

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11207. 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 and Environmental Research (in Chinese), 18 (4): 427–435.

空气质量多模式系统在广州应用及对 PM10 预报效果评估

陈焕盛^{1,2} 王自发¹ 吴其重³ 吴剑斌^{1,2} 晏平仲¹ 唐晓¹ 王哲^{1,2}

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

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 北京师范大学全球变化与地球系统科学学院, 北京 100875

摘 要 介绍了广州空气质量多模式系统并评估其对 2010 年 9 月广州市的气象要素和 PM10 日均浓度的 24 h 的预报效果。评估结果表明: 模式系统较好地预测了气象要素的变化, 但高估了风速; 各空气质量模式能合理预测广州 PM10 浓度的时空变化, 预报效果均处于可接受范围内 (平均分数偏差 MFB 小于 $\pm 60\%$ 且平均分数误差 MFE 小于 75%), 部分模式可达到优秀水平 (MFB 小于 $\pm 30\%$ 且 MFE 小于 50%), 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。模式间对比表明, 在本次业务预报实践中, 不存在最优的单模式, 同一模式对不同的统计指标、不同的站点, 其预报效果可能存在差异, 基于算术平均集成各模式结果未能获得最优的预报效果。优化排放源空间分布并引进更好的集成预报方法 (如权重平均、神经网络、多元回归等) 是未来改进广州空气质量多模式系统预报效果的可能途径。

关键词 空气质量 多模式 PM10 广州 亚运会

文章编号 1006-9585 (2013) 04-0427-09

中图分类号 X16

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11207

Application of Air Quality Multi-Model Forecast System in Guangzhou: Model Description and Evaluation of PM10 Forecast Performance

CHEN Huansheng^{1,2}, WANG Zifa¹, WU Qizhong³, WU Jianbin^{1,2}, YAN Pingzhong¹,
TANG Xiao¹, and WANG Zhe^{1,2}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

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

Abstract The air quality multi-model forecast system was introduced and its 24-h forecast performance for meteorological parameters and PM10 daily mean concentration in Guangzhou during September 2010 was evaluated. The results show that although wind speed is overestimated, the model system can effectively predict variation in the meteorological parameters. All air quality models analyzed are shown to reasonably predict temporal and spatial variations of PM10 daily mean concentration in Guangzhou. In addition, all model forecasts satisfy the performance criteria such that mean fractional bias errors are less than or equal to $\pm 60\%$ and 75%, respectively, and several even reached

收稿日期 2011-12-25 收到, 2012-03-22 收到修定稿

资助项目 国家高技术研究发展计划 2006AA06A306

作者简介 陈焕盛, 男, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事区域空气质量预报预警及模式研发。E-mail: huanshengchen09@gmail.com

performance goals of less than or equal to $\pm 30\%$ and 50% , respectively. However, all model forecasts overestimate PM10 daily mean concentration in suburban Guangzhou while underestimating the value in the urban region. An optimal model in this operational air quality forecast is not detected through model intercomparison. Variety in stations and statistical indicators may result in significant differences in forecast performance for the same model. Moreover, model ensemble based on arithmetic average does not reveal optimal forecast performance. Optimization of spatial distribution of the emission and usage of improved model ensemble forecast methods such as weighted average, neural network, and multiple regressions may improve forecast performance of the air quality multi-model system.

Keywords Air quality, Multi-model, PM10, Guangzhou, Asian Games

1 引言

随着经济的飞速发展和城市化进程的加快,中国的大城市面临着严峻的空气污染问题 (Chan and Yao, 2008; Tie and Cao, 2009)。而作为 2010 年亚运会的举办城市,广州的空气质量更是备受国内外关注。通过多年的大气污染治理,广州的 NO_2 、 SO_2 、PM10 浓度逐年下降 (广州市环境保护局, 2009), 空气质量有了显著的改善。但观测表明,各污染物特别是 PM10 的浓度仍存在超标现象 (Wang et al., 2008; Zhang et al., 2008)。此外,广州的空气质量受周边城市的显著影响 (陈焕盛等, 2010; 胡晓宇等, 2011), 表现出区域污染的特征, 增大了空气污染防治的难度。

为实现绿色亚运会承诺,广州政府一方面削减污染物排放以提高空气质量,另一方面开展空气质量预报预警以避免或减轻空气污染的影响。借鉴 2008 年北京奥运会和 2010 年上海世博会空气质量保障的成功经验,将中国科学院大气物理研究所发展的空气质量多模式预报系统应用于广州,并针对广州复杂的气象、空气污染特征对模式系统做适当改进,服务于亚运会的空气质量预报预警工作。

空气质量模式预报的准确性、可靠性对于空气质量预报预警至关重要,是决定模式系统可用性的前提 (Chang and Hanna, 2004)。因此,空气质量模式评估是实现模式预报预警的首要任务,同时也能为预报效果的改进提供科学依据。例如 Eder et al. (2006) 检验了 2004 年 6~9 月通用空气质量多尺度模式 CMAQ 对美国东北部 O_3 浓度的业务预报效果,指出 CMAQ 模式中不合理的云覆盖方案导致模式高估有云条件下的 O_3 浓度。Honore et al. (2008) 评估了 2003~2005 年空气质量预报分析系统 PREV'AIR 对法国的 PM10、 O_3 、 NO_2 浓度的可预测性,指出观测数据同化和集合预报是提高该系统

