

王媛媛,赵玮,邢楠,等,2020. 基于 RMAPS-CHEM 模式产品的北京地区能见度预报订正[J]. 气象,46(3):403-411. Wang Y Y,Zhao W,Xing N,et al,2020. Visibility forecast correction based on RMAPS-CHEM model products in Beijing[J]. Meteor Mon,46(3):403-411(in Chinese).

基于 RMAPS-CHEM 模式产品的 北京地区能见度预报订正^{*}

王媛媛 赵 玮 邢 楠 付宗钰 李杭玥

北京市气象台,北京 100089

提 要: 基于 RMAPS-CHEM 空间分辨率为 3 km 的逐小时能见度预报产品,考虑到不同区域、不同时效及不同级别的预报误差不同,对北京区域各站点能见度观测值与模式预报结果进行比较和分时段逐级偏差订正,以 2016 年数据为样本,并对 2017 年数据检验。订正结果表明该统计订正方案对 2017 年能见度预报有较好的订正效果,不仅可以较好地改善其对高海拔地区的高估现象,也能更好地预报出低能见度现象。以 2017 年 1 月为例,北京观象台站能见度平均偏差及均方根误差都有所降低,0~24 h 分级预报准确率均有所提高。同时,对优化后结果进行合理插值,并应用于北京 iGrAPS 无缝隙智能网格预报分析系统,得到北京地区 1 km 空间分辨率的 0~96 h 时效能见度预报产品,从而为雾、霾等低能见度天气现象的预报提供支撑。

关键词: RMAPS-CHEM,能见度,偏差订正,预报检验

中图分类号: P457,P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.03.011

Visibility Forecast Correction Based on RMAPS-CHEM Model Products in Beijing

WANG Yuanyuan ZHAO Wei XING Nan FU Zongyu LI Hangyue

Beijing Weather Forecast Center, Beijing 100089

Abstract: This study conducted experiments based on the hourly visibility forecast products with spatial resolution of 3 km by RMAPS-CHEM. The data in 2016 were taken as a sample, and the model forecasts and observations from each site were compared. The bias was corrected step by step, by considering different forecasting errors in different regions, periods and levels. The data for 2017 were used for verification. The results show that statistical bias correction has a good correction effect on visibility forecast for 2017, which could not only improve the visibility overestimation in high altitude areas, but also better predict the low visibility phenomenon. Taking January 2017 as an example, the average deviation and root mean square error of Beijing Guanxiangtai Station were reduced, and the accuracy of 0—24 h grading forecasting was improved. Also, the optimized results were reasonably interpolated and applied to the Beijing Integrated Grid Analysis Prediction Systems (iGrAPS) to provide the visibility forecast product in Beijing for 0—96 h with 1 km spatial resolution, which could better support the forecast of low-visibility weather phenomena such as fog and haze.

Key words: RMAPS-CHEM, visibility, bias correction, forecast verification

^{*} 北京市气象局科技项目(BMBKJ201701010)、中国气象局气象预报业务关键技术的发展专项(YBGJXM(2017)3-01)共同资助

2018年9月19日收稿; 2019年10月8日收修定稿

第一作者:王媛媛,主要从事数值模式发展与应用研究. Email:wyy19890103@163.com

通讯作者:赵玮,主要从事北京地区灾害性天气研究. Email:zhaowei308@sina.com

引言

近年来,随着工业经济的发展和城市范围的扩大,北京的气候、大气环境(空气质量)和大气能见度也在不断发生变化,大气能见度及城市空气污染问题日益受到关注(王淑英等,2003;赵秀娟等,2016)。目前能见度预报业务不管是依赖于主观经验分析预测,还是回归建模,或是数值预报产品释用(吴彬贵等,2017),预报效果及业务化程度均不理想,对大气能见度的预报研究仍然是近年来气象预报中的一个难点和热点(李沛等,2012;夏冬等,2014;周须文等,2014;倪江波等,2015;周广强等,2016;侯梦玲等,2017;夏凡和李昌义,2018)。北京市气象局基于北京地区快速更新循环同化预报系统、WRF-CHEM 模式和优选的能见度参数化方案,建立了北京区域环境气象数值预报系统(RMAPS-CHEM),该系统集空气质量、能见度和气象要素预报为一体,可提供环境气象预报所需的多种要素参考。其优势在于它是一个在线的、全耦合的包括多尺度、多过程的模式系统,既包含了大气化学过程,又避免了由离线模式引起的空气质量模拟误差。

