周广强,许建明,殷长秦,等.CMA-GFS 驱动长三角主要大气污染物数值预报 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3593-3603.
Zhou G Q, Xu J M, Yin C Q, et al. Numerical prediction of major atmospheric pollutants over the Yangtze River Delta region driven by CMA-GFS [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3593-3603.

CMA-GFS 驱动长三角主要大气污染物数值预报

周广强*,许建明,殷长秦,毛卓成,余钟奇,瞿元昊 (长三角环境气象预报预警中心,上海 200030)

摘要：为强化区域大气环境数值预报的自主可控和对空气质量预报预警业务的支撑能力,基于华东区域大气环境数值预报系统研制了 CMA-GFS 驱动数值预报系统,分析了 2023 年 7 月 4 日~2024 年 7 月 3 日长三角地区主要大气污染物的预报效果及其与 NCEP-GFS 和 ECMWF 驱动预报效果的差异.结果显示,CMA-GFS 驱动预报对主要污染物具有良好的预报效果,相关系数一般超过 0.7、均方根误差约为观测均值的 30%~70%,不同时效的预报能力接近;不同污染物的预报效果之间存在性能差异和空间不同,北部优于南部,$PM_{2.5}$ 和 O_3 预报效果较好,PM_{10} 系统性低报而其他要素不同程度高报.CMA-GFS 驱动的预报效果略优于 ECMWF 驱动而与 NCEP-GFS 驱动相当,但相互之间的差异一般不超过 5%.评估结果证实了 CMA-GFS 应用于长三角地区空气质量数值预报的适用性,但不同表现的预报偏差表明还需要开展针对性的数值预报技术改进和应用方法研究.

关键词：CMA-GFS；数值预报；空气质量；大气污染；WRF-Chem
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-3593-12

Numerical prediction of major atmospheric pollutants over the Yangtze River Delta region driven by CMA-GFS. ZHOU Guang-qiang*, XU Jian-ming, YIN Chang-qin, MAO Zhuo-cheng, YU Zhong-qi, QU Yuan-hao (Yangtze River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Shanghai 200030, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3593~3603

Abstract：To enhance the independence and controllability of regional atmospheric environment numerical prediction and its capability to support air quality forecast and air pollution warning, a CMA-GFS driving numerical prediction system (RAEMS-CMA) was established and operationally implemented. This system was based on the NCEP-GFS driving Regional Atmospheric Environmental Modeling System for eastern China (RAEMS-NCEP). The forecast effects evaluation on the major air pollutants over the YRD region from July 4th, 2023, to July 3rd, 2024, was executed. Evaluation results showed that RAEMS-CMA had good performance in forecasting the major air pollutants, e.g. correlation coefficients were generally over 0.7 and root mean square errors were 30%~70% of corresponding observation means. The performance was consistent in different forecast lengths of 24h ~ 96h. Further analysis indicated that the performance differs from air pollutants, with better skills in forecasting $PM_{2.5}$ and O_3. The prediction of PM_{10} was underestimated, while the others were overestimated. It also showed better forecast capability over the north region than over the south. The intercomparison indicated that RAEMS-CMA had slightly superior performance to that of RAEMS-EC (which was driven by ECMWF) and accordant to RAEMS-NCEP, while their differences were usually less than 5%. These results proved the applicability of CMA-GFS in numerical air quality prediction over the YRD region. At the same time, the divergent performance in pollutants and regions suggests further efforts on technological improvements and application approaches to numerical air quality prediction.

Key words：CMA-GFS；numerical prediction；air quality；atmospheric pollution；WRF-Chem

数值模拟和数值预报是开展大气污染研究与环境空气质量预报业务和相关服务的重要技术方法和技术途径[1-9].无论是全球尺度还是区域尺度,大气环境的模拟均是在气象条件的驱动下,由大气化学模式计算得到污染物的空间分布和时间演变.

面向区域空气质量模拟,常用的大气化学传输模式包括国外的 WRF-Chem[10]、CMAQ[11]和国内的 NAQPMS[12]与 CUACE[13]等.其中,WRF-Chem 包含了详细的大气物理和化学过程处理方案,采用在线(online)方式处理气象和化学的计算,即化学部分和物理部分在线耦合,使用相同的模式网格、平流、对流和扩散方案.在线耦合技术的使用避免了对风速、边界层参数、水成物、降水等气象场进行时间插值,减少了离线技术(物理与化学计算分别进行)中时间尺度小于气象模式输出间隔的大气过程的信息丢失,而这些丢失信息对高分辨率空气质量模拟

收稿日期：2024-12-23
基金项目：上海市自然科学基金资助项目(22ZR1467500);华东区域气象科技协同创新基金资助项目(QYHZ202317);国家重点研发计划项目(2016YFC0201900)
* 责任作者, 教授级高级工程师, zhougq21@163.com

非常重要[9].应用该模式的在线技术优势,长三角环境气象预报预警中心在多年研究的基础上,于 2013 年建立了华东区域大气环境数值预报业务系统.该系统对华东区域、尤其是长三角区域的空气质量保持了较高的预报能力[9,14-15],在国内外得到了广泛应用,是欧盟 MarcoPolo-PANDA 国际合作项目[1]和国家气象中心[16]空气质量集合预报的成员之一.

无论是采用在线还是离线方式,区域大气环境模拟都需要全球气象场作为气象初始条件和边界条件进行驱动.较长时间以来,由于相对开放的数据共享策略和较好的预报能力,美国国家环境预报中心(NCEP)、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)等国外全球预报系统(GFS)产品在国内区域大气环境模拟和预报中占据了主力地位,尤其是 NCEP-GFS 或其再分析产品[6,9,17].近年来,中国气象局开发的全球中期数值预报系统(CMA-GFS)得到了长足发展.CMA-GFS 于 2009 年投入准业务运行,2016 年业务化运行.随着资料同化、动力框架与物理过程等方面的持续改进和水平与垂直分辨率的逐步提高,该模式的预报性能逐步接近国际先进水平.目前 CMA-GFS 已升级至 V4.0 版本[18],水平分辨率提高至 0.125°,预报性能全面提升,北半球可预报日数突破 8d,降水预报效果显著改进.

本文研制了 CMA-GFS 驱动华东区域大气环境数值预报系统,评估了该系统对长三角地区主要大气污染物的预报能力,旨在强化数值预报产品对区域空气质量预报和大气污染预警服务的支撑能力,推进国产 CMA-GFS 数据在大气环境领域应用,从而提升区域大气环境数值预报自主性.

1 数据与方法

1.1 预报系统和模拟方案

CMA-GFS 驱动华东区域大气环境数值预报系统(以下简称 CMA-GFS 驱动系统)使用中国气象局全球同化预报系统的预报数据作为气象初始和边界条件,采用了 NCEP-GFS 驱动华东区域大气环境数值预报业务系统[9]的基本框架、物理化学设置以及人为源资料和生物源静态数据.采用单层网格,中心为(32.5°N,118°E)、水平网格 360(东西)×400(南北)、水平分辨率 6km,预报范围覆盖华东及周边区域(图 1).垂直 28 层(层顶 50hPa, η=1.000, 0.990, 0.978, 0.964, 0.946, 0.922, 0.894, 0.860, 0.817, 0.766, 0.707, 0.644, 0.576, 0.507, 0.444, 0.380, 0.324, 0.273, 0.228, 0.188, 0.152, 0.121, 0.093, 0.069, 0.048, 0.029, 0.014, 0.000).气象时间步长为 30s,化学时间步长为 60s.物理和化学方案设置与排放源处理见表 1.本系统构建时,针对 CMA-GFS 数据修改了部分 WRF 预处理程序(WPS)和参数表,使用的模式包含了云内[19]和云下[20]湿清除改进.

