

NMCP降水预报的适用性研究

——以辽宁诺敏河为例

赵伟刚, 王加虎*, 李丽, 路顺昌, 李名

河海大学水文水资源学院, 江苏 南京

收稿日期: 2022年9月21日; 录用日期: 2022年10月22日; 发布日期: 2022年10月31日

摘要

对高分辨率数值天气预报产品进行精度评估时考虑其时空不确定性是有必要的。从降水量级、空间分布和时间分布多角度出发建立降雨预报评估方法, 选取2021年诺敏河流域的实测数据和预报数据, 采用上述方法对NMCP模式进行了综合评价。结果表明: 1) 在降水量级上, 以相对误差作为评价指标。前36 h的NMCP模式相对误差在0.8以上, 尤其对短时强降雨量预报精度较高; 2) 在空间分布上, 采用邻域法改善空间不确定性, 结合FSS评分确定NMCP在该流域的最优邻域半径为60 km。3) 在时间分布上, 引入时间域半径, 结合TFSS评分确定最优时间域半径为2 h。前48 h的NMCP模式对大雨及以下的预报精度较高, FSS与TFSS评分均达到0.8以上, 对于暴雨表现较差。该评价方法能够较好的反映降雨预报数据的时空分布, 更加真实客观地评价降雨预报精度, 为今后的多模式集成与气象水文耦合等应用提供理论基础。

关键词

降雨预报评估, NMCP模式, 邻域法, 高分辨率, 时空分布

Study on the Applicability of NMCP Precipitation Forecast

—A Case Study of the Nuomin River in Liaoning Province

Weigang Zhao, Jiahu Wang*, Li Li, Shunchang Lu, Ming Li

College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Received: Sep. 21st, 2022; accepted: Oct. 22nd, 2022; published: Oct. 31st, 2022

Abstract

It is necessary to consider the spatiotemporal uncertainty in the accuracy evaluation of high-reso-

*通讯作者。

lution numerical weather forecast products. Based on the precipitation magnitude, spatial distribution and time distribution, a rainfall forecast evaluation method is established. The measured data and forecast data of NOMIN River Basin in 2021 are selected to comprehensively evaluate the NMCP model. The results show that: 1) In terms of precipitation magnitude, the relative error is used as the evaluation index. The relative error of NMCP model in the first 36 hours is more than 0.8, especially for short-term strong rainfall prediction; 2) In terms of spatial distribution, neighborhood method is used to improve spatial uncertainty. Combined with FSS score, the optimal neighborhood radius of NMCP in the basin is determined to be 60 km. 3) In terms of time distribution, the time domain radius is introduced, and the optimal time domain radius is determined to be 2 h in combination with TFSS score. The NMCP model in the first 48 hours has high prediction accuracy for heavy rain and below, with FSS and TFSS scores above 0.8, and poor performance for heavy rain. The evaluation method can better reflect the spatial-temporal distribution of rainfall forecast data, and more truly and objectively evaluate the accuracy of rainfall forecast, providing a theoretical basis for the future application of multi-mode integration and meteorological hydrological coupling.

Keywords

Rainfall Forecast and Evaluation, NMCP Mode, Neighborhood Method, High Resolution, Spatiotemporal Distribution

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

降水作为洪水预报的输入条件, 直接决定了水文模型预报精度, 也会直接影响洪涝灾害防治与水库兴利减灾等决策工作。随着数值天气预报技术的发展, 降雨预报产品迅速兴起并广泛应用于洪水预报中 [1] [2] [3] [4]。目前国内外常见的数值预报产品有欧洲 ECWFMF、美国 GFS、日本 JMA、中国气象局 NMCP 等。各数值模式预报产品在不同流域、不同降水阈值、不同的预见期存在差异 [5]-[12]。因此, 在选取预报产品用于洪水预报之前, 需对其进行精度评估, 判断模式在研究区的适用性是有必要的。

目前, 国内外学者对降雨预报能力的评估做了大量研究, 并取得了显著成果, 例如: 何超禄等 [13] 综合评估了 TIGGE 中的多模式数据在中国干旱半干旱区的预报效果, 研究表明 ECWFMF 模式总体表现上更稳定; 潘留杰等 [14] 采用邻域法分析 ECWFMF、JMA、T639 高分辨率模式的降水预报性能, 研究表明增大邻域半径能提高技巧评分; 张玉兰等 [15] 认为现有研究主要考虑总量误差, 对降雨预报的时空分布研究较少, 提出了一种综合总量和时空分布的降雨预报方法。

然而, 大多数预报评估研究着眼于同时刻站点对站点、网格对网格和面雨量与面雨量的总量误差, 研究尺度较大, 对于引发中小流域洪涝的短时强降水研究较少。传统的检验评估方法忽略了降水气候概率在时间和空间上的差异, 但这些时空差异会影响洪水预报的洪峰、峰现时间 [16]-[21]。因此, 评估高分辨模式建立一套考虑时空误差的评估体系是有必要的。

因此, 从总量误差、空间分布和时间分布等多角度出发建立一套评价体系, 并采用上述方法对 NMCP 模式在诺敏河研究区的预报效果进行评价, 以期为 NMCP 模式的应用和多模式集成提供一定的理论支持。