根据全国智能网格气象预报业务发展有关要求,北京市气象台依托智能化无缝隙格点分析预报系统(Integrated Grid Analysis Prediction Systems, iGrAPS)建设,初步建立 0~10 d 智能网格预报产品体系,实现站点和格点一体化业务运行,并发布智能网格预报。目前,iGrAPS 可以提供 0~10 d 空间分辨率达 1 km 的智能网格预报,最高时间分辨率为 1 h(0~24 h:1 h,24~240 h:3 h),预报要素包括天气现象、降水量、气温、风、相对湿度、能见度等共 20 种。RMAPS-CHEM 虽然能对京津冀及周边地区能见度进行预报,但其预报准确度以及时空分辨率尚不足以满足精细化预报需求。为了满足北京 iGrAPS 应用需求,提供北京地区高时空分辨率的能见度格点预报产品,本研究基于 RMAPS-CHEM 模式 0~96 h 空间分辨率为 3 km 的逐小时能见度预报产品,以 2016 年数据为样本,考虑不同区域、不同时效、不同级别预报误差的不同,对各站点模式预报结果与观测进行比较和分时段逐级订正,并以 2017 年结果为检验,评估其预报效果,提供 0~96 h 时段内的高时空分辨率能见度网格预报产品(96~240 h 能见度基于欧洲中心 EC 模式的输出

采用多元动态统计模型预报方法,本文中不作介绍),从而进一步为雾、霾等低能见度天气现象的预报提供支撑。

1 数据和方法

1.1 模型、数据介绍

新一代快速更新多尺度资料分析和预报系统(RMAPS)的化学子系统(RMAPS-CHEM),在北京区域环境气象数值预报系统 BREMPs V1.0 的基础上建立而成,是以 WRF-CHEM V3.3.1 为积分主模式(Grell et al, 2005),由 RMAPS-ST 提供气象预报场。由于其在线耦合运行模式可同步计算物理和化学过程,从而可有效减少由于时间和空间插值造成的误差。其采用 Lambert 地图投影方式,预报范围覆盖华北大部分地区,空间分辨率为 9 km,同时还嵌套有 3 km 分辨率内层,覆盖京津冀地区,垂直方向分为 30 层,最低层中间高度距地面约 18 m,1500 m 以下 13 层,模式层顶为 50 hPa。系统已经正式通过中国气象局业务准入,实现业务运行。

RMAPS-ST 系统是北京市气象局基于 WRF 模式和 WRFDA 三维变分同化模块构建而成,在同化了大量常规气象观测资料、GPS 水汽和飞机观测的气象数据基础上,进一步同化了华北地区 6 部多普勒天气雷达的径向风速度和反射率因子资料,采用新的陆面参数化方案,提高了对华北地区气象要素场的能力(陈敏等,2011;魏东等,2011;刘梦娟和陈敏,2014;闵晶晶,2014),从而为 RMAPS-CHEM 提供更好的气象背景场,提高其对污染物时空演变的预报能力。RMAPS-CHEM 系统选用的主要物理、化学过程方案设置:积云对流参数化方案采用 Grell-3d 方案,微物理过程采用 WSM6 显式方案,RRTM 长波辐射方案,Goddard 短波辐射方案,边界层方案为 YSU 方案,模式陆面过程采用 Noah 参数化方案。气相化学过程采用 CBMZ 方案(Zaveri and Peters, 1999),光解过程由 Fast-J 方法在线计算(Wild et al, 2000),气溶胶过程采用分档分类的 MOSAIC 模型(Zaveri et al, 2008)。

为了满足业务应用计算简单但精度高的需求,对于能见度的计算,通过调研、对比北京及周边地区的研究成果,选用 Chen et al(2012)在天津武清地区通过野外试验观测建立的能见度参数化方案。该方

