氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

海河流域东北冷涡背景下的降水预报订正研究

从靖 吴振玲 田笑 刘博 徐威

Correction of Precipitation Forecast under the Northeast Cold Vortex in the Haihe River Basin

CONG Jing WU Zhenling TIAN Xiao LIU Bo XU Wei

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20144

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于机器学习的华北气温多模式集合预报的订正方法

A Temperature Correction Method for Multi-model Ensemble Forecast in North China Based on Machine Learning

气候与环境研究. 2019, 24(1): 116 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18049

模式降水订正法及未来年中国降水预估

CMIP5 Model Precipitation Bias-Correction Methods and Projected China Precipitation for the Next 30 Years

气候与环境研究. 2019, 24(6): 769 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19021

ECMWF集合预报系统对秦岭周边地区降水确定性预报的性能分析

Performance Analysis on Deterministic Precipitation Forecasting in Surrounding Areas of Qinling Mountains by ECMWF Ensemble Prediction System

气候与环境研究. 2017, 22(5): 551 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16150

三种高分辨率格点降水预报检验方法的对比

Comparison of Three Verification Methods for High-Resolution Grid Precipitation Forecast

气候与环境研究. 2017, 22(1): 45 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16012

沙尘预报客观检验中最优实况资料和圆插值半径选择研究

Research on the Selection of the Optimal Observations and Radius of Circular Interpolation during Objective Verification of Sand-Dust Forecasts

气候与环境研究. 2019, 24(6): 735 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18082

基于欧洲中心细网格预报资料和观测资料的浙江省春夏降水性质分类指标

Precipitation Classification Index Based on ECMWF Fine Grid Forecast Data and Observation Data for Spring and Summer in Zhejiang Province

气候与环境研究. 2018, 23(5): 543 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17066

关注微信公众号，获得更多资讯信息

从靖, 吴振玲, 田笑, 等. 2021. 海河流域东北冷涡背景下的降水预报订正研究 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 556−568. CONG Jing, WU Zhenling, TIAN Xiao, et al. 2021. Correction of Precipitation Forecast under the Northeast Cold Vortex in the Haihe River Basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 556−568. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20144

海河流域东北冷涡背景下的降水预报订正研究

从靖[1] 吴振玲[2] 田笑[1] 刘博[1] 徐威[1]

1 天津市气象台，天津 300074
2 天津市气象科学研究所，天津 300074

摘 要 针对海河流域东北冷涡降水样本，应用海河流域加密自动站降水资料及欧洲中期天气预报中心（ECMCWF）降水预报资料，利用滑动相关分析方法建立重组预报序列，基于加密自动站 24 h 累积降水量及重组 24 h 降水预报序列的 Gamma 累积概率分布曲线，采用预报—实况概率匹配方法建立 1～3 日的短期订正模型并进行试报检验。结果表明：欧洲中心数值模式对于海河流域东北冷涡降水的预报较实况偏慢；概率匹配法主要通过订正降水量级来改善预报结果，订正后降水预报对于小雨、大雨、暴雨预报的 TS（Threat Score）评分技巧均有提升，尤其对于大雨和暴雨及以上量级预报，订正后预报量级及预报落区大小均与实况更加接近，订正效果显著。东北冷涡降水对流性强，模式预报能力弱，而订正后预报能有效提高此类强降水的预报技能，具有较好的应用价值。

关键词 东北冷涡 预报—实况概率匹配法 降水预报订正
文章编号 1006-9585(2021)05-0556-13 **中图分类号** P457.6 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20144

Correction of Precipitation Forecast under the Northeast Cold Vortex in the Haihe River Basin

CONG Jing[1], WU Zhenling[2], TIAN Xiao[1], LIU Bo[1], and XU Wei[1]

1 *Tianjin Municipal Meteorological Observatory*, *Tianjin* 300074
2 *Tianjin Institute of Meteorological Science*, *Tianjin* 300074

Abstract Using the precipitation samples from the northeast cold vortex in the Haihe River basin, based on the encrypted observation station data and precipitation forecast data produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), we conducted a sliding time window correlation analysis between 24-h precipitation observation and forecast series to re-establish the precipitation forecast series. Then, we matched the frequency with the gamma cumulative probability distribution curve of 24-h precipitation observation, re-established the 1–3-days short-term forecast series on each of the encrypted observation stations to enable correction of precipitation forecast in the Haihe River basin, and checked the forecast effect of the correction of precipitation forecast. The results showed that the period of ECMWF model precipitation forecast is mainly slower than that of the observation of the northeast cold vortex precipitation forecast in the Haihe River basin. The frequency matching method mainly improves forecasting skills by

收稿日期 2020-11-23；**网络预出版日期** 2021-05-07
作者简介 从靖，女，1990 年出生，硕士研究生，主要从事天气预报技术研究。E-mail: Congjing2016@126.com
通讯作者 吴振玲，E-mail: bigwiselyyn@yahoo.com
资助项目 国家自然科学基金青年基金项目 4187508，天津市气象局科研项目 201942bsjj01
Funded by Youth Program of National Natural Science Foundation of China (Grant 4187508), Research Projects of Tianjin Meteorological Bureau (Grant 201942bsjj01)

correcting the precipitation magnitude. TS (Threat Score) of the precipitation calibration forecast has been improved for light rain, heavy rain, and rainstorm. The magnitude and area of precipitation calibration forecast need to be close to the observation station data, particularly for the forecasting of heavy rain and rainstorm. However, the model has poor forecasting skills for convective precipitation caused by the northeast cold vortex. Thus, the precipitation-calibration forecast can effectively improve the forecasting skills for heavy precipitation, resulting in good business application prospects.

Keywords Northeast cold vortex, Frequency matching method, Precipitation forecast correction

1 引 言

近年来，随着数值预报技术的迅速发展，模式降水产品已成为业务降水预报的重要依据，但是其初始条件和模式自身存在的系统性误差，往往会导致预报与实况出现一定偏差（王雨和闫之辉, 2004; 周慧等, 2010; 常俊等, 2015; 孙靖等, 2015; 吴启树等, 2017），如欧洲中期天气预报中心（ECMWF）、日本气象厅（JMA）等全球模式对于弱降水预报偏空报而对于强降水预报偏漏（张宏芳等, 2014; 陈博宇等, 2015）；而武汉暴雨所（AREM）等中尺度区域模式预报较实况总体偏强（李俊等, 2014）。因此，基于数值预报直接输出产品的订正研究，已成为提高精细化要素客观预报准确性的关键。

降水量的非正态性及非连续性导致降水预报具有更大的不确定性（Brown et al., 2012; Hamill et al., 2008），因此基于模式降水预报的客观订正技术研究已成为许多学者的研究热点之一。对于降水预报，越来越多的研究通过订正模式预报的降水偏差来改进预报结果（李莉等, 2011）。目前常见的降水订正方法有分类与集成方法（曹晓钟等, 2008）、神经网络法（Yuan et al., 2007）、逻辑和分位数回归法（Bentzien and Friederichs, 2012）、超级集合预报方法（Krishnamurti et al., 1999）、贝叶斯方法（陈朝平等, 2010）等。“频率匹配法”更好地利用已有观测资料，而越来越受到相关科研和业务单位重视。智协飞和吕游（2019）利用卡尔曼滤波及频率匹配方法分区订正中国降水多模式预报，订正后各模式预报平均绝对误差大幅减小，晴雨预报准确率明显提高。李莉等（2011）基于频率匹配方法的 T213 降水订正预报明显改善预报偏差，雨带位置及轮廓更加接近降水实况。李俊等（2014, 2015）利用“频率匹配平均法”得到的订正预报能够改善模式预报雨量、雨区的系统性偏差和集合预报平均平滑所造成的强降水被削弱的负作用。郭达烽等（2017）采用 Gamma 函数作为降水频率匹配的累积概率函数对欧洲中心降水预报进行订正，修正了模式系统性误差，对各等级降水尤其暴雨均有良好订正效果。但是许多学者的研究均是基于关键区域的平均序列建立订正模型，因而造成区域内所有格点或站点的降水预报订正模型均是相同的（李俊等, 2014, 2015; 郭达烽等, 2017; 智协飞和吕游, 2019）。目前仅周迪等（2015）研究是采用预报—观测概率匹配法对四川盆地 T213 集合预报区域内格点进行订正，订正预报有效地减小了集合预报的系统性偏差，降低了漏报率和空报率。