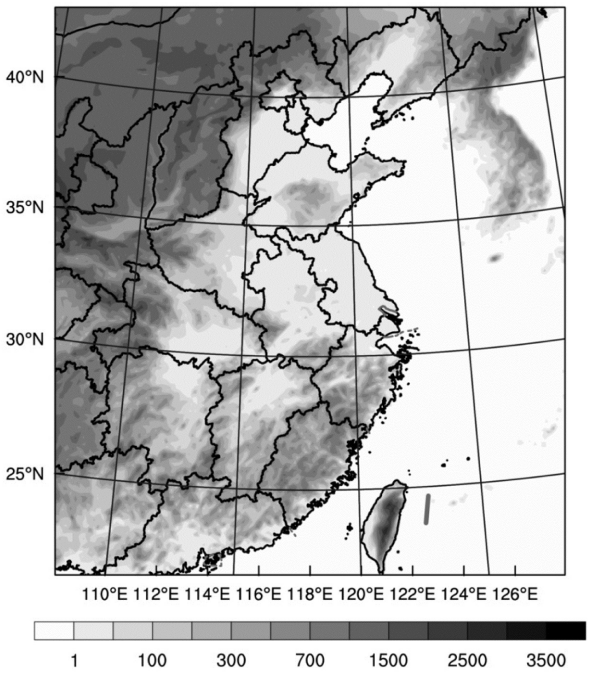


图 1 模拟区域与地形高度(m)

Fig.1 Modeling region and topographic height(m)

审图号:GS(2024)0650 号

本系统自 2023 年 6 月 30 日起每日起报一次,起报时间为世界时(UTC)12:00,CMA-GFS 数据通过国家气象信息中心获得.作为对比的 NCEP-GFS[9]和 ECMWF[21]驱动的预报系统,除使用不同的气象驱动场和各自的前次 24h 预报作为当次的化学初始场外,其他配置完全相同;3 个预报系统均为业务化运行.CMA-GFS 数据水平分辨率为 0.125°×0.125°,每 6h 更新 1 次(00:00,06:00,12:00,18:00UTC),垂直方向 40 层(1000 至 0.1hPa,其中 50hPa 以下 27 层).NCEP-GFS 和 ECMWF 资料的水平分辨率分别为 0.5°×0.5°和 0.25°×0.25°,50hPa 以下层数分别为 23 和 17 层;更新频次同 CMA-GFS.总的来说,CMA-GFS 具有更高的水平分辨率和更密的垂直层次(表 2),更接近本文预报系统的网格设置,这得益于

CMA-GFS V4.0 的关键技术改进[18]和更有利于业务化应用的数据传输条件.

表 1　预报系统物理、化学方案设置与排放源处理

Table 1　Options of physical and Chemical Schemes and treatment of anthropogenic and biogenic emissions

方案类型	方案选项	描述
显示物理(mp_physics)	WSM 6	WRF Single-Moment 6-class 霰方案[22]
积云参数化(cu_phy)	不使用	
长波辐射(ra_lw)	RRTM	Rapid Radiative Transfer Model 长波辐射方案[23]
短波辐射(ra_sw)	Dudhia	Dudhia 短板辐射方案[24]
表面层物理(sf_sfclay)	Monin_Obukhov	Monin_Obukhov 方案[25]
陆面物理(sf_surface)	Unified Noah	Unified Noah 陆面模式[26]
边界层物理(bl_pbl)	YSU	Yonsei University 边界层方案[27]
气相化学	RADM2	Regional Acid Deposition Model version 2[28]
无机气溶胶	ISORROPIA II	ISORROPIA(平衡,希腊语) II 热动力平衡机制[29]
有机气溶胶	MADE/SORGAM	Modal Aerosol Dynamics Model/Secondary Organic Aerosol Model[30]
人为源	基于 MEIC 改进	Multi-resolution Emission Inventory for China[31]
生物源	MEGAN2 在线计算	Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature[32]

表 2　3 种全球天气预报数据的差异

Table 2　Differences of the three global weather predictions

名称	分辨率(°)	50hPa 以下垂直层次(hPa)
CMA-GFS	0.125	1000,975,950,925,900,850,800,750,700,650,600,550,500,450,400,350,300,275,250,225,200,175,150,125,100,70,50
NCEP-GFS	0.5	1000,975,950,925,900,850,800,750,700,650,600,550,500,450,400,350,300,250,200,150,100,70,50
ECMWF	0.25	1000,950,925,900,850,800,700,600,500,400,300,250,200,150,100,70,50

1.2　数据与评估方法

本文分析时段为 2023 年 7 月 4 日~2024 年 7 月 3 日,为完整一年;分析要素为长三角地区存在较高污染风险的主要大气污染物的日值,包括 PM_{10}、$PM_{2.5}$、O_3-8h(日最大 8h 滑动平均臭氧)、O_3-1h(日最大小时平均臭氧)和 NO_2;空间范围为长三角,采用地级以上市(共 41 个,简称市)的平均/最大代表该市,41 市为上海市、江苏省 13 市(南京市、无锡市、徐州市、常州市、苏州市、南通市、连云港市、淮安市、盐城市、扬州市、镇江市、泰州市、宿迁市)、浙江省 11 市(杭州市、宁波市、温州市、嘉兴市、湖州市、绍兴市、金华市、衢州市、舟山市、台州市和丽水市)和安徽省 16 市(合肥市、芜湖市、蚌埠市、淮南市、马鞍山市、淮北市、铜陵市、安庆市、黄山市、滁州市、阜阳市、宿州市、六安市、亳州市、池州市、宣城市).污染物小时浓度观测数据来自全国城市空气质量实时发布平台(https://air.cnemc.cn:18007/).预报小时浓度取距离测站最近的模式网格的整点值;以积分 5~28h 为 24h,并依次类推得到 48h、72h 和 96h,共 4 个时效的预报结果.浓度日值的计算根据国家标准[33]及其技术规定[34]进行,取各市国控点(不含参考点)平均为该市小时浓度,再由小时浓度计算日值;观测和预报值的计算分别进行,5 个要素的观测日值和各系统的预报日值的有效率均在 95%以上.根据浓度日值分段线性计算空气质量分指数并确定其等级.

主要评估指标为 41 市的总体指标和各市指标,分浓度和空气质量等级两类.浓度指标包括平均偏差(MB)、平均误差(或平均绝对误差,ME)、均方根误差(RMSE)、偏差中值(medB)、误差中值(medE)、相关系数(R)、FACx 等.其中前 5 个指标合称绝对数值指标,后 2 个为相对数值指标;FACx 指预报值在观测值[1/x, x]之间的占比,可通过 x 不同取值反映预报偏差的分布情况,本文取 2、1.5 和 1.25. Derwent 等[35]认为对于空气质量数值预报 FAC_2 超过 0.5 为可接受,本文增加了 $FAC_{1.5}$ 和 $FAC_{1.25}$ 来评估顺应数值预报发展的更高要求下的数值预报性能.等级指标使用等级预报准确率,定义为预报等级与观测等级相同的记录数在分析时段内的占比.