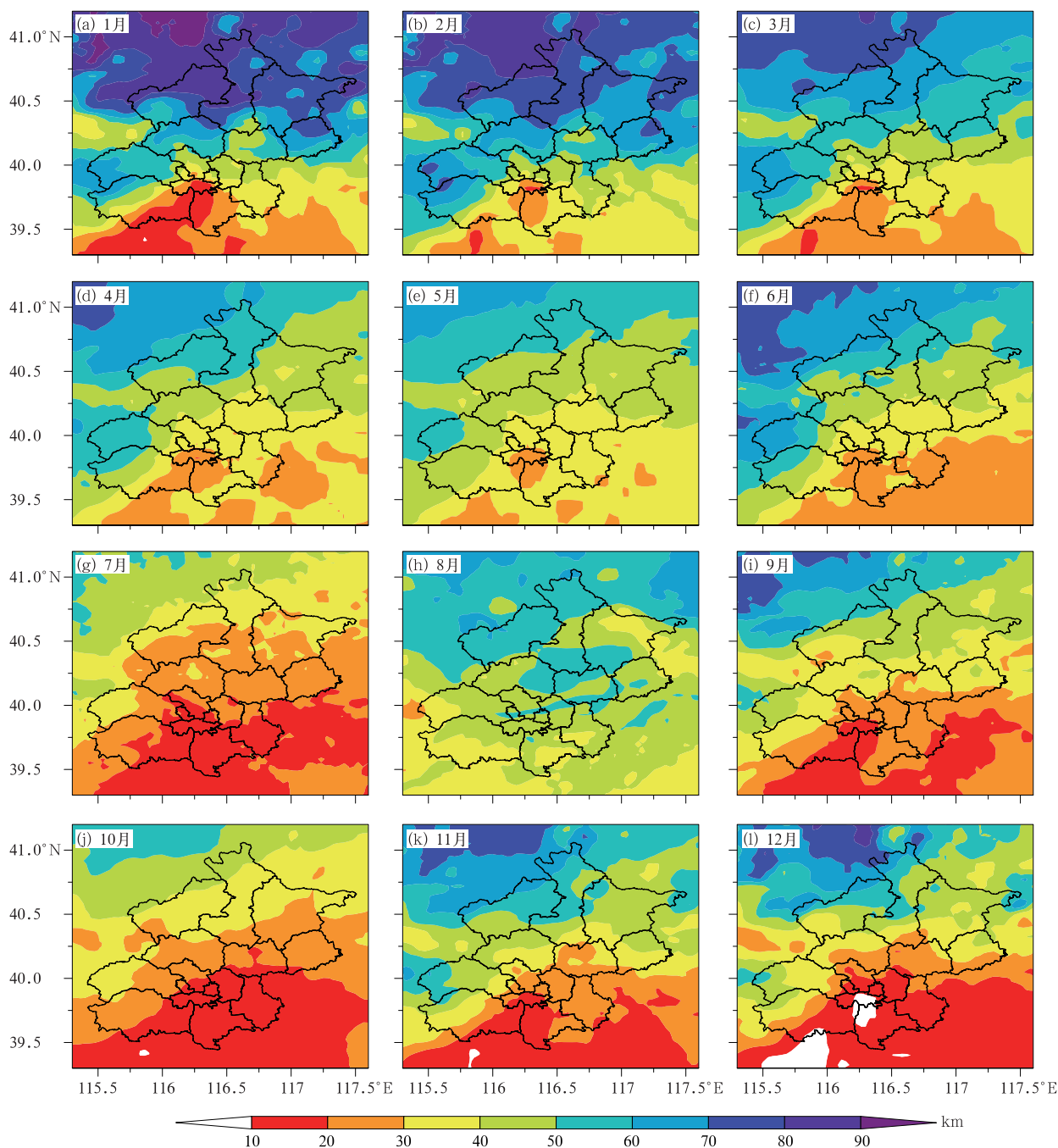


图3 RMAPS-CHEM 预报的北京地区 2016 年 1—12 月(a~l)月平均能见度分布(24 h 时效)

Fig. 3 Distribution of monthly average visibility in Beijing from January to December (a-l) 2016 of the RMAPS-CHEM model result (24 h lead time)

排放物,使大气中的气溶胶粒子不断增多,降低了城市大气能见度;同时由于气溶胶粒子增加,又为城市雾、降水的增多提供了有利条件,从而又影响了能见度,再加上地形造成的局地环流偏南风出现频率在一天中较其他地区要高,这样有利于周边城市污染物向北京地区输送,它们共同作用的结果使得该地区成为低能见度的高发区。而因北部、西部地区人

口密度相对较低,东北部为密云水库,地势开阔;另外,官厅水库三峡河谷、八达岭、昌平风口等自然环境所形成的气象条件(即偏北风频率高),且风速较大,因而发生低能见度的概率较少(赵习方等,2002)。因此,整体而言北京地区低能见度表现为由西北向东南递减的区域分布格局,这是与实况相符合的。从时间变化上来看,冬季能见度明显低于其他季节,这与北

京地区冬季雾-霾多发密切相关。

图 4 给出了北京地区 20 个国家级观测站 2016 年月平均能见度预报值与观测值的时间序列,通过对比可以看出预报值与观测值在月变化趋势上较为一致,但在量值上存在较大差异。对于高海拔地区,如佛爷顶、汤河口、上甸子观测站,存在较大的高估现象,而对于南部丰台、大兴、房山等观测站,虽然量值较为接近,但仍存在一定偏差,尤其是对于低能见度模拟偏高,这是由于目前模式对雾-霾期间的气溶胶浓度模拟偏低且对高相对湿度模拟偏干造成的(Wang et al, 2012; 2018)。另外,模式预报的能见

度最大值为 100 km,这与观测值的上限并不一致,在订正时需进行处理。

2.2 订正结果

提取各站点、各时效、各级别预报值与观测值,建立样本,假设二者之间为线性关系,通过建立统计模型,得到各站点、各时效、各级别能见度观测值与预报值间的拟合系数 A 和 B 。由于观测能见度一般设定 35 km 为上限,为方便比较,模式预报能见度高于 35 km 的统一设定为 35 km。其中,以观象台为例,各系数如表 1 所示。