2. 研究区域及数据介绍

2.1. 研究区域

诺敏河发源于大兴安岭支脉伊勒呼里山南麓,在呼伦贝尔盟莫力达瓦达斡尔族自治旗尼尔基镇附近分两支注入嫩江,是嫩江右岸7条一级支流之一。诺敏河流域位于北纬 $48^{\circ}00'$ ~ $50^{\circ}30'$,东经 $121^{\circ}45'$ ~ $124^{\circ}35'$,属于温带大陆性气候,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥。流域内降雨量年内、年际分配不均匀,主要集中在7~8月,多年平均年降水量约480 mm。本文研究的古城子水文站距离河口42 km,断面以上河长398 km,控制流域面积25,230 km²,每年7~9月降雨历时长,强度高,极易造成洪涝灾害[22]。古城子流域概况见图1。

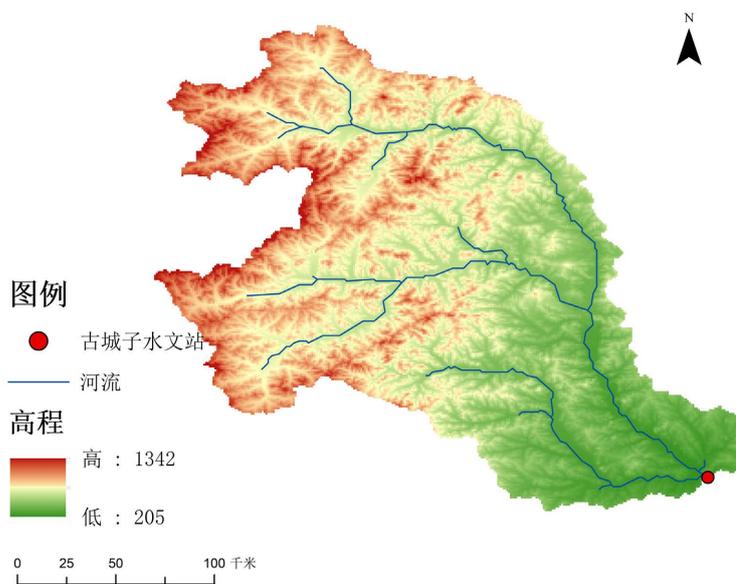


Figure 1. Overview of Guchengzi watershed

图1. 古城子流域概况图

2.2. 数据及预处理

2.2.1. 预报数据来源

本次拟评价的降水数值预报模式为来自于中央气象局的NMCP降水数据。NMCP是创新性运用机器学习和数值模式的双预报引擎模式,具有高分辨率、高精度的特征,能促进国内天气预报业务以及数值预报技术的发展,在洪涝灾害防治与水库兴利减灾等有一定的应用前景,有效降低洪涝等自然灾害造成的损失。NMCP数据每日世界时(Universal Time Coordinated, UTC) 00:00和12:00发布,共计2次,对应北京时间8:00和20:00,预报时长为72 h,时间分辨率为1 h,空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。默认数据格式为flt类型,可用Visual Studio 2017(VS)中ReadBinSingle方法进行查看和转换。

2.2.2. 实测数据来源

实测资料来自中国气象科学数据信息网CMORPM(NOAA Climate Prediction Center Morphing Method)卫星与全国 3×10^4 个自动观测站的逐时降水量融合产品。时间序列选取与预报数据保持一致,空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。有研究表明[17],CMORPH卫星与自动站降水融合资料在降水量值和空间分布上能够更好的反映实际情况,并取得较高的融合降水精度。不同降水量级下的融合产品质量均优于国际上

可接受的误差标准。该融合产品能够准确地抓住典型区强降水过程，对于定量监测降水过程具有优势。因此，该数据集可以作为参照物来评估预报模式的预报性能。

2.2.3. 数据预处理

考虑数据序列的完整性和代表性，选取了 2021 年 07 月~09 月的预报数据与实测数据。预报数据和实测数据均为网格数据，且时间尺度和空间尺度均一致。依据古城子流域边界利用 VS 软件进行剪裁并提取出研究区范围数据。实测数据与预报数据的流域面雨量均采用网格平均法，通过将流域内所有网格降雨值取平均求得。

3. 建立评价体系

3.1. 量级评价指标

常见的降雨量级评价指标有流域面雨量、降雨中心雨量、降雨标准差、累积最大 1 h, 3 h, 6 h, 12 h 降雨量平均值、累积最大 1 h, 3 h, 6 h, 12 h 降雨量最大值等[23]。基于洪水预报中重点关注洪水总量以及洪峰峰量等，引入相对误差对流域雨量进行精度评价。为使评分与技巧成正相关，取如下指标：

$$\Delta R_i = 1 - \frac{|R_{i,pre} - R_{i,obs}|}{R_{i,obs}} \quad (1)$$

式中， ΔR_i 为累积最大 i 小时降雨的总量相对误差，取值范围在 0~1 之间，数值越大表明预报效果越好； $R_{i,pre}$ 为累积最大 i 小时预报降雨量； $R_{i,obs}$ 为累积最大 i 小时实测降雨量。在洪水模拟通常会关注最大 1, 3, 6, 12 h 特征时段和全时段累积降雨量，因此 i 取 1, 3, 6, 12 和 all。

