

徐旗, 吴其重, 李冬青, 等. 2020. 北京市城六区 2018 年空气质量数值预报效果评估 [J]. 气候与环境研究, 25(6): 616–624. XU Qi, WU Qizhong, LI Dongqing, et al. 2020. Assessment of the Air Quality Numerical Forecast in the Main District of Beijing (2018) [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 25 (6): 616–624. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19158

北京市城六区 2018 年空气质量数值预报效果评估

徐旗¹ 吴其重¹ 李冬青¹ 王晓彦² 王辉¹
王蓉蓉¹ 肖晗¹ 陈焕盛³

¹ 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 北京 100875

² 中国环境监测总站国家环境保护环境监测质量控制重点实验室, 北京 100012

³ 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘 要 为更好地改进提高模式预报性能, 评估了新一代 WRF-CMAQ (Weather Research and Forecasting model-Community Multi-scale Air Quality model) 模式系统的不同网格分辨率预报产品对 2018 年北京市城六区空气质量预报结果的影响。分析表明: (1) 基于首要污染物为 PM_{2.5} 的预报数据集, 模式系统 1 km 网格分辨率 (BJ01) 和 3 km 网格分辨率 (BJ03) 等级准确率优于官方预报结果, 模式系统 BJ01 和 BJ03 区域 4 天内预报等级准确率均达到 50% 以上, 24 h 内准确率达 60% 以上, 官方预报 24 h 内等级准确率为 59%。本文引入预报综合评分法, 基于 IAQI (Individual Air Quality Index) 和等级级别正确性双因素的预报综合评分结果显示, 模式系统 BJ03 得分 75.0 分最高, BJ01 次之, 优于官方预报结果, 模式 9 km 网格分辨率 (BJ09) 得分 69.1 分最低。(2) 基于模式系统 2018 年长时间序列预报结果分析表明: 模式系统预报的 PM_{2.5} 浓度与实测的变化趋势较为一致, 其中模式系统 BJ03 结果与实测 PM_{2.5} 浓度相关系数达 0.76, 覆盖区域较大的 BJ03 和 BJ09 对 PM_{2.5} 浓度峰值模拟较好。中重度污染过程的 PM_{2.5} 浓度峰值模式预测误差表明, 不同分辨率模式预报峰值误差的变化趋势基本一致, 覆盖区域更大的粗分辨率模式预报结果高于覆盖区域小的细分辨率模式预报结果。与预报综合评分结果一致, 统计分析结果也表明 BJ03 区域预报效果最好, 平均偏差为 0.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; 而 BJ01 区域预报整体偏低, BJ09 区域预报整体偏高。(3) 基于不同网格分辨率预报效果的空间差异性分析表明: 同一站点在不同分辨率上表现不一致, BJ01 区域中农展馆站表现最好, BJ03 区域中万柳站表现最好, BJ09 区域中东四站表现最好。

关键词 空气质量预报 CMAQ 模式 PM_{2.5} 效果评估

文章编号 1006-9585(2020)06-0616-09

中图分类号 X513

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19158

Assessment of the Air Quality Numerical Forecast in the Main District of Beijing (2018)

XU Qi¹, WU Qizhong¹, LI Dongqing¹, WANG Xiaoyan², WANG Hui¹,
WANG Rongrong¹, XIAO Han¹, and CHEN Huansheng³

¹ College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875

² State Environmental Prediction Key Laboratory of Quality Control in Environmental Monitoring, China National

收稿日期 2019-10-12; 网络预出版日期 2020-07-12

作者简介 徐旗, 女, 1994 年出生, 硕士, 研究方向为空气质量数值模拟。E-mail: xuq@mail.bnu.edu.cn

通讯作者 吴其重, E-mail: wqizhong@bnu.edu.cn

资助项目 国家重点研究计划项目 2017YFC0209805、2017YFC0212100, 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目, 北京高精尖学科“陆地表层学”项目

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2017YFC0209805 and 2017YFC0212100), the Fundamental Research Funds for the Central University, Beijing Advanced Innovation Program for Land Surface Science

Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012

3 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In order to improve model performance, the impact of the new generation WRF-CMAQ (Weather Research and Forecasting model-Community Multi-scale Air Quality model) air quality model system performance of different resolutions for the main district of Beijing was evaluated in 2018. Based on the data set, with PM_{2.5} as the primary pollutant, forecast grade accuracy of BJ01 (resolution of 1 km) and BJ03 (resolution of 3 km) domains were found to be better compared to that of the official forecast. More than 50% accuracy rate was achieved with BJ01 and BJ03 domains. Compared with the accuracy rate on the first day of official forecast (59%), accuracy rate using the proposed system reached over 60%. A comprehensive scoring method based on the IAQI (Individual Air Quality Index) accuracy and the grade accuracy is adopted. Results show that BJ03 domain achieved the highest score (75.0 points) followed by BJ01 domain. The official forecast scored 70.6 points while BJ09 (resolution of 9 km) domain achieved the lowest score of 69.1 points. Based on the analysis of the prediction results of 2018 long time series of the model system, the model's predicted PM_{2.5} concentration is observed to be consistent with that of the observation trend. In addition, the analysis reveals that the correlation coefficient between the model result of BJ03 domain and that of the observation is 0.76. Good peak value simulation performances are achieved in BJ03 and BJ09 domains where there are large area coverages. Similar error trends in peak value simulation of the three model domains are observed. It is evident that the results from the model with coarse resolution are higher than that of the model with fine resolution, which covers a smaller area. Consistent with the forecast comprehensive score, the statistical analysis results reveal that BJ03 domain prediction has the best performance with an average deviation of 0.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Compared with the observation forecast, BJ09 domain forecast is generally higher whereas BJ01 domain forecast is observed to be lower. Spatial difference analysis of different resolutions from the same site yields inconsistent results. This study shows that best performance is achieved by BJ01, BJ03, and BJ09 areas for the Nongzhanguan, Wanliu, and Dongsì stations, respectively.