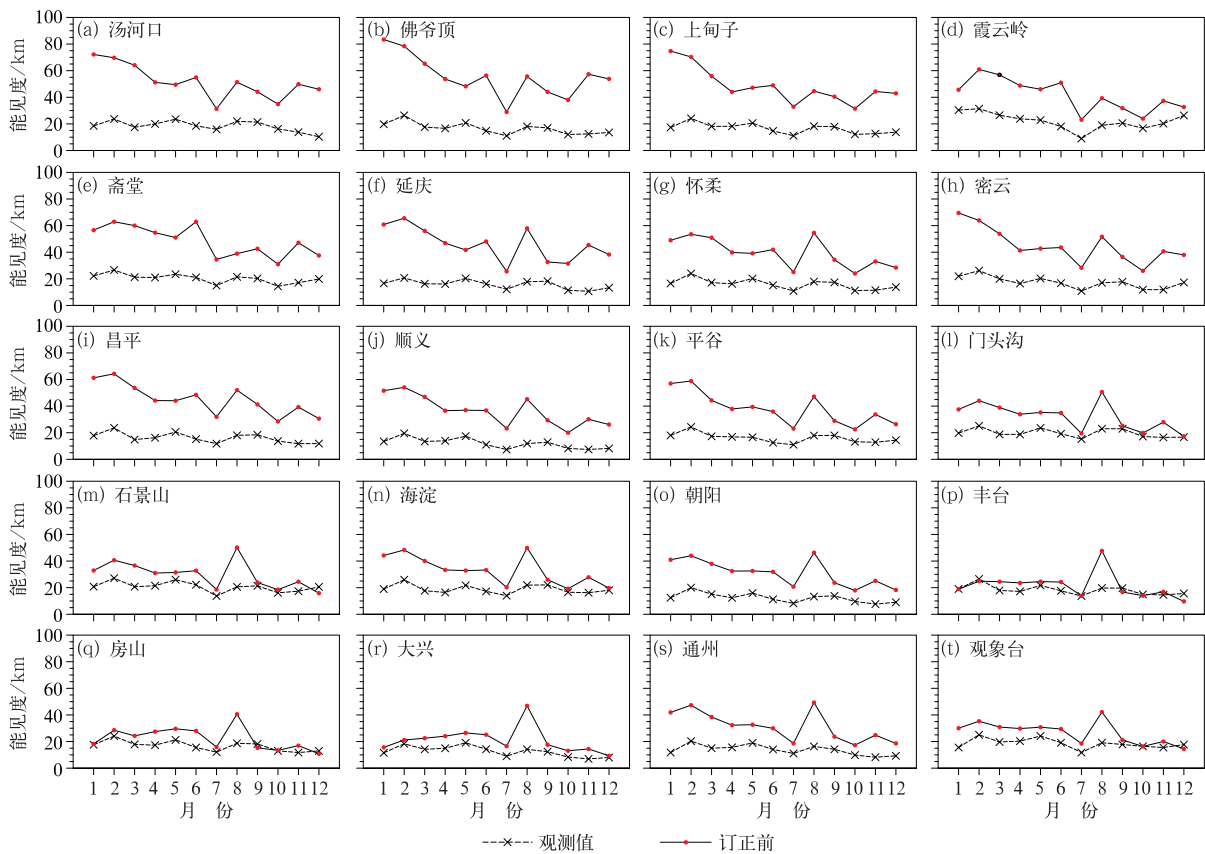


图 4 北京地区 20 个国家级观测站(a~t)2016 年月平均能见度模式预报结果与观测值比较
Fig. 4 Comparison of monthly average visibility in 2016 from model results and observation at 20 national sites (a~t) in Beijing

表 1 观象台不同时段不同级别的能见度拟合系数

时效/h	[0, 2) km		[2, 5) km		[5, 10) km		[10, 35] km	
	A	B	A	B	A	B	A	B
0~24	0.026	0.377	0.336	2.678	0.365	0.589	0.342	5.625
24~48	0.019	1.156	0.013	3.468	0.054	5.816	0.159	17.345
48~72	0.301	0.102	0.030	3.727	0.055	5.896	0.216	16.238
72~96	0.369	0.326	0.190	2.470	0.084	7.286	0.245	15.510

图 5 以观象台 2017 年 1 月为例,给出了观测能见度与预报值的逐日变化。可以看出,不管是 24、48、72 还是 96 h 时效,订正前和订正后的能见度均可以很好地反映出与观测能见度一致的趋势,但在数值和量级上存在偏差。图 6 给出了观象台 2017 年 1 月观测能见度与预报值之间的平均偏差 (MBE) 和均方根误差 (RMSE),表 2 统计了观象台 2017 年 1 月不同时段能见度分级预报准确率。对比可发现,不管订正前还是订正后,短时效的能见度预报的 MBE 和 RMSE 总是低于更长时效的预报

结果,因此,总体来看,短时效能见度预报结果总是优于更长时效的预报结果。对于能见度大于 10 km 的情况,RMAPS-CHEM 预报的准确率可达 80%,对于低于 10 km 的情况,预报准确率接近 60%,随着能见度降低,准确率逐级下降。以 24 h 时效为例,2017 年 1 月北京观象台站能见度订正后,MBE 及 RMSE 都有所降低,MBE 由 2.71 km 降为 0.88 km,RMSE 由 16.79 km 降为 8.26 km。0~24 h 分级预报准确率也均有所提高,0~2 km 级别内准确率由 0.38 增至 0.41,2~5 km 级别内准确率