2　结果与讨论

2.1　CMA-GFS 驱动系统的总体预报性能

本系统对长三角地区 $PM_{2.5}$ 浓度具有良好的预报效果(表 3):4 个预报时效的相关系数均超过 0.7,达 0.73~0.76,不同预报时效之间的差异很小,保持了很高的稳定性,这个结果高于 Zhou 等[9]对华东区域、周广强等[21]对长三角和杨关盈等[36]对安

徽省的预报结果,与周广强等[15]的冬季预报相当;平均偏差和平均误差分别为 4~6 和 13~15μg/m^3,总体上处于较高的水平,不同时效之间的差异也不大;偏差中值和误差中值为 2~4 和 9~10μg/m^3,也较小,数值上略小于平均偏差和平均误差;均方根误差为 20~23μg/m^3,比平均误差大 7~8μg/m^3,表明 $PM_{2.5}$ 预报的极大偏差数量上不多;$PM_{2.5}$ 预报浓度在数值上大部分较为接近观测,80%左右在观测值的[0.5,2](0.5~2 倍),超过 50%在[2/3,1.5], [0.8,1.25]的占比也超过 30%.

表 3 长三角地区主要大气污染物不同时效预报效果

Table 3 Summarized forecast performance of major air pollutants over the YRD region

时效(h)	要素	MO	MF	MB	ME	medB	medE	RMSE	*R*	FAC_2	$FAC_{1.5}$	$FAC_{1.25}$
24	PM_{10}	56	44	−13	21	−10	15	31	0.68	0.75	0.52	0.30
	$PM_{2.5}$	33	37	4	13	2	9	20	0.76	0.81	0.57	0.34
	O_3−8h	103	128	25	31	21	24	39	0.79	0.93	0.76	0.49
	O_3−1h	116	143	27	33	23	27	43	0.79	0.94	0.78	0.50
	NO_2	25	32	7	14	5	11	19	0.54	0.69	0.44	0.25
48	PM_{10}	56	47	−9	21	−9	15	30	0.69	0.76	0.53	0.31
	$PM_{2.5}$	33	40	6	14	4	9	21	0.76	0.80	0.56	0.33
	O_3−8h	103	126	23	30	19	24	39	0.76	0.93	0.76	0.50
	O_3−1h	116	140	25	32	21	25	42	0.76	0.94	0.78	0.52
	NO_2	25	31	6	14	3	10	18	0.53	0.70	0.44	0.25
72	PM_{10}	56	48	−8	21	−8	15	30	0.70	0.76	0.53	0.31
	$PM_{2.5}$	33	40	6	15	4	10	22	0.74	0.78	0.54	0.31
	O_3−8h	103	124	21	31	17	23	40	0.72	0.92	0.75	0.50
	O_3−1h	116	138	23	33	19	25	43	0.71	0.93	0.77	0.52
	NO_2	25	31	6	14	3	10	18	0.52	0.69	0.45	0.26
96	PM_{10}	56	48	−8	21	−8	15	31	0.70	0.75	0.52	0.31
	$PM_{2.5}$	33	39	6	15	4	10	23	0.73	0.77	0.53	0.31
	O_3−8h	104	124	20	31	17	24	40	0.70	0.92	0.74	0.48
	O_3−1h	117	138	21	33	18	26	43	0.70	0.93	0.76	0.51
	NO_2	25	30	5	14	3	10	19	0.50	0.69	0.44	0.25

注:MO和MF为观测和预报均值;MO~RMSE单位为μg/m^3,其他无量纲.

对于 O_3,有两个要素代表日值,O_3−8h 和 O_3−1h,可分别反映臭氧的较长时间的累计影响和较短时间的直接影响.总的来说,本系统对这两个要素的预报能力接近.数值上看,由于 O_3−1h 浓度高于 O_3−8h,因此与浓度大小有关的平均偏差、平均误差、均方根误差等评估指标也相应较大;相对指标上,O_3−8h 的相关系数略高于 O_3−1h,3 个 FAC*x* 则相等或略低于 O_3−1h,综合相当.不同时效的预报效果上,相关系数随预报时效增加略有下降,但变化均不超过 0.1,最大为 0.09;FAC*x* 指标互有优劣,但差异很小,最大不超过 0.02. 9 个指标中,相对于 24h 预报效果,48h 和 72h 均有超过半数指标略优,96h 则多数略低;数值上,各指标的差异均不大,因此可以认为不同时效的预报能力接近.与 Zhou 等[9]相比,相关系数和 FAC_2 均较高而绝对数值指标则较低,因此预报效果有提升.对于臭氧,峰值时间也是重要指标,以 48h 预报为例(图 2),O_3−8h 和 O_3−1h 的峰值时间预报偏差较为均衡地分布在“0”两侧,O_3−8h 预报峰值时间与观测峰值时间相同、相差 1h 以内和 3h 以内的占比依次为 26.5%、62.7%和 80.6%,O_3−1h 的对应比例分别为 18.8%、49.7%和 77.2%,由此可见预报的臭氧峰值与观测较为一致.同时,O_3−1h 体现出一定的左偏,比例最大处为“−1”,“0”的占比略低于“−1”处,表明预报峰值时间稍偏早.这既与数据的处理方法有关(因为观测为前 1h 内的平均值而预报为整点值),也存在 O_3 的光化学生成偏早的因素,可能源于 O_3 光化学生成阶段(主要在上午)[37]光照/温度上升偏快或挥发性有机物浓度偏高,还需要进一步分析.另一方面,无论是 O_3−8h 还是 O_3−1h,均存在明显的高报,平均偏差和偏差中值在 20μg/m^3 上下,平均偏差为观测均值的 18%~24%.

PM_{10} 和 NO_2 也是长三角地区较重要的大气污染物.PM_{10} 预报总体偏低,平均偏差为−13~−8μg/m^3,与 $PM_{2.5}$ 不同,表明粗颗粒物的预报上存在不足;相关系数较高,在 0.68~0.70 之间;FAC*x* 分别约超 0.75、0.5 和 0.3. 4 个时效的 NO_2 预报效果

指标解决,差异不大,但后 3 个时效的各项指标相对于 24h 呈现一致性的改进;相关系数略超 0.5;数值上则存在较明显的偏高,平均偏高幅度约 20%. PM_{10} 的预报效果较 Zhou 等[9]有较明显的改进,但 NO_2 因为高报而造成平均偏差、平均误差和均方根误差等指标反而下降.

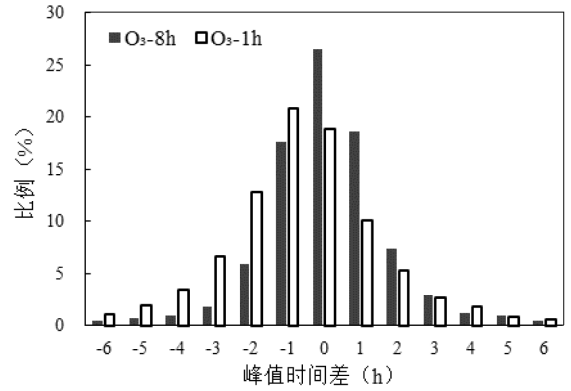


图 2　O_3-8h 和 O_3-1h 48h 预报峰值时间偏差分布

Fig.2　Distribution of pulse-time bias of O_3-8h and O_3-1h 48h forecast

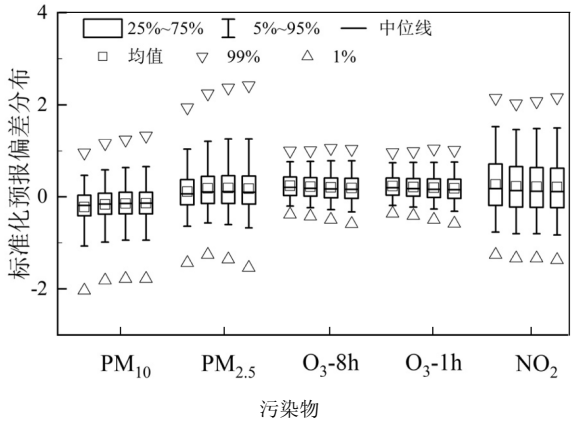


图 3　主要污染物不同时效预报偏差分布

Fig.3　Daily forecast bias distribution of major air pollutants in different prediction lengths