Keywords Air quality forecast, CMAQ model, PM_{2.5}, Model performance

1 引言

北京市由于三面环山, 西北高东南低的簸箕状地形使得污染物易进不易出, 大气扩散条件差, 容易造成污染物聚集 (王琪等, 2014)。全市平原面积仅 6000 km^2 左右, 却承载了超过 500 万辆的机动车、超过 2000 万的人口以及相应的大量的生产、生活活动, 大气污染物排放量较大 (王占山等, 2016), 而北京市城六区仅占整个北京总面积的 8%, 却承载了 60% 的人口, 70% 的产业, 因此城六区是北京大气污染防治关注点。

为治理大气污染, 2013 年北京市实施了《2013~2017 年清洁空气行动计划》, 针对燃煤、机动车和扬尘等提出一系列治理措施 (王占山等, 2016), 并且明确要求环境部门建立重污染空气质量预警体系。2018 年北京市制定实施新一轮大气污染防治行动计划, 同时还制定了新的《北京市空气重污染应急预案 (2018 年修订)》, 将空气重污染应急纳入全市应急体系统一管理。城市空气质

量预报对大气污染物减排、重大活动期间空气质量保障以及公众的出行和健康都具有重要的作用。目前空气质量预报主要采用空气质量数值预报方法, 而在空气质量数值模式应用前, 模式的预报效果评估工作非常重要。

国内外学者已开展大量空气质量预报效果评估的研究工作。Fox (1984)、Hanha (1988) 和 Hanna (1989) 提出了评估空气质量模型的综合性能指标, 建议采用分数偏差、归一化均方误差、几何平均、几何方差、相关系数等评价模型性能。Chang and Hanna (2004) 总结了空气质量评估常用图表, 分类归纳散点图、Q-Q 图、残差箱式图以及时间序列图适用范围和优缺点。Taylor and Karl (2001) 提出了泰勒图, 该图可以在一个图中反映出三项统计指标: 归一化标准差、归一化均方根误差和相关系数, 该方法最初应用于天气预报和气候模型, 但近年来也有学者采用该方法用于空气质量模式的多模式效果评估 (Wu et al., 2012)。国内对空气质量效果评估也展开了大量研究, 多采用多种方法综合

分析(陈焕盛等, 2013; 程念亮等, 2015; 朱莉莉等, 2015; 王辉等, 2016; 马琳等, 2017; 麦健华等, 2018; 杨关盈等, 2018; 张金谱等, 2018)。陈焕盛等(2013)等利用时间序列、散点图、泰勒图以及统计值的计算对空气质量多模式系统在广州 PM10 预报效果进行了评估, 研究表明预报效果均处于可接受范围内, 部分模式可达到优秀水平, 但同时各模式在郊区均预测偏高而在市区偏低; 总体上, 模式在广州郊区的 PM10 预报效果优于市区。也有学者提出新的评估方法, 杨晓春等(2015)参考中国气象局发布的《城市空气质量预报检验评估和考核办法(试行)》提出空气质量预报考核评分, 对西安市空气质量预报系统 XAWRF-CMAQ 的产品进行业务化评估。

现阶段, 北京市空气质量的预报体系以空气质量多模式预报和统计预报结果为基础, 结合预报员个人经验, 并根据天气形势和空气质量实况进行研判(即人工预报方法)得出结果, 以此作为官方预报结果通过公众号、官方微博等渠道发布(王占山等, 2016)。本文利用多种方法来定性、定量评估新一代模式系统 WRF-CMAQ 预报系统的 PM2.5 预报效果, 将为未来进一步改进模式客观预报提供科学依据, 也为空气质量预报水平提升提供坚实基础。

2 数据与方法

2.1 模式设置

CMAQ (Community Multiscale Air Quality model) 是美国环保署基于“一个大气”的概念研发的第三代空气质量模式, 在国内外得到广泛的应用 (An et al., 2007; Wu et al., 2014; Yang et al., 2019)。模式在模拟过程中全面考虑了天气系统中、小尺度气象过程对污染物的输送、扩散、转化和迁移过程, 同时兼顾了区域与城市尺度之间大气污染物的相互影响以及污染物在大气中的各种化学过程 (Byun and Schere, 2006; 王占山等, 2013)。本研究 CMAQ 采用的版本为 CMAQ v4.7。

模式系统采用中尺度气象模式 WRF (Weather Research and Forecasting model) 提供气象背景场, 初始边界条件采用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 全球预报分析资料 (Global Forecast

System, GFS), 其时间间隔为 24 h, 空间分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度)。

模式系统排放清单基于 Wu et al. (2014) 研究成果, 综合考虑了面源、点源和移动源, 融合了 Streets et al. (2006) 为 TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over Pacific) 研究计划建立的空间分辨率为 1° (纬度) $\times 1^\circ$ (经度) 的 TRACE-P 排放清单、Zhang et al. (2009) 为 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B) 更新的空间分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 的 2006 年东亚地区火电厂排放清单, 以及 Wu et al. (2011) 所用的中国华北地区的区域排放清单, 具体排放数据及处理方法参考文献 Wu et al. (2014)。

模式区域采用 4 层嵌套, 水平方向网格分辨率分别为 27 km、9 km、3 km 和 1 km, 依次覆盖我国大部地区 (BJ27)、华北大部分地区 (BJ09)、京津冀地区 (BJ03) 和北京市及周边 (BJ01), 以下统一缩写为 BJ09、BJ03 和 BJ01。模式区域的中心经纬度为 (35°N 、 110°E), 两条真纬度线分别为 30°N 和 60°N , 采用 Lambert 投影方式。本文选取 BJ09、BJ03 和 BJ01 区域模式结果, 对比评估模式不同网格分辨率嵌套区域对北京 PM2.5 预报模拟效果的影响。