一般而言，数值模式降水预报偏差会随模式预报时效、降水阈值及具体天气形势的不同而不同（Hamill et al., 2006; Greybush et al., 2008; 李俊等, 2014），所以降水订正最好基于不同时效预报、不同降雨量和不同天气形势单独进行（李俊等, 2014），因此本文主要针对影响海河流域的主要降水系统之一，开展短期降水预报订正技术研究。东北冷涡是指出现在东北地区具有一定强度的，能够维持 3～4 d 且具有深厚冷空气的高空气旋性涡旋（朱乾根等, 2007）。由于冷涡发展阶段的温压场结构并不完全对称，所以其西部常有冷空气不断补充南下，有利于冷涡西、西南、南到东南部位发生雷阵雨天气；类似的天气可持续重复出现，从而产生暴雨（朱乾根等, 2007）。东北冷涡不仅能够直接造成东北地区低温、多雨等天气，其冷涡外围往往还会影响华北、华中、华东等地区（李爽等, 2016）。

海河流域位于东北冷涡的西南部，尽管东北冷涡引发流域发生暴雨相对较少，1955～2007 年东北冷涡引起流域发生暴雨的比率约 8% 左右（陈鸣等, 2011），但东北冷涡的槽后冷空气极易触发流域产生暖湿对流天气，此类暴雨降水时段集中、雨强大、局地性强，中尺度对流系统活动十分活跃（余文韬等, 2015），故暴雨落区预报难度较大。由于海河流域中小河流多，河道源短流急，这种对流性暴雨往往较稳定性暴雨更容易给流域带来致洪

风险。而欧洲数值预报等大尺度模式本身对于对流性暴雨预报能力较弱，所以开展对流性暴雨的预报订正技术，提高对流性暴雨预报准确性，对于流域抗洪防灾更具有重要意义。因此本文选取影响海河流域的 2012～2020 年 6～10 月东北冷涡降水样本，利用预报—观测概率匹配法开展海河流域精细化降水预报落区订正研究，旨在提升此类暴雨预报准确性，为提升海河流域洪水预见期提供有利的降水预报支撑。

2 资料与方法

2.1 资料处理

2.1.1 降水实况资料

本文选取海河流域内 2012～2020 年 6～10 月流域内稳定（地址未迁移变化）2301 个加密自动站点（站点分布及流域分区如图 1 所示）的实况逐小时降水资料，将东北冷涡影响下的逐小时降水量处理为前 1 日 20:00（北京时间，下同）至当日 20:00 的 24 h 累积降水量。逐小时加密自动站资料由中国气象局下发的气象数据统一服务接口（http://10.226.89.17:8008/cimissapiweb/[2020-11-01]）下载获得。

2.1.2 模式预报资料

降水预报产品选用业务中最常使用的欧洲中期天气预报中心（ECMWF）降水预报资料, 文中选取每日 20:00 起报的 ECMWF 降水预报产品，其时间分辨率 0～72 h 预报为 3 h，72～240 h 为 6 h，其空间分辨率 2015 年以前为 0.25°（纬度）×0.25°（经度），2015 年以后为 0.125°（纬度）×0.125°（经度）。根据选取的东北冷涡样本，将提前 1～3 日 20:00 起报的 ECMCWF 降水预报产品累加为冷涡降水当日滑动 24 h 降水预报，具体的处理方式如表 1 所示。最后将上述滑动 24 h 累积降水量预报采用双线性插值的方法插值到流域内的加密自动站点上，得到基于加密自动站的超前、同期、滞后的冷涡样本时间序列。

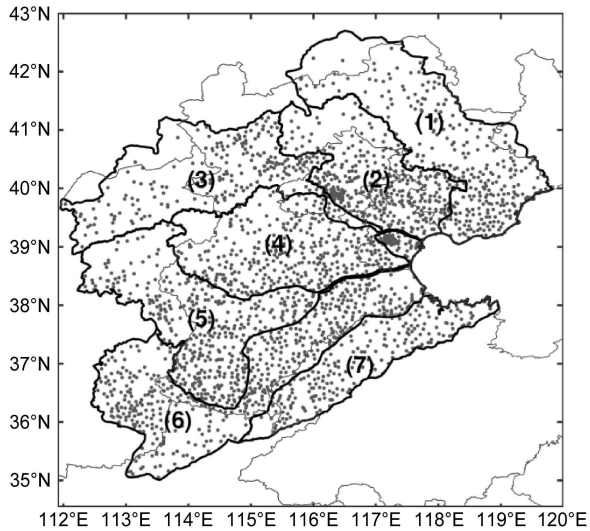

图 1 海河流域加密自动站分布（散点）及流域子分区：（1）滦河、（2）北三河、（3）永定河、（4）大清河、（5）子牙河、（6）漳卫南运河、（7）徒骇马颊河

Fig. 1 Encrypted observation distribution in the Haihe River basin and its partition name: (1) Luanhe, (2) Beisanhe, (3) Yongdinghe, (4) Daqinghe, (5) Ziyahe, (6) Zhangweinanyunhe, and (7) Tuhaimajiahe

2.2 方法

选取 2012～2017 年 6～10 月的东北冷涡降水样本，基于海河流域内加密自动站点，采用滑动时间相关分析方法建立重组 ECMWF 预报序列，然后基于站点实况及重组预报序列的 Gamma 累积概率分布拟合曲线，利于预报—实况概率匹配法，建立站点独立预报订正模型；最后选取 2018～2020 年的东北冷涡个例对订正模型进行试报检验。采用的具体技术方法及检验方法介绍如下：

2.2.1 滑动时间相关分析

考虑到预报较实况降水时段的偏差，基于加密自动站 24 h 降水实况及超前、同期、滞后 24 h 冷涡降水样本时间序列，计算两者的时间相关系数，选取相关性最大的冷涡样本预报序列重组加密自动站点预报序列。由于降水量不服从正态分布，因此做相关分析时需采用 spearman 相关分析方法，相

表 1 滑动 24 h 降水预报计算方式

Table 1 Calculation of the sliding time window of the 24-h accumulated precipitation for forecasting

预报	起报时间	滑动24 h降水量预报累加时段		
		超前1个预报间隔	同时段	滞后1个预报间隔
提前1日	降水发生前1日20:00	21～45 h	24～48 h	27～51 h
提前2日	降水发生前2日20:00	45～69 h	48～72 h	54～78 h
提前3日	降水发生前3日20:00	66～90 h	72～96 h	78～102 h

关系数（ρ）公式为

$$\rho = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 \sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \tag{1}$$

其中，x_i, y_i分别为i时刻某一个站点的实况和预报值等级数据，$\bar{x}, \bar{y}$分别为某一时间序列的等级数据的均值。

2.2.2　预报—实况概率匹配法

基于东北冷涡降水样本实况及重组预报序列，分析加密自动站点上预报、实况概率累积分布曲线，采用预报—实况概率匹配法建立基于加密自动站点的预报订正模型。

所谓概率匹配法，就是基于实况及预报降水量时间序列的概率或累积概率分布曲线，将某一概率或累积概率下的实况降水量值作为同一累积概率下预报值的订正值，这样对于任意降水量预报值，均有同一累积概率下的实况值作为其概率匹配订正值（图 2）。实际应用时，将某一预报值带入到预报累积概率曲线函数中求解累积概率，然后基于实况累积概率曲线方程反函数求得订正预报值，这样可以得到连续预报值的概率匹配订正值。

概率匹配法应用成功的关键在于对降水量概率分布的拟合。降水累积概率分布为非正态分布，国内外大量研究均表明 Gamma 分布能够较好地拟合出降水累积概率分布曲线（Hamill and Colucci, 1998; Husak et al., 2007; 王斌等, 2011）。Gamma 累积概率函数表达式为

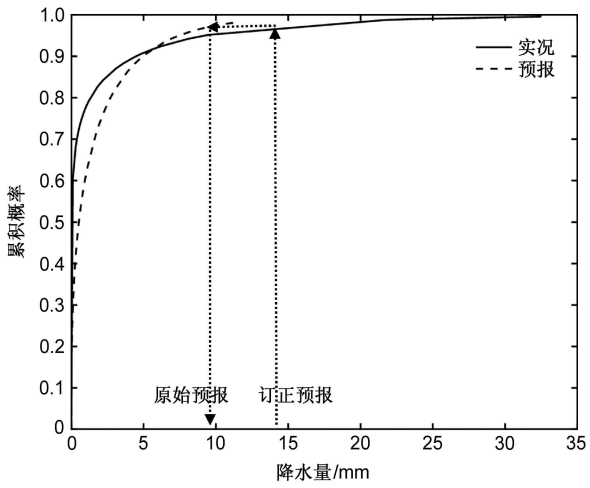

图 2　预报—实况概率匹配订正过程示意图

Fig. 2　Schematic of the frequency matching algorithm

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) \mathrm{d}t, \tag{2}$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty \mathrm{e}^{-t} t^{\alpha-1} \mathrm{d}t, \tag{3}$$