性能的重要方向。虽然空气质量多模式预报系统已在北京奥运会 (王自发等, 2009; 吴其重等, 2010) 和上海世博会 (王茜等, 2010) 成功应用,但不同区域、不同城市的地形、气候特征、污染特征等各不相同,模式预报性能可能存在显著差异。广州的地形、气候特征有别于北京、上海,其地处低纬,三面环山、一面向海,受亚热带季风气候影响,同时受热带气旋和海陆风作用,复杂的气象、污染条件使模式的适用性受到挑战。因此,评估空气质量多模式系统在广州的预报效果,了解预报误差的来源,才能有针对性地改进。

本文介绍了广州空气质量多模式预报系统,并利用多种方法评估模式系统对亚运会前期 (2010 年 9 月) 广州市的气象要素、PM10 日均浓度的 24 h 预报效果,以期改进模式系统预报效果提供科学依据。

2 空气质量多模式预报系统及观测数据

2.1 空气质量多模式预报系统

广州空气质量多模式预报系统的框架如图 1 所示,主要侧重于不同空气质量模式的集成,其中区域空气质量模式包括中国科学院大气物理研究所自主开发的嵌套网格空气质量预报模式系统 NAQPMS (王自发等, 2006),美国环保署的 CMAQ 模式 (Dennis et al., 1996) 及美国 Environ 公司的空气质量综合模拟系统 CAMx (ENVIRON International Corporation, 2002)。各模式采用统一的区域设置,统一的污染源排放清单及排放处理过程 (稀疏矩阵排放处理模型, SMOKE) (Houyoux et al., 2004),并由中尺度气象模式 MM5 (Grell et al., 1994) 提供统一的气象预报场,可减小由于气象、排放处理的不一致所引起的模式性能差异,可更客观评价不同空气质量模式预报效果优劣,并可以此为基础发展合理

的多模式集成预报方案。关于空气质量多模式预报系统的更详细介绍可见吴其重 (2010)。

2.2 模式设置

系统中各模式采用统一的 4 层嵌套区域设置 (图 2), 网格分辨率分别为 81 km、27 km、9 km、3 km, 依次覆盖了东亚地区、我国的南部地区、广东省、珠三角地区。模式区域的中心经纬度为 (25°N, 112.5°E), 采用兰伯特投影方式, 真纬度分别为 10°N 和 40°N, 重点关注以广州为中心的珠三角地区。

考虑珠三角地区三面环山、一面临海, 受海陆风显著影响等特点, 在 MM5 中, 积云参数化方案选择 Grell 方案, 显式微物理过程选用简单冰相方案, 大气辐射选用云辐射方案, 行星边界层物理参数化方案考虑 MRF 方案, 多层土壤温度模式为 5 层土壤模式。各空气质量模式所采用的物理、化学参数化方案也各有侧重, 详细介绍可见吴其重 (2010)。

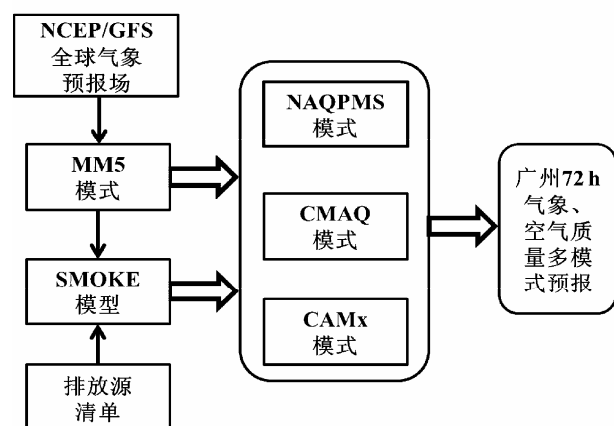


图 1 广州空气质量多模式预报系统框架

Fig. 1 The framework of the air quality multi-model forecast system in Guangzhou

在业务预报中, 模式的第一区域预报 96 h, 而第二至第四区域预报 72 h。MM5 气象模式的初始和边界条件采用 NCEP 和 NOAA 联合提供的 GFS 全球预报场。各空气质量模式的最外层区域采用清洁边界条件, 而内嵌套区域的边界条件由上一层区域提供。初始浓度则采用前一日的 24 h 预报结果。

2.3 排放源处理

空气质量多模式系统的网格化排放源由 SMOKE 模型处理获得, SMOKE 中考虑了气象要素对点源烟羽抬升的影响并引进了珠三角本地化的时空分配因子。排放源清单由 3 部分构成: 区域背景采用 Zhang et al. (2009) 为 INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment Phase B) 观测试验准备的东亚地区排放清单; 珠三角的本地源清单由 Zheng et al. (2009) 提供, 该清单考虑了珠三角地区亚运会前不同阶段的排放控制措施并更新到 2010 年; 香港、澳门的源清单则来源于香港环保署。