各要素从左至右依次为 24~96h 预报时效

PM_{10}、$PM_{2.5}$、O_3 和 NO_2 4 种污染物之间,去除由于浓度差异较大不宜直接比较的绝对数值指标,仅从可比的相对类指标(R 和 FAC*x*)进行分析.相关系数上,O_3 与 $PM_{2.5}$ 较高,均超过 0.7;PM_{10} 略低,但超过 0.68;NO_2 则在 0.5~0.54 之间,下降明显.不同时效上,O_3 预报的相关系数下降相对较快,O_3-8h 和 O_3-1h 一致地从 0.79 下降至 0.70;其他要素则有升有降,变化不大.各要素 FAC*x* 之间的大小关系与相关系数一致,但 NO_2 的偏低程度得到缓解.

逐日预报偏差是各预报效果指标的计算基础,因此进一步分析其分布特征.由于不同要素的浓度差异显著,为增强可比性,计算了标准化(除以各自的观测均值,均值见表 3)的各主要污染物不同时效预报偏差分布(图 3).从中可以看出,PM_{10} 以负偏差为主,75%分位值(由低至高排序,下同)略大于 0,各预报时效负偏差的比例均约占 70%;$PM_{2.5}$ 和 NO_2 各预报时效的 25%分位值稍低于 0,负偏差比例约为 40%、正偏差约 60%;O_3-8h 和 O_3-1h 的 25%分位线均在 0 附近,负偏差的比例在 25%上下,因此大部分(~75%)为正偏差.由此可知,O_3 预报存在系统性的偏高,$PM_{2.5}$ 和 NO_2 存在一定的偏高(正偏差较多),而 PM_{10} 则以负偏差为主,与各污染物平均偏差的正负性一致;相对而言,O_3 和 PM_{10} 表现出的较为系统性的偏差分布特征相对有利于数值预报的改进与基于数值预报数据的改进应用(释用).

不同要素标准化偏差的变化范围具有明显差异:O_3-8h 和 O_3-1h 相对较小,二者相当,50%(25%~75%分位)的偏差分布在观测值的约 0.5 倍范围内,90%(5%~95%分位)基本不超过 1 倍范围,98%(1%~99%分位)不超过 1.5 倍范围;PM_{10} 的偏差分布范围增大,上述 3 个区间的范围依次约为观测值的 0.5 倍、1.5 倍和 3 倍;$PM_{2.5}$ 的分布范围进一步增大,分别略超 0.5 倍、1.5 倍和 3.5 倍;NO_2 的分布范围最大,分别约 1 倍、2 倍和 3.5 倍.从不同预报时效的差异看,各要素 25%~75%分位的变化范围均不大,5%~95%分位和 1%~99%分位的范围则存在不同程度的增加,其中 $PM_{2.5}$ 增加较大,主要体现为 99%分位增大明显.$PM_{2.5}$ 极端预报偏差(1%和 99%外)随预报时效增加而增多与表 3 中均方根误差和 FAC*x* 指标体现的随时效增加预报性能下降更明显的结论一致,表明其对气象条件的变化更敏感,这与 $PM_{2.5}$ 中占主要成分的硫酸盐、硝酸盐和铵盐[38-39]均来源于二次生成有关.各要素预报偏差分布范围的差异,加之偏差中值与“0”线接近程度接近,造成了其他评估指标的相对差异,如对均方根误差与观测均值的比例,O_3-8h 和 O_3-1h 各预报时效均在 0.3~0.4,PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 分别约为 0.5 和 0.6,NO_2 则上升至超过 0.7,排序与各污染物标准化预报偏差分布范围大小的排序一致,因此逐日预报偏差的相对分布较好地反映了系统对各污染物的预报能力.

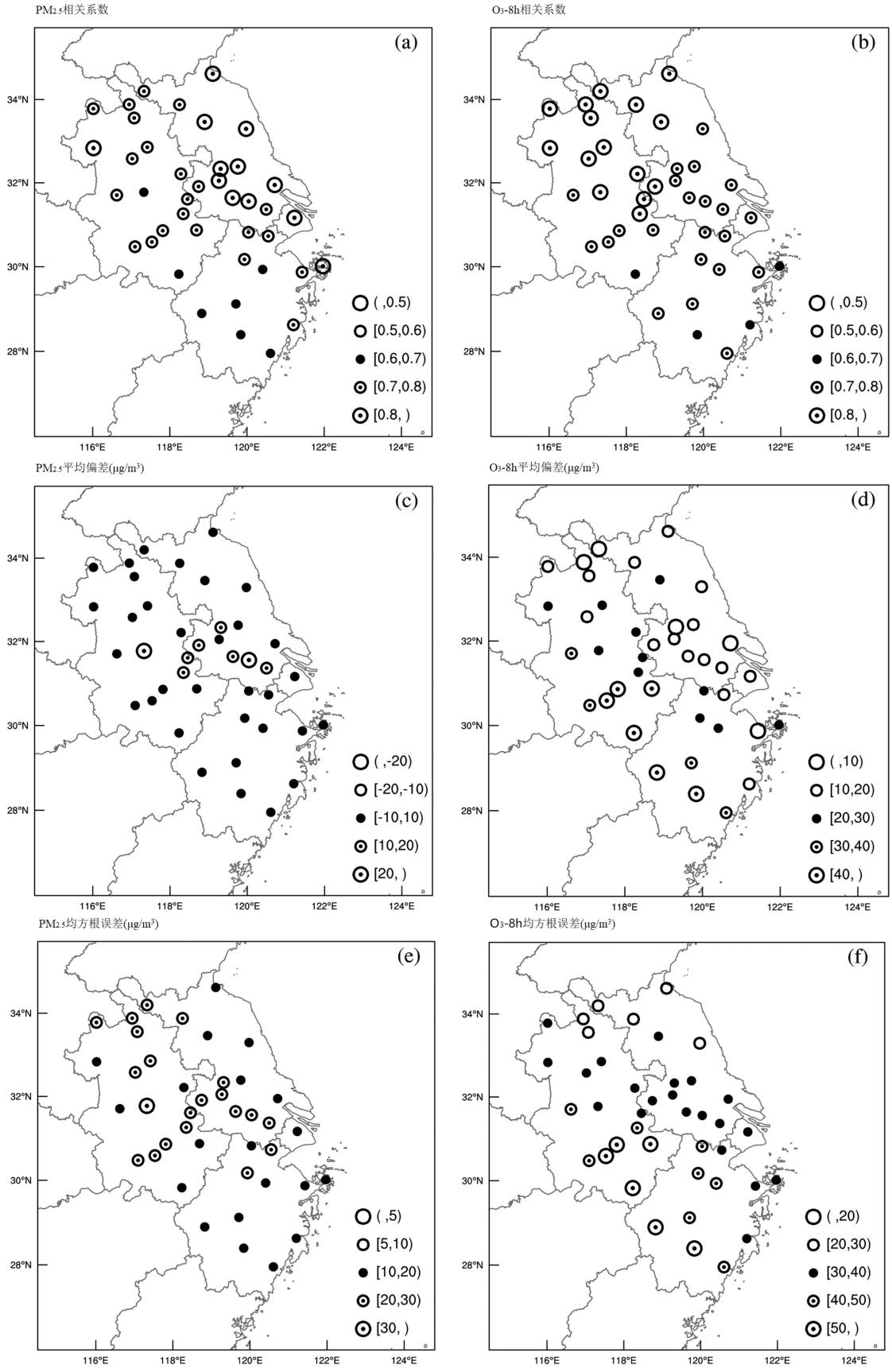


图 4 各市 $PM_{2.5}$ 和 O_3−8h 48h 预报相关系数、平均偏差、均方根误差空间分布

Fig.4 Distributions of correlation coefficient, mean bias, root mean square error of $PM_{2.5}$ and O_3−8h 48h forecast