其中，$\alpha>0$，$\beta>0$，α 为形状参数，β 为尺度参数，x 为日降水量。

Gamma 分布参数 α、β 由极大似然估计法得到。样本均值$\bar{x}$、方差 s^2 与参数 α、β 关系如下：

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}, \tag{4}$$

$$\alpha\beta^2 \approx s^2. \tag{5}$$

使用 Gamma 累积概率函数拟合降水量分布，可以得到累积概率分布具体表达式，应用概率匹配进行订正时仅需求解反函数即能得到任意降水量的订正值，计算方便简单、应用效果好，并可避免许多研究中所采用的多项式拟合插值降水频率分布（李俊等, 2014, 2015；智协飞和吕游，2019）而可能造成的 Runge 现象（随插值次数增多而造成的偏离原函数现象）。

2.2.3　降水检验方法

文中除了利用空间相关系数（SCC）检验预报与实况的空间分布相似程度外，还选用成功指数 TS（Threat Score）、预报偏差（Bias）、漏报率（Po）、空报率（Far）（李俊等, 2014; 周迪等, 2015; 郭达烽等, 2017）检验各降水量级预报效果，各统计量的计算公式如下：

$$\mathrm{TS} = \frac{n_\mathrm{a}}{n_\mathrm{a} + n_\mathrm{b} + n_\mathrm{c}}, \tag{6}$$

$$\mathrm{Bias} = \frac{n_\mathrm{a} + n_\mathrm{b}}{n_\mathrm{a} + n_\mathrm{c}}, \tag{7}$$

$$\mathrm{Po} = \frac{n_\mathrm{c}}{n_\mathrm{a} + n_\mathrm{c}}, \tag{8}$$

$$\mathrm{Far} = \frac{n_\mathrm{b}}{n_\mathrm{a} + n_\mathrm{b}}, \tag{9}$$

其中，n_a为预报准确的站点数量，n_b为空报的站点数量，n_c为漏报的站点数量，n_d为预报实况均不在某一检验量级范围内的站点数量。

3　结果与分析

3.1　东北冷涡降水日的筛选及特征分析

按照冷涡中心出现在（35°N～60°N，115°E～145°E）范围内并有冷中心或明显冷槽配合的标准

（孙力等, 1994），基于 500 hPa 的高度场及温度场，对比实况与提前 1～3 日起报的对应时段欧洲中心数值预报的冷涡范围、中心位置及强度，筛选出两者重合度较高且出现降水的东北冷涡降水样本，按上述方法筛选出 2012～2020 年 6～10 月东北冷涡降水样本共 101 d，其中 2012～2017 年 88 d 用于降水订正模型建立，2018～2020 年 13 d 用于东北冷涡降水的试报检验。分析东北冷涡中心位置分布特征看到，82.1% 的东北冷涡中心集中在（38°N～50°N，117～130°E）关键区内（图 3a）。分析平均环流场距平特征，可以看到，关键区内存在强大的冷涡系统，高度负距平与温度负距平区相配合，两者中心基本重合（高度负距平、温度负距平中心依次达到−40 gpm 和−1.5°C）；低层存在气旋式风场环流相对应，冷涡发展深厚。因此就平均而言，东北冷涡降水发生时，东北冷涡中心位置偏南（40°N），其海河流域位于东北冷涡偏西南部地区，涡后冷槽下摆带来的冷空气，配合本地潮湿不稳定的环境，触发本地产生不稳定降水天气（图 3b）。分析东北冷涡降水发生日数的逐月变化可以看到（图 3c），东北冷涡降水发生日数随月份呈现出迅速减少的趋势，仅初夏 6 月发生达到 40 d 以上，7 月开始迅速下降至 25 d 以下，说明东北冷涡降水主要发生在初夏季节。

3.2 预报订正过程分析

3.2.1 重组预报序列分布特征

基于预报与实况样本时间序列的滑动相关分析，选取最大时间相关性序列重组预报序列。分析重组后的预报样本序列分布特征，提前 1 日（24～48 h）预报流域大部分地区预报较实况偏慢（滞后 3 h 相关系数最大），仅永定河南部至大清河西部集中表现为预报较实况偏快（超前 3 h 相关系数最大）特征（图 4a）；提前 2 日预报（48～72 h），全流域大部分站点几乎表现预报较实况偏慢的特征（滞后 6 h

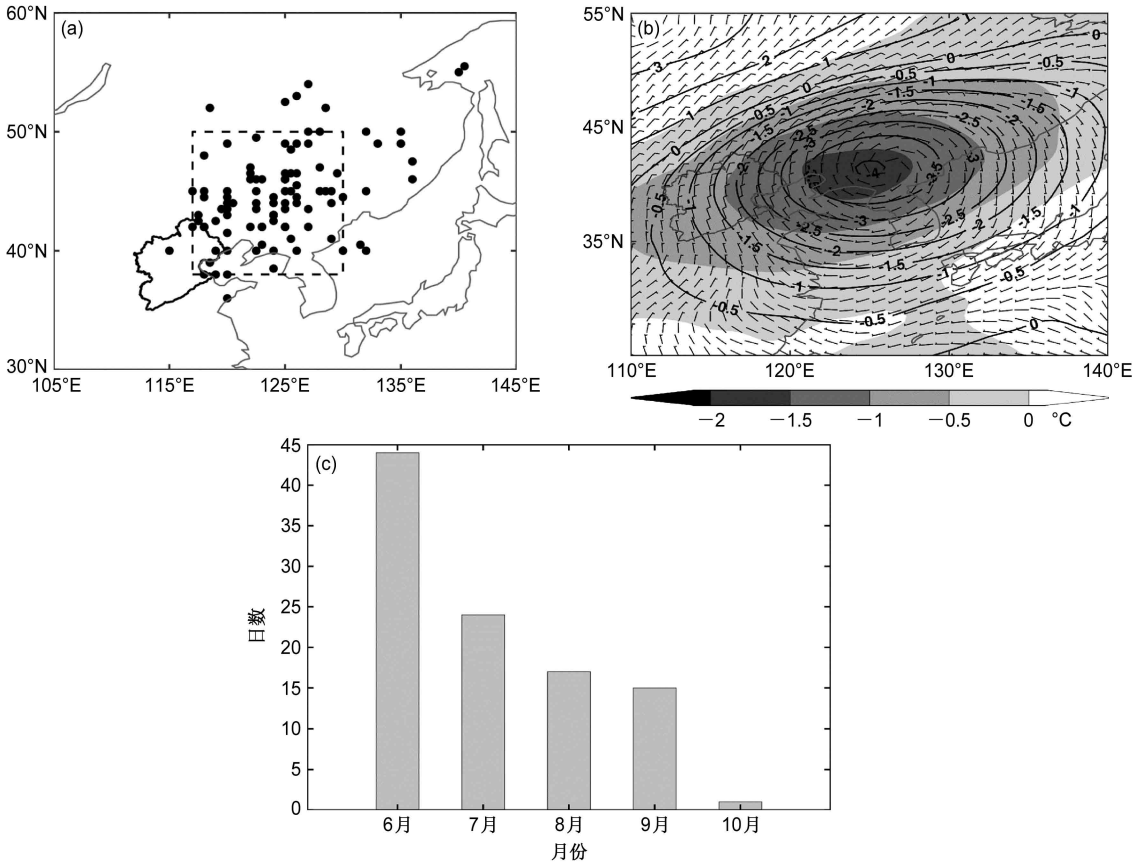

图 3 2012～2020 年（a）东北冷涡中心位置空间分布，（b）500 hPa 日平均高度距平（黑实线，单位：dagpm）、温度距平（填色，单位：°C）和 700 hPa 风场距平（单位：m/s）及（c）东北冷涡发生日数逐月变化

Fig. 3 (a) Spatial distribution at the center of the northeast cold vortex; (b) daily mean anomaly of 500-hPa geopotential height (black solid lines, units: dagpm), temperature (shaded area, units: °C), and 700-hPa wind (vector, units: m/s); (c) monthly frequency of the northeast cold vortex during the period of 2012–2020