2.2 数据来源

本文实测数据包含北京市城六区 (包括东城区、西城区、朝阳区、海淀区、石景山区、丰台区) 2018 年 AQI (Air Quality Index) 日数据以及 PM2.5 的质量浓度日均数据, 实测数据缺测 5 天 (2018 年 12 月 22 日至 12 月 26 日), 数据均来自中国环境监测总站 ([http://www.cnemc.cn/\[2019-00-00\]](http://www.cnemc.cn/[2019-00-00]))。

预报数据采用模式系统中网格分辨率为 9 km、3 km、1 km (分别为 BJ09、BJ03 和 BJ01) 的城六区 7 个站点 (包括万寿西宫站、东四站、天坛站、农展馆站、官园站、万柳站和奥体中心站) PM2.5 质量浓度日数据, 模式数据缺报 7 天 (1 月 1 日、1 月 22 日、1 月 23 日、4 月 8 日、4 月 9 日、5 月 21 日和 5 月 30 日)。受高性能软硬件系统计算能力限制, 模式系统在不同分辨率采用不同时长预报时效, 其中, BJ09 区域的预报时效为 9 天, BJ03 和 BJ01 区域的预报时效为 4 天。

官方预报是以空气质量多模式预报和统计预报

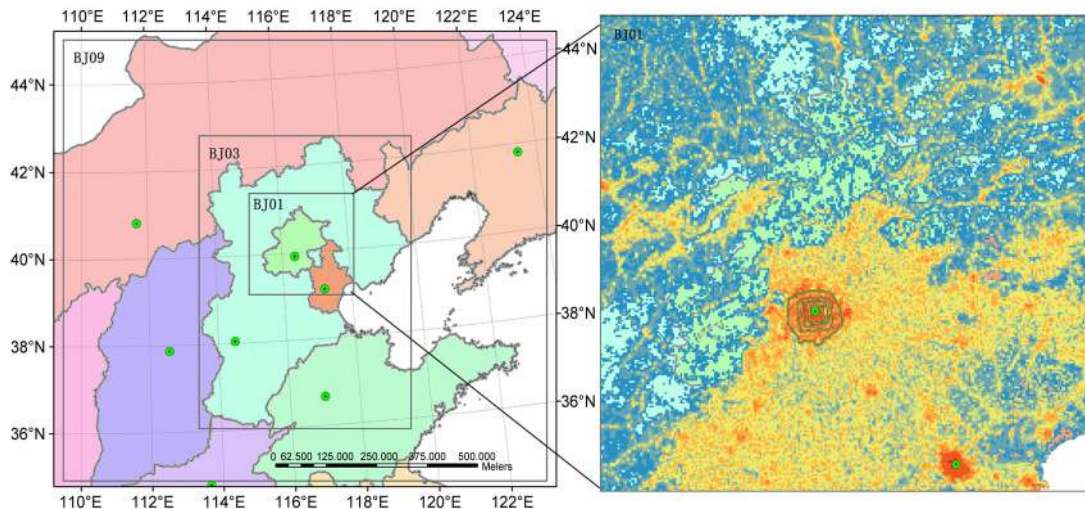


图 1 (a) WRF-CMAQ 模式内部三层嵌套网格区域设置：网格分辨率为 9 km 区域 (BJ09) 覆盖华北大部分地区，网格分辨率为 3 km 区域 (BJ03) 覆盖京津冀，网格分辨率为 1 km 区域 (BJ01) 覆盖北京市；(b) BJ01 区域，填色为区域人口分布，中心区域表征北京市区最核心的五环区域

Fig. 1 (a) Inner three nested domain set of WRF-CMAQ (Weather Research and Forecasting model -Weather Research and Forecasting model-Community Multiscale Air Quality model): BJ09 forecast system covering most of North China with 9 km horizontal resolution, BJ03 covers Beijing-Tianjin-Hebei with 3-km horizontal resolution, and BJ01 covers Beijing with 1 km horizontal resolution. (b) BJ01 domain, fill color shows the regional population distribution and the central area represents the five rings area of Beijing urban area

结果为基础，结合预报员个人经验，并根据天气形势和空气质量实况进行研判得出结果。官方预报数据来源于北京市环境保护监测中心官方网站 ([http://zx.bjmemc.com.cn/\[2019-01-01\]](http://zx.bjmemc.com.cn/[2019-01-01])) 等官方渠道所发布的空气质量预报数据，包括北京市内不同区域（城六区、西北部、东北部、西南部和东南部）24 h AQI 数据，不同时效的北京市等级预报数据，等级预报时效为 4 天，在空气质量评价中，往往采用国控站点平均来代表整个城市的空气质量，因此在本文的模拟性能评价中，采用国控站点平均值与之对应。

2.3 检验评估方法

预报效果采用 IAQI (Individual Air Quality Index) 准确率、等级准确率、预报综合评分、时间序列、统计分析等方法进行评估。为更好与官方预报对比，IAQI 准确率、等级准确率以及预报综合评分选取首要污染物为 PM_{2.5} 数据集进行分析。时间序列、统计分析以全年 PM_{2.5} 质量浓度进行检验评估。以上检验评估均以 7 个站点的平均值作为城区平均状况，与实测数据对比。数据缺测状况不考虑在内。以下对评估方法作具体介绍。

2.3.1 IAQI 及等级准确率评估方法

IAQI 准确率的计算方法是将实测与模式系统

预测的 PM_{2.5} 浓度转换成 IAQI 值。当预报的 IAQI 在实测 IAQI ± 10 的范围内，则判定为 IAQI 预报正确。预报级别由预报 IAQI ± 10 范围值所处的空气质量级别而定，允许跨级预报，当实况级别与任一预报级别一致时，均判断为级别预报准确。