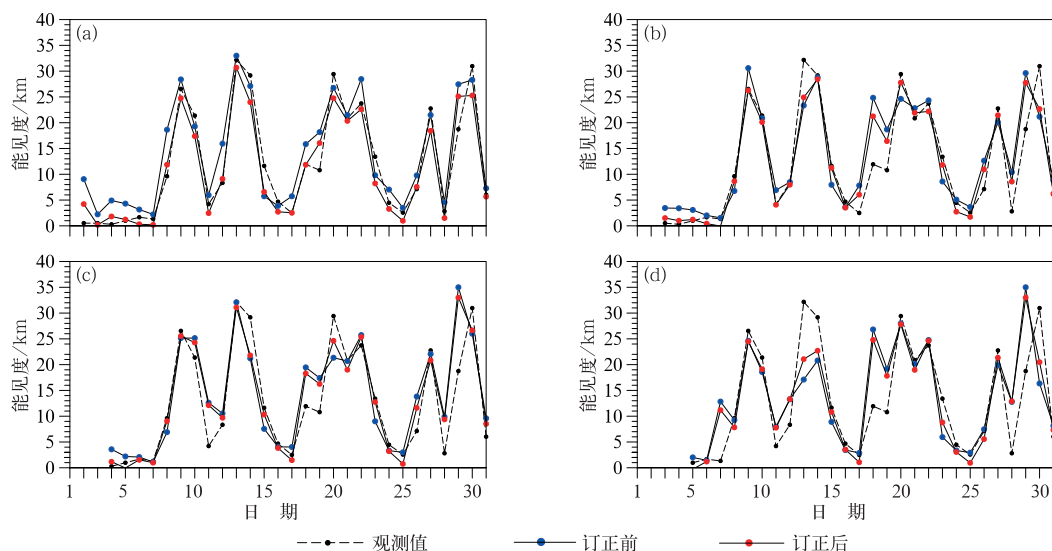


图 5 观象台 2017 年 1 月观测能见度与(a)24 h,(b)48 h,(c)72 h,(d)96 h 时效预报值的逐日变化

Fig. 5 Daily variation of visibility from observation and model results of (a) 24 h, (b) 48 h, (c) 72 h, (d) 96 h at Guanxiangtai Station in January 2017

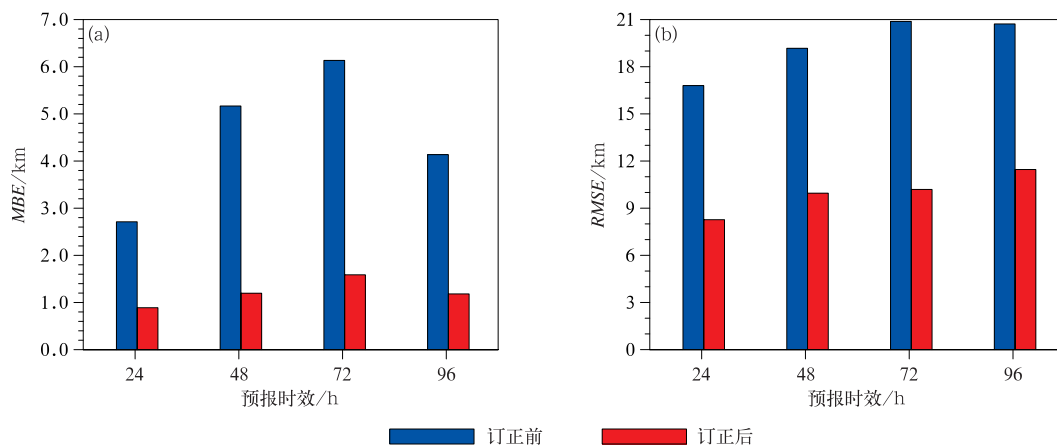


图 6 观象台 2017 年 1 月观测能见度与预报值之间(a)MBE,(b)RMSE 的统计特征

Fig. 6 Statistical features of the observed visibility and the model forecasts at Guanxiangtai Station in January 2017

(a) MBE, (b) RMSE

表 2 观象台 2017 年 1 月不同时段能见度分级预报准确率

分级/km	0~24 h		24~48 h		48~72 h		72~96 h	
	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后	订正前	订正后
[0, 2)	0.38	0.41	0.31	0.33	0.31	0.30	0.27	0.27
[2, 5)	0.45	0.51	0.36	0.39	0.40	0.44	0.39	0.41
[5, 10)	0.58	0.67	0.54	0.56	0.62	0.65	0.52	0.55
[10, 35]	0.83	0.84	0.82	0.82	0.81	0.81	0.78	0.78