审图号:GS(2024)0650 号

综上,CMA-GFS 驱动系统对长三角地区各主要污染物具有良好的预报效果,不同时效的预报能力总体接近.不同污染物之间,$PM_{2.5}$ 和 O_3 预报效果较优,PM_{10} 次之,NO_2 相对较低;数值上,O_3 预报存在明显的系统性偏高,$PM_{2.5}$ 和 NO_2 存在一定偏高,而 PM_{10} 为系统性的偏低.

2.2　$PM_{2.5}$ 和 O_3-8h 预报效果空间分布

分析时段内,PM_{10}、$PM_{2.5}$、O_3-8h、O_3-1h 和 NO_2 的污染率分别为 3.1%、6.7%、9.9%、4.2%和 0.6%,并基于不同时效预报效果接近的特点和空气质量预报业务需求,进一步分析 41 市 $PM_{2.5}$ 和 O_3-8h 的 48h 时效预报效果的空间分布.

从图 4 可以看出,各市 $PM_{2.5}$ 预报的相关系数位于 0.63~0.86,其中 7 个市在 0.6~0.7,22 个在 0.7~0.8,12 个超过 0.8;分布上,由低至高依次为浙江西南部、浙江东北部-安徽至江苏.各市平均偏差在数值上较为接近,绝大部分(33 个)在±10μg/m^3 之间,其中±5μg/m^3 之间的 19 个;8 个超过+10μg/m^3,其中 2 个超过+20μg/m^3;超过+10μg/m^3 的市基本位于长江附近.各市 $PM_{2.5}$ 的均方根误差也具有较好的一致性,10~20μg/m^3 和 20~30μg/m^3 各有 20 个,仅一个超过 30μg/m^3;均方根误差的空间分布与平均偏差相似.相关系数、平均偏差和均方根误差空间分布的不一致性表明各评估指标的空间分布之间可能存在不同的关联性,因此进一步分析了各评估指标之间的空间相似性(表 4).从中可以发现,$PM_{2.5}$ 预报的平均偏差、平均误差、偏差中值、误差中值和均方根误差的空间分布之间为正相关,相关系数超过 0.85,偏差之间和误差之间分别较高;FACx 之间的相关性在 0.9 以上,其与前述 5 个绝对数值指标间呈弱负相关;相关系数的分布相对独立,与其他指标空间分布的相似性不高.

O_3-8h 的相关系数在长三角北部区域相对较高;数值上,22 个在 0.7~0.8,15 个超过 0.8,4 个在 0.6~0.7;综合起来 90%市的相关系数超过 0.7,表明各市的预报均与观测具有很好的时间变化一致性.平均偏差均为正偏差,具有明显的空间差异,东部和北部区域相对较小,一般在 10~30μg/m^3,西南部区域较大,超过 40μg/m^3 的位于安徽南部-浙江西部.均方根误差的分布形态与平均偏差相似,呈东、北较低而西、南较高的分布特征;数值上,6 个在 30μg/m^3 以下,21 个在 30~40μg/m^3,8 个在 40~50μg/m^3,6 个超过 50μg/m^3.臭氧预报各评估指标空间分布的相似性更高(表 4),绝对数值指标之间和 FACx 之间的相关系数均在 0.95 以上、绝对数值指标与 FACx 之间均超过-0.9、相关系数与其他指标也超过±0.6,这表明相关系数外,O_3-8h 预报的各评估指标呈相同或相反的空间分布.

$PM_{2.5}$ 和 O_3-8h 预报效果的空间分布存在明显的不同.各市 $PM_{2.5}$ 的相关系数差异相对较大,平均偏差和均方根误差相对较为一致,O_3-8h 与之相反;O_3-8h 在东、北部区域预报效果较好,西南部区域预报较差,而 $PM_{2.5}$ 在北部相关系数较高、中部预报偏差(以平均偏差和均方根误差为代表)较大.二者的相关系数在长三角北部区域整体较高,表明预报的 $PM_{2.5}$ 和 O_3-8h 浓度变化趋势与观测的一致性更好,应得益于地势相对平坦(图 1),污染物的预报准确性更好[40].而平均偏差和均方根误差的大小与浓度有关[9],尤其是均方根误差,由于北部 $PM_{2.5}$ 浓度相对较高而 O_3 浓度较低,造成了二者空间分布上的不同.不同污染物预报效果空间分布的差异为数值预报的优化带来了较高的挑战,需要根据不同要素、不同区域和不同评估指标进行针对性、差异化的努力;从当前的预报能力看,臭氧预报效果的改进具有相对有利的条件.

表 4　$PM_{2.5}$ 和 O_3-8h 48h 预报评估指标间相关系数

Table 4　Correlation coefficients among evaluation indices of $PM_{2.5}$ and O_3-8h 48h forecast

参数		O_3-8h								
		MB	ME	medB	medE	RMSE	*R*	FAC_2	$FAC_{1.5}$	$FAC_{1.25}$
$PM_{2.5}$	MB		0.97	1.00	0.96	0.96	−0.60	−0.90	−0.93	−0.94
	ME	0.89		0.97	0.99	0.99	−0.66	−0.97	−0.98	−0.97
	medB	0.99	0.87		0.97	0.95	−0.61	−0.90	−0.92	−0.94
	medE	0.86	0.96	0.85		0.97	−0.66	−0.97	−0.97	−0.97
	RMSE	0.88	0.98	0.86	0.91		−0.65	−0.96	−0.97	−0.96
	R	0.17	0.03	0.16	−0.04	0.08		0.70	0.73	0.76
	FAC_2	−0.14	−0.18	−0.14	−0.36	−0.04	0.32		0.98	0.96
	$FAC_{1.5}$	−0.24	−0.26	−0.23	−0.42	−0.11	0.35	0.95		0.98
	$FAC_{1.25}$	−0.28	−0.29	−0.28	−0.46	−0.14	0.34	0.90	0.95	

2.3　CMA-GFS 驱动与 NCEP-GFS 和 ECMWF 驱动的预报性能对比

由于不同时效的预报效果总体接近,这里仅对 48h 预报进行分析.比较预报效果的优劣时采用 CMA-GFS 驱动的结果相对于 NCEP-GFS 和 ECMWF 驱动预报效果的改进,并统一为以正值表

示预报效果较好、负值表示预报效果较低.