2.3.2 预报综合评分方法

本文参考杨晓春等 (2015) 研究成果构建基于 IAQI 和等级预报准确率双因素的预报综合评分，评分规则按单项评分 100 分设计，对 IAQI 准确度和预报等级正确性双因素按 0.5 的权重计算总分 (f):

$$f = 0.5 \times f_1 + 0.5 \times f_2, \quad (1)$$

其中， f_1 为预报级别正确性评分，预报等级完全一致定义为级别正确 100 分，级别相差 1 级 50 分，实测与预报等级级别差异 2 级及 2 级以上为 0 分； f_2 为预报 IAQI 精确度评分，计算公式如下：

$$f_2 = \left[1 - \frac{|c_m - c_o|}{\max(c_m, c_o)} \right] \times 100, \quad (2)$$

其中， c_m 为模式预报值， c_o 为实测值。

2.3.3 统计分析方法

模式预报与实测的统计分析用相关系数、均方根误差、平均偏差、平均分数偏差、平均分数误差共 5 个指标以及泰勒图进行计算分析。5 个指标用

来评估模式对于城六区平均状况的模拟效果，以泰勒图来评估模式对不同站点的模拟效果差异。

3 结果和分析

3.1 PM_{2.5} 等级预报准确率分析

表 1 为首要污染物为 PM_{2.5} 时模式系统不同预报时效以及官方预报的 IAQI 准确率。官方预报 24 h 内准确率为 20%，模式系统 BJ01 不同预报时效的准确率维持在 20% 以上，均优于官方预报结果，BJ03 区域的准确率随预报时效的增加而降低，24 h 预报准确率达 27%，BJ09 区域的准确率前三天均低于 BJ03 区域，可见预报 IAQI 误差在 ±10 内这一指标是一个很严格的指标，无论模式预报结果或是官方预报结果都处于一个比较低值范围。因此，本文通过变动所允许的误差范围研究了预报准确率相应的变化情况，结果表明：预报准确率随 IAQI 范围的增加而增大；允许的 IAQI 误差范围为 ±20 时，模式系统 BJ01、BJ03、BJ09 和官方预报的 IAQI 准确率可分别达到 60%、58%、45% 和 47%（表 2）。

表 3 为首要污染物为 PM_{2.5} 时模式系统和官方预报 PM_{2.5} 等级预报准确率，BJ01 和 BJ03 等级准确率明显优于官方预报，不同预报时效 BJ01 和 BJ03 等级准确率均达到 50% 以上，24 h 内等级准确率达 60% 以上，BJ03 第二天和第三天的预报准确率高于 BJ01；BJ09 区域前三天的等级预报准确率维持在 50% 以上，前四天的等级预报准确率随时效的增加而降低，由于预报时效的延长使得模式预报的不稳定性增加，第四天至第九天的等级预报准确率呈波动式下降，等级预报准确率维持在 40% 以上。官方预报 24 h 内预报准确率高于 BJ09 区域，达 59%，后三天准确率均低于 BJ09 区域，维持在 40% 以上。

基于 IAQI 精确度和等级级别正确性双因素的预报综合评分方法，本文研究获得了北京市城六区 2018 年模式预报 PM_{2.5} 24 h 内预报综合评分，不同模式嵌套区域（BJ09、BJ03 和 BJ01）分别得分 69.1 分、75.0 分和 71.4 分；与之相对应的，官方预报结果得分为 70.6 分，由此可知，基于预报综合评分指标， $f_{BJ03} > f_{BJ01} > f_{官方} > f_{BJ09}$ ，即 BJ03 区域预报综合得分最高，BJ03 和 BJ01 优于官方预报，而 BJ09 预报综合评分比官方预报略差。

表 1 2018 年北京市城六区不同预报时效下模式预报空气质量 IAQI 预报准确率以及官方空气质量 IAQI 预报准确率
Table 1 Accuracy of model system under different forecast time and official IAQI (Individual Air Quality Index) forecast in six districts of Beijing city in 2018

时效	IAQI 预报准确率			
	BJ01	BJ03	BJ09	官方预报
第一天	24%	27%	19%	20%
第二天	25%	22%	18%	
第三天	20%	22%	14%	
第四天	21%	17%	18%	
第五天			18%	
第六天			16%	
第七天			12%	
第八天			13%	
第九天			14%	

表 2 2018 年北京市城六区在不同 IAQI 误差范围下模式预报和官方预报 24 h 空气质量 IAQI 预报准确率
Table 2 Accuracy of model system and official 24-h IAQI forecast under different error range in six districts of Beijing city in 2018

IAQI 误差范围	IAQI 预报准确率			
	BJ01	BJ03	BJ09	官方预报
IAQI	24%	27%	19%	20%
IAQI ± 5	38%	39%	26%	30%
IAQI ± 10	48%	45%	33%	36%
IAQI ± 20	60%	58%	45%	47%

表 3 2018 年北京市城六区模式预报和官方预报 PM_{2.5} 等级预报准确率
Table 3 Accuracy of model system and official PM_{2.5} grade forecast in six districts of Beijing city in 2018

时效	PM _{2.5} 等级预报准确率			
	BJ01	BJ03	BJ09	官方预报
第一天	65%	64%	55%	59%
第二天	57%	58%	53%	46%
第三天	52%	54%	50%	43%
第四天	55%	50%	47%	41%
第五天			50%	
第六天			49%	
第七天			40%	
第八天			47%	
第九天			41%	