最后，需要将全时段、各个特征时段评价指标综合，得到最终的量级评价指标为：

$$\Delta R = \sum_{i=1,3,6,12,all} \Delta R_i * c_i \quad (2)$$

式中： c_i 为各特征时段量级评价所占权重，可根据流域产汇流特性进行赋值，或按照算术平均取值。本文选用平均取值，故 $c_i = 1/5$ 。

3.2. 空间分布评价指标

常见的降水空间分布指标有不均匀度、标准差与平均值之比、均方根误差(RMSE)等[23]。由于中小尺度流域降水存在着明显的空间分布不均匀性，高分辨率数值模式的降水预报存在着较大的预报偏差。TS 评分、RMSE 等传统检验指标对观测与预报空间分布一致性要求过于苛刻，导致高分辨率预报模式的评分低于粗网格模式，无法客观地反映高分辨率模式地优势。利用邻域法邻域窗可变的特点，引入 FSS 评分来评价模式预报效果的空间尺度变化，进而得到优化的降水预报结果。FSS 主要评价预报与观测面积的偏差。具体步骤如下：

a) 按照雨量等级划分标准，将 12 小时雨量划分为 7 个等级(见表 1)，但考虑到流域内发生大暴雨和特大暴雨次数较少，故将其归入暴雨等级内一并讨论，且无雨对于洪水的形成几乎没有直接的影响，故不做讨论。因此，定义降水阈值 G_k ($k = 1, 2, 3, 4$)，依次对应 0.1 mm, 5 mm, 15 mm 和 30 mm。

Table 1. Classification of areal rainfall

表 1. 面雨量划分等级

无雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	大暴雨	特大暴雨
<0.1	0.1~4.9	5.0~14.9	15.0~29.9	30.0~69.9	70.0~139.9	≥140.0

b) 对模式格点进行“0/1”二分化处理, 即超过降水阈值 G_k 的格点记为 1, 反之为 0:

$$B_o = \begin{cases} 1, & O(i, j) > G_k \\ 0, & O(i, j) < G_k \end{cases} \quad (3)$$

$$B_p = \begin{cases} 1, & P(i, j) > G_k \\ 0, & P(i, j) < G_k \end{cases} \quad (4)$$

式中: B_o 和 B_p 分别代表观测和预报数据二分化处理后的值; $O(i, j)$ 和 $P(i, j)$ 分别代表观测和预报数据, i 为经向格点, j 为纬向格点。

c) 邻域窗选取。模式实际应用的核心问题在于选择合适的空间尺度使得预报模式表现最好。对任意邻域半径的空间窗来水, 区域内超过阈值的格点与总格点比值为:

$$O(n)(i, j) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n B_o \left(i+k-1-\frac{n-1}{2}, j+l-1-\frac{n-1}{2} \right) \quad (5)$$

$$P(n)(i, j) = \frac{1}{n^2} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n B_p \left(i+k-1-\frac{n-1}{2}, j+l-1-\frac{n-1}{2} \right) \quad (6)$$

式中: i, j 分别为区域 x 轴和 y 轴方向的格点, 取值范围为 $1-N_x$ 和 $1-N_y$; k, l 分别为邻域窗内 x 轴和 y 轴方向的格点数, n 为邻域窗半径, 当 $n=1$ 时, 表示格点本身的预报技巧。邻域半径 n 的均方根误差 FBS (Fraction Brier Score) 为:

$$FBS = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (O(n)(i, j) - P(n)(i, j))^2 \quad (7)$$

FBS 本质上是概率预报, 且是一个负向评分指数, 结果越接近 0 越好。为此对 FBS 进行转换, 得到 FSS。

$$FSS = 1 - \frac{FBS}{\frac{1}{N_x N_y} \left(\sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} (O^2(n)(i, j) + P^2(n)(i, j)) \right)} \quad (8)$$

其中: FSS 区间为 $[0, 1]$, FSS 评分越高, 预报能力越好。FSS 为 0 时表示实测与预报无相关性。理想情况下在保证实测与观测降水事件频率一致时, FSS 随着邻域半径的增加趋于 1。

3.3. 时间分布评价指标

由于气象预报在预报时刻存在误差, 为了准确评价实测和预报降雨时间分布的吻合程度, 引入时间域半径对预报时刻进行模糊化, 利用 TFSS 评分来作为时间分布评价指标。

a) 参考中小流域面雨量等级划分的相关标准, 定义降水阈值 D_k ($k=1, 2, 3, 4$), 依次对应 0.1 mm, 0.5 mm, 1.5 mm 和 5 mm。

b) 对各时刻面雨量进行“0/1”二分化处理, 即超过降水阈值 D_k 的格点记为 1, 反之为 0

$$R_t = \begin{cases} 1, & S_t > D_k \\ 0, & S_t < D_k \end{cases} \quad (9)$$

式中: S_t 为 t 时刻的降雨量, R_t 为 t 时刻转换后的值。

c) 选择时间域半径 n 。

$$Q_t = \frac{\sum_{i=t-n}^{t+n} R_i}{2n} \quad (10)$$

式中： Q_t 为 t 时刻的邻域概率，取值区间为[0, 1]。

d) 计算 TFSS。

$$TFSS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{t,p} - Q_{t,o})^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{t,p})^2 + (Q_{t,o})^2} \quad (11)$$

