

郝翠,于波,戴翼,等,2023.北京地区汛期降水时空分布的统计降尺度研究[J].气象,49(7):843-854. Hao C, Yu B, Dai Y, et al, 2023. Statistical downscaling research on spatio-temporal distributions of summer precipitation across the Beijing Region [J]. Meteor Mon, 49(7):843-854 (in Chinese).

北京地区汛期降水时空分布的统计降尺度研究*

郝 翠¹ 于 波¹ 戴 翼¹ 智协飞² 张迎新¹

1 北京市气象台,北京 100097

2 南京信息工程大学,气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044

提 要:降水的时空降尺度方案一直以来是智能网格预报业务的难点,通过对比多种时间和空间的降尺度方法,凝练出适用于北京地区的最优方案。空间降尺度方面,对比反距离权重法、普通克里金法、最近邻法、双线性插值法、三维普通克里金法等 5 种方法的空间分布特征表明,双线性插值法在北京地区的应用效果最好,误差最小且 ETS 评分最高;时间降尺度方面,采用基于区域数值模式(睿图、CMA-MESO)产品的逐时分配和平均分配两种方案,其中睿图逐时分配、CMA-MESO 逐时分配和平均分配在 RMSE 和 MAE 的误差表现差距不大,但睿图逐时分配在 ETS 上的效果最显著,且在强降雨时段表现也较优,说明从预报准确率角度采用睿图逐时分配的优势更为明显。双线性插值和睿图逐时分配作为北京地区客观降水预报方法的时空降尺度方案,能够支撑智能网格业务提供精细化的预报产品,其成果可为相关业务研究提供借鉴。

关键词:降水,时空降尺度,插值方案,分布特征,网格预报

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.050201

Statistical Downscaling Research on Spatio-Temporal Distributions of Summer Precipitation Across the Beijing Region

HAO Cui¹ YU Bo¹ DAI Yi¹ ZHI Xiefei² ZHANG Yingxin¹

1 Beijing Weather Forecasting Center, Beijing 100097

2 Key Laboratory of Meteorological Disasters, Ministry of Education (KLME)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: The spatio-temporal statistical downscaling of precipitation has always been a difficult research point in intelligent grid forecasting. By comparing several spatio-temporal downscaling methods, we obtained the optimal scheme suitable for the Beijing Region in this study. In terms of spatial statistical downscaling, spatial distribution characteristics of five methods are compared, namely inverse distance weighting, ordinary Kriging, Nearest, Bilinear, 3-D ordinary Kriging method, and the results show that Bilinear interpolation method has the best application effect in Beijing Region, with the smallest error and highest ETS. For temporal downscaling, two kinds of allocation schemes based on regional numerical model are compared, including hourly allocation schemes (RMAPS and CMA-MESO) and average allocation. The results show that there are no significant differences in RMSE and MAE for the three methods. The hourly allocation by RMAPS is more preponderant than by observation in ETS score, and it performs also better in heavy rainfall cases, which means the allocation by RMAPS has better advantages from the

* 北京市科技计划项目(Z201100008220005、Z201100005820002)、国家重点研发计划(2018YFC1507305)和北京市自然科学基金项目(8224090、8222079)共同资助

2022 年 3 月 24 日收稿; 2023 年 5 月 29 日收修定稿

第一作者:郝翠,主要从事客观预报技术研究. E-mail:haocui2015@163.com

通讯作者:于波,主要从事灾害天气机理及天气预报技术研究. E-mail:Yubo_0@mail.126.com

perspective of forecast accuracy. The schemes of bilinear interpolation and RMAPS hourly allocation are taken as the spatio-temporal downscaling schemes in the objective forecasting technique of Beijing Meteorological Observatory, and can support intelligent grid forecasting for providing refined forecast products. The results can provide some references for forecasting and associated researches.

Key words: precipitation, spatio-temporal downscaling, interpolation scheme, distribution characteristic, grid forecast

引 言

数值预报后处理产品已成为数值产品释用的重要参考依据(赵声蓉等,2012;唐健等,2018;郝翠等,2019;张宏芳等,2019;金巍等,2020),但目前数值预报后处理产品的时空分辨率仍不能满足当前精细化预报服务的需求,因此发展适用于本地区的时空降尺度技术成为预报业务的关键问题。

降水具有时空不连续性、非正态分布等特点(王海霞和智协飞,2015;董旭光等,2018),因此时空降尺度一直以来是降水精细化预报业务的难点,不同降尺度方法所得到的插值结果不尽相同。在进行统计降尺度之前,必须先将基于站点或粗分辨率的网格产品插值到更细分辨率网格上(王亚男和智协飞,2012;智协飞等,2016;刘绿柳等,2018;吴遥等,2020)。对于空间降尺度,由于降水的局地性很大,尤其是在地形复杂区域,地理位置虽接近但降水量可能会差别很大,不同的空间插值方法产生的降水分布差异很大(邬伦等,2010),因此需要遴选出本地适用性最好的插值方法;目前广泛应用且效果较好的空间插值方法包括最近邻(Nearest)插值、双线性(Bilinear)插值(陈胜东等,2015)、反距离权重(inverse distance weighting, IDW)插值(包慧濛等,2015)、普通克里金(ordinary Kriging, OK)插值(陈胜东等,2015)等;而基于地形信息的三维插值方法(吴链,2017)进行空间降尺度,应用效果也较好。根据中国气象局的业务要求,本文将基于观测的站点资料插值成空间分辨率为 5 km 的格点产品,采用 IDW、OK、Nearest、Bilinear、三维普通克里金(three-dimensional ordinary Kriging, TOK)5 种插值方法对北京地区的降水进行空间降尺度试验,该结果可以为粗分辨率数值模式及数值预报后处理产品提供参考。

时间降尺度的研究相对较少。刘凑华等(2021)

通过模拟雨带位置和形态来实现时间降尺度,其利用数值模式逐 3 h 预报进行位置订正、动态重构和频率匹配,将逐日降水客观预报降尺度为逐 1 h。由于目前区域数值模式已有逐 1 h 预报产品,本文将观测的日降水资料基于区域数值模式逐 1 h 的预报产品进行时间降尺度,并与平均分配的结果进行对比分析,相关结论可为粗时间分辨率的数值模式释用及数值模式预报后处理产品提供参考。

本文针对降水客观预报产品进行业务化应用时遇到的时空降尺度问题,若直接利用降水客观预报产品或数值模式的日降水预报进行时空插值,则难以对比时空插值的真实效果。为最大程度反映时空插值的效果,利用观测的日降水资料和中尺度区域数值模式预报产品,进行时空降尺度试验,探讨北京地区最优的降水时空降尺度技术方法,为智能网格预报业务建设提供参考和依据。