2.4 观测数据

本文利用国家气象局逐 6 h 的 Micaps 气象观测资料评估 MM5 的预报效果, 并收集广州市空气质量监测网络的污染物浓度监测数据评估 PM10 预报效果。监测站点的空间分布如图 2 所示, 气象监测站包括广州和东莞两个站点, 均位于市区。广州空气质量监测站共有 18 个站点, 为反映市区与郊区污染特性的不同, 根据站点的地理位置, 将其划分为两大类即市区站 (10 个) 和郊区站 (8 个)。

3 预报效果评估

3.1 气象预报评估

气象场尤其是风场的预报效果直接影响污染

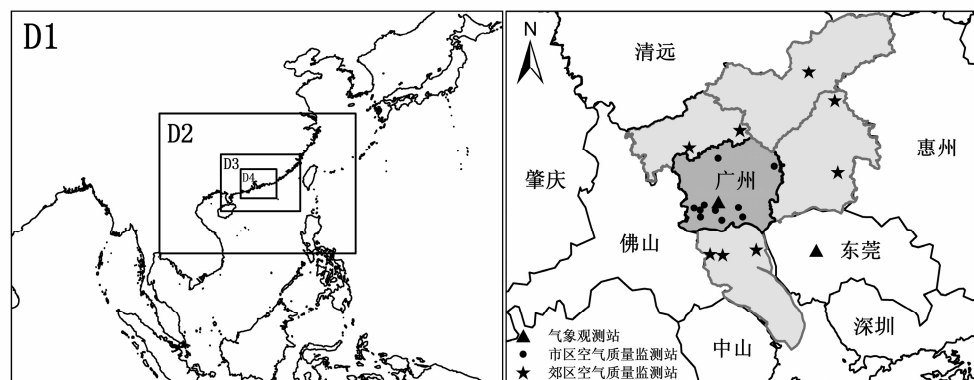


图 2 (a) 模式 4 层嵌套区域设置和 (b) 气象和空气质量监测站点空间分布 (浅和深灰色分别代表广州郊区和市区)

Fig. 2 (a) Four nested model domains and (b) spatial distribution of the meteorology and air quality monitoring stations (light and dark gray denotes suburban and urban Guangzhou)

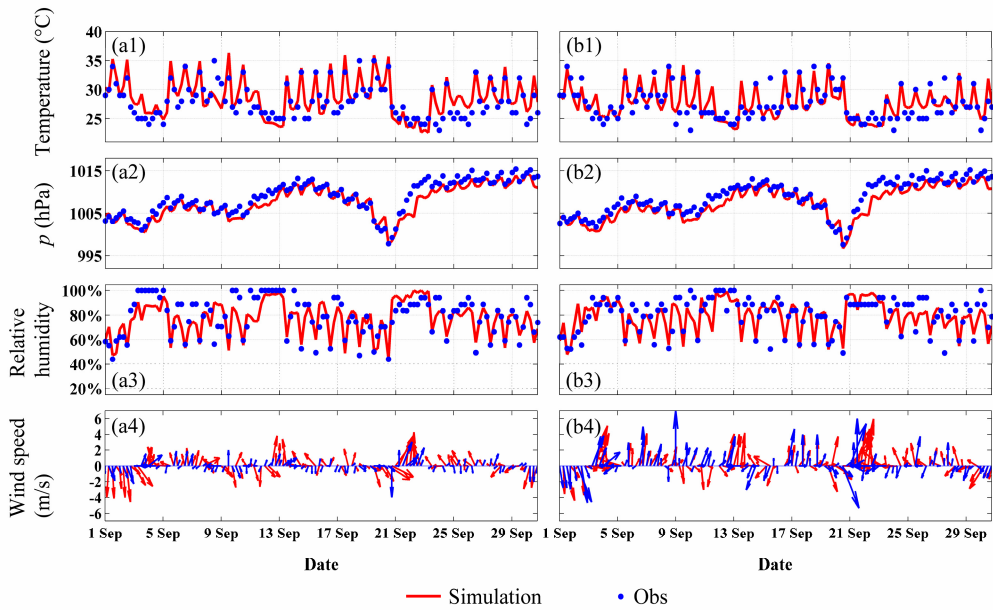


图3 模式MM5对2010年9月广州站(左列)和东莞站(右列)(a1、b1)温度、(a2、b2)气压、(a3、b3)相对湿度、(a4、b4)风速预报与观测对比

Fig. 3 Comparisons of the forecasted (a1, b1) temperature, (a2, b2) pressure, (a3, b3) relative humidity, and (a4, b4) wind speed from MM5 model with observations in Guangzhou (left panel) and Dongguan (right panel) in Sep 2010

物浓度的预报准确性。由图3可见,模式较好地预测了各气象要素的变化趋势和量值。同时可注意到,模式对温度、气压、相对湿度的预报效果明显优于风场。风场易受局地地形、建筑、天气系统的影响,模式难以准确地把握。表1统计了MM5的预报效果,其中温度、气压、相对湿度的预报值和观测值的相关系数(r)均在0.76以上,均方根误差(RMSE)和平均偏差(MB)也较小;风速预报值和观测值的 r 则较低,在广州和东莞分别为0.38和0.28;另外,风速的预测值总体偏高,在广州平均偏高 0.94 m s^{-1} 。总体上,MM5合理地预测了气象要素的变化,为空气质量模式提供了可靠的气象输入。