3.2 时间尺度预报效果分析

图 2 是北京城六区 2018 年模式 24 h 预报与实测的 PM_{2.5} 日均浓度时间序列图。椭圆区域为

2018 年典型沙尘过程（3 月 26 日至 4 月 5 日，11 月 26 至 12 月 3 日），在这两个过程期间，模式预报与实测的 PM_{2.5} 质量浓度相差较大，除此之外，模式预报与实测的变化趋势较为一致，BJ03 区域模拟效果最好，模式预报与实测值的相关系数达到 0.76，其次是 BJ09 区域，相关系数达 0.72，BJ01 区域相关系数最低，为 0.71（见表 4）。方框区域为另一类型的典型污染过程，在该类型污染过程中 BJ03 和 BJ09 区域峰值模拟较好，而 BJ01 模拟的 PM_{2.5} 浓度峰值偏低，已有学者研究表明这与 BJ01 区域边界处理问题有关，由于区域外的输送有所损失，使得高污染峰值模拟偏低（Wu et al., 2014）。

图 3 是 2018 年中 20 次 PM_{2.5} 中度以上污染过程（PM_{2.5} 质量浓度 $\geq 115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的模式预测 PM_{2.5} 浓度峰值误差。研究结果表明，3 个区域的

模式预报峰值误差的变化趋势基本一致；而从模式预报结果来看，粗分辨率模拟区域的 PM_{2.5} 浓度预报结果高于细分辨率区域（即 BJ09 预报结果 > BJ03 预报结果 > BJ01 预报结果），这一现象与模式系统区域设置和边界到区域内的输送处理有关，CMAQ 模式采用单向嵌套，并且仅选择变量的一部分作为内部嵌套区域的边界条件，这将导致污染物通过粗—细网格嵌套边界时会被低估（Wu et al., 2014）。

根据模式预报的 PM_{2.5} 日均浓度与实测浓度模拟性能统计指标结果表明（见表 4），BJ01、BJ03 和 BJ09 区域与实测的相关系数均达到了 0.70 以上，平均偏差在 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围内，均方根误差均在 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的范围内，可见 3 个模拟区域的预报系统性误差较小。其中，BJ03 预报效果最好，相关系数达 0.76，平均偏差为 $0.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，

表 4 北京城六区 2018 年模式预报的 PM_{2.5} 日均浓度与实测浓度统计分析

Table 4 Statistical analysis of the daily mean PM_{2.5} concentration forecast performance of Beijing's six districts in 2018

分辨率	样本数	PM _{2.5} 浓度						
		实测均值/ $\mu\text{g m}^{-3}$	预测均值/ $\mu\text{g m}^{-3}$	预报与实测相关系数	均方根误差/ $\mu\text{g m}^{-3}$	平均偏差/ $\mu\text{g m}^{-3}$	平均分数偏差	平均分数误差
BJ01	353	51.90	36.84	0.71	34.16	-15.06	-20%	31%
BJ03	353	51.90	52.74	0.76	29.54	0.83	6%	26%
BJ09	353	51.90	65.91	0.72	36.87	14.00	25%	35%

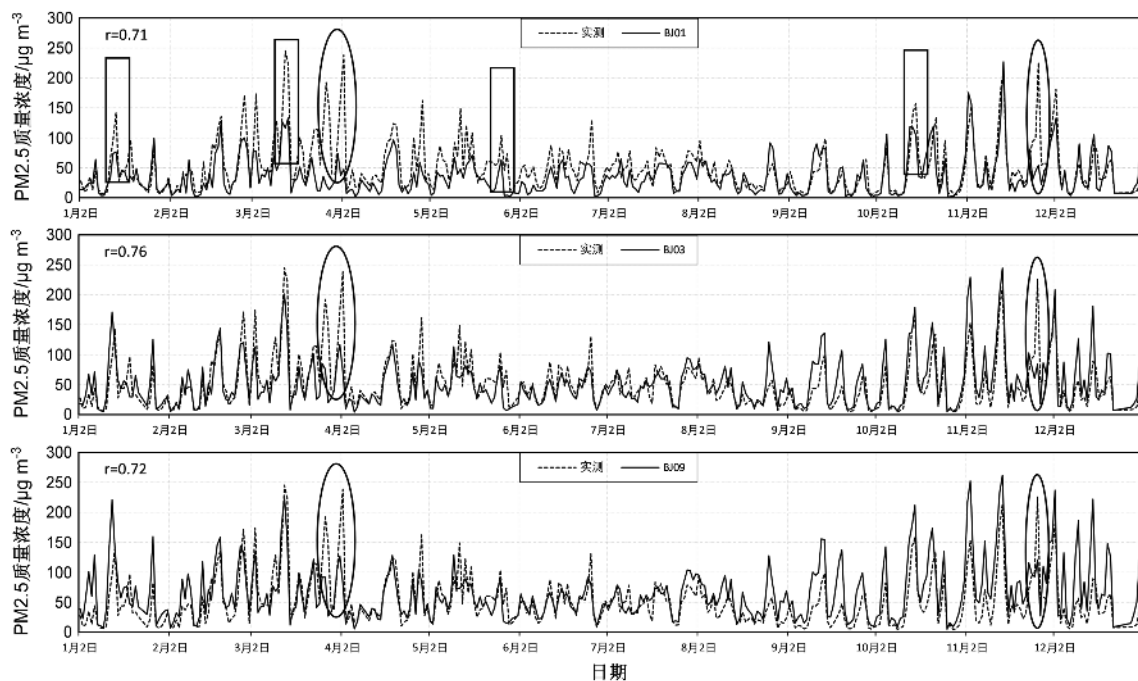
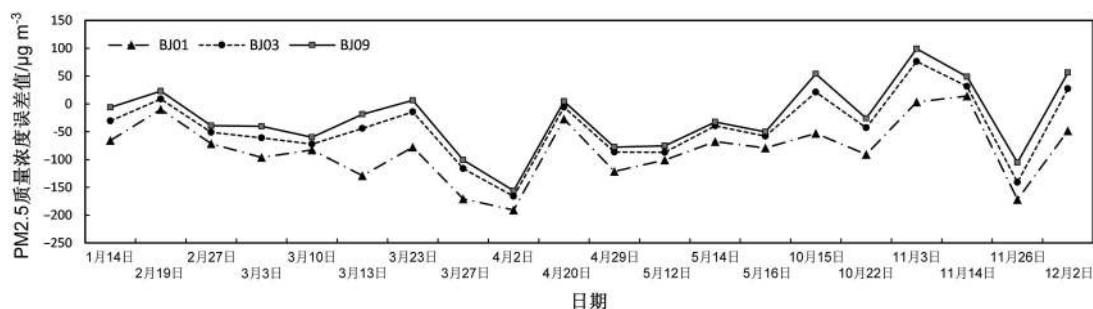