1 资料和方法

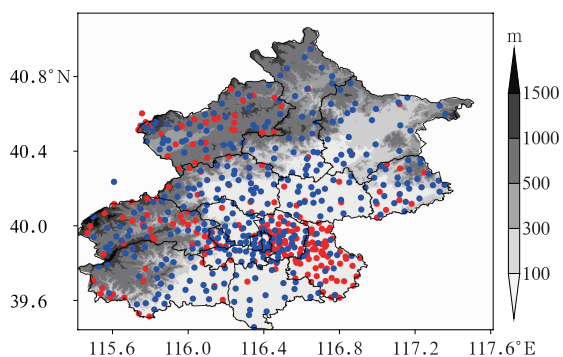
考虑到观测数据的完整性和准确性,观测资料采用 2019 年 4—9 月北京地区共 364 个自动气象观测站(以下简称自动站,2015 年自动站总数)逐时降水质量控制产品,并将逐时产品处理成逐日(前日 21 时至当日 20 时)降水产品。数值预报产品选取对北京预报性能较好的北京市气象局睿图模式(RMAPS)和中国气象局 CMA-MESO 的逐小时降水预报产品,预报时长为 24 h。其中,睿图模式为北京市城市气象研究院于 2002 年开始研发的快速更新循环数值预报系统,至今已升级更新了 3 个版本,对 2007 年以来北京地区重大天气过程无一漏报(陈敏等,2014;仲跻芹等,2010;2017),截至目前可提供空间分辨率为 3 km 的地面要素及降水的集成预报(刘梦娟和陈敏,2014;闵晶晶,2014);CMA-MESO 为中国气象局自主研发的区域数值天气预报系统,2006 年 7 月投入业务应用,2014 年起提供

空间分辨率为 10 km 的地面降水预报产品,在天气预报业务中发挥了重要作用(沈学顺等,2020)。本文所用时间,除特殊说明外,均为北京时。

1.1 空间降尺度方案

利用 15 m 空间分辨率的数字高程资料实现三维空间的降尺度处理。对比验证的观测资料为北京地区 512 个自动站(2019 年自动站总数)降水实况(图 1)。近年来北京地区的观测站点逐年增加,而数值模式后处理技术需要相对稳定的多年观测资料,因此进行时空降尺度未采用较新的 512 个自动站的实况信息,而是仍采用 364 个站(2015 年自动站总数)的实况信息。

常用的 5 种空间降尺度方案具体为:(1)IDW:以插值点与样本点间距离的倒数为权重进行加权平均(Bartier and Keller,1996)。(2)OK:以空间统计学作为理论基础,对空间分布数据进行全局变异函数计算,获取最优、线性、无偏的内插估计;其本质是由可用样本数据的线性组合来获得待插值点的降水量,其中加权值不仅与观测点和待插值点的距离有关,同样与观测点的位置、空间结构相关(Pardo-Igúzquiza and Dowd,1998)。(3)Nearest:以距离网格点最近的站点值为此网格点值来进行插值(陈欢欢等,2007)。(4)Bilinear:采用 2 个变量的插值函数的线性插值扩展,利用网格点附近的 4 个站点值的水平、垂直方向上的线性内插获取网格点的值(叶金印等,2013)。(5)TOK:即在二维插值的基础上加入高程信息,将海拔高度作为经度、纬度之外的第



注:蓝点:2015年,364个;圆点:2019年,512个。

图 1 北京地区自动站分布图

Fig. 1 Distribution of automatic weather stations (dots) across the Beijing Region

三维度进行插值(曾怀恩和黄声享,2007)。

利用上述方法将实况自动站观测资料插值至 5 km×5 km 网格上。针对空间降尺度,本文采用交叉验证法(Seaman,1983)评价各方法的效果,即将逐日 364 个站的降水资料按 8:2 的比例分成 2 组,用 291 个站资料进行插值,73 个站的资料进行检验,为保证结果稳定,每日资料随机分组 10 次(图 2)。

1.2 时间降尺度方案

采用的数值模式资料为 2019 年 5 月 1 日至 9 月 30 日的北京睿图模式和 CMA-MESO 的逐时降水预报,以及对应的 364 个站降水实况(逐日和逐时)。本文设计 2 种方案(图 2):(1)当数值模式(睿图逐时预报、CMA-MESO 逐时预报)预报有降水时,按照当日数值模式逐 1 h 的降水比例分配;当数值模式预报无降水时,平均分配;当数值模式预报有降水、观测无降水时,按观测无降水分配。(2)对逐日观测降水进行逐时平均分配(平均分配)。

检验方法为计算各站点在整个降水过程中各时次观测值与估计值间的均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、公平风险(equitable threat score, ETS)评分。其中,MAE 反映估计值的误差范围,取值越接近 0 表明误差越小;RMSE 反映估计值的灵敏度和极值情况,取值越接近 0 表明误差越小(高华喜和殷坤龙,2007;宋丽琼等,2008);ETS 反映预报准确率,是对 TS 评分的改进,对空报或漏报进行惩罚,使评分更公平,取值范围为 -1~1,越接近 1 表明预报效果越好。具体计算为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y - \bar{y})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |y - \bar{y}| \quad (2)$$

$$ETS = \frac{a - e}{a + b + c - e}$$

$$\text{其中 } e = \frac{(a + b)(a + c)}{a + b + c + d} \quad (3)$$

式中: y 为观测实况的降水, \bar{y} 为预报的降水, m 为样本数; a 是预报准确的站点数, b 是漏报站点数, c 是空报站点数, d 是实况和预报均没有出现降水的站点数。ETS>0 时为有正预报技巧,ETS<0 为无技巧,ETS=1 时为最佳预报。

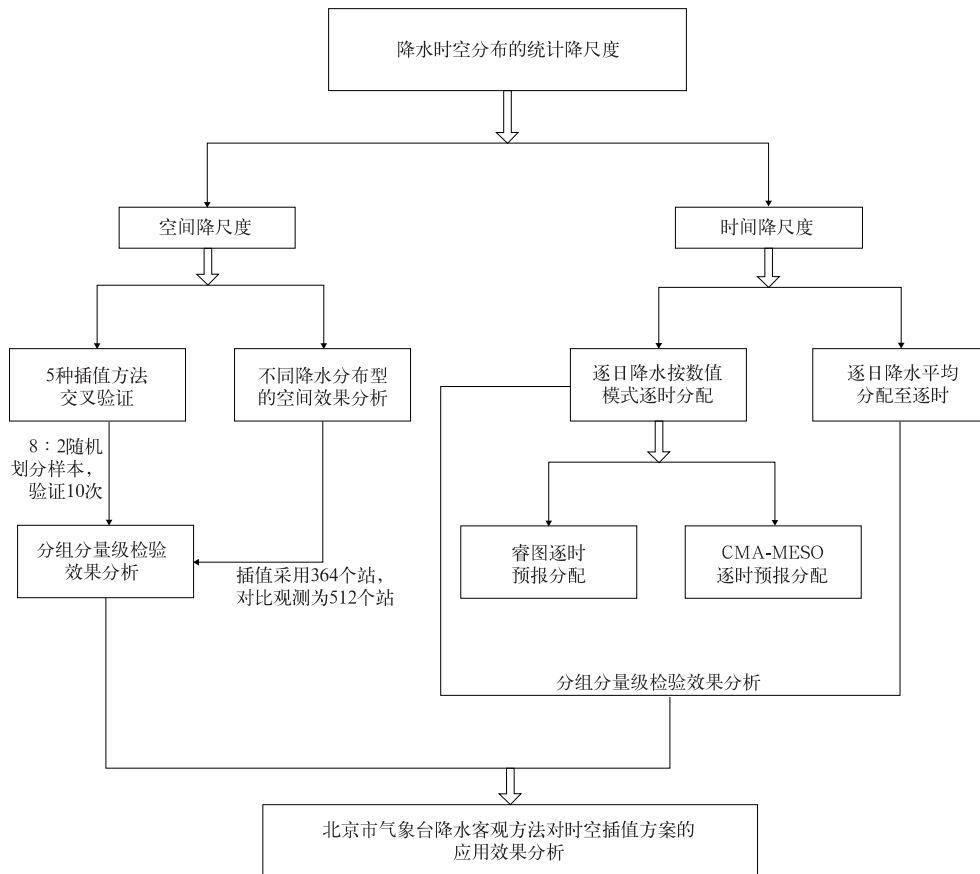


图 2 北京地区时空降尺度方案技术路线图

Fig. 2 The technology roadmap of spatio-temporal downscaling methods for the Beijing Region

