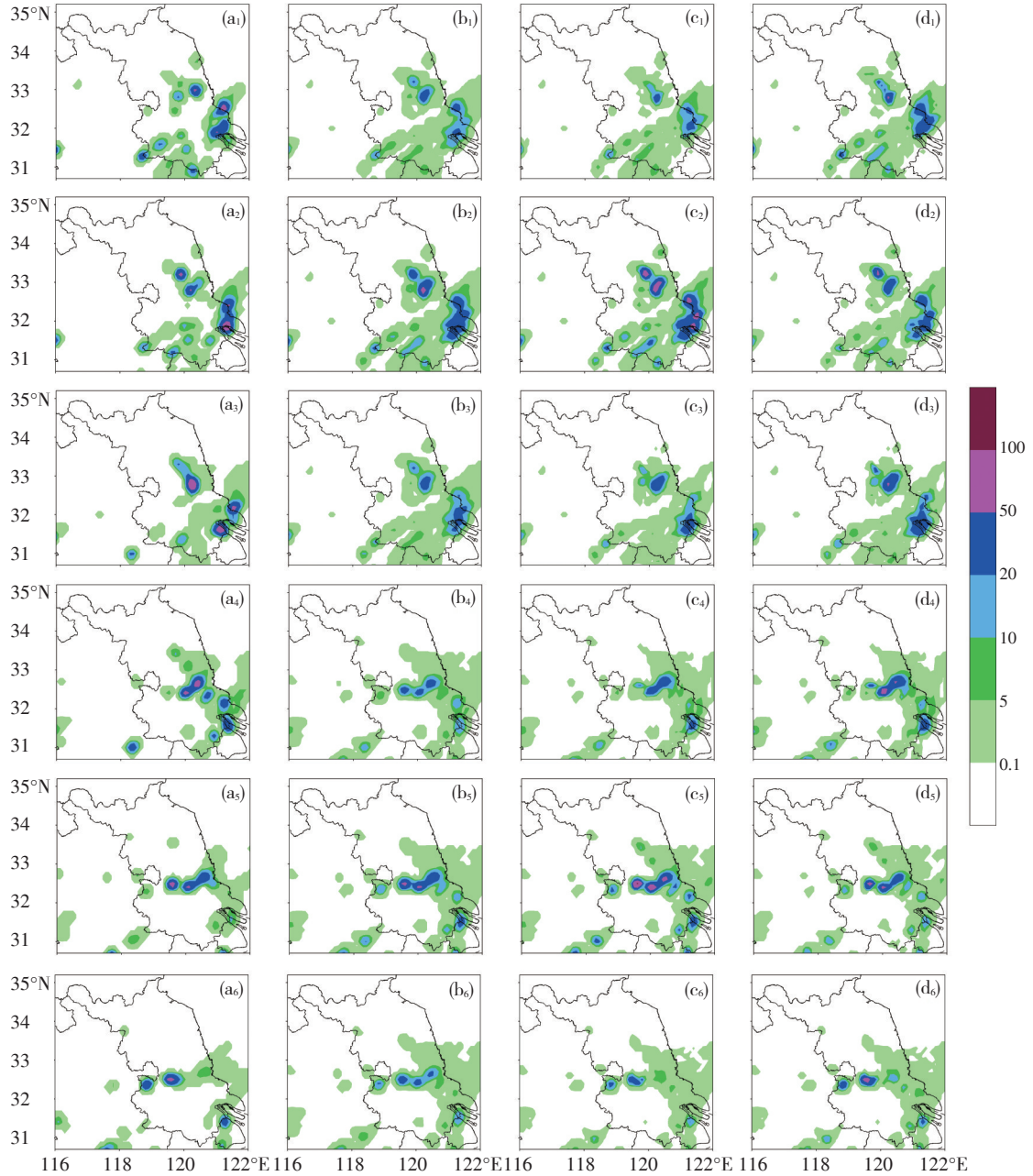


图4 2020年7月28日08时起报的CMA-SH9模式原始(a_1—a_6)、单纯的逐点拆分方法(b_1—b_6)、“现有方法”(c_1—c_6)、“改进方法”(d_1—d_6)时间降尺度后第30~31 h (a_1、b_1、c_1、d_1) 、31~32 h (a_2、b_2、c_2、d_2) 、32~33 h (a_3、b_3、c_3、d_3) 、33~34 h (a_4、b_4、c_4、d_4) 、34~35 h (a_5、b_5、c_5、d_5)和35~36 h (a_6、b_6、c_6、d_6)逐1 h降水(单位：mm)预报