表1 气象预报效果统计分析

Table 1 Statistical analysis of the meteorological forecast performance

站点	气象因子	样本数	观测 平均值	预测 平均值	相关 系数	均方 根误差	平均 偏差
广州	风速 (m s^{-1})	112	1.44	2.38	0.38	1.53	0.94
	温度 (K)	120	301.18	301.82	0.84	1.9	0.64
	气压 (hPa)	120	1008.71	1007.62	0.94	1.73	-1.09
	相对湿度	120	79.09%	77.20%	0.77	10.28%	-1.88%
东莞	风速 (m s^{-1})	116	2.48	2.96	0.28	1.84	0.47
	温度 (K)	120	300.74	300.77	0.82	1.65	0.04
	气压 (hPa)	120	1008.67	1007.36	0.95	1.84	-1.31
	相对湿度	120	80.31%	78.78%	0.76	9.36%	-1.53%

3.2 PM10 预报效果评估

3.2.1 空间分布对比

污染物浓度的空间分布反映了区域的污染分布态势和特征。图4给出了2010年9月NAQPMS、CMAQ、CAMx及三模式算术平均(AVE)的珠三角地区PM10月均浓度空间分布,并叠加了广州监测点的观测浓度。广州市区站的PM10月均浓度为 0.081 mg m^{-3} ,而郊区站为 0.065 mg m^{-3} ,表现出市区高而郊区低的特征,这与排放源的分布相对应。各模式均较好地预测了PM10浓度的空间分布,但高浓度区的强度和范围有所不同,其中NAQPMS预测的PM10高浓度区范围最广且强度最大,而CAMx预测的范围和强度则最小。AVE综合了各模式的特点,其预测的高浓度区范围和强度居中,与CMAQ较为接近。总体上,由于各模式采用相同的排放源,其预测的PM10浓度空间分布较为相似,但各模式内部考虑的物理、化学方案各有侧重,使预测的高浓度区强度和范围不同。

3.2.2 时间序列对比

气象条件、排放变化对污染物的扩散、清除有重要的影响,污染物浓度时间序列反映了污染物随时间的累积、清除等演变过程。时间序列对比分析可评估模式对污染物浓度的日变化、不同气象条件下的累积和清除等的预测能力。在排放相对固定的

条件下, 污染物浓度随时间的变化主要取决于气象条件的演变。

由图 5 可见, 各模式预测的 PM10 浓度变化趋势相似, 但量值有所不同。在广州市区和郊区, 各模式均合理预测了 PM10 浓度的变化趋势和量级, 表明各模式能较好把握 PM10 的累积、清除过程。但预测结果仍有较大的改进空间, 在市区, 各模式均高估 PM10 的浓度, 其中 NAQPMS 最为显著。另外, 10~12 日, 模式均虚报 PM10 的峰值, 这主要是模式低估降水强度造成的 (图表略)。在郊区, 各模式则均低估 PM10 浓度, 尤以 1~3 日、17~20 日

最为显著。模式高估市区浓度而低估郊区浓度的特征可能是由排放源的不合理分布引起。各模式统一采用由 SMOKE 模型处理获得的网格化排放源, 其中面源部分仅以人口密度作为空间分配因子, 而人口主要分布在市区, 这导致更多的排放量被分摊到市区同时削弱了郊区的排放。

3.2.3 散点分析

散点图反映预测值与观测值的线性关系, 可一目了然地判断预测结果相对于观测结果是高估或低估。由图 6 可见, 对于市区, 散点主要分布在 $y=2x$ 和 $y=0.5x$ 之间, 表明模式能合理预测 PM10 的量值,

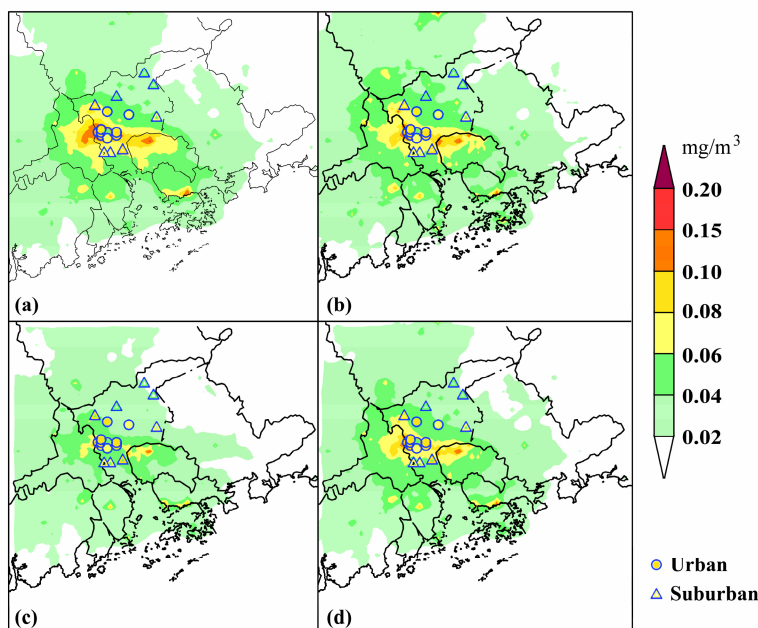


图 4 2010 年 9 月 (a) NAQPMS、(b) CMAQ、(c) CAMx、(d) 3 个模式算术平均 AVE 的 PM10 预测月均浓度与站点监测浓度的空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of monthly mean PM10 concentration forecasted from (a) NAQPMS, (b) CMAQ, (c) CAMx, and (d) their average (AVE) and observations in Sep 2010