总体上,CMA-GFS 与 NCEP-GFS 和 ECMWF 驱动的长三角地区主要污染物预报具有高度一致性.以 $PM_{2.5}$ 和 O_3-8h 为例,他们的逐日预报(图 5)集中在 1:1 线附近、绝大部分在 1.5 倍范围内.以 CMA-GFS 驱动预报为基准,NCEP-GFS 和 ECMWF 驱动预报的 $PM_{2.5}$ 分别有 87%和 88%在 1/1.5~1.5 倍之间,O_3-8h 则均有 97%;1.5 倍外的数据呈对称分布,$PM_{2.5}$ 在 y=1.5x 和 y=x/1.5 线外侧的数据占比均约 6%,O_3-8h 均约 1.5%.1.5 倍范围外的数据主要位于中等浓度区,该部分数据对应的 $PM_{2.5}$ 和 O_3-8h 观测均值分别约为分析时段均值的 80%和 70%,且两侧接近,表明不同气象驱动下的预报对于高浓度或低浓度具有更好的一致性,但对中等浓度存在分歧,即 CMA-GFS、NCEP-GFS 和 ECMWF 在过渡性污染气象条件的预报上存在差异.若设截距为 0,则他们之间线性拟合的决定系数超过 0.95(0.95~0.99)、斜率非常接近 1(0.98~1.00).

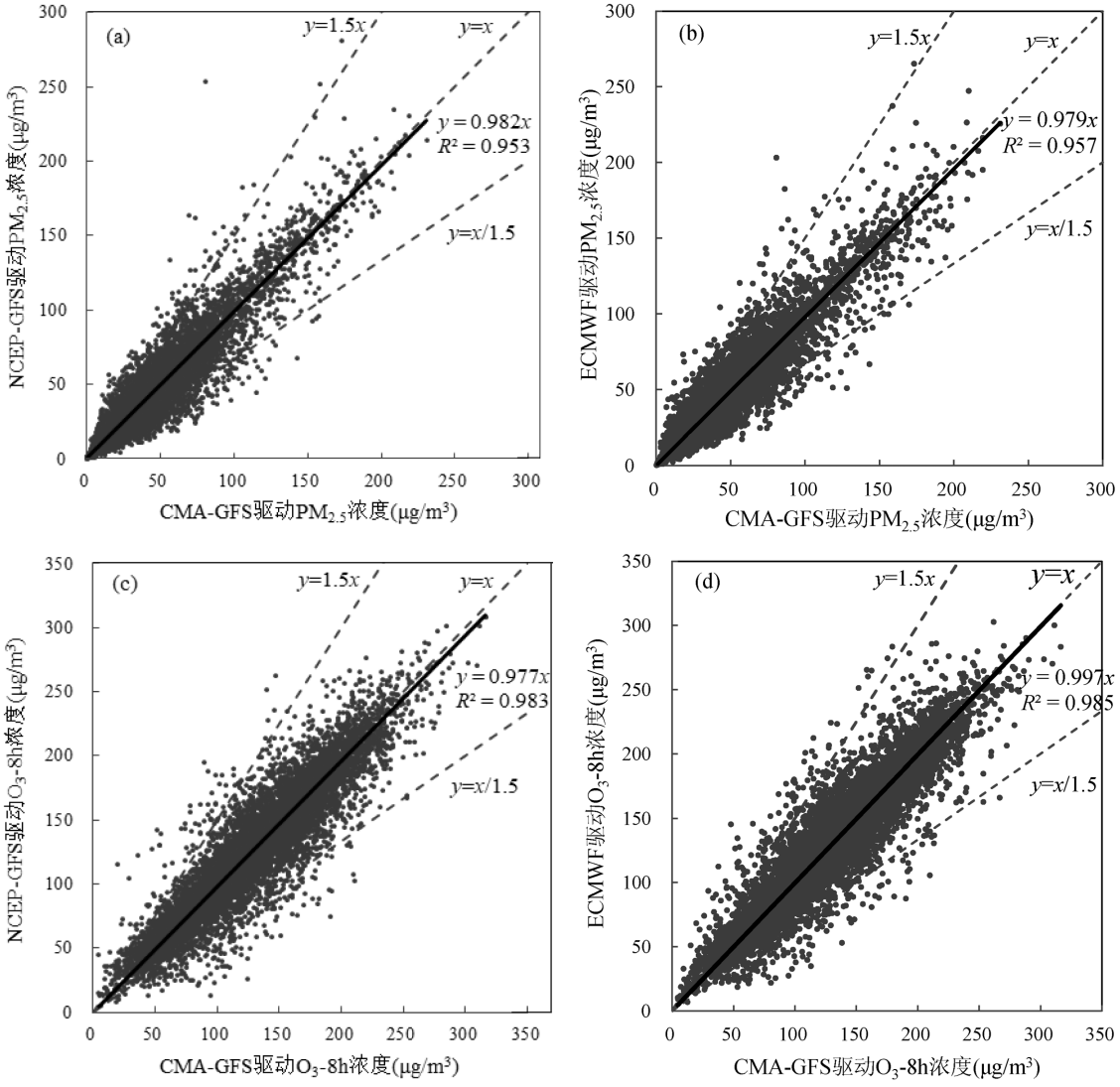


图 5 CMA-GFS 与 NCEP-GFS 和 ECMWF 驱动逐日 48h 预报 $PM_{2.5}$ 和 O_3-8h 浓度对比

Fig.5 Scattered daily concentrations of $PM_{2.5}$ and O_3-8h 48h forecast from RAEMS-NCEP and RAEMS-EC comparing to those from RAEMS-CMA

从表 5 评估指标的改进可以看出,CMA-GFS 驱动系统对 PM_{10}、$PM_{2.5}$、O_3-8h、O_3-1h 和 NO_2 5 个要素的 48h 预报能力总体上与 NCEP-GFS 和 ECMWF 驱动系统相当,不同要素之间略有差异,但改进或下降的值均不大.相对于 NCEP-GFS 驱动系统,9 个评估指标中,上述 5 要素分别有 5、4、4、3

和 6 个指标为正值,合计 22 个,占总计 45 个指标的一半;相对于 ECMWF 驱动系统,5、5、5、7 和 6 个指标为正值,合计 28,约占 60%;因此从改进指标的数量上,CMA-GFS 驱动与 NCEP-GFS 驱动的预报效果基本相同,略高于 ECMWF.数值上,这些指标的改进量均较小,与表 3 所示的对应值相比,仅平均偏差或偏差中值的部分指标可达 10%,去除这两类数值较小且以趋于“0”为目标的评估指标,其他指标的改进比例绝大多数不超过±5%,表明不同预报系统的预报能力总体接近.

表 5　CMA-GFS 驱动 48h 预报效果相对 NCEP-GFS 和 ECMWF 驱动预报的改进

Table 5　Performance improvement of RAEMS-CMA 48h forecast to those of RAEMS-NCEP and RAEMS-EC

系统	要素	MB	ME	medB	medE	RMSE	*R*	FAC_2	$FAC_{1.5}$	$FAC_{1.25}$
相对 NCEP-GFS 驱动	PM_{10}	−1.4	0.1	−1.2	−0.2	0.0	−0.010	0.014	0.008	0.007
	$PM_{2.5}$	−0.4	0.6	−0.4	0.2	1.2	0.021	−0.006	−0.012	−0.006
	O_3-8h	−2.1	−1.1	−2.1	−1.3	−1.1	0.001	0.002	0.009	0.015
	O_3-1h	−2.1	−1.3	−2.2	−1.6	−1.2	−0.004	0.002	0.012	0.024
	NO_2	0.4	0.4	0.4	0.1	0.6	0.014	−0.007	−0.005	−0.008
相对 ECMWF 驱动	PM_{10}	0.1	0.8	−0.4	0.2	1.3	0.022	−0.003	−0.011	−0.005
	$PM_{2.5}$	−0.2	0.6	0.0	0.2	1.0	0.024	−0.007	−0.011	−0.006
	O_3-8h	0.5	0.2	0.7	0.4	0.1	−0.008	−0.001	−0.003	−0.002
	O_3-1h	0.6	0.2	0.6	0.2	0.1	−0.011	0.001	0.000	0.001
	NO_2	0.1	0.3	0.1	0.1	0.4	0.016	−0.007	−0.004	−0.007