Fig. 4 The (a_1, b_1, c_1, d_1) 30–31 h, (a_2, b_2, c_2, d_2) 31–32 h, (a_3, b_3, c_3, d_3) 32–33 h, (a_4, b_4, c_4, d_4) 33–34 h, (a_5, b_5, c_5, d_5) 34–35 h and (a_6, b_6, c_6, d_6) 35–36 h hourly precipitation (unit: mm) forecast initialized from 08:00 BT on 28 July 2020 generated from (a_1–a_6) the original CMA-SH9 model, and time downscaled from (b_1–b_6) simple split by point method, (c_1–c_6) “existing method” and (d_1–d_6) “improved method”

降水预报场的短时强降水(20 mm·h^{-1}) TS评分可得,三者的TS评分分别为0.357、0.384、0.421,说明“改进方法”的降水预报时间降尺度产品的准确性最佳。

5 结论与讨论

针对现有的基于三次样条插值逐点拆分、位置订正、光流动态重构、频率匹配、逐点总量约束的网格降水预报时间降尺度方法在应用于未经订正的数值模式降水预报时存在的问题,对“现有方法”进行改进,设计了一种适用于数值模式降水预报的时间降尺度方法。首先,在逐点拆分步骤中采用分段三次Hermite插值代替三次样条插值以避免负降水的产生;其次,在光流动态重构步骤中采用金字塔LK光流法代替经典LK光流法以减缓雨带移速较快所产生的影响;最后,采用均衡的逐点总量约束步骤代替逐点总量约束步骤以解决“现有方法”在降水强度上的不合理波动问题。得到的主要结论如下:

(1) 基于匀速运动的圆形雨带理想模型实验对比检验了单纯的逐点拆分方法、“现有方法”、“改进方法”所生成的逐1 h降水预报,结果表明“改进方法”所生成的逐1 h降水预报场与真实的逐1 h降水预报场最为接近,RMSE相比于“现有方法”总体下降10%,且在强度分布上更加均衡合理。

(2) 以2020年是4—10月CMA-SH9模式逐1 h降水预报场作为检验真值,累加生成的逐3 h降水预报场作为不同时间降尺度方案的输入场,通过检验评估和个例研究发现,“改进方法”所生成的逐1 h降水预报场总体优于“现有方法”,尤其对于20 mm等级以上的强降水,平均TS评分提升13%以上,平均BIAS偏差幅度下降31%以上。

(3) “改进方法”还解决了“现有方法”所生成的逐1 h降水预报场的评分随预报时效剧烈波动的不合理问题,而该问题随降水等级的增大变得尤为显著。以20 mm·h^{-1}短时强降水为例,“改进方法”的平均TS评分和BIAS偏差的波动幅度明显降低,仅为“现有方法”的27%和9%。

需要说明的是,“改进方法”中的分段三次Hermite插值逐点拆分和金字塔LK光流动态重构步骤均属于较小的改进,目的是使算法在理论上更加合理,可能并不能通过检验评分来论证其优势。均衡的逐点总量约束步骤属于方法改进的重点部分,检验评分的改进结果主要来源于此。正如“刘2021方法”中各个步骤的作用并非都是为了提升检验评分,例如动态重构主要是为了使得降水的移动更加合理,但从统计意义上检验下来,并不能显著改进降水评分,最终决定降水评分改进的还是频率匹配订正步骤。

降水变量属于累积量,其时间降尺度受到总降水量的约束,不能像温度、风等瞬时变量一样通过插值拆分和基于较高时间分辨率的观测订正两个步骤完成时间降尺度。基于观测的订正步骤仅能作为降水预报时间降尺度的中间步骤,最终时间降尺度产品的系统偏差还与输入的降水预报场的系统偏差有关。本文提出的数值模式降水预报时间降尺度方法保留了原始模式的系统偏差,不依赖于降水实况,无需建立大量的订正模型,计算速度快,通用性强,可用于任意网格降水预报的时间降尺度。虽然“改进方法”所生成的降水预报时间降尺度产品同时满足运动合理、强度波动合理和总量约束的基本要求,但对于强降水预报仍存在强度偏弱的问题,原因之一是光流法对于降水形变的预测准确性有限。此外,由于本“改进方法”重点基于排序映射修正,因此对同一天气系统控制下的连续变化的降水预报场的时间降尺度效果更佳,而对不同天气系统控制下的突变性降水预报场适应性欠佳。

参考文献(References):

曹春燕,陈元昭,刘东华,等.2015.光流法及其在临近预报中的应用[J].气象学报,73(3):471-480. Cao C Y, Chen Y Z, Liu D H, et al. 2015. The optimal flow method and its application to nowcasting [J]. Acta Meteorologica Sinica,73(3):471-480 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2015.034