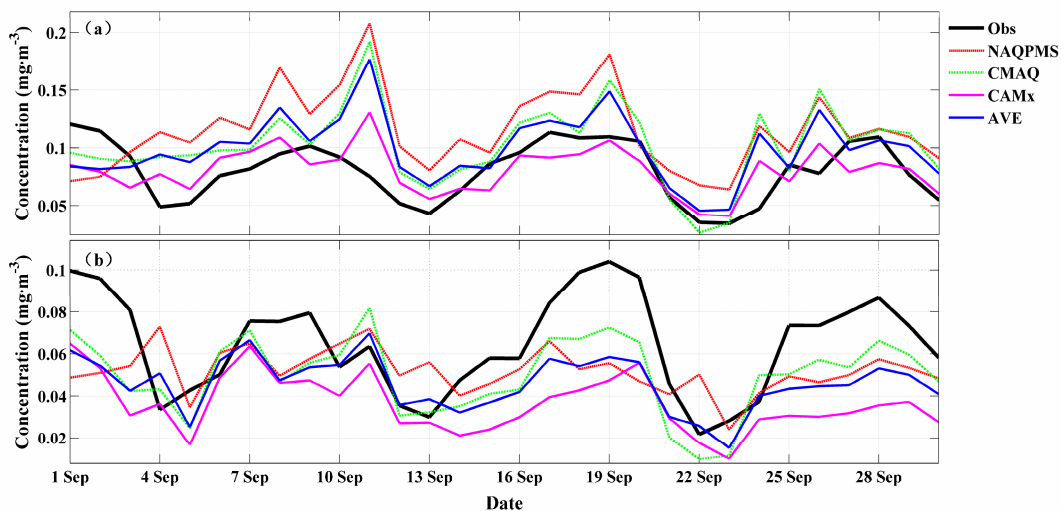


图 5 2010 年 9 月广州 (a) 市区与 (b) 郊区 PM10 日均预报和观测浓度对比

Fig. 5 Comparisons of the forecasted daily mean PM10 concentrations and observations in (a) urban and (b) suburban Guangzhou in Sep 2010