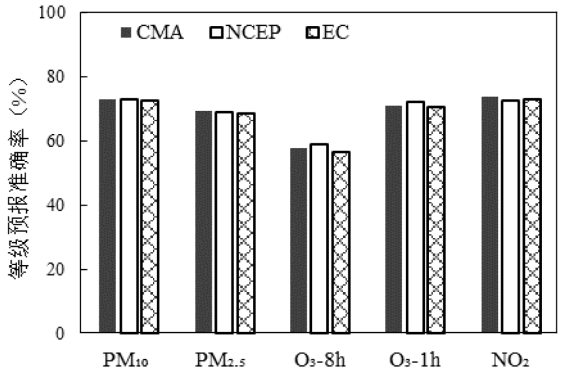


图 6　不同气象驱动下的各污染物 48h 等级预报准确率

Fig.6　Grade accuracy of 48h forecast driven by different meteorological fields

空气质量指数(分指数)等级是衡量环境空气质量的重要指标之一,也是空气质量预报业务和服务的关注重点.如图 6 所示,各系统对长三角地区 PM_{10}、$PM_{2.5}$、O_3-8h、O_3-1h 和 NO_2 5 类污染物的 48h 等级预报准确率接近,CMA-GFS 驱动预报整体略优.上述要素的等级预报准确率具有较明显的差异,PM_{10}、O_3-1h 和 NO_2 相近,略超 70%;$PM_{2.5}$ 次之,略低于 70%;O_3-8h 有较明显的下降,略低于 60%,主要原因在于浓度高报,其平均偏差和偏差中值均与 O_3-1h 接近,而等级限值较小,造成较多(37%)预报等级高于观测.相对于 NCEP-GFS 驱动的预报效果,CMA-GFS 驱动的 O_3-8h 和 O_3-1h 预报稍低而其他 3 个要素略高,相对于 ECMWF 则均为较高;但数值上,相对变化一般不超过 1 个百分点.

综合主要污染物浓度预报和等级预报,尽管在不同污染物或评估指标上存在一定差异,不同气象驱动下的预报效果总体相当.具体而言,CMA-GFS 驱动的长三角地区主要污染物的预报效果略优于 ECMWF 驱动,与 NCEP-GFS 驱动的预报效果互有优劣而总体接近,但不同气象驱动的预报效果之间的差异都很小,变化比例一般不超过 5%、百分比指标的改变一般不超过 1 个百分点.这个结果表明,各预报系统都可以为空气质量预报和大气污染预警提供客观产品支撑,也可以作为成员或集成数据之一支持集合/集成预报[6,16,21,41]、数值预报释用[42-43]等进一步应用.

3　结论

3.1　CMA-GFS 驱动系统对长三角地区各主要污染物都具有良好的预报效果,24~96h 4 个不同时效的预报能力总体接近,如 90%的预报偏差在观测均值的 1.5 倍范围内、均方根误差约为观测均值的 30%~70%、NO_2 外的相关系数一般超过 0.7.

3.2　该系统对不同污染物具有不同的预报效果,且相对优劣因预报偏差分布和评估指标而有不同表现.总体上,$PM_{2.5}$ 和 O_3 预报效果较优,PM_{10} 次之,NO_2

相对较低.O_3 预报存在明显的系统性偏高(正偏差约占 75%),$PM_{2.5}$ 和 NO_2 存在一定偏高(正偏差约占 60%),而 PM_{10} 系统性地偏低(负偏差约占 70%).

3.3 不同污染物要素和不同评估指标在长三角区域的空间分布存在差异.各市 $PM_{2.5}$ 的相关系数差异相对较大,平均偏差和均方根误差较为一致,O_3-8h 与之相反;O_3-8h 在东和北部区域预报效果较好、西南部区域较差,而 $PM_{2.5}$ 在北部相关系数较高、中部预报偏差较大.同一污染物的绝对数值指标之间、FACx 之间均为空间正相关而两类指标之间则为负相关,相关系数与其他指标的空间相关性较小;O_3-8h 评估指标之间的空间相关性高于 $PM_{2.5}$.

3.4 CMA-GFS 驱动的长三角地区主要污染物的预报效果略优于 ECMWF 驱动,与 NCEP-GFS 驱动的结果互有优劣而总体相当,但不同气象驱动的预报之间的差异不大,一般不超过 5%,因此不同气象驱动下的预报效果接近,预报能力基本相同.

3.5 CMA-GFS 驱动系统对长三角地区主要污染物的预报是适用的,具有与其他气象驱动相当的预报效果,但同时也发现其还存在偏离程度不同、空间分布不同且与污染要素和评价指标相关的预报偏差,需要进行针对性、差异化的数值预报技术改进和预报结果释用.

参考文献:

[1] Brasseur G, Xie Y, Petersen A, et al. Ensemble forecasts of air quality in eastern China - part 1: model description and implementation of the MarcoPolo-Panda prediction system, version 1 [J]. Geoscientific Model Development, 2019,12:33-67.

[2] Chen J, Vaughan J, Avise J, et al. Enhancement and evaluation of the AIRPACT ozone and $PM_{2.5}$ forecast system for the Pacific Northwest [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008,113:762-770.

[3] Chen L, Zhu J, Liao H, et al. Assessing the formation and evolution mechanisms of severe haze pollution in the Beijing–Tianjin–Hebei region using process analysis [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019,19:10845-10864.

[4] Mckeen S, Wilczak J, Grell G, et al. Assessment of an ensemble of seven real-time ozone forecasts over Eastern North America during the summer of 2004 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2005,112:3003-3013.

[5] Petersen A, Brasseur G, Bouarar I, et al. Ensemble forecasts of air quality in eastern China - Part 2: Evaluation of the MarcoPolo-Panda prediction system, version 1 [J]. Geoscientific Model Development, 2019,12:1241-1266.

[6] 王 茜,伏晴艳,王自发,等.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, 2010,2(4):1-6.
Wang Q, Fu Q Y, Wang Z F, et al. Application of ensemble numerical model system on the air quality forecast in Shanghai [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2010,2(4):1-6.

[7] Wang Z, Li J, Wang Z, et al. Modeling study of regional severe hazes over mid-eastern China in January 2013 and its implications on pollution prevention and control [J]. Science in China Series D, 2014,57(1):3-13.

[8] 薛文博,付 飞,王金南,等.中国 $PM_{2.5}$ 跨区域传输特征数值模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2014,34(6):1361-1368.
Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. Numerical study on the characteristics of regional transport of $PM_{2.5}$ in China [J]. China Environmental Science, 2014,34(6):1361-1368.

[9] Zhou G, Xu J, Xie Y, et al. Numerical air quality forecasting over Eastern China: An operational application of WRF-Chem [J]. Atmospheric Environment, 2017,153:94-108.

[10] Grell G, Peckham S, Schmitz R, et al. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39:6957-6975.

[11] Byun D W, Schere K L. Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models- 3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system [J]. Applied Mechanics Reviews, 2006,9:51-77.

[12] 王自发,谢付莹,王喜全,等.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, 2006,30(5):778-790.
Wang Z F, Xie F Y, Wang X Q, et al. Development and application of nested air quality prediction modeling system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006,30(5):778-790.

[13] Zhou C, Gong S, Zhang X, et al. Towards the improvements of simulating the chemical and optical properties of Chinese aerosols using an online coupled model - CUACE/Aero [J]. TELLUS B, 2012, 64:18965.