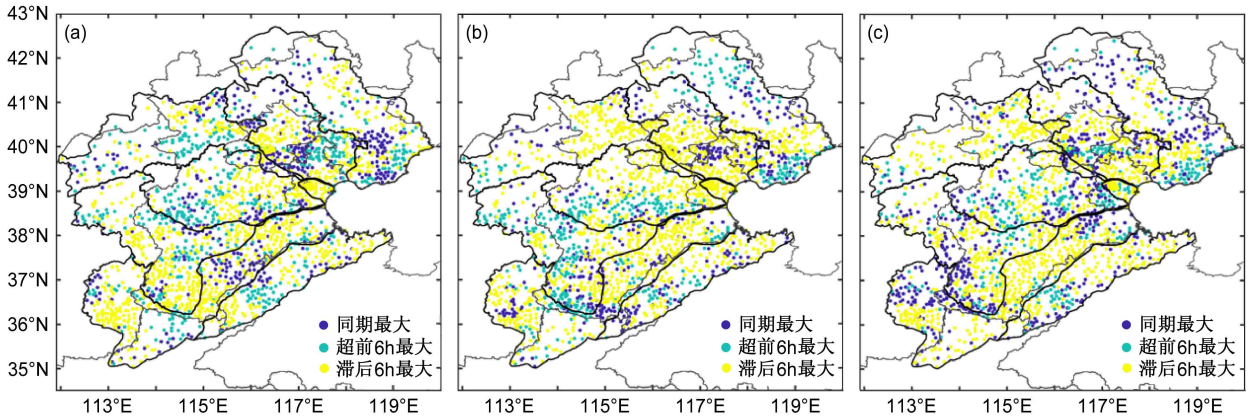

图 4　海河流域加密自动站点（a）提前 1 日、（b）提前 2 日、（c）提前 3 日降水预报与实况时间序列最大时间相关序列分布

Fig. 4　Distribution of the time series from the maximum correlation analysis between (a) one-day ahead, (b) two-day ahead, and (c) three-day ahead precipitation forecasts and observations time series on encrypted observation stations in Haihe River basin

相关系数最大），仅在子牙河、大清河南部及滦河中上游和下游地区表现为预报较实况偏快的特征（超前 3 h 相关系数最大）（图 4b）；提前 3 日预报（72～96 h）大部分地区也主要表现为预报较实况偏慢的特征（滞后 6 h 相关系数最大），而在子牙河至漳卫南运河西北部及滦河地区预报与实况降水时段相近（同期相关系数最大）（图 4c）。就整体而言，影响海河流域的东北冷涡降水样本，提前 1～3 日的预报与实况序列滞后相关性最大的站点比例最高，均达到 50% 以上（表 2），这说明欧洲中心数值模式对东北冷涡降水预报整体偏慢。按照上述分布特征，对于每个自动站，选取样本实况与预报序列相关性最大的序列（可能是同期、超前或滞后）进行重组，得到重组预报序列。

表 2　站点重组预报序列分布比例

Table 2　Distribution ratio of recombinant forecast series on station

	站点比例		
	提前1日	提前2日	提前3日
同期	21.1%	18.8%	27.8%
超前	25.7%	20.8%	17.3%
滞后	53.2%	60.4%	54.9%

3.2.2　预报—实况概率匹配结果分析

基于流域内加密自动站实况与重组预报序列的 Gamma 累积概率分布曲线，建立每个站点的预报—实况概率匹配订正模型。分析决定 Gamma 累积概率分布曲线形状的参数α、β发现，流域内各自动站点间实况与重组预报序列的α、β参数分布均有所不同，整体而言，重组预报序列的 Gamma 累积概率曲线参数α较实况明显偏大，而参数β较实况相差不大（图略）。Gamma 累积概率分布曲线参数的不同表明，每个站点预报—实况概率匹配订正模型均有所不同，基于站点开展订正较为合理。

以河北省承德市滦平站点 54420 为例，具体说明概率匹配过程。由实况及重组预报序列 Gamma 累积概率分布曲线和不同降水量累积频率（散点）的匹配程度可以看到，不同降水量的累积频率值均在 Gamma 累积概率分布曲线附近，这表明 Gamma 累积概率分布曲线可以较好地拟合出降水累积频率分布（图 5）。对比实况与重组预报的 Gamma 累积概率分布曲线可以看到，降水量级较小时，重组预报概率匹配值（相同累积概率下的重组预报值）明显大于实况，此时重组预报值需向小量级订正；随着降水量级的增长，重组预报概率匹配值反而低于实况，尤其提前 1 日重组预报与实况之间的差异最为明显（图 5a），此时重组预报值需向大量级订正（图 5）。整体而言基于概率匹配的分析结果发现，重组预报较实况在小量级时明显偏大，说明易空报小量级降水；而随着量级增大，重组预报较实况又明显偏小，说明易漏报大量级降水。

选取假设实况为中雨（10 mm）、大雨（25 mm）、暴雨（50 mm）所对应的重组预报概率匹配值，则假设实况即为重组预报概率匹配值的订正值，以此展现出流域所有站点预报—实况概率匹配情况。可以看到，流域大部分站点的中雨（10 mm）重组预报概率匹配值与实况接近，两者量级偏差不大，仅在子牙河南部及北三河下游小范围区域明显高于实况至少 1 个量级（图 6a–6c）；而大雨（图 6d–

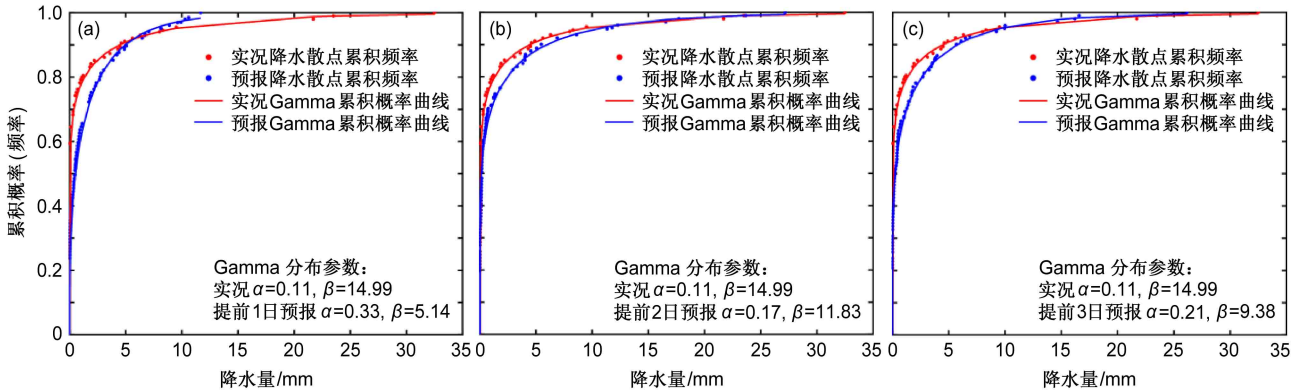

图 5 滦平站（54420）单站（a）提前 1 日、（b）提前 2 日、（c）提前 3 日降水量重组预报序列（蓝色）与实况（红色）累积频率及 Gamma 累积概率曲线

Fig. 5 Cumulative frequency of precipitation and gamma cumulative probability distribution curve at Luanping station (54420) for observation (red mark) and (a) one-day ahead, (b) two-day ahead, and (c) three-day ahead recombinant forecast (blue mark) series

6f)、暴雨（图 6g–6i）重组预报概率匹配值较实况偏低 1～2 个量级，仅子牙河南部、北三河中下游、永定河西部以及大清河局地较实况明显偏大 1 个量级以上。可见重组预报对于东北冷涡降水的大雨、暴雨预报能力有限，量级偏差较大，整体表现为预报能力不足、局地预报量级明显偏高的特征。