图 2 2018 年北京市城六区 PM_{2.5} 质量浓度模式预报（实线）与实测（虚线）时间序列：（a）BJ01；（b）BJ03；（c）BJ09

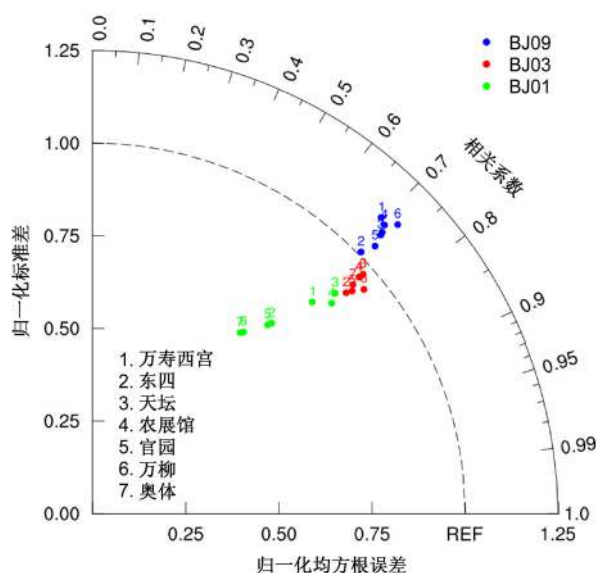
Fig. 2 Time series of the predicted daily mean PM_{2.5} concentration (solid line) and observation (dashed line) in six districts of Beijing city in 2018: (a) BJ01; (b) BJ03; (c) BJ09

图3 2018年北京市城六区PM_{2.5}中重度污染峰值模式预测误差Fig. 3 Peak value error of model in moderate and severe pollution processes in PM_{2.5} of Beijing's six districts in 2018

预报均值与实测均值的差值在 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内。BJ01 平均偏差为负值, 预报整体偏低。Boylan and Russell (2006) 认为平均分数偏差 (MFB) 和平均分数误差 (MFE) 指标更适用于评估颗粒物的模式预报效果, 并且提出当 $-30\% \leq \text{MFB} \leq 30\%$ 且 $\text{MFE} \leq 50\%$ 时, 模式的预报效果达到理想水平, 当 $-60\% \leq \text{MFB} \leq 60\%$ 且 $\text{MFE} \leq 75\%$ 时, 模式的预报效果达到合理水平。表4中平均分数偏差和平均分数误差计算结果表明, BJ01、BJ03 和 BJ09 的预报效果达到了理想水平。纵观整体模拟效果, BJ03 在5个指标表现上显著优于 BJ01 和 BJ09, 可认为目前模式系统中, BJ03 区域模拟效果最佳。

3.3 不同网格分辨率预报效果的空间差异性分析

泰勒图可以在一个图中反映出3个统计参数: 归一化标准差、归一化均方根误差、相关系数, 可用于评估不同模式的预报效果 (Taylor and Karl, 2001)。本文通过泰勒图对比各站点不同网格分辨率的模式预报结果与实测值的差异, 来说明不同站点的预报效果。如图4所示, 不同颜色的实心圆点表示不同分辨率的预测结果不同的序号代表不同的站点。参考点为 REF, 距离参考点越近, 表明其归一化标准差和归一化均方根误差越小, 相关系数越高, 即预报效果越好。由图可知, 模拟结果整体表现为最粗分辨率覆盖范围最广的 BJ09 预报结果整体偏高, 而最细分辨率覆盖范围最小的 BJ01 预报结果整体偏低, 而处于两者之间的 BJ03 预报效果刚好适中, 我们的进一步研究表明, 双向嵌套可部分解决此问题。BJ03 与 BJ09 区域预报的各站点模式结果较为集中, 而 BJ01 的站点区分度更高, 这是由于所构建的排放引入了 1 km 网格分辨率的人口数据以及更高分辨率的路网等矢量图层数据, 提高了排放源的空间差异性, 与此同时, 更高分辨率的气象驱动场也进一步的区分出 BJ01 区域站点

图4 北京市城六区2018年模式预报的各站点的PM_{2.5}日均浓度与实测的泰勒图Fig. 4 Taylor plot of predicted daily mean PM_{2.5} concentration of the stations of Beijing's six districts in 2018

的模拟结果, 因此不同站点在 BJ01 的模拟效果在泰勒图上表征更为离散, 区分度更高。总体上, BJ03 整体效果最好; 同一站点在不同网格分辨率上表现不一致, BJ01 区域中农展馆站表现最好, 其次是天坛站, BJ03 区域中万柳站表现最好, 其次为官园站, BJ09 区域中东四表现最好, 其次是万柳站。