[14] 周广强,耿福海,许建明,等.上海地区臭氧数值预报 [J]. 中国环境科学, 2015,35(6):1601-1609.
Zhou G Q, Geng F H, Xu J M, et al. Numerical ozone forecasting over Shanghai [J]. China Environmental Science, 2015,35(6):1601-1609.

[15] 周广强,谢 英,吴剑斌,等.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, 2016,36(8):2251-2259.
Zhou G Q, Xie Y, Wu J B, et al. WRF-Chem based $PM_{2.5}$ forecast and bias analysis over the East China Region [J]. China Environmental Science, 2016,36(8):2251-2259.

[16] 张恒德,张庭玉,李 涛等.基于 BP 神经网络的污染物浓度多模式集成预报 [J]. 中国环境科学, 2018,38(4):1243-1256.
Zhang H D, Zhang T Y, Li T, et al. Forecast of air quality pollutants' concentrations based on BP neural network multi-model ensemble method [J]. China Environmental Science, 2018,38(4):1243-1256.

[17] 蔡子颖,姚 青,韩素芹,等.气溶胶直接气候效应对天津气象和空气质量的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(3):908-914.
Cai Z Y, Yao Q, Han S Q, et al. The influence of the air quality and meteorological field about aerosol direct climate effect on Tianjin [J]. China Environmental Science, 2017,37(3):908-914.

[18] 张 进,孙 健,沈学顺,等.CMA-GFSV4.0 模式关键技术研发和业务化 [J]. 应用气象学报, 2023,34(5):513-526.

Zhang J, Sun J, Shen X S, et al. Key model technologies of CMA-GFS V4.0 and application to operational forecast [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2023,34(5):513-526.

[19] 周广强,高　伟,谷怡萱,等. WRF-Chem 模式降水对上海 $PM_{2.5}$ 预报的影响 [J]. 环境科学学报, 2017,37(12):4476-4482.
Zhou G Q, Gao W, Gu Y X, et al. Impact of precipitation on Shanghai $PM_{2.5}$ forecast using WRF-Chem [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(12):4476-4482.

[20] 周广强,瞿元昊,高　伟,等.云下湿清除作用对长三角 $PM_{2.5}$ 模拟的影响 [J]. 中国环境科学, 2020,40(7):2794-2801.
Zhou G Q, Qu Y H, Gao W, et al. Simulated impact of blow-cloud wet scavenging on $PM_{2.5}$ over the YRD [J]. China Environmental Science, 2020,40(7):2794-2801.

[21] 周广强,余钟奇,瞿元昊. ECMWF 气象场驱动长三角 $PM_{2.5}$ 预报与最优集成 [J]. 环境科学学报, 2021,41(5):1656-1664.
Zhou G Q, Yu Z Q, Qu Y H. Forecast of $PM_{2.5}$ over Yangtze River Delta by ECMWF data driving and optimal integration [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021,41(5):1656-1664.

[22] Hong S, Dudhia J, Chen S. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parametrisation of clouds and precipitation [J]. Monthly Weather Review, 2004,132(1):103-120.

[23] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997,102:16663-16682.

[24] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a two-dimensional model [J]. Journal of Atmospheric Science, 1989,46(20):077-3107.

[25] Pleim J E. A simple, efficient solution of flux-profile relationships in the atmospheric surface layer [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006,45:341–347.

[26] Alapaty K, Niyogi D, Chen F, et al. Development of the flux-adjusting surface data assimilation system for mesoscale models [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008,47(9):2331-2350.

[27] Hong S, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Monthly Weather Review, 2006,134:2318-2341.

[28] Chang J S, Binkowski F S, Seaman N L, et al. The regional acid deposition model and engineering model [R]. State-of-Science/ Technology, Report 4, National Acid Precipitation Assessment Program, Washington, DC, 1989.

[29] Fountoukis C, Nenes A. ISORROPIA II: A computationally efficient aerosol thermodynamic equilibrium model for K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, NH_4^+, Na^+, SO_4^{2-}, NO_3^-, Cl^-, H_2O aerosols [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2007,7:4639-4659.

[30] Schell B, Ackermann I, Hass H, et al. Modeling the formation of secondary organic aerosol within a comprehensive air quality model system [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001,106: 28275-28293.

[31] Li M, Liu H, Geng G, et al. Anthropogenic emission inventories in China: a review [J], National Science Review, 2017,4:834-866.

[32] Guenther A, Karl T, Harley P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (model of emissions of gases and aerosols from nature) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006,6: 3181-3210.

[33] GB3095-2012　环境空气质量标准 [S].
GB3095-2012　Ambient air quality standards [S].

[34] HJ633-2012　环境空气质量指数技术规定(试行) [S].
HJ633-2012　Technical regulation on ambient air quality index (on trial) [S].

[35] Derwent D, Fraser A, Abbott J, et al. Evaluating the performance of air quality models [R]. Issue 3/June 2010, London: Department for Environment, Food & Rural Affairs of UK, 2010:1-73.

[36] 杨关盈,邓学良,周广强,等. 基于 WRF-Chem 模式的 $PM_{2.5}$ 预报效果评估 [J]. 气象科技, 2018,46(1):84-91.
Yang G Y, Deng X L, Zhou G Q, et al. Evaluation of $PM_{2.5}$ forecast performance base on WRF-Chem model [J]. Meteorological Science and Technology, 2018,6(1):84-91.

[37] Tang W, Zhao C, Geng F, et al. Study of ozone 'weekend effect' in Shanghai [J]. Science in China Series D, 2008,51(9):1354-1360.

[38] Ye B, Ji X, Yang H, et al. Concentration and chemical composition of $PM_{2.5}$ in Shanghai for a 1-year period [J]. Atmospheric Environment, 2003,37:499-510.

[39] Yin C, Xu J, Gao W, et al. Characteristics of fine particle matter at the top of Shanghai Tower [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2023,23:1329-1343.

[40] 章建成,徐　敬,赵秀娟,等.地形及暖锋共同影响下京津冀典型重污染过程数值模拟 [J]. 气象, 2024,50(9):1071-1080.
Zhang J C, Xu J, Zhao X J, et al. Numerical simulation of synergic effect of topography and warm front on typical heavy air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Meteorological Monthly, 2024, 50(9):1071-1080.

[41] 李梓铭,赵秀娟,孙兆彬,等.基于相似集合预报技术的臭氧预报释用研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(2):475-484.
Li Z M, Zhao X J, Sun Z B, et al. Research on the interpretation and correction of numerical ozone forecast based on analog ensemble [J]. China Environmental Science, 2020,40(2):475-484.

[42] 瞿元昊,许建明,Guy Brasseur,等.利用多模式最优集成方法预报上海 $PM_{2.5}$ [J]. 环境科学学报, 2018,38(9):3449-3456.
Qu Y H, Xu J M, Brasseur G, et al. Application of OCF on $PM_{2.5}$ forecast in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018,38(9): 3449-3456.

[43] 周广强,瞿元昊,余钟奇.长江三角洲城市臭氧数值预报与释用 [J]. 中国环境科学, 2021,41(1):28-36.
Zhou G Q, Qu Y H, Yu Z Q, et al. Numerical forecast and improvement of ozone over YRD cities [J]. China Environmental Science, 2021,41(1):28-36.

作者简介： 周广强(1976-),男,四川安岳人,教授级高级工程师,博士,主要从事大气环境研究与数值预报工作.发表论文 60 余篇. zhougq21@163.com.