3.3 订正模型的试报及检验

3.3.1 统计学检验

运用基于 2012～2017 年东北冷涡降水日建立的订正模型对 2018～2020 年东北冷涡降水进行试报，并利用统计学参数对所有站点试报样本做整体检验，订正前（浅色色柱）及订正后（深色色柱）检验结果如图 7 所示。从各降水量级的 TS 评分来看，除了中雨量级预报 TS 评分较订正前有所下降外，其他各降雨量级订正后 TS 评分均较订正前有所上升，表现为正订正技巧；其中大雨和暴雨以上量级的预报 TS 评分提升较为明显，尤其暴雨以上量级订正后 TS 评分至少提升了 71% 以上，订正效果最佳（图 7a）。Bias 评分表示预报降水面积与实况降水面积之比，用于检验预报落区范围（面积）偏差，Bias 为 1 时表示预报与实况的落区范围大小（面积）相等。分析 Bias 评分发现，小雨及中雨量级预报订正后 Bias 评分均越远离 1，表明订正后预报与实况落区偏差明显增大；而大雨量级预报订正前 Bias 评分较接近于 1 且订正后 Bias 评分变化不大或更接近于 1，这表明订正前、后大雨预报与实况落区偏差均较小，且订正后落区偏差略减小；对于暴雨以上量级预报，订正后 Bias 评分较订正前评分明显更加接近 1，这表明预报与实况落区偏差显著减小（图 7b）。分析预报漏报率与空报率，小雨预报订正后漏报率明显降低，空报率变化不大；中雨、大雨、暴雨以上量级订正后漏报率和空报率均有所下降（图 7c、7d）。

综合而言，概率匹配法对于大雨及暴雨以上量级预报订正效果较好，尤其对于暴雨以上量级预报订正效果最优，订正后无论从量级预报准确性还是落区分布大小均与实况更加接近。而对于小雨预报，订正后 TS 评分和 Bias 评分均升高（图 7a、7b），其原因可能是小雨湿偏差较大且空报率较高（图 7b、7d），订正后漏报率显著降低使得预报准确站点增多（图 7c），而空报率变化不大（图 7d），导致正确站点比重增大且预报范围增大，使得 TS 评分升高、Bias 增大且越远离 1（落区偏差增大）（图 7a、7b）。对于中雨预报订正后 TS 评分降低，Bias 越远离 1（图 7a、7b），其预报技巧及落区偏差均较订正前变差，分析原因可能是中雨预报漏报率、空报率相差不多且订正前预报与实况的面积偏差较小（Bias 接近 1）（图 7c、7d、7b），订正后漏报率上升、空报率下降（图 7c、7d），使得预报准确站点明显减小，预报范围较实况范围明显减小，从而导致 TS 评分降低、Bias 评分降低且越远离 1（落区偏差增大）（图 7a、7b）；分析概率匹配法对中雨订正能力弱的特征根本原因可能是由于预报与实况概率匹配值较为接近（图 6a–6c），预报匹配值无法实现跨量级订正。

为验证基于 2012～2017 年东北冷涡降水样本建立订正模型试报 2018～2020 年东北冷涡降水的优势，选取基于 2012～2017 年所有降水日建模对

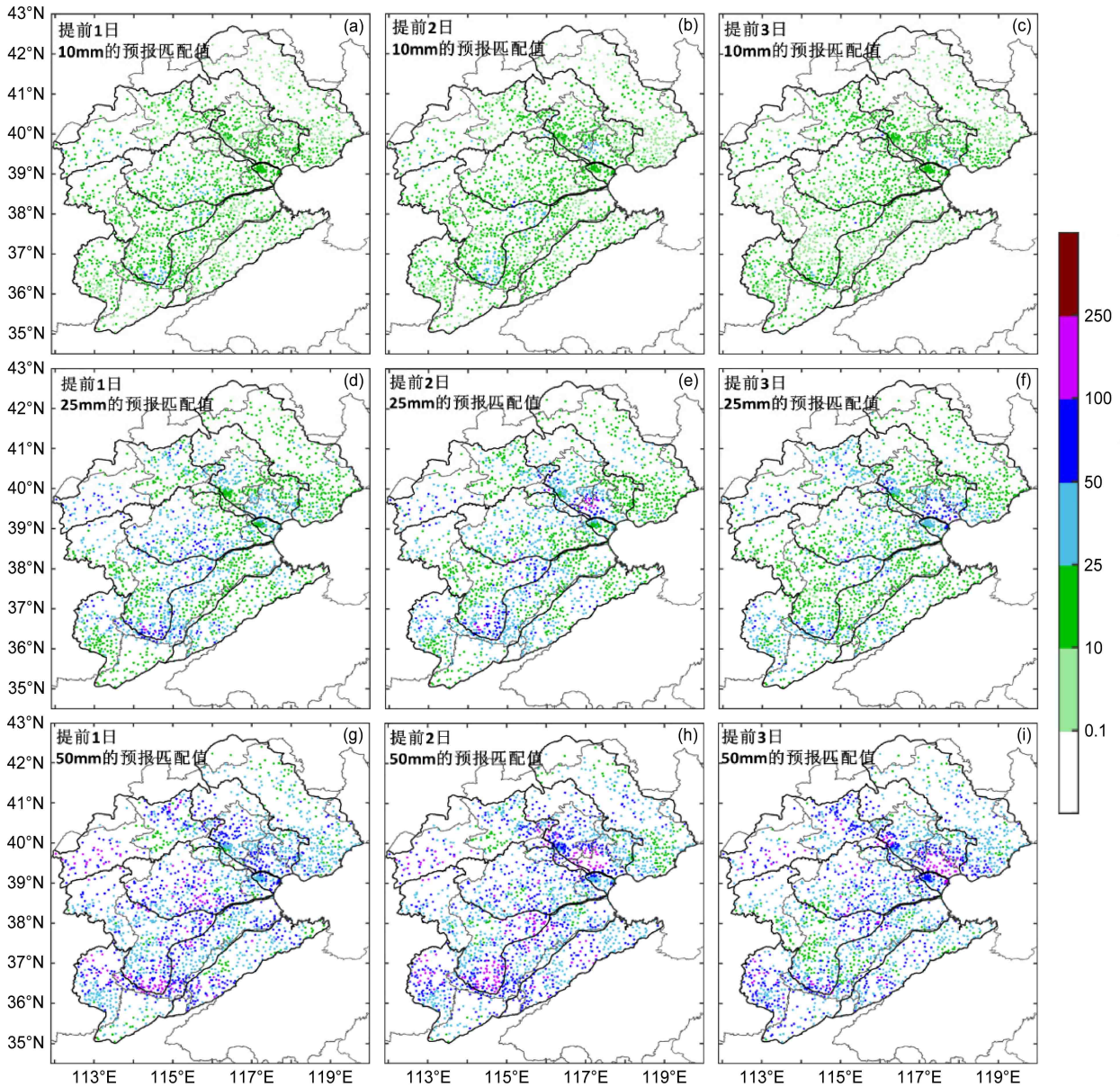

图 6　实况为中雨（第一行）、大雨（第二行）、暴雨（第三行）的（a、d、g）提前 1 日、（b、e、h）提前 2 日、（c、f、i）提前 3 日降水量重组预报概率匹配值

Fig. 6　Frequency matching recombinant forecast values of moderate rain (first line), heavy rain (second line), and rainstorm (third line) for (a, d, g) one-day ahead, (b, e, h) two-day ahead, and (c, f, i) three-day ahead recombinant forecast

2018～2020 年东北冷涡降水的试报结果作为对比，对比分析两种订正模型下各降水量级的试报效果。分析各降水量级的 TS 评分结果，可以看到，对于小雨预报，提前 1 日和 2 日预报，基于东北冷涡降水日建模试报结果明显优于基于所有降水建模试报结果，表现为正技巧，提前 3 日预报，两种建模试报结果均表现为正技巧，且东北冷涡建模试报结果略低于所有降水日建模试报结果（图 8a）。对于中雨预报，两类建模试报结果均表现为负技巧，但基于东北冷涡建模试报结果下降幅度较小，TS 评分仍高于基于所有降水日建模试报结果（图 8b）。对于大雨预报，提前 1 日的基于所有降水日建模试报结果表现为负技巧，提前 2、3 日预报表现为正技巧，而基于东北冷涡降水建模试报结果均表现为正技巧且明显优于前者（图 8c）。对于暴雨以上量级预报，仅提前 1 日的基于所有降水日建模试报结果表现为正技巧，而基于东北冷涡建模试报结果均表现为正技巧，试报结果明显优于前者且 TS 评