2 结果分析

2.1 空间降尺度

对比 5 种降尺度方案 (IDW、OK、Nearest、Bilinear、TOK) 的空间分布特征, 通过计算各站点在整个降水过程中逐时次观测值与预报值间的误差, 检验了不同插值方法误差的空间分布特征 (表 1)。结果表明, Bilinear 的效果最好, RMSE 和 MAE 最小, ETS 评分最高; 对 10 mm 以上降水的插值效果评估也表明 Bilinear 插值效果最好, ETS (>10 mm) 可达 0.65; OK 的效果次之, Nearest、IDW 的结果较差, 这与高歌等 (2007) 对逐日降水的空间插值的结论一致, OK 的结果相对于 IDW 较好。加入高程信息后的 TOK 效果最差, 误差反而增大, 因此将地形高度与降水量做相关分析, 分析表明二者相关系数仅为 -0.01 , 几乎无相关性。北京地区的复杂地形对降水的影响主要体现在对降水的触发上, 即降水

发生频次, 而对于降水量来说, 二者并无相关性, 这与袁宇锋 (2017) 的研究结论一致。因此, 对北京地区而言, 在进行空间插值时, 不考虑次级信息 (高程) 的二维效果反而比三维效果要好。

由于北京地区地形复杂, 西北为山地, 东南为平原, 按海拔高度将北京地区分为山区 (海拔高度 200 m 及以上) 和平原 (海拔高度 200 m 以下) 两部分, 分别占总面积的 59.29% 和 40.71%。对山区和平原 5 种降尺度方案的空间分布特征分析 (表 2) 表明: (1) 对山区而言, Bilinear 效果最好, RMSE 和 MAE 最小, 分别为 5.30 mm 和 2.81 mm, 其次是 OK 和 Nearest; (2) 平原地区, IDW 效果为最好, 其 RMSE 和 MAE 分别为 5.57 mm 和 3.25 mm, 其次是 Bilinear, RMSE 和 MAE 分别为 5.76 mm 和 3.28 mm。综合山区和平原的效果分析, Bilinear、Nearest、IDW、OK 差距不大, 但 TOK 与其他 4 种方法有明显差距。

对北京地区 3 个主要的降水分布型 (全市降雨、北多南少、东多西少) 的检验表明 (图 3), OK 虽然

表 1 不同空间降尺度方案的检验结果

Table 1 The test results of different spatial downscaling schemes

检验指标	Nearest	IDW	Bilinear	OK	TOK
RMSE/mm	7.21	8.16	5.64	7.34	10.50
MAE/mm	3.41	4.08	2.82	3.53	5.58
ETS(>0.1 mm)	0.66	0.55	0.69	0.60	0.00
ETS(>10 mm)	0.60	0.48	0.65	0.20	-0.14
RMSE(>10 mm)/mm	13.88	15.20	11.23	14.34	16.93
MAE(>10 mm)/mm	8.15	9.90	6.84	8.68	11.13

表 2 山区(海拔 200 m 及以上)和平原(海拔 200 m 以下)不同空间降尺度方案的检验结果

Table 2 The test results of different spatial downscaling schemes for mountains (above sea level ≥ 200 m) and plains (above sea level < 200 m)

地形	检验指标	Nearest	IDW	Bilinear	OK	TOK
山区	RMSE/mm	7.44	9.57	5.30	7.43	11.52
	MAE/mm	3.92	6.32	2.81	3.93	6.54
平原	RMSE/mm	6.28	5.57	5.76	7.08	9.56
	MAE/mm	3.39	3.25	3.28	3.35	4.00

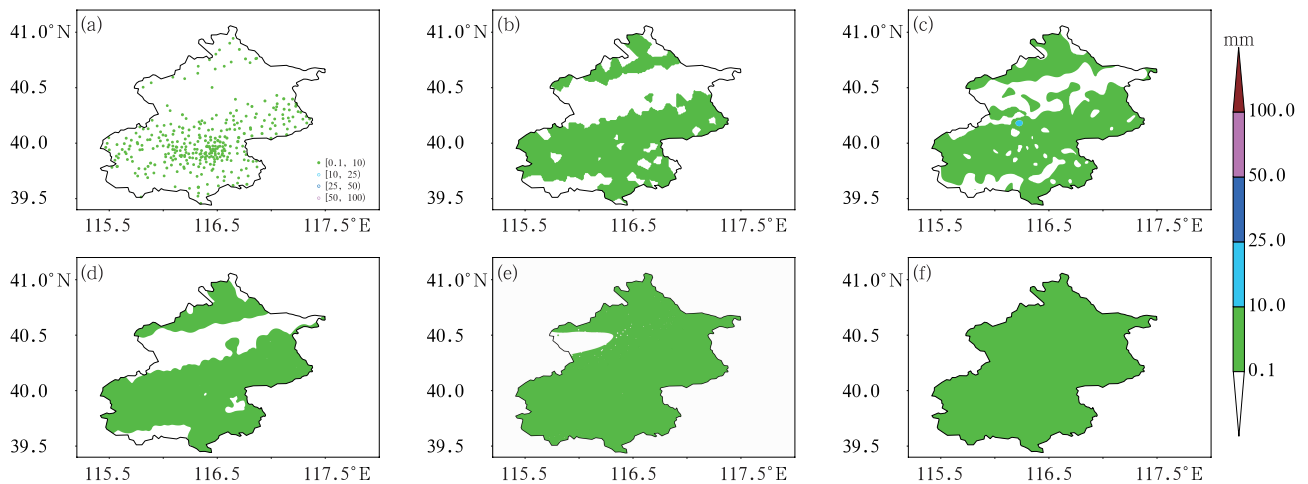


图 3 2019 年 6 月 3 日北京地区小雨型降水不同空间降尺度方案的分布

(a) 实况, (b) Nearest, (c) IDW, (d) Bilinear, (e) OK, (f) TOK

Fig. 3 Distribution of different spatial downscaling schemes for light rain across Beijing Region on 3 June 2019

(a) observation, (b) Nearest, (c) IDW, (d) Bilinear, (e) OK, (f) TOK

在降水量大的区域插值效果较好,但会增加降水分布范围,Nearest 和 IDW 在刻画局部点的特征时容易失真造成误差较大,TOK 效果最差,Bilinear 在各种降水分布类型中都与观测实况最为接近(图 3~图 5),这与税军峰等(2019)的研究结论一致。从 ETS 评分的检验效果看,Bilinear 的评分也是最高的。张永顺(2020)在对比海温插值方法时,同样认为 Bilinear 优于 Nearest 和三次插值。

从降水类型看,2019 年 6 月 3 日受高空槽和低层切变线影响,此次过程属于对流性降水,Bilinear 方法的分布与实况最为接近(图 3)。同样作为对流

性降水,但对流性更强的 2019 年 8 月 2 日受高空槽和低层偏东风造成的降水,IDW、Bilinear、Nearest 的分布与观测实况都很接近,其中 IDW 在降水量较大的分布区域与观测实况最为接近(图 4)。2019 年 7 月 23 日受副热带高压外围偏南暖湿气流和高空槽系统影响,以及大尺度稳定性降水和对流性降水的共同作用,此次过程属于混合性降水,IDW、Bilinear、Nearest 的分布与观测实况都很接近,其中 IDW 在降水量较大的分布区域与观测实况最为接近(图 5)。由于华北地区汛期降水以混合性和对流性为主,大尺度稳定性降水较少,且常发生在春秋两