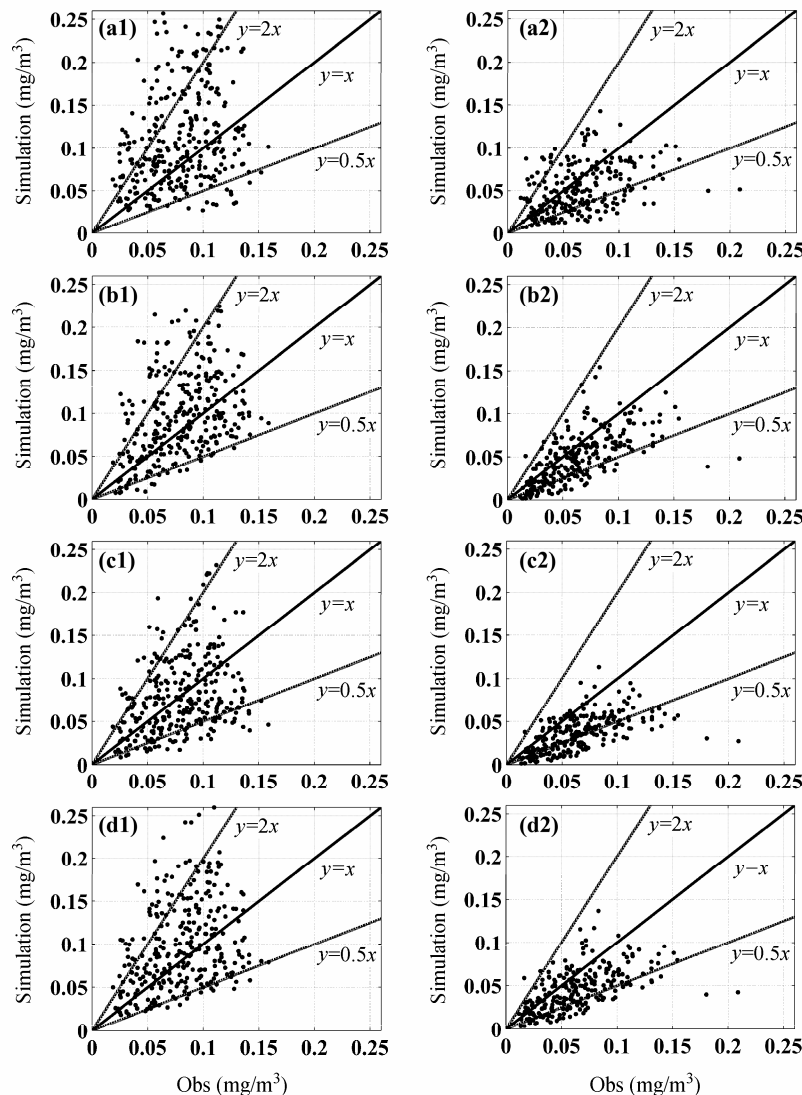


图6 广州市区(左列)和郊区(右列)(a1, a2) NAQPMS, (b1, b2) CMAQ, (c1, c2) CAMx, (d1, d2) AVE 模式预报的PM10日均浓度与观测散点图

Fig. 6 Scatter plots of the forecasted daily mean PM10 concentrations from (a1, a2) NAQPMS, (b1, b2) CMAQ, (c1, c2) CAMx, and (d1, d2) AVE and observations in urban (left) and suburban (right) Guangzhou

但各模式均存在不同程度的高估,其中 NAQPMS 高估最显著,而 CAMx 则相对较好。而在郊区,各模式则均低估 PM10 浓度,尤以 CAMx 最为显著。这与 3.2.2 节的分析结果相同。

3.2.4 统计分析

空间分布对比、时间序列对比、散点图分析等只是对模式预测效果的定性评估,而统计分析可定量评估模式的偏差及对污染物变化趋势的预测能力。

表2统计了各空气质量模式的PM10日均浓度预报效果。从 r 、RMSE、MB 3个参数来看,各模式在郊区的预报效果优于市区。在郊区, r 介于

0.42~0.64,明显高于市区;而RMSE介于0.031~0.039 mg m^{-3} ,明显低于市区。此外,在郊区,MB均为负,而在市区则均为正,表明模式总体低估郊区的PM10浓度,而高估市区的PM10浓度。同时可注意到,并不存在对所有统计参数均表现最优的模式且同一模式在市区和郊区的预报效果也存在差异。例如,在广州市区,CMAQ的 r 最高,而RMSE和MB却均高于CAMx;NAQPMS在市区的MB最大,而在郊区则最小。对于3个模式的平均值,各统计参数均介于各个单模式之间,表明基于简单算术平均来集成各模式的结果并不能获得最优的预测效果。

表 2 2010 年 9 月 NAQPMS、CMAQ、CAMx 模式及 3 个模式算术平均 AVE 预报的广州市区和郊区 PM10 日均浓度与实测浓度的统计分析

Table 2 Statistical analysis of the daily mean PM10 concentration forecast performance in urban and suburban Guangzhou in Sep 2010

站点	模式	样本数	观测平均值	预测平均值	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
			(mg m ⁻³)	(mg m ⁻³)		(mg m ⁻³)	(mg m ⁻³)		
市区站	NAQPMS	298	0.080	0.115	0.24	0.072	0.035	28%	52%
	CMAQ	298	0.080	0.102	0.34	0.058	0.022	14%	44%
	CAMx	298	0.080	0.081	0.32	0.046	0.001	-7%	46%
	AVE	298	0.080	0.099	0.31	0.055	0.019	15%	44%
郊区站	NAQPMS	238	0.065	0.052	0.42	0.036	-0.013	-23%	49%
	CMAQ	238	0.065	0.050	0.64	0.031	-0.015	-34%	47%
	CAMx	238	0.065	0.037	0.61	0.039	-0.028	-59%	62%
	AVE	238	0.065	0.046	0.59	0.033	-0.019	-35%	48%

为评估模式对 PM10 预报的可信度,Boylan and Russell (2006) 建议以平均分数偏差 (MFB) 和平均分数误差 (MFE) 作为衡量指标,若 MFB 小于 ±30%同时 MFE 小于 50%,则模式的表现优秀;而若 MFB 小于 ±60%同时 MFE 小于 75%,则模式的表现处于可接受的范围。由表 2 可见,在市区和郊区,各模式对 PM10 的预报性能均满足可接受的条件。另外,在市区,CMAQ、CAMx、AVE 的预报性能为优秀;而在郊区,NAQPMS、CMAQ、AVE 的预报性能为优秀。

3.3 不同模式预报效果对比

在多模式预报系统中,各模式采用统一的区域设置、气象场、排放源,模式预报性能的差异主要源于各模式内部对物理、化学过程的不同处理。不同模式预报效果的对比,可为优化模式物理、化学方案并建立有效的模式集成方案提供初步依据。

泰勒图 (Taylor, 2001) 可综合考虑相关系数、标准差、中心均方根误差 3 个统计参数,可在同一图形中对比不同模式预测结果与观测的接近程度,是不同模式预测性能对比的有效工具。如图 7 所示,参