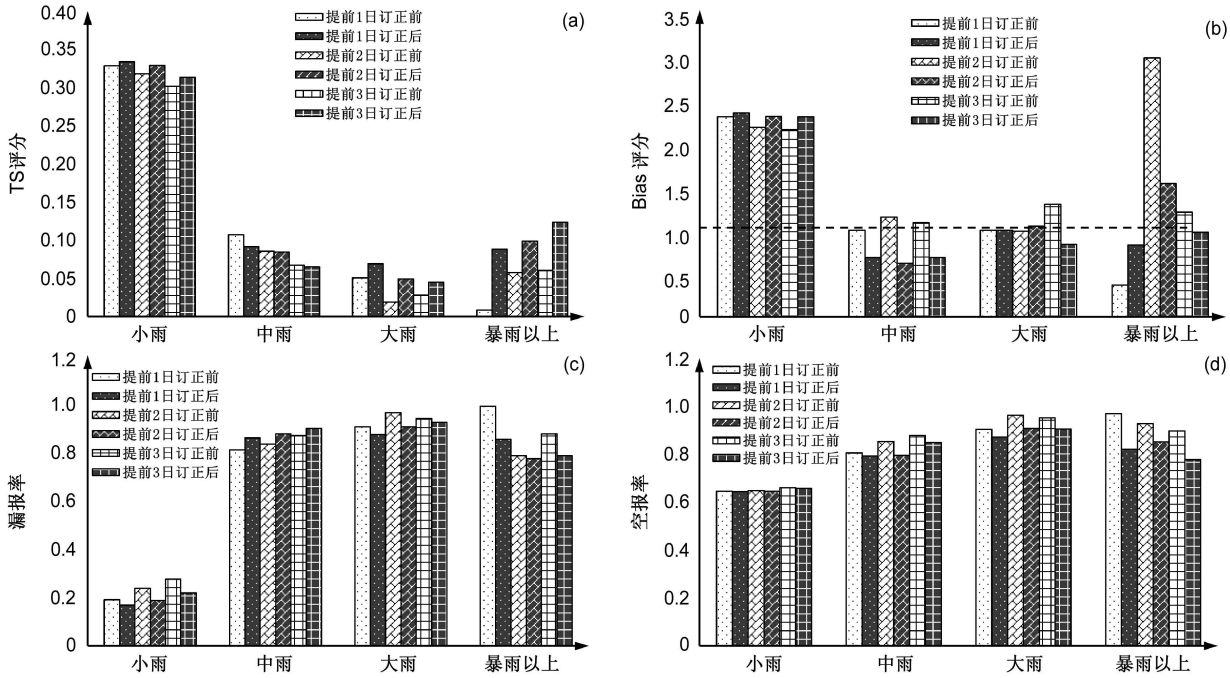

图 7 2018～2020 年东北冷涡试报样本的订正前（浅色色柱）及订正后（深色色柱）（a）TS 评分、（b）Bias 评分、（c）漏报率、（d）空报率

Fig. 7 (a) TS (Threat Score), (b) Bias score, (c) missing rate, and (d) false alarm rate histograms for the raw (light color bar) and calibrated forecasts (shaded color bar) of the precipitation cases under the northeast cold vortex during 2018–2020

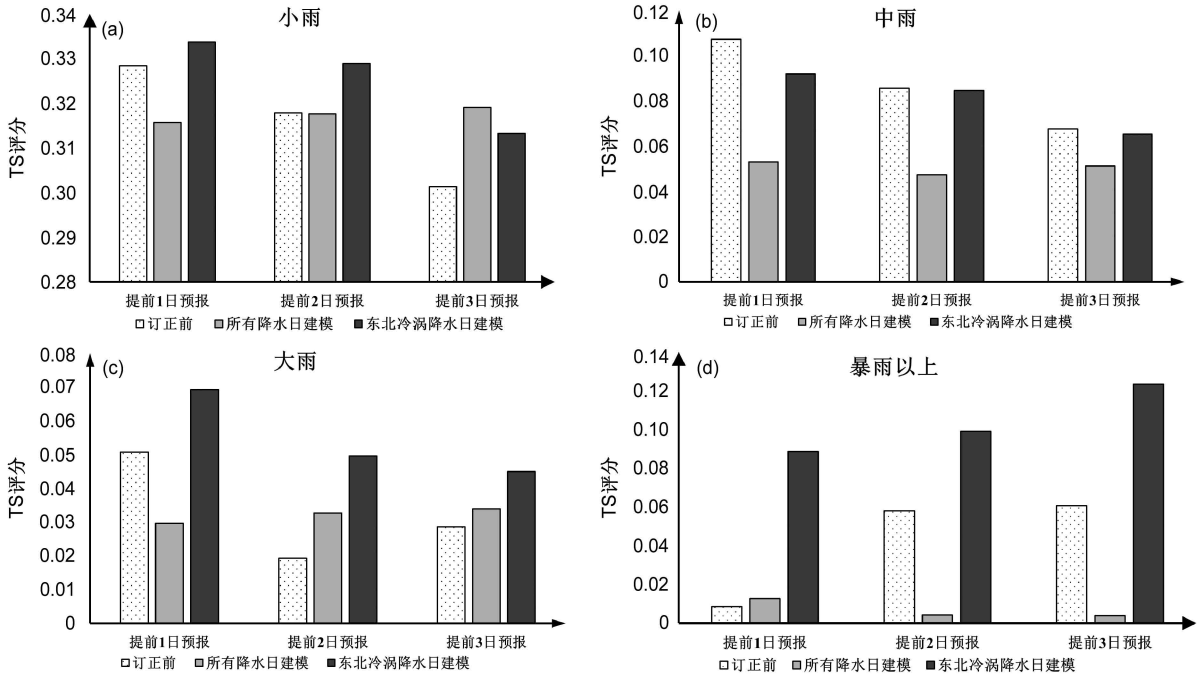

图 8 2018～2020 年实况（浅色色柱）与所有降水日建模（灰色色柱）试报及基于东北冷涡日建模（黑色色柱）东北冷涡降水的（a）小雨、（b）中雨、（c）大雨和（d）暴雨以上量级的 TS 评分

Fig. 8 TS of (a) light rain, (b) moderate rain, (c) heavy rain, and (d) rainstorm for the observations (light bar) and forecasts of precipitation cases under the northeast cold vortex during the years 2018–2020 based on all precipitation cases (gray bar) and the correction scheme of historical northeast cold vortex precipitation cases (black bar)