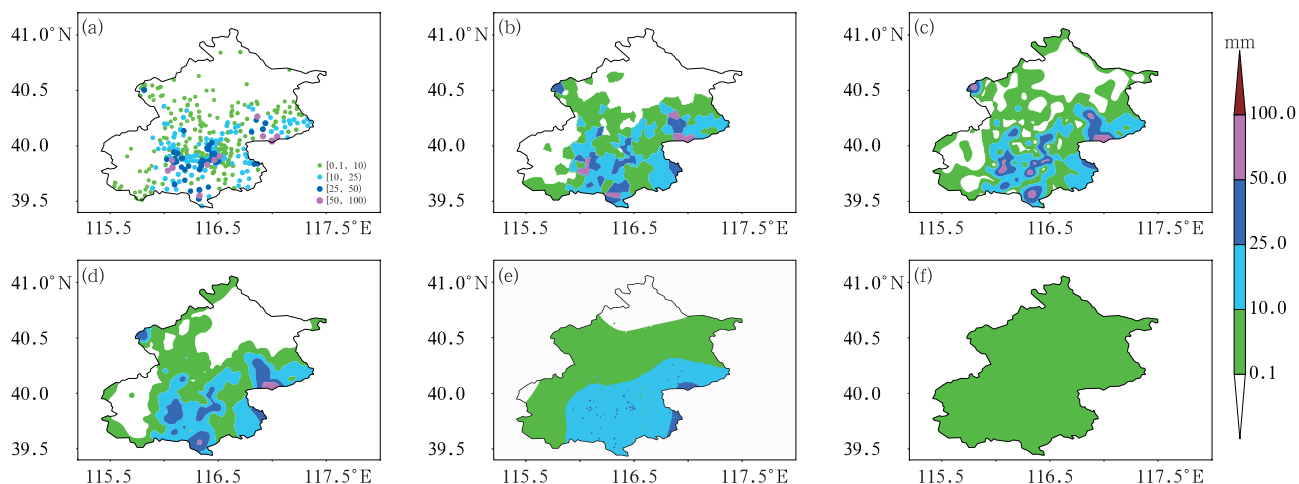


图 4 2019 年 8 月 2 日北京地区东多西少型降水不同空间降尺度方案的分布

(a) 实况, (b) Nearest, (c) IDW, (d) Bilinear, (e) OK, (f) TOK

Fig. 4 Distribution of different spatial downscaling schemes for precipitation more in the east and less in the west of Beijing Region on 2 August 2019

(a) observation, (b) Nearest, (c) IDW, (d) Bilinear, (e) OK, (f) TOK

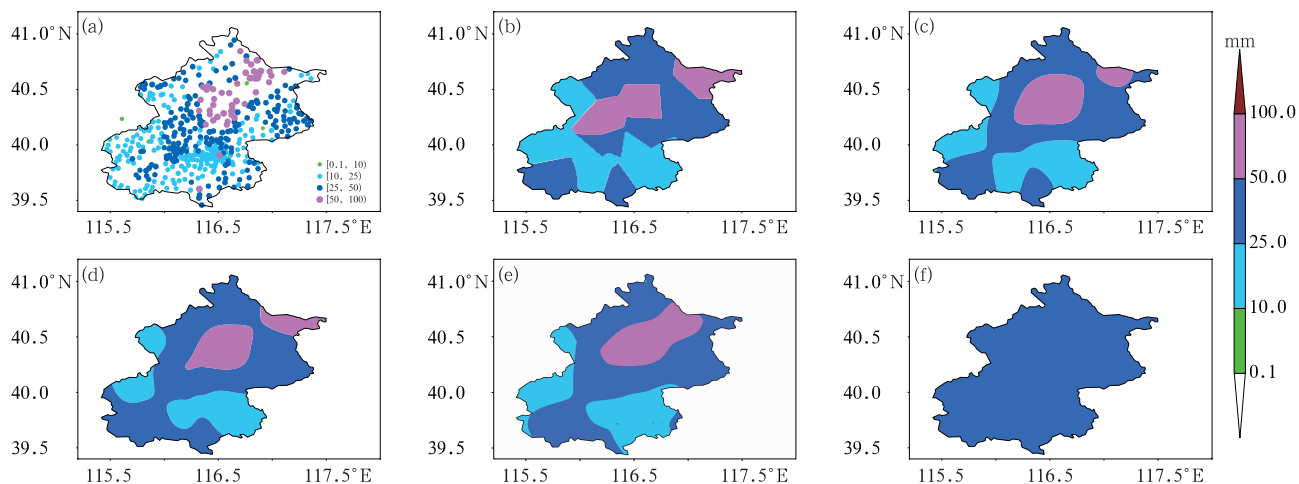


图 5 2019 年 7 月 23 日北京地区北多南少型降水不同空间降尺度方案的分布

(a) 实况, (b) Nearest, (c) IDW, (d) Bilinear, (e) OK, (f) TOK

Fig. 5 Distribution of different spatial downscaling schemes for precipitation more in the north and less in the south of Beijing Region on 23 July 2019

(a) observation, (b) Nearest, (c) IDW, (d) Bilinear, (e) OK, (f) TOK

季,为了分析对大尺度稳定性降水的空间降尺度效果,本文回算了 2018 年 4 月 21 日的降水个例,此次降水过程整体雨势平稳,属于典型的稳定性降水,Nearest、Bilinear、IDW 的分布与观测实况都很接近,其中 Nearest 和 Bilinear 在降水量较大的分布区域与观测实况最为接近, Bilinear 整体分布较 Nearest 更平滑(图 6)。总体来看,在不同类型的降水个例中, Bilinear 不一定是表现最好的插值方法,但它却是一个表现效果最为稳定的方法。

2.2 时间降尺度

对 2019 年 4—9 月逐时的统计表明(图 7),基于睿图的逐时分配、基于 CMA-MESO 的逐时分配和平均分配在 RMSE 上的表现差距不大,表明三者在与观测值偏差上的表现基本一致; MAE 的结果表明,睿图逐时分配和 CMA-MESO 逐时分配在大部分时段比平均分配的误差小,睿图逐时分配在误差上的表现相对于 CMA-MESO 更有优势;而从