4 结论

本文基于2018年中国环境监测总站实况监测数据、WRF-CMAQ的PM_{2.5}预报产品以及北京市环境保护监测中心发布的预报指导产品, 对北京市城六区的空气质量预报效果进行评估, 得到结果如下:

(1) 模式系统 BJ01 和 BJ03 等级准确率优于官方预报结果, 模式系统 BJ01 和 BJ03 区域 4 天内预报等级准确率都达到 50% 以上, 24 h 内等级准确率达 60% 以上, 官方 24 h 内预报等级准确率为 59%。基于 IAQI 和等级级别正确性双因素的预报综合评分结果显示, 模式系统 BJ03 得分 75.0 分最高, BJ01 次之, 优于官方预报结果, BJ09 得分 69.1 分最低。

(2) WRF-CMAQ 模式预报的 PM_{2.5} 质量浓度与实测的变化趋势较为一致, BJ03 的模式结果与实测相关系数达 0.76, 其次是 BJ09 区域, 相关系数达 0.72, BJ01 区域相关系数最低, 为 0.71。PM_{2.5} 中重度污染过程的峰值模式预测误差, 3 个区域的模式预报峰值误差的变化趋势基本一致, 粗分辨率模拟区域的 PM_{2.5} 浓度预报结果高于细分辨率区域。统计分析表明, BJ03 区域预报效果最好, 在 5 个指标表现上显著优于 BJ01 和 BJ09, 平均偏差为 0.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。BJ09 区域预报整体偏高, 而 BJ01 区域预报整体偏低。根据平均分数偏差和平均分数误差计算结果显示, BJ01、BJ03 和 BJ09 的预报效果均达到了理想水平。

(3) 泰勒图分析结果同样表明, BJ03 整体模拟效果最佳。BJ03 与 BJ09 区域预报的各站点模式结果区分度较小, BJ01 的站点区分度更高。同一站点在不同分辨率上表现不一致, BJ01 区域中农展馆站表现最好, BJ03 区域中万柳站表现最好, BJ09 区域中东四表现最好。

在 WRF-CMAQ 模式系统与官方预报的预报效果对比分析中, WRF-CMAQ 模式系统两种分辨率预报产品的预报技巧优于官方预报, 原因可能是人工预报过程中考虑到重污染过程给社会造成的可能损害或提升统计预报权限等因素影响, 人为将预报结果提高, 致使准确率不如模式的等级准确率高。针对这一问题, 恰恰需要更加独立的第三方平台来对各个数值模式、包括官方发布在内的多渠道数据进行系统性地公开核验、评价, 甚至评分, 客观评价各渠道预报数据的性能, 正如联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 所作的模式比较计划试验及评估, 这也有利于提升包括官方发布在内的各渠道预报能力。因此, 针对城市空气质量预报的预报技巧, 可提高准确率较高的数值模式在集合预报中的权重来提高整体预报性能, 同时可采用资料同化、深度学

习等各种新的预报技术来改善预报效果。

参考文献 (References)

- An X, Zhu T, Wang Z, et al. 2007. A modeling analysis of a heavy air pollution episode occurred in Beijing [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 7(12): 3103–3114. doi:10.5194/acp-7-3103-2007
- Boylan J W, Russell A G. 2006. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models [J]. *Atmos. Environ.*, 40(26): 4946–4959. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.09.087
- Byun D, Schere K L. 2006. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system [J]. *Appl. Mech. Rev.*, 59(2): 51–77. doi:10.1115/1.2128636
- Chang J C, Hanna S R. 2004. Air quality model performance evaluation [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 87(1): 167–196. doi:10.1007/s00703-003-0070-7
- 陈焕盛, 王自发, 吴其重, 等. 2013. 空气质量多模式系统在广州应用及对 PM₁₀ 预报效果评估 [J]. *气候与环境研究*, 18(4): 427–435. Chen Huansheng, Wang Zifa, Wu Qizhong, et al. 2013. Application of air quality multi-model forecast system in Guangzhou: Model description and evaluation of PM₁₀ forecast performance [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 18(4): 427–435. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11207
- 程念亮, 李红霞, 孟凡, 等. 2015. 山东省空气质量预报平台设计及其预报效果评估 [J]. *环境污染与防治*, 37(9): 92–99. Cheng Nianliang, Li Hongxia, Meng Fan, et al. 2015. Building and evaluation of air quality numerical prediction platform in Shandong province [J]. *Environmental Pollution & Control (in Chinese)*, 37(9): 92–99. doi:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.09.017
- Fox D G. 1984. Uncertainty in air quality modeling: A summary of the AMS workshop on quantifying and communicating model uncertainty, Woods Hole, Mass., September 1982 [J]. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 65(1): 27–36. doi:10.1175/1520-0477(1984)065<0027:UAIQM>2.0.CO;2
- Hanhan S R. 1988. Air quality model evaluation and uncertainty [J]. *JAPCA*, 38(4): 406–412. doi:10.1080/08940630.1988.10466390
- Hanna S R. 1989. Confidence limits for air quality model evaluations, as estimated by bootstrap and jackknife resampling methods [J]. *Atmos. Environ.*, 23(6): 1385–1398. doi:10.1016/0004-6981(89)90161-3
- 马琳, 魏巍, 张稳定, 等. 2017. 2016 年秋季新乡市空气质量模式预报效果评估 [J]. *中国环境监测*, 33(5): 89–94. Ma Lin, Wei Wei, Zhang Wending, et al. 2017. Evaluation on air quality forecasting model in the fall of 2016 in Xinxiang city, Henan province [J]. *Environmental Monitoring in China (in Chinese)*, 33(5): 89–94. doi:10.19316/j.issn.1002-6002.2017.05.13
- 麦健华, 于玲玲, 邓涛, 等. 2018. 基于 GRAPES-CMAQ 的中山市空气质量预报系统预报效果评估 [J]. *热带气象学报*, 34(1): 78–86. Mai Jianhua, Yu Lingling, Deng Tao, et al. 2018. Assessments of forecast products of air quality forecasting system based on GRAPES-CMAQ