式中： $Q_{t,p}$ 为 t 时刻预报数据的邻域概率， $Q_{t,o}$ 为 t 时刻观测数据的邻域概率。TFSS 取值范围为 0~1，数值越大表明预报效果越好。

4. 结果与分析

4.1. 时空尺度确定

为了更好的反映预报数据的时空分布，使用邻域法将预报降水和实测降水进行时空尺度放大，采用 FSS 指标评估空间分布，采用 TFSS 指标评估时间分布。

图 2 为不同降水阈值和空间尺度下 NMCP 模式的 FSS 评分。由图 2 可知，FSS 评分随邻域半径的增大而增大，且在同一邻域半径内，随之降水阈值的增大，FSS 评分降低。NMCP 模式在小雨、中雨和大雨预报的 FSS 评分较高，表明预报产品对降雨的空间分布和大小预报准确性较高。邻域半径的增大对小雨的 FSS 评分影响较小，对暴雨表现为显著增长。如邻域半径为 5 km 时，小雨 FSS 评分为 0.670，暴雨 FSS 评分仅 0.110；当邻域半径增长至 60 km 时，小雨 FSS 评分为 0.751，暴雨 FSS 评分增长至 0.296。当邻域半径达到 60 km 时，各个等级降水的 FSS 增长均已成明显变缓的趋势。考虑到计算效率和 FSS 评分，在实际应用中较优的邻域半径为 60 km。

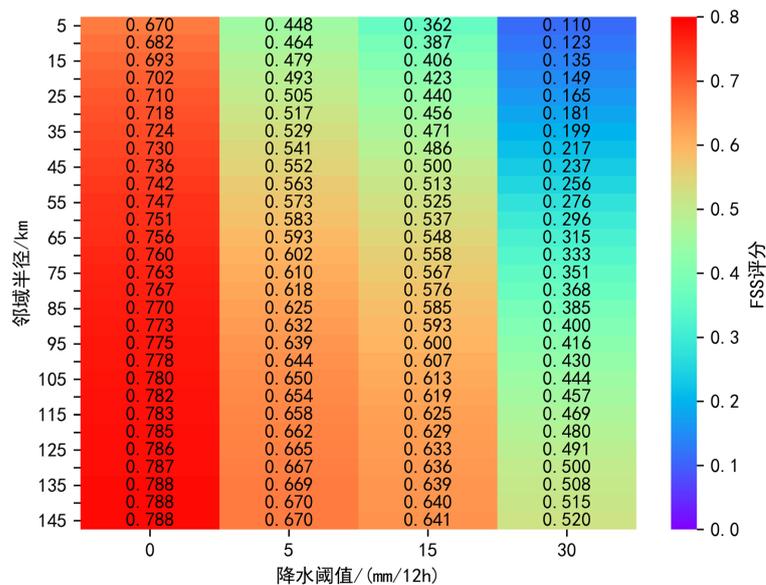


Figure 2. FSS score of NMCP model under different precipitation thresholds and spatial scales
图 2. 不同降水阈值和空间尺度下 NMCP 模式的 FSS 评分

图 3 为不同邻域半径下不同降雨量级的逐 12 小时 FSS 的时间演变。可以看出，小雨 FSS 的变化范围在 0.67~0.73 之间，中雨 FSS 的变化范围在 0.4~0.54 之间，说明 NMCP 模式对中雨及以下的预报能力较好，FSS 基本上随着预报时效的增加而下降，其中 12 h 的 FSS 评分最高。但随着降水量级的增加，预报能力逐渐减弱，NMCP 的 FSS 评分呈现先升后降的趋势，暴雨的 FSS 评分基本在 0.2 以下，尤其在 60 h 以后