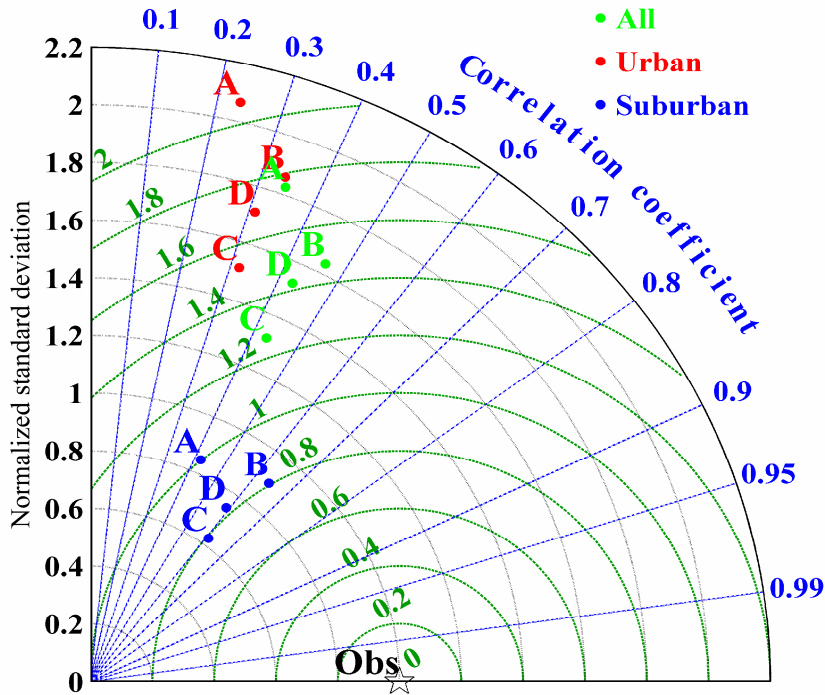


图 7 2010 年 9 月 NAQPMS (A)、CMAQ (B)、CAMx (C) 及 AVE (D) 预报的广州市区、郊区、全市 PM10 日均浓度与实测浓度的泰勒图 (黑线代表归一化标准差, 蓝线代表相关系数, 绿线代表归一化的中心均方根误差)

Fig. 7 Taylor plot of forecasted daily mean PM10 concentration from NAQPMS(A), CMAQ (B), CAMx (C), and AVE (D) in urban and suburban Guangzhou and Guangzhou city (black line denotes normalized standard deviation, blue line denotes correlation coefficient, green line denotes normalized centered root-mean-square error)

考点为观测值 (Obs), 不同颜色的实心圆点代表不同模式在广州市区、郊区、全市的 PM₁₀ 预测结果。在图 7 中, 距离参考点越近表明预测效果越好, 而距离越远则预测效果越差。可见, 各模式在郊区的预测效果优于市区, 而全市的预测效果介于两者之间。对于不同的模式, 在市区或全市, CAMx 的预测结果与观测最为接近, 其次是 AVE、CMAQ, NAQPMS 则最差; 在郊区, CMAQ、CAMx、AVE 的预测效果相当, 且均优于 NAQPMS。无论在市区或郊区, AVE 的预测效果均不是最优的, 而是处于各模式之间。

4 结论

本文介绍了广州空气质量多模式业务预报系统的框架、设置及其使用的气象场、排放源, 并从空间对比、时间序列对比、散点分析、统计分析、不同模式间对比等角度详细评估了模式系统对 2010 年 9 月广州市的气象要素和 PM₁₀ 日均浓度的 24 h 预报效果。模式评估结果表明:

(1) MM5 较好地预测了气象要素的变化, 对温度、气压、相对湿度的预报效果较为理想, 预测值与观测值的相关系数均在 0.76 以上。而风速预测值总体偏高, 在广州平均偏高 0.94 m s^{-1} 。

(2) 各空气质量模式能合理反映 PM₁₀ 浓度的时空分布, 在统一气象场、排放源条件下, 各模式预测的 PM₁₀ 浓度时空变化相似但仍有一定差异。各模式均高估广州市区的 PM₁₀ 浓度而低估郊区的浓度, 这可能是由于排放源的空间分配不合理造成。

(3) 各模式的 PM₁₀ 预报效果均在可接受的范围内, 部分模式可达到优秀水平, 总体上模式在郊区的预报效果优于市区。

(4) 在本次业务预报实践中, 不存在最优的单模式, 同一模式对不同的统计指标、不同的站点, 其预报效果可能存在差异, 基于算术平均集成各模式结果未能获得最优的预报效果。

广州空气质量多模式预报系统仍存在较大的提高空间, 未来可根据不同的排放源类型引进多样化的空间分配因子以优化源的空间分布, 借鉴集合预报系统在北京等地区的应用经验(唐晓等, 2010; 张伟等, 2010), 引进权重平均、神经网络、多元回归等集合预报方法以获得最优的预报效果, 进一

步分析各模式的内部差异以了解其对预测效果的影响。

参考文献 (References)