ETS 评分看,不论是 0.1 mm 还是 10 mm 以上的降水,基于睿图模式的逐时分配都是 3 种方案中最高

的,平均分别为 0.22 和 0.05,说明从预报准确率看睿图逐时分配的优势更明显;CMA-MESO 在 0.1 mm

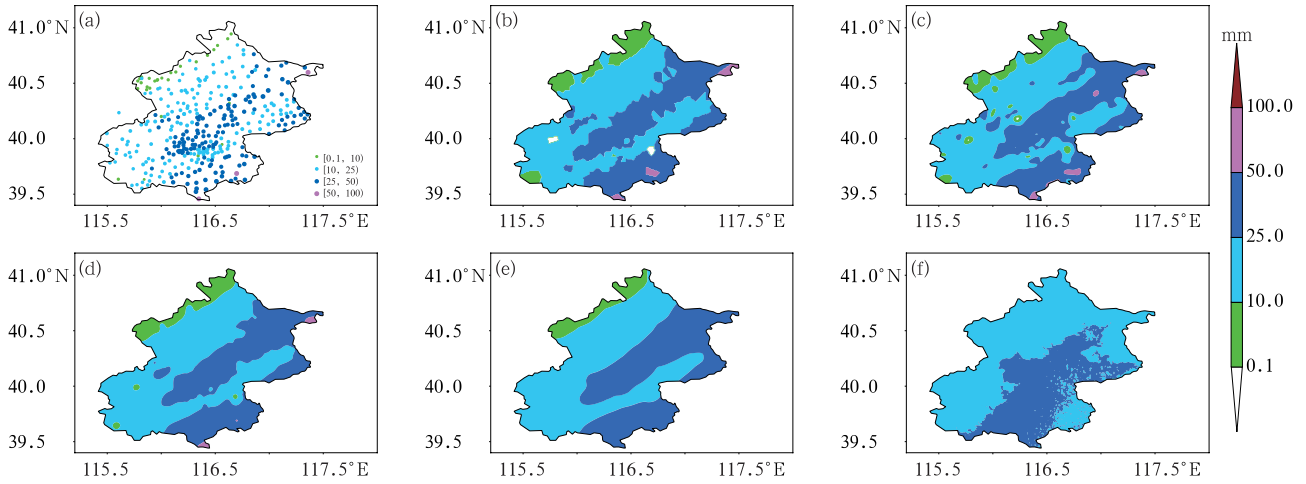


图 6 2018 年 4 月 21 日北京地区大尺度稳定性降水不同空间降尺度方案的分布 (a) 实况, (b) Nearest, (c) IDW, (d) Bilinear, (e) OK, (f) TOK

Fig. 6 Distribution of different spatial downscaling schemes for large-scale stable precipitation in Beijing Region on 21 April 2018 (a) observation, (b) Nearest, (c) IDW, (d) Bilinear, (e) OK, (f) TOK

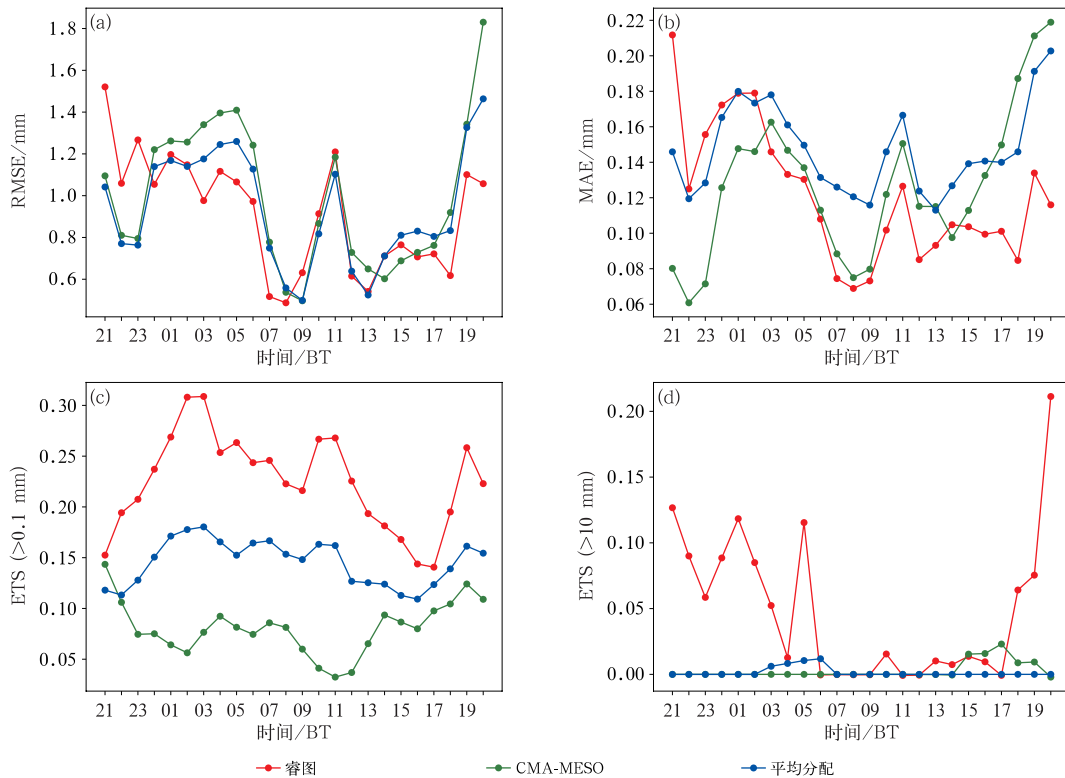


图 7 2019 年 4—9 月不同时间分配方案的逐时降水检验评分 (a) RMSE, (b) MAE, (c) ETS(>0.1 mm), (d) ETS(>10 mm)

Fig. 7 Verification scores of different temporal allocation schemes for hourly precipitation from RMAPS, CMA-MESO and observation between April and September 2019 (a) RMSE, (b) MAE, (c) ETS (>0.1 mm), (d) ETS (>10 mm)

以上降水的 ETS 评分最差,为 0.08,但在 10 mm 以上 ETS 评分中较平均分配略高,为 0.003。CMA-MESO 逐时分配的效果与睿图逐时分配的效果差距较大,原因可能与 2 个数值模式的空间分辨率差异较大有关,CMA-MESO 的空间分辨率为 10 km,插值到自动站可能也会产生较大误差,未来利用自 2020 年起业务化运行的 CMA-MESO 3 km 预报产品时(黄丽萍等,2022),可能会有较好的结果,并且由于睿图模式融合了地基 GPS 和京津冀 29 部雷达的实时资料,对降水临近预报更接近实况,因此睿图逐时分配的方案 ETS 评分较高。这与刘凑华等(2021)的结果一致,其通过位置订正和动态重构方法对逐日降水预报做逐时分配,ETS 评分也有显著提高。

以 2019 年 8 月 6—7 日强降水时段(6 日 23 时至 7 日 02 时)为例(图 8),基于睿图逐时分配的空

间效果与实况空间分布一致性较高,CMA-MESO 没有预报出该时段内的强降水分布特征,平均分配在强降水上没有任何体现。

3 时空降尺度方案在降水客观方法预报中的应用

目前,北京市气象台降水客观技术方法预报基于睿图数值模式预报产品,采用频率匹配和偏差订正方法,获取对模式的逐日预报订正结果(以下简称降水客观方法预报),最大程度地减小预报误差,自动得到各时段最优的降水预报结果。降水客观方法预报采用的是上文的时空降尺度方案,与睿图区域模式预报相比,2019 年 6—9 月北京地区 0~3 d 的平均晴雨预报准确率提高了 4.1%;0~3 d 的小雨 TS 评分提高了 2.0%(图略)。