曹勇,刘凑华,宗志平,等.2016.国家级格点化定量降水预报系统[J].气象,42(12):1476-1482. Cao Y, Liu C H, Zong Z P, et al. 2016. State-level gridded quantitative precipitation forecasting system [J]. Meteorological Monthly,42(12):1476-1482 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.12.005

谌芸,曹勇,孙健.2021.中央气象台精细化网格降水预报技术的发展和思考[J].气象,47(6):655-670. Chen Y, Cao Y, Sun J. 2021. Progress of fine gridded quantitative precipitation forecast technology of National Meteorological Centre [J]. Meteorological Monthly,47(6):655-670 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.06.002

代刊,朱跃建,毕宝贵.2018.集合模式定量降水预报的统计后处理技术研究综述[J].气象学报,76(4):493-510. Dai K, Zhu Y J, Bi B G. 2018. The review of statistical post-process technologies for quantitative precipitation forecast of ensemble prediction system [J]. Acta Meteorological Sinica,76(4):493-510 (in Chinese). doi:10.11676/qxxb2018.015

李泽椿,谌芸,张夕迪,等.2019.中央气象台暴雨预报业务的发展及思考[J].暴雨灾害,38(5):407-415. Li Z C, Chen Y, Zhang X D, et al. 2019. Development and perspectives on torrential rain forecasting operation in National Meteorological Center [J]. Torrential Rain and Disasters,38(5):407-415 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2019.05.002

刘凑华,林建,曹勇,等.2021.网格降水预报时间降尺度方法改进[J].暴雨灾害,40(6):617-625. Liu C H, Lin J, Cao Y, et al. 2021. Improvement of time downscaling method of grid precipitation forecast [J]. Torrential Rain and Disasters,40(6):617-625 (in Chinese). doi:10.3969/j.issn.1004

–9045.2021.06.006

唐健,代刊,宗志平,等.2018.主客观融合定量降水预报方法及平台实现[J].气象,44(8):1020–1032. Tang J, Dai K, Zong Z P, et al. 2018. Methods and platform realization of the national QPF master blender [J]. Meteorological Monthly,44(8):1020–1032 (in Chinese). doi:10.7519/j.issn.1000–0526.2018.08.004

危国飞,刘会军,吴启树,等.2020.多模式降水分级最优化权重集成预报技术[J].应用气象学报,31(6):668–680. Wei G F, Liu H J, Wu Q S, et al. 2020. Multi–model consensus forecasting technology with optimal weight for precipitation intensity levels [J]. Journal of applied Meteorological Science,31(6):668–680 (in Chinese). doi: 10.11898/1001–7313.20200603

吴启树,韩美,刘铭,等.2017.基于评分最优化的模式降水预报订正算法对比[J].应用气象学报,28(3):306–317. Wu Q S, Han M, Liu M, et al. 2017. A comparison of optimal–score–based correction algorithms of model precipitation prediction [J]. Journal of applied Meteorological Science,28(3):306–317 (in Chinese). doi:10.11898/1001–7313.20170305

宗志平,代刊,蒋星.2012.定量降水预报技术研究进展[J].气象科技进展,2(5):29–35. Zong Z P, Dai K, Jiang X. 2012. The research progress of quantitative precipitation forecast [J]. Advances Meteorological Science Technology,2(5):29–35 (in Chinese)

Bouguet J Y. 2001. Pyramidal implementation of the affine Lucas Kanade feature tracker description of the algorithm [J]. Intel Corporation,5 (1–10):4

Ebert E E. 2001. Ability of a poor man's ensemble to predict the probability and distribution of precipitation [J]. Monthly Weather Review,129(10): 2461–2480. doi:10.1175/1520–0493(2001)129<2461:AOAPMS>2.0.CO;2

Liu Y, Xi D G, Li Z L, et al. 2015. A new methodology for pixel–quantitative precipitation nowcasting using a pyramid Lucas Kanade optimal flow approach [J]. Journal of Hydrology,529:354–364. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.07.042

Wang Y, Dai K, Zong Z P, et al. 2021. Quantitative precipitation forecasting using multi–model blending with supplemental grid points: Experiments and prospects in China [J]. Journal of Meteorological Research, 35(3):521–536. doi:10.1007/s13351–021–0172–5

Zhu Y, Luo Y. 2015. Precipitation calibration based on the frequency–matching method [J]. Weather and Forecasting,30(5):1109–1124. doi:10.1175/WAF–D–13–00049.1

（责任编辑　唐国瑛）