表现为无任何技巧。对于不同量级降雨，FSS 总是随着邻域半径的增加而增加，尤其对前 48 h 暴雨来说，增加邻域半径可以获得较为明显的 FSS 增长。

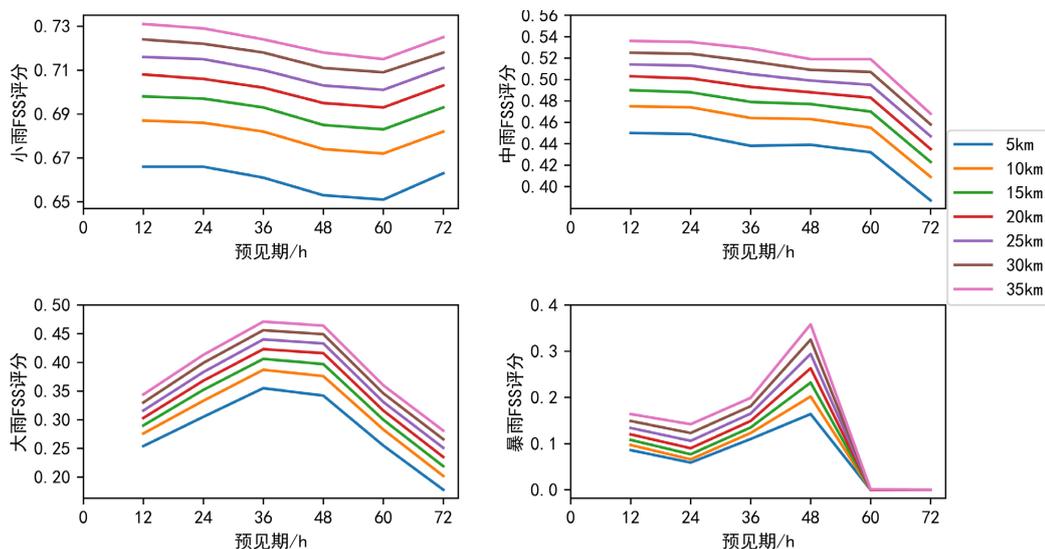


Figure 3. Time evolution of 12 h FSS scores under different neighborhood radii
图 3. 不同邻域半径下，逐 12 h FSS 评分的时间演变

图 4 为不同降水阈值和时间尺度下 NMCP 产品的 TFSS 评分。由图 4 可得，时间域半径越大，TFSS 评分越好，且在同一时间域半径，TFSS 随降雨阈值的增大而降低。暴雨 TFSS 评分出现 0 的现象，分析数据可知，研究时间内从面雨量角度出发发生暴雨的次数极少。以小时降雨量超过 1.5 mm 为例，对比时间域半径为 1 h 和 2 h 的邻域概率场，TFSS 评分从 0.345 上升至 0.441，上升 0.096，但当时间域半径继续增加时，TFSS 评分上升不足 0.05。随着时间域半径增加，TFSS 上升的趋势更加缓慢。在实际应用中，时间域半径定为 2 h 为较合理的选择。

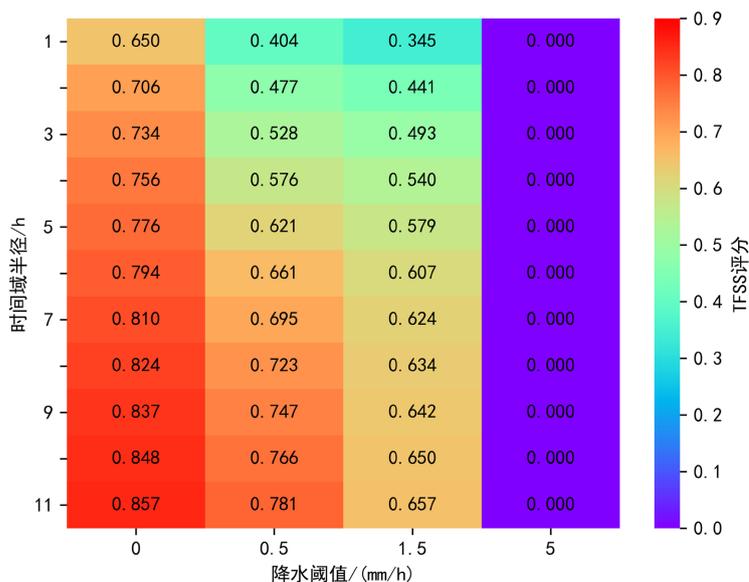


Figure 4. TFSS score of NMCP products under different precipitation thresholds and time scales
图 4. 不同降水阈值和时间尺度下 NMCP 产品的 TFSS 评分

4.2. 场次降雨指标评价结果

选取诺敏河古城子流域 2021 年 07 月 17 日 1 时至 2021 年 07 月 20 日 0 时共 72 h 降雨过程。NMCP 模式每 12 h 预报 1 次, 按预见期 0~12 h, 12~24 h, 24~36 h, 36~48 h, 48~60 h, 60~72 h 将 NMCP 模式分为 6 段, 分别记作 NMCP12, NMCP24, NMCP36, NMCP48, NMCP60, NMCP72。

“7.17”诺敏河极端降雨过程中的强降水落区主要集中在流域的右下角, 如图 5 所示, 古城子流域的降雨中心值约 250 mm/3d。NMCP12 和 NMCP24 预测的强降水范围大致与实况一致, 但位置偏北偏西, 部分区域的强降水分布以及强度上与实际存在一定的空间差异, 主要表现为低估强降雨。NMCP48、NMCP60 及 NMCP72 在估测强降水落区和强度上与实际存在明显差异, 降水中心分散且严重低估。