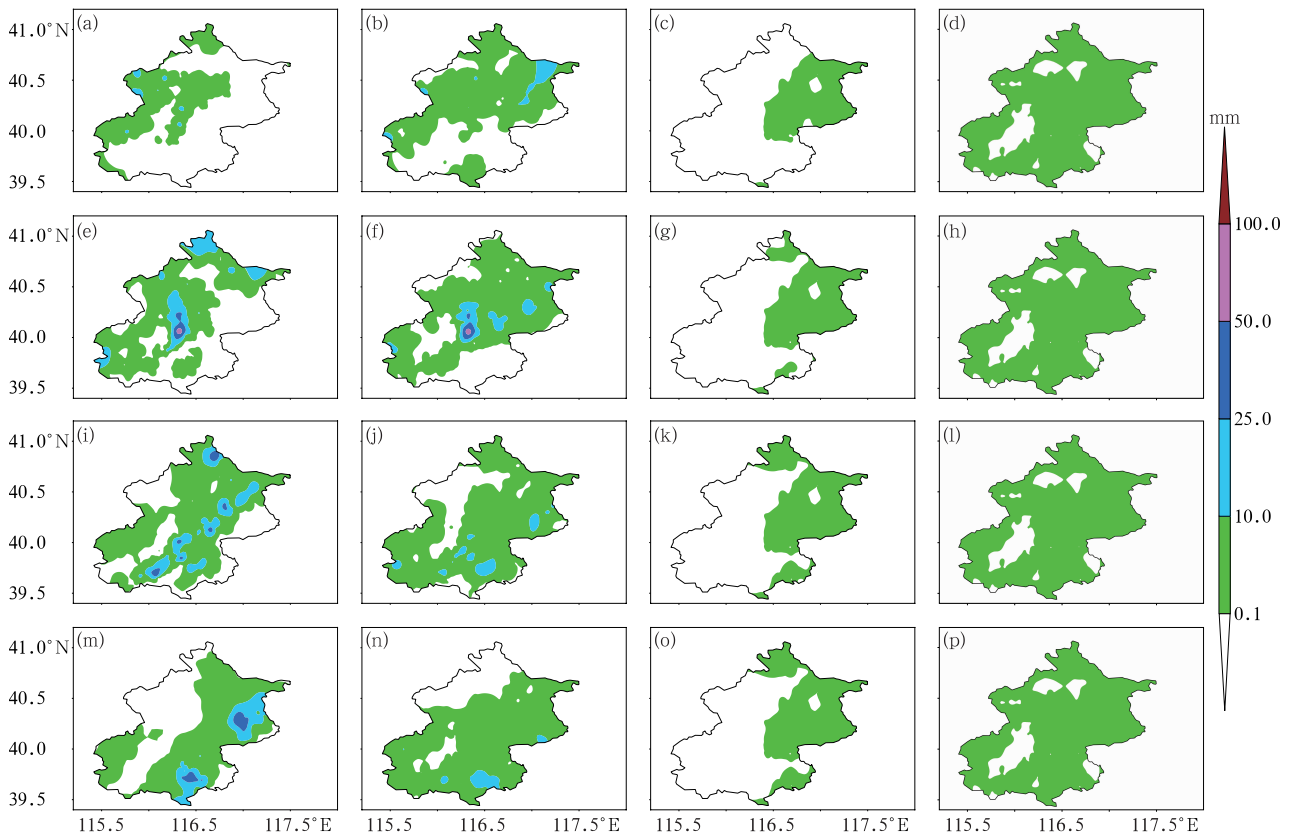


图 8 2019 年 8 月(a~d)6 日 23 时,(e~h)7 日 00 时,(i~l)7 日 01 时,
(m~p)7 日 02 时不同时间分配方案北京地区强降水时段的分布
(a, e, i, m)实况,(b, f, j, n)睿图,(c, g, k, o)CMA-MESO,(d, h, l, p)平均分配

Fig. 8 Spatial distribution of different temporal allocation schemes for heavy precipitation cases in Beijing Region at (a~d) 23:00 BT 6, (e~h) 00:00 BT 7, (i~l) 01:00 BT 7 and (m~p) 02:00 BT 7 August 2019
(a, e, i, m) observation, (b, f, j, n) RMAPS, (c, g, k, o) CMA-MESO, (d, h, l, p) average

2019 年 8 月 6—7 日降水个例(图 9)分析表明,逐日的预报相对观测实况较大,降水客观方法预报在睿图模式的基础上订正后虽然更接近实况的降水分布,但降水量仍然偏大。降水客观方法预报的逐日预报根据睿图逐时分配的结果(图 9f, 9i, 9l, 9o)

也较为接近实况,在强降水中心的预报上表现较优。因此,降水客观方法预报采用 Bilinear 空间插值和睿图逐时分配应用效果良好,可以为业务提供精细化的预报结果,可满足业务需求。

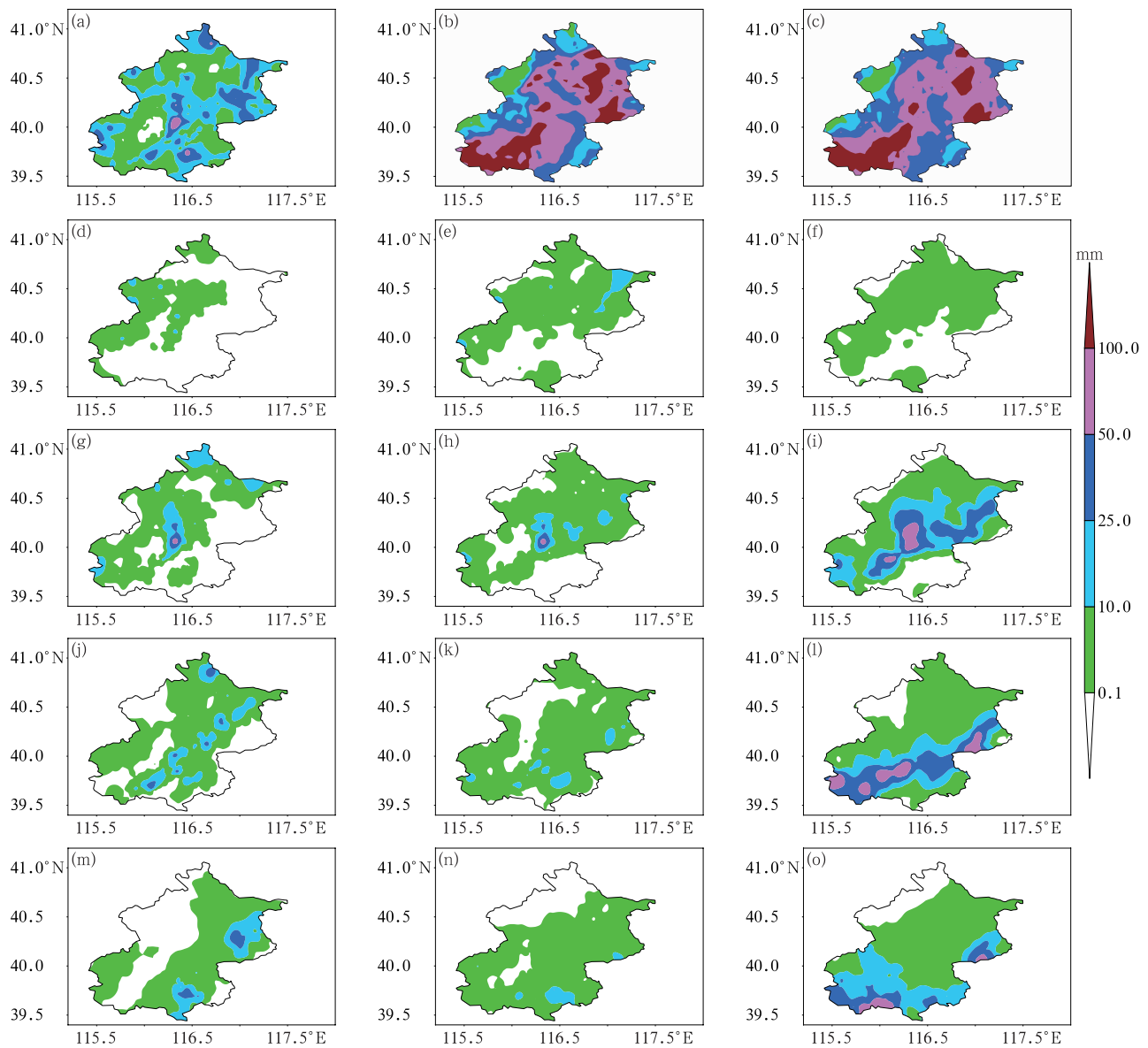


图 9 2019 年 8 月(a~c)6 日 21 时至 7 日 20 时,(d~f)6 日 23 时,(g~i)7 日 00 时,(j~l)7 日 01 时,(m~o)7 日 02 时不同时间分配方案北京地区强降水时段的分布
(a, d, g, j, m)实况,(b, e, h, k, n)睿图预报,(c, f, i, l, o)降水客观方法预报