率由 0.45 增至 0.51,5~10 km 级别内准确率由 0.58 增至 0.67,10~35 km 级别内准确率由 0.83 增至 0.84。值得注意的是,由于偏差订正很大程度上依赖于原模式预报结果,因此虽然订正后结果有一定改进,但数值上差异并不太大,改进能力仍然有限。

2.3 典型个例分析

2017 年 1 月 1—7 日,北京地区高空为偏西气流控制,无明显冷空气活动,地面多偏南风,同时低层有明显的逆温,近地面层湿度大并长时间维持,风速小,不利于污染物的扩散。由于高低空形势场较为稳定,北京地区出现了持续低能见度天气,尤其是北京南部区域。图 7 显示了 2 日 21 时至 3 日 08 时观象台、房山、大兴、通州四站的小时能见度,进一步对该时段的能见度预报进行检验。可以看出,订正前预报值虽也能反映该时段能见度低,但数值和级

别上仍存在一定偏差,通过订正预报能见度可以很好地与观测值匹配,平均偏差大大降低,观象台、房山、大兴、通州四站的能见度平均偏差分别由 0.88、0.83、1.03、0.98 km 降到-0.02、0.02、0.16、0.11 km,订正后的结果可以更好、更准确地反映该时段的能见度情况。

2.4 全年应用分析

为了进一步对上述订正方法进行检验,将该订正方法应用于北京 20 个国家级观测站 2017 年全年的能见度预报。图 8 给出各站 24 h 时效全年能见度预报的统计结果。可以看出,通过订正各站能见度平均偏差和均方根误差均有所降低,不仅可以降低对高海拔站能见度的高估,也可以改进对平原地区能见度的预报。

通过检验,上述订正方法可以改进模式对能见度的预报结果。因此将上述订正方法对每个时次的

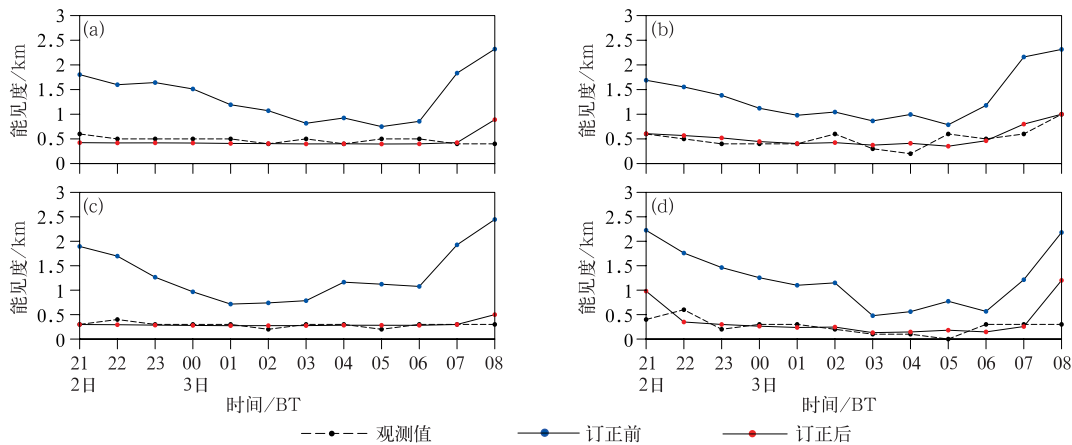


图 7 2017 年 1 月 2 日 21 时至 3 日 08 时(a)观象台、(b)房山、(c)大兴、(d)通州站小时能见度时间序列(预报结果为 24 h 时效)

Fig. 7 Time series of hourly visibility at (a) Guanxiangtai Station, (b) Fangshan Station, (c) Daxing Station, (d) Tongzhou Station from 21:00 BT 2 to 08:00 BT 3 January 2017 (24 h lead time)

空间分辨率为 3 km 格点结果进行应用,这里将各观测站的拟合系数作为其所在区域所有格点的订正系数对原预报结果进行订正。由于克里金插值方法考虑了空间属性的变异分布,可以有效地消除由于采样不均匀造成的误差,使结果更符合实际要求(姜江等,2019),这里采用克里金插值方法对空间结果进行插值,得到空间分辨率为 1 km 的能见度格点预报产品,以满足 iGrAPS 平台使用要求。图 9 以 24 h 时效 2017 年 1 月平均值为例,给出了订正后格点产品示例。

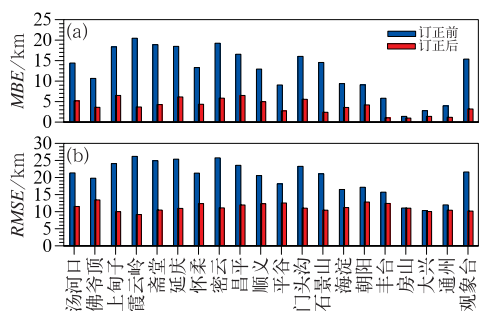


图 8 北京 20 个国家级观测站 24 h 时效
2017 年的能见度预报统计
(a) MBE, (b) RMSE

Fig. 8 Statistics of visibility forecasts with
24 h lead time for the 20 national
observation stations in Beijing in 2017
(a) MBE, (b) RMSE