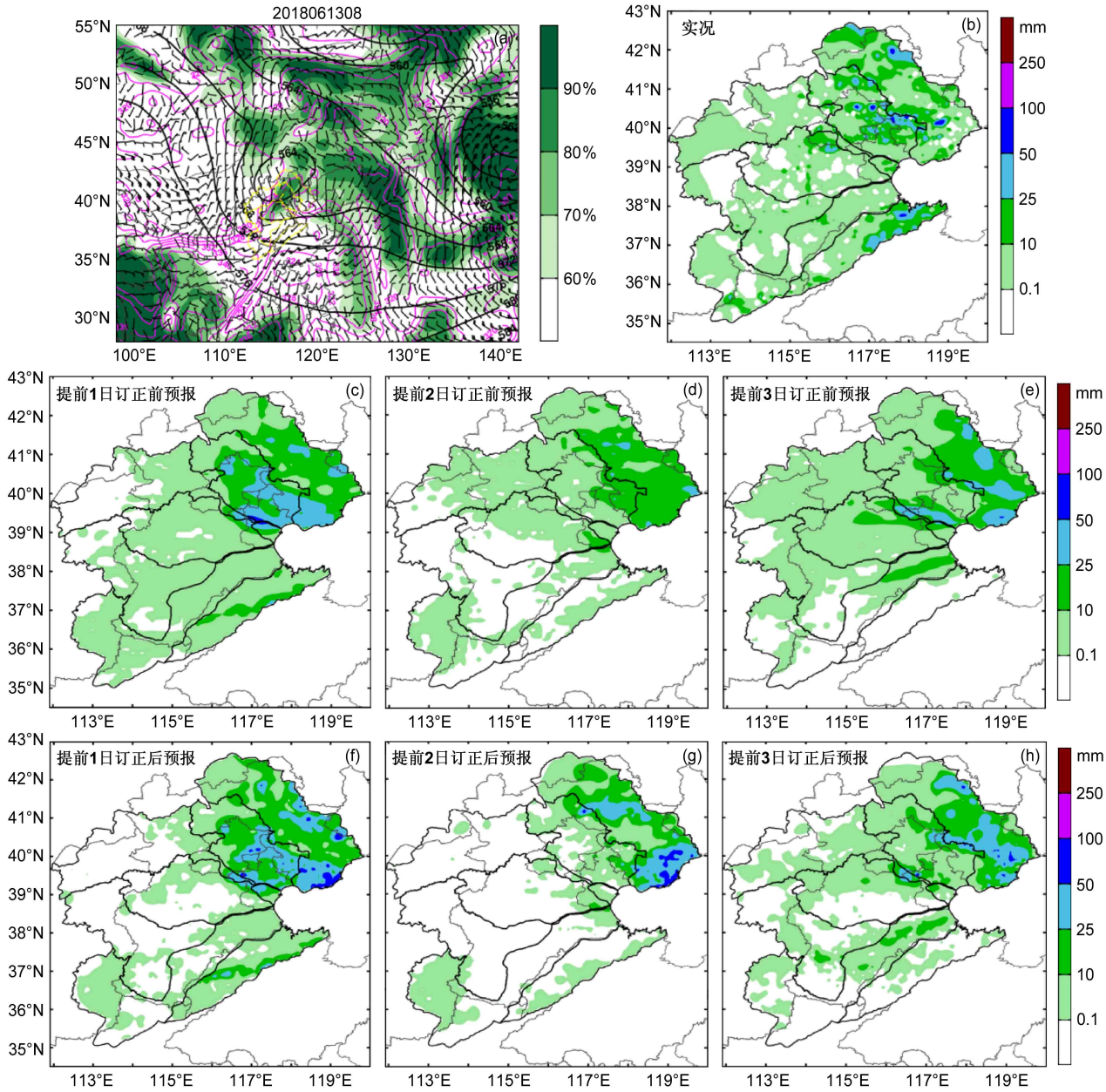

图 9　（a）2018 年 6 月 13 日 08:00 500 hPa 高度场（黑实线，单位：dagpm）、850 hPa 风场（单位：m/s）、相对湿度场（填色，单位：%）、假相当位温场（洋红色实线，单位：K）；2018 年 6 月 12 日 20:00 至 13 日 20:00 24 h（b）实况降水量及（c–e）订正前、（f–h）订正后降水量预报空间分布：（c、f）提前 1 日重组预报；（d、g）提前 2 日重组预报；（e、h）提前 3 日重组预报

Fig. 9　(a) The 500-hPa geopotential height (the black solid lines, units: dagpm), 850-hPa wind (units: m/s), relative humidity (the shaded, units: %), pseudo-equivalent potential temperature (the pink solid lines, units: K) at 0800 BJT 13 June 2018; The spatial distribution of 24-h (a) observed precipitation, (c–e) the raw forecasts and (f–h) the calibrated forecasts (f–h) from 2000 BJT 12 June 2018 to 2000 BJT 13 June 2018: (c, f) One-day ahead recombinant forecast; (d, g) two-day ahead recombinant forecast; (e, h) three-day ahead recombinant forecast

分可达到 0.1 左右，订正效果极佳（图 8d）。整体而言，基于东北冷涡建模试报结果明显优于基于所有降水日建模试报结果，且在大雨和暴雨以上量级预报中表现的最为显著。

3.3.2　典型降水个例检验

基于 2012～2017 年东北冷涡订正模型试报 2018 年 6 月 12 日至 13 日的一次典型东北冷涡暴雨个例，检验模型试报效果。2018 年 6 月 12 日晚，位于内蒙古中部的高空槽系统加深发展并伴随着横槽下摆，至 13 日早间发展为闭合冷涡系统，涡后横槽恰好位于流域的西北边界处，此时流域内部低层 850 hPa 有明显的假相当位温高湿高湿舌北伸，

表 3 订正前及订正后预报与实况空间相关系数及 TS 评分

Table 3 Spatial correlation coefficient between raw or calibrated forecasts and observations, and TS of the raw and calibrated forecasts

	预报与实况相关系数		小雨TS评分		中雨TS评分		大雨TS评分		暴雨及以上TS评分	
	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后
提前1日	0.325**	0.364**	0.394	0.404	0.184	0.180	0.082	0.112	0.000	0.105
提前2日	0.316**	0.321**	0.409	0.415	0.160	0.087	0.000	0.040	0.000	0.000
提前3日	0.270**	0.359**	0.392	0.407	0.138	0.092	0.040	0.097	0.000	0.097

**表示空间相关系数通过0.05的显著性检验。

形成热力不稳定环境（图 9a）；13 日白天涡后冷空气伴随横槽旋转南下，触发流域暖湿空气对流发展，产生对流性降水天气。受冷涡影响，12 日 20 时至 13 日 20:00（北京时间，下同），流域几乎全区均出现雷阵雨天气，在东北部及东南部地区出现中雨，局地大雨，个别站暴雨天气（图 9b）。本次降水过程具有雨量分布不均、个别站点雨强大的对流性降水特征，增加了本次过程的预报难度。

分析本次东北冷涡降水过程的预报情况，订正前、后预报均基本能预报出降水的空间分布情况（图 9c–9h），且订正后空间相关系数有所升高，表明订正后预报与实况的空间分布更为接近（表 3）。分析各降雨量级的预报技巧 TS 评分，原始预报能力有限，预报技巧 TS 评分极低，尤其暴雨以上量级预报为零技巧评分。订正后小雨、大雨、暴雨以上量级预报能力有所提高，尤其对于局地大雨和暴雨预报提升效果更为明显，其中对于大雨预报，提前 1~3 日的订正预报 TS 评分均有所升高，表现为正技巧；而对于暴雨以上量级预报，提前 1 日和 3 日的订正预报 TS 评分由 0 提升至 0.1 左右，实现了由无到有的突破，订正效果极好；但是订正后中雨预报由于漏报率及空报率升高（略），技巧 TS 评分明显减小，订正效果较差（表 3）。综合而言，对于本次局地性较强的强降水过程，订正预报无论从落区分布还是从强降水量级预报上均有较为明显的改善，对比分析 3 日的预报情况，提前 1 日订正预报的订正效果最好，空间落区预报能力提升幅度最大（空间相关系数提高 12%）（表 3），且对于局地大雨及分散性的暴雨点，预报能力最强。

4 结果与讨论

本文选取 2012～2017 年 6～10 月的冷涡降水样本，利用滑动相关分析法重组预报序列，然后基于站点实况及重组预报的样本时间序列，分析两者的 Gamma 累积概率分布曲线，并采用预报—实况概率匹配法建立订正预报模型，最后运用订正预报模型试报 2018～2020 年的东北冷涡，并检验订正效果。结论如下：

（1）海河流域东北冷涡降水 6～10 月均有发生且初夏季节最多，冷涡涡后冷空气触发海河流域内产生对流性降水天气，对于流域此类降水天气的预报，欧洲中心数值模式预报的降水时段较实况整体表现为偏慢的特征。

（2）东北冷涡降水多以对流性降水为主，欧洲中心数值模式预报对于对流性降水预报整体效果较差。而订正后的模式预报对此类降水预报能力有所提高，对于大雨和暴雨预报，订正效果更佳，尤其对于暴雨以上量级的预报，订正后预报 TS 评分显著提升，Bias 更加接近 1，无论从量级还是落区大小上来说与实况均更加接近，订正效果显著。

（3）由于欧洲中心模式预报对于此类小雨预报空报率显著高于漏报率，而订正后漏报率降低而空报率下降不明显，因此导致 TS 评分增加而 Bias 评分增大；对于此类中雨预报订正效果较差，主要是由于订正后漏报率上升而空报率下降造成的，分析根本原因可能是预报与实况的概率匹配值较为接近，概率匹配法几乎无法通过修正预报量级来改进预报效果。

海河流域河道源短流急，洪水预见期短、突发性强，提高暴雨预报准确率对海河流域防洪抗灾及水资源合理分配具有重要意义。东北冷涡暴雨降水分布不均、局地性强，预报难度大，订正预报能有效提升此类暴雨预报能力。由于海河流域东北冷涡强降水样本数较少，导致强降水个例检验具有局限性，今后随着海河流域东北冷涡样本数尤其是强降

水样本数的增加，将会继续对模型进行滚动优化，以提升此类降水预报的准确率。

参考文献（References）

Bentzien S, Friederichs P. 2012. Generating and calibrating probabilistic quantitative precipitation forecasts from the high-resolution NWP model COSMO-DE [J]. Wea. Forecasting, 27(4): 988−1002. doi:10.1175/WAF-D-11-00101.1

Brown J D, Seo D J, Du J. 2012. Verification of precipitation forecasts from NCEP' s short-range ensemble forecast (SREF) system with reference to ensemble streamflow prediction using lumped hydrologic models [J]. J. Hydrometeorol., 13(3): 808−836. doi:10.1175/JHM-D-11-036.1

曹晓钟, 闵晶晶, 刘还珠, 等. 2008. 分类与集成方法在降雨预报中的应用 [J]. 气象, 34(10): 3−11. Cao Xiaozhong, Min Jingjing, Liu Huanzhu, et al. 2008. Application of classification and integration to rainfall forecast [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 34(10): 3−11. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.10.001