- 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.
- Chan C K, Yao X H. 2008. Air pollution in mega cities in China [J]. *Atmos. Environ.*, 42 (1): 1–42.
- Chang J C, Hanna S R. 2004. Air quality model performance evaluation [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 87: 167–196.
- 陈焕盛, 王自发, 吴其重, 等. 2010. 亚运时段广州大气污染物来源数值模拟研究 [J]. *环境科学学报*, 30 (11): 2145–2153.
- Chen Huansheng, Wang Zifa, Wu Qizhong, et al. 2010. Source analysis of Guangzhou air pollutants by numerical simulation in the Asian Games period [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 30 (11): 2145–2153.
- Dennis R L, Byun D W, Novak J H, et al. 1996. The next generation of integrated air quality modeling: EPA's Models-3 [J]. *Atmos. Environ.*, 30 (12): 1925–1938.
- Eder B, Kang D W, Mathur R, et al. 2006. An operational evaluation of the Eta-CMAQ air quality forecast model [J]. *Atmos. Environ.*, 40 (26): 4894–4905.
- ENVIRON International Corporation. 2002. User's Guide to the Comprehensive Air Quality Modeling System with Extensions (CAMx), Version 4.4 [R]. Novato, California: ENVIRON International Corporation.
- Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. 1994. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5) [R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 122pp.
- 广州市环境保护局. 2009. 2008 年广州市环境状况通报 [R]. 广州. Guangzhou Municipal Environmental Protection Bureau. 2009. Guangzhou Environmental Bulletin in 2008 [R] (in Chinese). Guangzhou.
- Honore C, Rouil L, Vautard R, et al. 2008. Predictability of European air quality: Assessment of 3 years of operational forecasts and analyses by the PREV'AIR system [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 113(D04301): doi:10.1029/2007JD008761.
- Houyoux M R, Vukovich J M, Brandmeyer J E, et al. 2004. Sparse Matrix Operator Kernel Emissions modeling system (SMOKE) [R]. User Manual, Version 2.1.
- 胡晓宇, 李云鹏, 李金凤, 等. 2011. 珠江三角洲城市群 PM₁₀ 的相互影响研究 [J]. *北京大学学报 (自然科学版)*, 47 (3): 519–524.
- Hu Xiaoyu, Li Yunpeng, Li Jinfeng, et al. 2011. Interaction of ambient PM₁₀ among the cities over the Pearl River delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 47 (3): 519–524.
- 唐晓, 王自发, 朱江, 等. 2010. 北京地面 O₃ 的集合预报试验 [J]. *气候与环境研究*, 15 (5): 677–684.
- Tang Xiao, Wang Zifa, Zhu Jiang, et al. 2010. Ensemble based surface O₃ forecast over Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (5): 677–684.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D7): 7183–7192.
- Tie X X, Cao J J. 2009. Aerosol pollution in China: Present and future

- impact on environment [J]. *Particuology*, 7 (6): 426–431.
- 王茜, 伏晴艳, 王自发, 等. 2010. 集合数值预报系统在上海市空气质量预测预报中的应用研究 [J]. *环境监控与预警*, 2 (4): 1–6, 11. Wang Qian, Fu Qingyan, Wang Zifa, et al. 2010. Application of ensemble numerical model system on the air quality forecast in Shanghai [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning* (in Chinese), 2 (4): 1–6, 11.
- 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 2006. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用 [J]. *大气科学*, 30 (5): 778–790. Wang Zifa, Xie Fuying, Wang Xiquan, et al. 2006. Development and application of nested air quality prediction modeling system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (5): 778–790.
- 王自发, 吴其重, Gbaguidi A, 等. 2009. 北京空气质量多模式集成预报系统的建立及初步应用 [J]. *南京信息工程大学学报 (自然科学版)*, 1 (1): 19–26. Wang Zifa, Wu Qizhong, Gbaguidi A, et al. 2009. Ensemble air quality multi-model forecast system for Beijing (EMS-Beijing): Model description and preliminary application [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)* (in Chinese), 1 (1): 19–26.
- Wang W, Ren L H, Zhang Y H, et al. 2008. Aircraft measurements of gaseous pollutants and particulate matter over Pearl River delta in China [J]. *Atmos. Environ.*, 42 (25): 6187–6202.
- 吴其重, 王自发, 徐文帅, 等. 2010. 多模式模拟评估奥运赛事期间可吸入颗粒物减排效果 [J]. *环境科学学报*, 30 (9): 1739–1748. Wu Qizhong, Wang Zifa, Xu Wenshuai, et al. 2010. Multi-model simulation of PM₁₀ during the 2008 Beijing Olympic Games: Effectiveness of emission restrictions [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 30 (9): 1739–1748.
- 吴其重. 2010. 北京空气质量多模式实时预报系统的建立与应用 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 215pp. Wu Qizhong. 2010. Air quality multi-models real-time forecast system in Beijing and its application [D] (in Chinese). Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 215pp.
- 张伟, 王自发, 安俊岭, 等. 2010. 利用 BP 神经网络提高奥运会空气质量实时预报系统预报效果 [J]. *气候与环境研究*, 15 (5): 595–601. Zhang Wei, Wang Zifa, An Junling, et al. 2010. Update the ensemble air quality modeling system with BP model during Beijing Olympics [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (5): 595–601.
- 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.
- Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, et al. 2008. Regional integrated experiments on air quality over Pearl River delta 2004 (PRIDE-PRD2004): Overview [J]. *Atmos. Environ.*, 42 (25): 6157–6173.
- Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, et al. 2009. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmos. Environ.*, 43 (32): 5112–5122.