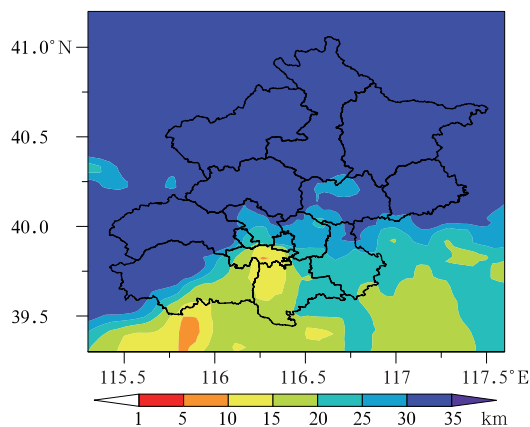


图 9 订正后的 2017 年 1 月北京地区
能见度平均值空间分布
(分辨率 1 km, 24 h 时效)

Fig. 9 Spatial distribution of corrected average
visibility in Beijing in January 2017
(resolution: 1 km; lead time: 24 h)

3 结 论

为了满足北京 iGrAPS 无缝隙智能网格预报分析系统应用需求,提供北京地区高时空分辨率的能见度格点预报产品,本研究基于 RMAPS-CHEM 空间分辨率为 3 km 的逐小时能见度预报产品考虑到不同区域、不同时效及不同级别的预报误差不同,对北京各站点能见度观测值与模式预报结果进行比较,进行分时段逐级偏差订正,以 2016 年数据为样本,以 2017 年数据为检验,主要结论如下:

(1)总体来看,无论订正前后,短时时效能能见度预报结果总是优于更长时效的预报结果。对于能见度大于 10 km 的情况,RMAPS-CHEM 预报的准确率可达到 80%,对于低于 10 km 的情况,预报准确率接近 60%,随着能见度降低,准确率逐级下降。

(2)该订正方案对 2017 年能见度预报有较好的订正效果,以 24 h 时效为例,2017 年 1 月北京观象台站能见度订正后,MBE 及 RMSE 都有所降低,MBE 由 2.71 km 下降为 0.88 km, RMSE 由 16.79 km 下降为 8.26 km, 0~24 h 分级预报准确率也均有所提高。

(3)进一步对 2017 年 1 月 1—7 日低能见度个例进行分析,发现订正后,观象台、房山、大兴、通州南部四个站点的模式预报可以更好、更准确地反映该时段的能见度情况,更接近于观测值。

对优化后结果进行克里金插值,并应用于北京 iGrAPS 无缝隙智能网格预报分析系统,得到北京地区 1 km 空间分辨率的 0~96 h 时效能能见度预报产品,从而为雾、霾等低能见度天气现象的预报提供支撑。值得注意的是,虽然偏差订正可以在一定程度上改进原模式对能见度的预报,但由于结果仍然依赖于模式性能,改进能力仍然有限。因此今后仍需在能见度参数化方案方面进行进一步研究。

致谢:本研究工作得到中国气象局北京城市气象研究院徐敬高级工程师的大力支持,在此表示感谢。

参考文献

- 陈敏,范水勇,郑祚芳,等,2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探[J]. 气象学报, 69(1): 181-194. Chen M, Fan S Y, Zheng Z F, et al, 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast[J]. Acta Meteor Sin, 69(1): 181-194 (in Chinese).
- 侯梦玲,王宏,赵天良,等,2017. 京津冀一次重度雾霾天气能见度及边