常俊, 彭新东, 范广洲, 等. 2015. 结合历史资料的数值天气预报误差订正 [J]. 气象学报, 73(2): 341−354. Chang Jun, Peng Xindong, Fan Guangzhou, et al. 2015. Error calibration of numerical weather prediction with historical data [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(2): 341−354. doi:10.11676/qxxb2015.021

陈博宇, 代刊, 郭云谦. 2015. 2013 年汛期 ECMWF 集合统计量产品的降水预报检验与分析 [J]. 暴雨灾害, 34(1): 64−73. Chen Boyu, Dai Kan, Guo Yunqian. 2015. Precipitation verification and analysis of ECMWF ensemble statistic products in 2013 flooding season [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 34(1): 64−73. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.01.009

陈朝平, 冯汉中, 陈静. 2010. 基于贝叶斯方法的四川暴雨集合概率预报产品释用 [J]. 气象, 36(5): 32−39. Chen Chaoping, Feng Hanzhong, Chen Jing. 2010. Application of Sichuan heavy rainfall ensemble prediction probability products based on Bayesian method [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(5): 32−39. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.05.004

陈鸣, 吴永祥, 王高旭, 等. 2011. 不同天气系统下海河流域汛期暴雨落区及时程分布规律 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 39(3): 237−241. Chen Ming, Wu Yongxiang, Wang Gaoxu, et al. 2011. Distribution of rainstorm centers and processes under different weather systems in Haihe River basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences) (in Chinese), 39(3): 237−241. doi:10.3876/j.issn.1000-1980.2011.03.001

Greybush S J, Haupt S E, Young G S. 2008. The regime dependence of optimally weighted ensemble model consensus forecasts of surface temperature [J]. Wea. Forecasting, 23(6): 1146−1161. doi:10.1175/2008WAF2007078.1

郭达烽, 陈翔翔, 段明铿. 2017. 预报—观测概率匹配订正法在降水预报业务中的应用 [J]. 中国农学通报, 33(32): 100−107. Guo Dafeng, Chen Xianxiang, Duan Mingkeng. 2017. Method of forecast-observed probability matching: Application in precipitation forecast [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese), 33(32): 100−107. doi:10.11924/j.issn.1000-6850.casb16110126

Hamill T M, Colucci S J. 1998. Evaluation of Eta-RSM ensemble probabilistic precipitation forecasts [J]. Mon. Wea. Rev., 126(3): 711−724. doi:10.1175/1520-0493(1998)126<0711:EOEREP>2.0.CO;2

Hamill T M, Whitaker J S, Mullen S L. 2006. Reforecasts: An important dataset for improving weather predictions [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 87(1): 33−46. doi:10.1175/BAMS-87-1-33

Hamill T M, Hagedorn R, Whitaker J S. 2008. Probabilistic forecast calibration using ECMWF and GFS ensemble reforecasts. Part II: precipitation [J]. Mon. Wea. Rev., 136(7): 2620−2632. doi:10.1175/2007MWR2411.1

Husak G J, Michaelsen J, Funk C. 2007. Use of the gamma distribution to represent monthly rainfall in Africa for drought monitoring applications [J]. International Journal of Climatology, 27(7): 935−944. doi:10.1002/joc.1441

Krishnamurti T N, Kishtawal C M, LaRow T E, et al. 1999. Improved weather and seasonal climate forecasts from multimodel superensemble [J]. Science, 285(5433): 1548−1550. doi:10.1126/science.285.5433.1548

李俊, 杜钧, 陈超君. 2014. 降水偏差订正的频率 (或面积) 匹配方法介绍和分析 [J]. 气象, 40(5): 580−588. Li Jun, Du Jun, Chen Chaojun. 2014. Introduction and analysis to frequency or area matching method applied to precipitation forecast bias correction [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 40(5): 580−588. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.05.008

李俊, 杜钧, 陈超君. 2015. “频率匹配法”在集合降水预报中的应用研究 [J]. 气象, 41(6): 674−684. Li Jun, Du Jun, Chen Chaojun. 2015. Applications of “Frequency-Matching” method to ensemble precipitation forecasts [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 41(6): 674−684. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2015.06.002

李莉, 李应林, 田华, 等. 2011. T213 全球集合预报系统性误差订正研究 [J]. 气象, 37(1): 31−38. Li Li, Li Yinglin, Tian Hua, et al. 2011. Study of bias-correction in T213 global ensemble forecast [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 37(1): 31−38. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2011.01.004

李爽, 丁治英, 戴萍, 等. 2016. 东北冷涡的最新研究进展 [J]. 干旱气象, 34(1): 13−19. Li Shuang, Ding Zhiying, Dai Ping, et al. 2016. Recent advances in research on Northeast China cold vortex [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 34(1): 13−19. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-01-0013

孙靖, 程光光, 张小玲. 2015. 一种改进的数值预报降水偏差订正方法及应用 [J]. 应用气象学报, 26(2): 173−184. Sun Jing, Cheng Guangguang, Zhang Xiaoling. 2015. An improved bias removed method for precipitation prediction and its application [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 26(2): 173−184. doi:10.11898/1001-7313.20150205

孙力, 郑秀雅, 王琪. 1994. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的关系 [J]. 应用气象学报, 5(3): 297−303. Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. 1994. The climatological characteristics of northeast cold vortex in China [J]. Quarterly Journal of Applied

Meteorology (in Chinese), 5(3): 297−303.

王斌, 付强, 王敏, 等. 2011. 几种模拟逐日降水的分布函数比较分析 [J]. 数学的实践与认识, 41(9): 128−133. Wang Bin, Fu Qiang, Wang Min, et al. 2011. Comparative analysis on three distribution functions simulating daily rainfall [J]. Mathematics in Practice and Theory (in Chinese), 41(9): 128−133.

王雨, 闫之辉. 2006. 2004 年汛期 (5～9 月) 主客观降水预报检验 [J]. 热带气象学报, 22(4): 331−339. Wang Yu, Yan Zhihui. 2006. Verification of subjective and objective precipitation forecast in flood season of 2004 [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 22(4): 331−339. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2006.04.004

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 Qishu, Han Mei, Liu Ming, et al. 2017. A comparison of optimal-score-based correction algorithms of model precipitation prediction [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 28(3): 306−317. doi:10.11898/1001-7313.20170305

余文韬, 吴振玲, 何群英, 等. 2015. 天津天气预报手册 [M]. 北京: 气象出版社, 25. Yu Wentao, Wu Zhenling, He Qunying, et al. 2015. Weather Forecasting Method Handbook for Tianjin (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 25.

Yuan H L, Gao X G, Mullen S L, et al. 2007. Calibration of probabilistic quantitative precipitation forecasts with an artificial neural network [J]. Wea. Forecasting, 22(6): 1287−1303. doi:10.1175/2007WAF2006114.1

张宏芳, 潘留杰, 杨新. 2014. ECMWF、日本高分辨率模式降水预报能力的对比分析 [J]. 气象, 40(4): 424−432. Zhang Hongfang, Pan Liujie, Yang Xin. 2014. Comparative analysis of precipitation forecasting capabilities of ECMWF and Japan high-resolution models [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 40(4): 424−432. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.04.004

智协飞, 吕游. 2019. 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, 42(6): 814−823. Zhi Xiefei, Lyu You. 2019. Calibration of the multimodel precipitation forecasts in China using the frequency matching method [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 42(6): 814−823. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20190109001

周迪, 陈静, 陈朝平, 等. 2015. 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, 34(2): 97−104. Zhou Di, Chen Jing, Chen Chaoping, et al. 2015. Application research on heavy rainfall calibration based on ensemble forecast vs. observed precipitation probability matching method in the Sichuan basin [J]. Torrential Rain and Disasters (in Chinese), 34(2): 97−104. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2015.02.001

周慧, 崔应杰, 胡江凯, 等. 2010. T639 模式对 2008 年长江流域重大灾害性降水天气过程预报性能的检验分析 [J]. 气象, 36(9): 60−67. Zhou Hui, Cui Yingjie, Hu Jiangkai, et al. 2010. Validation of 2008 heavy rain events over the Yangtze River basin forecast by T639 model [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 36(9): 60−67. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.09.010

朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 [M]. 4 版. 北京: 气象出版社, 193, 374. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. The Principles and Methods of Meteorology (in Chinese) [M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press, 193, 374.