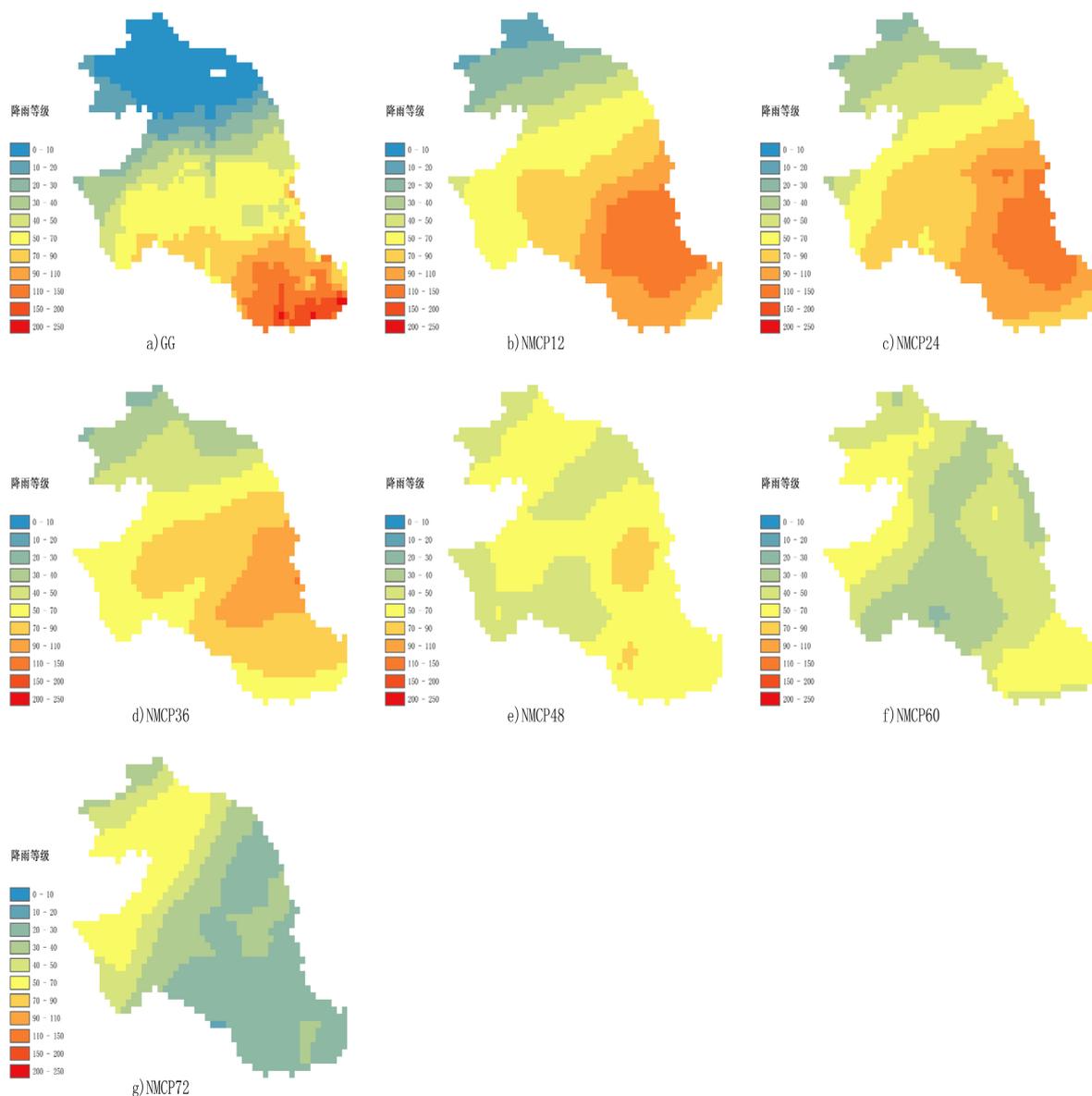


Figure 5. “7.17” Guchengzi watershed precipitation process cumulative precipitation distribution (mm/3d)

图 5. “7.17”古城子流域降水过程累积降水量分布(mm/3d)

为了量化 NMCP 模式在“7.17”诺敏河极端暴雨过程中的降水误差,采用本文的评价指标对 NMCP 模式进行评价与分析。

图 6 为实测降雨与不同预见期预报降雨数据对比图。从图 6 中可以得出, NMCP12、NMCP24、NMCP36 表现较好。在降水发生的前 13 h 内, 预报数据均表现为明显高估实际的降水量。预报数据均提前捕捉到强降水的峰值。在强降水过程发生的 57 h 后, 预报数据均表现低估实际的降水量。NMCP48、NMCP60、NMCP72 表现较差, 严重低估强降水的峰值。

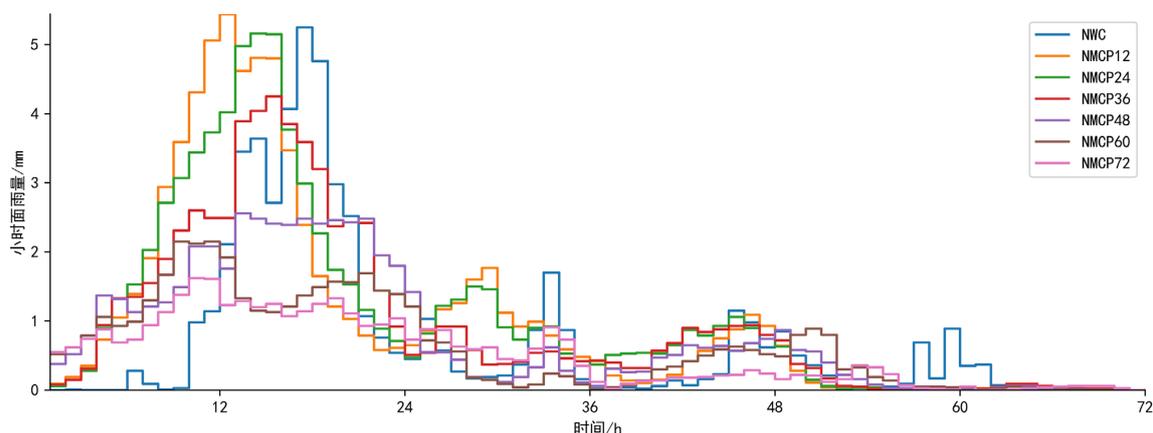


Figure 6. Change of hourly area rainfall of “7.17” Guchengzi station (mm/h)