- 界层关键气象要素的模拟研究[J]. 大气科学, 41(6):1177-1190.
- Hou M L, Wang H, Zhao T L, et al, 2017. A modeling study of the visibility and PBL key meteorological elements during a heavy fog-haze episode in Beijing-Tianjin-Hebei of China[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6):1177-1190(in Chinese).
- 姜江, 郭文利, 王春玲, 2019. 2007—2015 年北京地区能见度时空变化特征[J]. 气象与环境学报, 35(1):45-52. Jiang J, Guo W L, Wang C L, 2019. Temporal and spatial characteristics of visibility in Beijing from 2007 to 2015[J]. J Meteor Environ, 35(1):45-52(in Chinese).
- 李沛, 王式功, 尚可政, 等, 2012. 基于神经网络逐级分类建模的北京地区能见度预报[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 48(3):52-57. Li P, Wang S G, Shang K Z, et al, 2012. Visibility forecast in Beijing through artificial neural network based on hierarchical classification method[J]. J Lanzhou Univ(Nat Sci), 48(3):52-57(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).
- 闵昌晶, 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).
- 倪江波, 李文才, 尚可政, 等, 2015. 华北区域性能能见度天气的自动识别及预报[J]. 干旱气象, 33(1):174-179. Ni J B, Li W C, Shang K Z, et al, 2015. Automatic identification and prediction of low visibility weather in North China[J]. J Arid Meteor, 33(1):174-179(in Chinese).
- 王淑英, 张小玲, 徐晓峰, 2003. 北京地区大气能见度变化规律及影响因素统计分析[J]. 气象科技, 31(2):109-114. Wang S Y, Zhang X L, Xu X F, 2003. Analysis of variation features of visibility and its effect factors in Beijing[J]. Meteor Sci Technol, 31(2):109-114(in Chinese).
- 魏东, 尤凤春, 杨波, 等, 2011. 北京快速更新循环预报系统(BJ-RUC)要素预报质量评估[J]. 气象, 37(12):1489-1497. Wei D, You F C, Yang B, et al, 2011. Assessment and analysis of meteorological elements forecasted by Beijing Rapid Update Cycle Forecast System[J]. Meteor Mon, 37(12):1489-1497(in Chinese).
- 吴彬贵, 张建春, 李英华, 等, 2017. 天津港秋冬季低能见度数值释用预报研究[J]. 气象, 48(7):863-871. Wu B G, Zhang J C, Li Y H, et al, 2017. Research on numerical interpretative forecast for low-visibility at Tianjin Port in autumn and winter[J]. Meteor Mon, 48(7):863-871(in Chinese).
- 夏冬, 吴志权, 谭浩波, 等, 2014. 广东省能见度自动观测系统资料评估分析与订正[J]. 气象科技, 42(1):68-72. Xia D, Wu Z Q, Tan H B, et al, 2014. Analysis and correction of visibility measured by automatic observing system in Guangdong[J]. Meteor Sci Technol, 42(1):68-72(in Chinese).
- 夏凡, 李昌义, 2018. 基于 3 种能见度方案山东地区雾天气预报试验研究[J]. 气象与环境学报, 34(3):48-57. Xia F, Li C Y, 2018. Fog weather forecast experiments over Shandong Province based on three visibility schemes[J]. J Meteor Environ, 34(3):48-57(in Chinese).
- 赵习方, 徐晓峰, 王淑英, 等, 2002. 北京地区低能见度区域分布初探[J]. 气象, 28(11):55-57. Zhao X F, Xu X F, Wang S Y, et al, 2002. A study on regional distribution of low horizontal visibility in Beijing area[J]. Meteor Mon, 28(11):55-57(in Chinese).
- 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬, 2019. 霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估[J]. 环境科学, 40(4):1688-1696. Zhao X J, Li Z M, Xu J, 2019. Modification and performance tests of visibility parameterizations for haze days[J]. Environ Sci, 40(4):1688-1696(in Chinese).
- 赵秀娟, 徐敬, 张自银, 等, 2016. 北京区域环境气象数值预报系统及 PM_{2.5} 预报检验[J]. 应用气象学报, 27(2):160-172. Zhao X J, Xu J, Zhang Z Y, et al, 2016. Beijing regional environmental meteorology prediction system and its performance test of PM_{2.5} concentration[J]. J Appl Meteor Sci, 27(2):160-172(in Chinese).
- 周广强, 谢英, 吴剑斌, 等, 2016. 基于 WRF-Chem 模式的华东区域 PM_{2.5} 预报及偏差原因[J]. 中国环境科学, 36(8):2251-2259. Zhou G Q, Xie Y, Wu J B, et al, 2016. WRF-Chem based PM_{2.5} forecast and bias analysis over the East China Region[J]. China Environ Sci, 36(8):2251-2259(in Chinese).
- 周须文, 时青格, 贾俊妹, 等, 2014. 低能见度雾的分级预报方法研究[J]. 热带气象学报, 30(1):161-166. Zhou X W, Shi Q G, Jia J M, et al, 2014. A method for classifying and forecasting low-visibility fog[J]. J Trop Meteor, 30(1):161-166(in Chinese).
- Chen J, Zhao C S, Ma N, et al, 2012. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain[J]. Atmos Chem Phys, 12(11):4935-4950.
- Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, et al, 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model[J]. Atmos Environ, 39(37):6957-6975.
- Wang T J, Jiang F, Deng J J, et al, 2012. Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta Region[J]. Atmos Environ, 58:70-83.
- Wang Y, Wu Z J, Ma N, et al, 2018. Statistical analysis and parameterization of the hygroscopic growth of the sub-micrometer urban background aerosol in Beijing[J]. Atmos Environ, 175:184-191.
- Wild O, Zhu X, Prather M J, 2000. Fast-J: accurate simulation of in- and below-cloud photolysis in tropospheric chemical models[J]. J Atmos Chem, 37(3):245-282.
- Zaveri R A, Easter R C, Fast J D, et al, 2008. Model for simulating aerosol interactions and chemistry (MOSAIC) [J]. J Geophys Res: Atmos, 113(D13):D13204, DOI:10.1029/2007JD008782.
- Zaveri R A, Peters L K, 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications[J]. J Geophys Res: Atmos, 104(D23):30387-30415.