- in Zhongshan city [J]. *J. Trop. Meteor. (in Chinese)*, 34(1): 78–86. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2018.01.008
- Streets D G, Zhang Q, Wang L T, et al. 2006. Revisiting China's CO emissions after the Transport and Chemical Evolution over the Pacific (TRACE-P) mission: Synthesis of inventories, atmospheric modeling, and observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 111(D14): D14306. doi:10.1029/2006JD007118
- Taylor, Karl E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J. Geophys. Res.*, 106(D7): 7183–7192. doi:10.1029/2000JD900719
- 王琪, 孙巍, 张新宇. 2014. 北京地区 PM_{2.5} 质量浓度分布及其与气象条件影响关系分析 [J]. *计算机与应用化学*, 31(10): 1193–1196. Wang Qi, Sun Wei, Zhang Xinyu. 2014. Analysis of PM_{2.5} distribution characteristics and impacts of meteorological conditions on PM_{2.5} concentration in Beijing [J]. *Computers and Applied Chemistry (in Chinese)*, 31(10): 1193–1196. doi:10.11719/com.app.chem20141010
- 王辉, 吴其重, 周任君, 等. 2016. 结合 GIS 数据对合肥市大气污染状况的初步数值模拟研究 [J]. *环境科学学报*, 36(11): 3902–3912. Wang Hui, Wu Qizhong, Zhou Renjun, et al. 2016. Preliminary numerical simulation of air pollution in Hefei with GIS data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 36(11): 3902–3912. doi:10.13671/j.hjkxxb.2016.0100
- 王占山, 李晓倩, 王宗爽, 等. 2013. 空气质量模型 CMAQ 的国内外研究现状 [J]. *环境科学与技术*, 36(6L): 386–391. Wang Zhanshan, Li Xiaoqian, Wang Zongshuang, et al. 2013. Application status of models-3/CMAQ in environmental management [J]. *Environmental Science & Technology (in Chinese)*, 36(6L): 386–391.
- 王占山, 李云婷, 孙峰, 等. 2016. 北京市空气质量预报体系介绍及红色预警支撑 [J]. *环境科技*, 29(2): 38–42, 46. Wang Zhanshan, Li Yunting, Sun Feng, et al. 2016. Introduction of air quality of Beijing forecast system and the support for the red alert [J]. *Environmental Science and Technology (in Chinese)*, 29(2): 38–42, 46. doi:10.3969/j.issn.1674-4829.2016.02.009
- Wu Q Z, Wang Z F, Gbaguidi A, et al. 2011. A numerical study of contributions to air pollution in Beijing during CAREBeijing-2006 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11(12): 5997–6011. doi:10.5194/acp-11-5997-2011
- Wu Q Z, Wang Z F, Chen H S, et al. 2012. An evaluation of air quality modeling over the Pearl River delta during November 2006 [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 116(3–4): 113–132. doi:10.1007/s00703-011-0179-z
- Wu Q Z, Xu W S, Shi A J, et al. 2014. Air quality forecast of PM₁₀ in Beijing with Community Multi-scale Air Quality Modeling (CMAQ) system: Emission and improvement [J]. *Geosci. Model Dev.*, 7(5): 2243–2259. doi:10.5194/gmd-7-2243-2014
- 杨关盈, 邓学良, 周广强, 等. 2018. 基于 WRF-Chem 模式的 PM_{2.5} 预报效果评估 [J]. *气象科技*, 46(1): 84–91. Yang Guanying, Deng Xueliang, Zhou Guangqiang, et al. 2018. Evaluation of PM_{2.5} forecast performance based on WRF-Chem model [J]. *Meteor. Sci. Technol. (in Chinese)*, 46(1): 84–91. doi:10.19517/j.1671-6345.20170013
- 杨晓春, 吴其重, 赵荣, 等. 2015. 西安空气质量预报系统业务运行评估 [J]. *陕西气象*, (5): 41–43. Yang Xiaochun, Wu Qizhong, Zhao Rong, et al. 2015. Operational evaluation of Xi'an air quality forecasting system [J]. *Journal of Shaanxi Meteorology (in Chinese)*, (5): 41–43. doi:10.3969/j.issn.1006-4354.2015.05.009
- Yang X C, Wu Q Z, Zhao R, et al. 2019. New method for evaluating winter air quality: PM_{2.5} assessment using Community Multi-Scale Air Quality Modeling (CMAQ) in Xi'an [J]. *Atmos. Environ.*, 211: 18–28. doi:10.1016/j.atmosenv.2019.04.019
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 9(14): 5131–5153. doi:10.5194/acp-9-5131-2009
- 张金谱, 梁桂雄, 冯彪, 等. 2018. 广州市污染季节空气质量预报效果评估及误差分析 [J]. *环境监控与预警*, 10(2): 40–44. Zhang Jinpu, Liang Guixiong, Feng Biao, et al. 2018. Evaluation and error analysis on the effect of air quality forecast in Guangzhou during the polluted season [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning (in Chinese)*, 10(2): 40–44. doi:10.3969/j.issn.1674-6732.2018.02.011
- 朱莉莉, 晏平仲, 王自发, 等. 2015. 江苏省级区域空气质量数值预报模式效果评估 [J]. *中国环境监测*, 31(2): 17–23. Zhu Lili, Yan Pingzhong, Wang Zifa, et al. 2015. An operational evaluation of the regional air quality forecast modeling system in Jiangsu [J]. *Environmental Monitoring in China (in Chinese)*, 31(2): 17–23. doi:10.3969/j.issn.1002-6002.2015.02.004