图 6. “7.17”古城子站逐小时面雨量的变化(mm/h)

从表 2 中可以得出,在全时段累积降水量中, NMCP12, NMCP24, NMCP36 明显高估于实际降水量, NMCP60, NMCP72 表现为明显的低估, NMCP48 表现较好。在累积最大 1 h, 3 h 和 6 h 降水量中, NMCP12、NMCP24、NMCP36 与实际降水吻合度较好, ΔR 趋于 1; NMCP48, NMCP60, NMCP72 明显低估实际降水量, ΔR 基本小于 0.5; 在累积最大 12 h 降水量中, 前 36 h 的预报数据表现为高估, 后 36 h 表现为低估。综合分析量级评价指标, 前 36 h 预报数据 ΔR 维持在 0.8 以上, 大致与实况一致, 尤其对短时强降雨量预报精度较高。

Table 2. NMCP cumulative precipitation and relative error in characteristic period and whole period

表 2. NMCP 累积特征时段和全时段降水量以及相对误差

	NWC	NMCP12	NMCP24	NMCP36	NMCP48	NMCP60	NMCP72
P_{all}	51.490	72.600	75.030	66.750	55.190	44.360	36.800
P_1	5.250	5.440	5.160	4.250	2.560	2.150	1.620
P_3	14.080	15.120	15.290	12.180	7.450	6.420	4.610
P_6	23.880	29.040	26.810	22.820	14.730	11.340	8.330
P_{12}	34.680	44.990	43.320	37.620	28.020	19.260	15.500
ΔR_{all}		0.590	0.543	0.704	0.928	0.862	0.715
ΔR_1		0.964	0.983	0.810	0.488	0.410	0.309
ΔR_3		0.926	0.914	0.865	0.529	0.456	0.327
ΔR_6		0.784	0.877	0.956	0.617	0.475	0.349
ΔR_{12}		0.703	0.751	0.915	0.808	0.555	0.447
ΔR		0.793	0.814	0.850	0.674	0.551	0.429

根据上文参数选取结果, 设置 60 km 为邻域半径, 2 h 为时间域半径, 计算出不同预报时段内的 FSS 评分和 TFSS 评分, 结果如表 3 所示。由表 3 可知:

1) NMCP 降雨预报精度在相同预见期下, 评分总体上随着降雨量级的增大而降低, 这一结果符合天气统计学的规律。

2) 预报数据对于小雨和中雨的预报精度较高, 对于小雨的 FSS 和 TFSS 评分基本维持在 0.9 以上, 对于中雨的 FSS 和 TFSS 评分在 0.8 左右, 且预报精度随预报时效的变化波动幅度较小。对于大雨, FSS 和 TFSS 均呈现出先升后降的趋势, 在预见期 48 h 时达到最高, 48 h 后评分迅速下降, 72 h 的 TFSS 评分仅 0.154。对于暴雨, FSS 仍呈现先升后降的趋势, 在 48 h 达到最高, 为 0.540, 在 48 h 后的 FSS 均为 0; 而 TFSS 仅在 24 h 大于 0, 其他时段均表现为预报和观测完全分离。

Table 3. FSS and TFSS scores of NMCP in different forecast periods and rainfall levels

表 3. NMCP 在不同预见期、不同降雨等级的 FSS 与 TFSS 评分

预见期/h	FSS 评分				TFSS 评分			
	小雨	中雨	大雨	暴雨	小雨	中雨	大雨	暴雨
12	0.938	0.840	0.591	0.375	0.917	0.817	0.735	0.000
24	0.940	0.850	0.604	0.347	0.919	0.739	0.781	0.435
36	0.886	0.844	0.668	0.511	0.912	0.804	0.819	0.000
48	0.884	0.768	0.727	0.540	0.912	0.782	0.880	0.000
60	0.898	0.740	0.562	0.000	0.912	0.770	0.506	0.000
72	0.965	0.764	0.266	0.000	0.959	0.741	0.154	0.000

5. 结论

高分辨率数值预报存在一定的时空不确定性, 传统的降雨预报指标如预报偏差、误报率、CSI 评分等由于无法反映模式预报的空间结构与尺度变化, 导致低估高分辨率模式的预报精度, 无法应用于洪水预报等场景中。因此, 降水量级、空间分布和时间分布多角度出发建立降雨预报评估方法, 选取诺敏河古城子流域作为研究对象, 采用上述评价体系对 NMCP 模式进行了评价与分析: 在量级上, 综合考虑洪水特征时段和总降雨过程的面雨量, 引入相对误差作为评价指标; 在空间分布上, 采用邻域法对 NMCP 模式降水概率计算时, 综合考虑计算效率以及 FSS, 选用 60 km 作为最优邻域半径; 在时间分布上, 引入时间域半径考虑预报的时间误差, 对比 TFSS 与时间域半径热力图, 选用 2 h 为最优时间域半径。