Fig. 9 Spatial distribution of different temporal allocation schemes for heavy precipitation cases in Beijing Region (a—c) from 21:00 BT 6 to 20:00 BT 7, (d—f) at 23:00 BT 6, (g—j) at 00:00 BT 7, (j—l) at 01:00 BT 7 and (m—o) at 02:00 BT 7 August 2019
(a, d, g, j, m) observation, (b, e, h, k, n) RMAPS forecasts,
(c, f, i, l, o) forecasts by objective prediction method

4 结论与讨论

本文讨论的时空降尺度方法,都是基于数值模式后处理的降水客观预报产品,数值预报模式和降水客观预报产品的时空分辨率精度不一,在业务应用中需要考虑时空降尺度问题,主要是为了加强数值模式及数值预报后处理产品的精细化业务应用,在不影响原效果的情况下满足预报产品精细化和智能化的业务需求。

对空间降尺度的研究表明,Bilinear 插值效果最好,其 RMSE 和 MAE 为最小,ETS 评分最高;加入高程信息的 TOK 误差较大,可以认为北京地理高程对降水的影响主要与降水发生频次有关,与降水量关系不大。对不同的降水分布型的空间分布结果表明,Bilinear 的效果都是与实况最接近的,OK 在降水量大的区域插值效果较好,但会增加降水分布范围,Nearest 和 IDW 在刻画局部点的特征时容易失真造成误差较大,TOK 效果最差。对山区和平原分区的分析统计表明,山区 Bilinear 效果最好,而平原 IDW 效果最好,从山区和平原综合的效果分析,Bilinear、Nearest、IDW、OK 差距不大,但 TOK 与其他四种方法差距较大。对不同降水类型的个例分析表明,Bilinear、Nearest、IDW 效果最好且差距不大,其中 Bilinear 不一定是表现最好的插值方法,但它是一个表现最为稳定的方法。

对时间降尺度的研究表明,睿图逐时分配、CMA-MESO 逐时分配和平均分配在 RMSE 上的表现差距不大,表明二者在与观测值的偏差上的表现基本一致;而从 ETS 评分看,不论是 0.1 mm 还是 10 mm 以上的降水,睿图逐时分配比其他方法要显著,说明从预报准确率角度睿图逐时分配的优势更明显。

本研究的时空降尺度方案均未考虑降水的发生频率、空间分布特点、时间移动规律,但本研究的结论可为未来继续深入进行降水预报的时空降尺度研究打下较好基础。

上述时空降尺度方案已应用于北京市气象台的降水客观方法预报,并具有较好的业务应用效果。此外,相关时空降尺度方案还可用于北京地区的智能网格业务系统中,提高灾害天气的网格预报准确

率,为业务人员提供更为丰富、更加精细的参考产品。

参考文献

- 包慧濛,郭达烽,肖潇,2015. ECMWF 集合预报统计量在江西降水预报中的检验分析[J]. 气象与减灾研究,38(3):60-67. Bao H M, Guo D F, Xiao X, 2015. Validation of ECMWF ensemble forecast statistics in Jiangxi precipitation forecast[J]. Meteor Disaster Reduct Res,38(3):60-67(in Chinese).
- 陈欢欢,李星,丁文秀,2007. Surfer 8.0 等值线绘制中的十二种插值方法[J]. 工程地球物理学报,4(1):52-57. Chen H H, Li X, Ding W X, 2007. Twelve kinds of gridding methods of Surfer 8.0 in isoline drawing[J]. Chin J Eng Geophys, 4(1):52-57(in Chinese).
- 陈敏,陈明轩,范水勇,2014. 雷达径向风观测在华北区域数值预报系统中的实时三维变分同化应用试验[J]. 气象学报,72(4):658-677. Chen M, Chen M X, Fan S Y, 2014. The real-time radar radial velocity 3DVar assimilation experiments for application to an operational forecast model in North China[J]. Acta Meteor Sin,72(4):658-677(in Chinese).
- 陈胜东,章开美,彭王敏子,等,2015. NCEP/NCAR 再分析资料在江西金华山风资源评估中的应用[J]. 气象与减灾研究,38(1):53-58. Chen S D, Zhang K M, Peng W M Z, et al, 2015. Application of NCEP/NCAR reanalysis data to the wind resource assessment of Jiangxi Jinhua Mountain[J]. Meteor Disaster Reduct Res,38(1):53-58(in Chinese).
- 董旭光,顾伟宗,邱黎,等,2018. 山东省汛期小时降水过程时空分布特征[J]. 气象,44(8):1063-1072. Dong X G, Gu W Z, Qiu C, et al, 2018. Spatio-temporal distribution characteristics of hourly precipitation in Shandong Province in flood season[J]. Meteor Mon,44(8):1063-1072(in Chinese).
- 高歌,龚乐冰,赵珊珊,等,2007. 日降水量空间插值方法研究[J]. 应用气象学报,18(5):732-736. Gao G, Gong L B, Zhao S S, et al, 2007. Spatial interpolation methods of daily precipitation[J]. J Appl Meteor Sci,18(5):732-736(in Chinese).
- 高华喜,殷坤龙,2007. 降雨与滑坡灾害相关性分析及预警预报阈值之探讨[J]. 岩土力学,28(5):1055-1060. Gao H X, Yin K L, 2007. Discuss on the correlations between landslides and rainfall and threshold for landslide early-warning and prediction[J]. Rock Soil Mech,28(5):1055-1060(in Chinese).
- 郝翠,张迎新,王在文,等,2019. 最优集合预报订正方法在客观温度预报中的应用[J]. 气象,45(8):1085-1092. Hao C, Zhang Y X, Wang Z W, et al, 2019. Application of analog ensemble rectifying method in objective temperature prediction[J]. Meteor Mon,45(8):1085-1092(in Chinese).
- 黄丽萍,邓莲堂,王瑞春,等,2022. CMA-MESO 关键技术集成及应用[J]. 应用气象学报,33(6):641-654. Huang L P, Deng L T, Wang R C, et al, 2022. Key technologies of CMA-MESO and