选取辽宁诺敏河流域“7.17”典型降水事件进行分析: 在降水空间分布上, 预见期在 36 h 内的预报数据能较好地反映降水空间分布, 但仍表现出大雨低估, 小雨高估。在量级上, 前 36 h 预报数据 ΔR 维持在 0.8 以上, 大致与实况一致, 尤其对短时强降雨量预报精度较高。在时空分布上, NMCP 对中雨及以下的降水事件预报效果较好, FSS 和 TFSS 评分均在 0.8 以上; 对于大雨, FSS 和 TFSS 随预见期的延长均表现为先升后降的趋势, 在 48 h 达到最高; NMCP 对暴雨的检验效果较差, 这与暴雨样本次数少有着一定的关系。

综上所述, 采用该评价方法能考虑预报数据的时空误差从而能得到更真实地评价指标, 评价的结果可以为今后降雨数值预报的校正和应用以及多源预报模式的集成提供参考。由于本文只评价了 NMCP 在半干旱小流域的适用性, 对湿润区流域以及大流域未进行研究, 今后可进行对比分析其适用性。另外, 本文主要针对于防汛需求, 该评价体系对于其他需求的适用性在今后需进一步分析。

基金项目

国家研发计划重点项目山区暴雨山洪水沙灾害预报预警关键技术与示范(2019YFC1510700)。

参考文献

- [1] 温娅惠, 李致家, 孙明坤, 等. 降雨输入对实时洪水预报精度与预见期的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 39-51.
- [2] 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[J]. 气象, 2016, 42(9): 1045-1057.
- [3] 殷志远, 王志斌, 李俊, 等. WRF 模式与 Topmodel 模型在洪水预报中的耦合预报试验研究[J]. 气象学报, 2017, 75(4): 672-684.
- [4] Sarkar, S. and Himesh, S. (2021) Evaluation of the Skill of a Fully-Coupled Atmospheric-Hydrological Model in Simulating Extreme Hydrometeorological Event: A Case Study over Cauvery River Catchment. *Pure and Applied Geophysics*, **178**, 1063-1086. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02684-4>
- [5] 潘留杰, 张宏芳, 王建鹏. 数值天气预报检验方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(3): 327-335.
- [6] 王建群, 段蓉, 蔡晨凯. TIGGE 模式在淮河水系史河流域的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 14-21.
- [7] 郝莹, 王元, 王皓, 等. 淮河流域不同时间尺度暴雨的多模式预报性能评估及洪水可预报性探讨[J]. 气象, 2019, 45(7): 989-1000.
- [8] 王晓峰, 周荣卫. 全球模式降水预报在雅砻江流域汛期的效果检验[J]. 气象, 2021, 47(10): 1193-1205.
- [9] Shrestha, D.L., Robertson, D.E., Wang, Q.J., et al. (2013) Evaluation of Numerical Weather Prediction Model Precipitation Forecasts for Short-Term Streamflow Forecasting Purpose. *Hydrology and Earth System Sciences*, **17**, 1913-1931. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1913-2013>
- [10] 唐榕, 王运涛, 李敏, 等. ECMWF 降雨预报信息不同利用形式精度评估[J]. 中国农村水利水电, 2020(7): 1-5.
- [11] 舒章康, 汪琳, 金君良, 等. TIGGE 多模式降水预报产品检验与集成研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(2): 10-19.
- [12] 朱慧琴, 陈生, 李晓俞, 等. GPM 卫星降水产品在“7·21”河南极端暴雨过程中的误差评估[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(1): 1-13.
- [13] 何超禄, 吕海深, 朱永华, 等. TIGGE 降水预报在中国干旱半干旱地区的适用性评估[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 368-378.
- [14] 潘留杰, 张宏芳, 陈小婷, 等. 基于邻域法的高分辨率模式降水的预报能力分析[J]. 热带气象学报, 2015, 31(5): 632-642.
- [15] 张玉兰, 张卫国, 贾本有, 等. 基于防汛需求的降雨预报精度评估方法[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 293-300.
- [16] 赵滨, 张博. 邻域空间检验方法在降水评估中的应用[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(1): 1-7.
- [17] 潘留杰, 薛春芳, 张宏芳, 等. 三种高分辨率格点降水预报检验方法的对比[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(1): 45-58.
- [18] 王在文, 梁旭东, 范水勇, 等. 数值模式降水评分对分辨率的敏感性初探[J]. 暴雨灾害, 2016, 35(1): 10-16.
- [19] 罗聪, 时洋, 吴乃庚, 等. 基于邻域最优概率的 GRAPES 快速更新循环同化预报系统逐时降水订正方法[J]. 热带气象学报, 2021, 37(4): 569-578.
- [20] 滑申冰, 冯双磊, 靳双龙, 等. 基于邻域法对覆冰预报产品的评估[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1450-1457.
- [21] 曹勇, 张恒德, 郭云谦, 等. 基于多模式预报优选融合技术的短时定量降水预报研究[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2022, 50(5): 10-15.
- [22] 王鑫. 诺敏河流域径流变化规律分析及预报方法研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [23] 邸苏闯, 潘兴瑶, 刘洪伟, 等. 北京城市暴雨内涝预警指标体系构建和致灾因子阈值量化研究[C]//北京水问题研究与实践(2018年). 北京: 中国水利水电出版社, 2019: 225-235.