- application to operational forecast[J]. *J Appl Meteor Sci*, 33(6): 641-654(in Chinese).
- 金巍,刘卫华,高凌峰,等,2020. 辽宁地区 ECMWF 模式气温预报检验及误差订正研究[J]. *气象与环境学报*, 36(6): 50-57. Jin W, Liu W H, Gao L F, et al, 2020. Research on the test and error correction in temperature forecasted by the ECMWF model in Liaoning Province[J]. *J Meteor Environ*, 36(6): 50-57(in Chinese).
- 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 for grid precipitation forecast[J]. *Torr Rain Dis*, 40(6): 617-625(in Chinese).
- 刘绿柳,杜灵敏,廖要明,等,2018. 基于时空统计降尺度的淮河流域夏季分月降水概率预测[J]. *气象*, 44(11): 1464-1470. Liu L L, Du L M, Liao Y M, et al, 2018. Probability prediction of monthly precipitation over Huaihe River Basin in China in summer based on spatio-temporal statistical downscaling method[J]. *Meteor Mon*, 44(11): 1464-1470(in Chinese).
- 刘梦娟,陈敏,2014. BJ-RUC 系统对北京夏季边界层的预报性能评估[J]. *应用气象学报*, 25(2): 212-221. Liu M J, Chen M, 2014. Evaluation of BJ-RUC System for the forecast quality of planetary boundary layer in Beijing Area[J]. *J Appl Meteor Sci*, 25(2): 212-221(in Chinese).
- 闵晶晶,2014. BJ-RUC 系统模式地面气象要素预报效果评估[J]. *应用气象学报*, 25(3): 265-273. Min J J, 2014. Evaluation on surface meteorological element forecast by Beijing Rapid Update Cycle System[J]. *J Appl Meteor Sci*, 25(3): 265-273(in Chinese).
- 沈学顺,王建捷,李泽椿,等,2020. 中国数值天气预报的自主创新发展[J]. *气象学报*, 78(3): 451-476. Shen X S, Wang J J, Li Z C, et al, 2020. China's independent and innovative development of numerical weather prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(3): 451-476(in Chinese).
- 税军峰,任婧宇,彭守璋,等,2019. 1901—2014 年黄土高原 1 km 分辨率月均气温和月降水量数据集[J]. *中国科学数据*, 4(4): 129-138. Shui J F, Ren J Y, Peng S Z, et al, 2019. A dataset of 1 km-spatial-resolution monthly mean temperature and monthly precipitation in the Loess Plateau from 1901 to 2014[J]. *China Sci Data*, 4(4): 129-138(in Chinese).
- 宋丽琼,田原,邬伦,等,2008. 日降水量的空间插值方法与应用对比分析——以深圳市为例[J]. *地理信息科学*, 10(5): 566-572. Song L Q, Tian Y, Wu L, et al, 2008. On comparison of spatial interpolation methods of daily rainfall data: a case study of Shenzhen[J]. *Geo-Inform Sci*, 10(5): 566-572(in Chinese).
- 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]. *Meteor Mon*, 44(8): 1020-1032(in Chinese).
- 王海霞,智协飞,2015. 基于 TIGGE 多模式降水量预报的统计降尺度研究[J]. *气象科学*, 35(4): 430-437. Wang H X, Zhi X F, 2015. Statistical downscaling research of precipitation forecast based on TIGGE multimodel ensemble[J]. *J Meteor Sci*, 35(4): 430-437(in Chinese).
- 王亚男,智协飞,2012. 多模式降水集合预报的统计降尺度研究[J]. *暴雨灾害*, 31(1): 1-7. Wang Y N, Zhi X F, 2012. Statistical downscaling of the precipitation multimodel ensemble forecast[J]. *Torr Rain Dis*, 31(1): 1-7(in Chinese).
- 邬伦,吴小娟,肖晨超,等,2010. 五种常用降水量插值方法误差时空分布特征研究——以深圳市为例[J]. *地理与地理信息科学*, 26(3): 19-24. Wu L, Wu X J, Xiao C C, et al, 2010. On temporal and spatial error distributions of five precipitation interpolation models: a case of Shenzhen[J]. *Geogr Geo-Inform Sci*, 26(3): 19-24(in Chinese).
- 吴链,2017. 三维插值方法在湖南省气温精细化预报中的应用与检验[J]. *气象与减灾研究*, 40(1): 30-35. Wu L, 2017. Application and verification of a three-dimensional interpolation method for refined temperature forecast in Hunan Province[J]. *Meteor Disaster Reduct Res*, 40(1): 30-35(in Chinese).
- 吴遥,唐红玉,刘颖,等,2020. 统计降尺度方法在华西南区秋季降水预测中的应用[J]. *气象*, 46(12): 1555-1564. Wu Y, Tang H Y, Liu Y, et al, 2020. Application of statistical downscaling model to autumn rainfall forecasting over Southwest China[J]. *Meteor Mon*, 46(12): 1555-1564(in Chinese).
- 叶金印,邱旭敏,黄勇,等,2013. 气象遥感图像及格点场重采样插值方法[J]. *计算机工程与应用*, 49(18): 237-241, 252. Ye J Y, Qiu X M, Huang Y, et al, 2013. Resampling interpolation methods of meteorological remote sensing image and grid point field[J]. *Comput Eng Appl*, 49(18): 237-241, 252(in Chinese).
- 袁宇锋,2017. 北京地区夏季降水变化特征及城市热岛对小时强降水的影响分析[D]. 南京:南京信息工程大学. Yuan Y F, 2017. Changes in summer precipitation and the impact of urban heat island on hourly precipitation extremes in Beijing Area[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology(in Chinese).
- 曾怀恩,黄声享,2007. 基于 Kriging 方法的空间数据插值研究[J]. *测绘工程*, 16(5): 5-8, 13. Zeng H E, Huang S X, 2007. Research on spatial data interpolation based on Kriging interpolation[J]. *Eng Surv Map*, 16(5): 5-8, 13(in Chinese).
- 张宏芳,巨晓璇,卢珊,等,2019. 精细化网格的降水预报解析方法对比[J]. *气象科技进展*, 9(3): 7-14. Zhang H F, Ju X X, Lu S, et al, 2019. Comparison of parsing methods for fine grid precipitation forecasting[J]. *Adv Met S&T*, 9(3): 7-14(in Chinese).
- 张永顺,2020. 基于机器学习的数值天气预报降水产品偏差订正方法研究[D]. 长沙:国防科技大学. Zhang Y S, 2020. Research on the method of correcting precipitation product deviation in numerical weather prediction based on machine learning[D]. Changsha: National University of Defense Technology(in Chinese).

- 赵声蓉,赵翠光,赵瑞霞,等,2012.我国精细化客观气象要素预报进展[J].气象科技进展,2(5):12-21. Zhao S R,Zhao C G,Zhao R X,et al,2012. The development of objective meteorological element forecast in China[J]. Adv Met S&T,2(5):12-21(in Chinese).
- 智协飞,王姝苏,周红梅,等,2016.我国地面降水的分级回归统计降尺度预报研究[J].大气科学学报,39(3):329-338. Zhi X F,Wang S S,Zhou H M,et al,2016. Statistical downscaling of precipitation forecasting using categorized rainfall regression[J]. Trans Atmos Sci,39(3):329-338(in Chinese).
- 仲跻芹,陈敏,范水勇,等,2010. AMDAR 资料在北京数值预报系统中的同化应用[J].应用气象学报,21(1):19-28. Zhong J Q,Chen M,Fan S Y,et al,2010. Assimilation application of AMDAR data to the operational NWP system of Beijing[J]. J Appl Meteor Sci,21(1):19-28(in Chinese).
- 仲跻芹,Guo Y R,张京江,2017.华北地区地基 GPS 天顶总延迟观测的质量控制和同化应用研究[J].气象学报,75(1):147-164. Zhong J Q,Guo Y R,Zhang J J,2017. A study of quality control and assimilation of ground-based GPS ZTD in North China[J]. Acta Meteor Sin,75(1):147-164(in Chinese).
- Bartier P M,Keller C P,1996. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW)[J]. Comput Geosci,22(7):795-799.
- Pardo-Igúzquiza E,Dowd P A,1998. The second-order stationary universal Kriging model revisited[J]. Math Geol,30(4):347-378.
- Seaman R S,1983. Objective analysis accuracies of statistical interpolation and successive correction schemes[J]. Aust Met Mag,31:225-240.

(本文责编:王蕾 何晓欢)