

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0187

瞿元昊, 许建明, Guy Brasseur, 等. 2018. 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, 38(9): 3449-3456

Qu Y H, Xu J M, Brasseur G, et al. 2018. Application of OCF on PM_{2.5} forecast in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 38(9): 3449-3456

利用多模式最优集成方法预报上海 PM_{2.5}

瞿元昊^{1,2}, 许建明^{1,2,*}, Guy Brasseur³, 谢英^{1,2}, 周广强^{1,2}, 马井会^{1,2}

1. 长三角环境气象预报预警中心, 上海 200030

2. 上海市气象与健康重点实验室, 上海 200030

3. 德国马普气象研究所, 汉堡 20095

收稿日期: 2018-03-12 修回日期: 2018-04-27 录用日期: 2018-04-27

摘要: 采用多模式最优集成方法 (OCF), 对 PANDA 项目中国和欧洲 7 个空气质量模式的 PM_{2.5} 预报结果进行集成释用。2016 年 6 月—2017 年 5 月对上海逐日预报试验结果表明: 和最优单模式预报结果相比, OCF 预报的 PM_{2.5} 日均质量浓度的均方根误差降低 1.9 μg·m⁻³, 相关系数提高 0.04, 日均质量浓度的精度评分 TI 提高了 2.4, 污染 TS 评分提高了 0.28, 污染空报率降低了 20%, 显著提高了 PM_{2.5} 污染等级预报、趋势预报和精度预报的技巧。对长三角合肥、南京、苏州、杭州、宁波 5 个城市的预报试验也得到类似的结果, 为城市空气质量预报提供了新的方法和思路。但 OCF 对客观预报的改进幅度在夏季不如冬季显著, 在降雨日相对较低。

关键词: 多模式最优集成; PM_{2.5}; 空气质量模式

文章编号: 0253-2468(2018)09-3449-08 中图分类号: X513 文献标识码: A

Application of OCF on PM_{2.5} forecast in Shanghai

QU Yuanhao^{1,2}, XU Jianming^{1,2,*}, Guy Brasseur³, XIE Ying^{1,2}, ZHOU Guangqiang^{1,2}, MA Jinghui^{1,2}

1. YRD Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Shanghai 200030

2. Shanghai Key Laboratory of Health and Meteorology, Shanghai 200030

3. Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg 20095

Received 12 March 2018; received in revised form 27 April 2018; accepted 27 April 2018

Abstract: In this study, the OCF method was applied to conduct the daily PM_{2.5} ensemble forecasts in Shanghai during June 2016 to May 2017 based on the outputs from 7 PANDA air quality models. The results showed that the PM_{2.5} forecast performance in Shanghai was significantly increased by OCF compared with any of the PANDA models. The RMSE of daily averaged PM_{2.5} mass concentration decreased by 1.9 μg·m⁻³, the correlation coefficient increased by 0.04, and the false detection rate for pollution days reduced by 20%. Furthermore, both TS and TI marks which were used to evaluate the forecast accuracy for PM_{2.5} pollution day and the PM_{2.5} mean daily mass concentration were both advanced by 0.28 and 2.4 respectively. Similar positive results were achieved by OCF experiments for other 5 cities in YRD region. Thus it could be concluded that OCF can be regarded as an efficient ensemble method for current urban air quality forecast operations. Nevertheless the advantage of OCF was less effective in winter than in summer, and less skillful under rain day conditions.

Keywords: OCF; PM_{2.5}; air quality model

1 引言 (Introduction)

空气质量数值模式是开展大气污染预报预警的重要工具。近几十年来随着计算机技术的飞速发

展, 全球 (比如 GEOS-Chem、MOZART 等)-区域 (WRF-Chem、CMAQ、CAM_x、NAQPMS 等) 尺度的空气质量数值模式系统取得明显进步 (Boylan *et al.*, 2006; 侯雪伟等, 2013; Grell *et al.*, 2005; Wang *et al.*,

基金项目: 国家自然科学基金 (No.41475040); 国家重点研发计划项目 (No.2016YFC0201900, 2016YFC0203400); 上海市科委研发计划 (No. 16DZ1204607)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41475040), the National Key R&D Program of China (No.2016YFC0201900, 2016YFC0203400) and the Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (No.16DZ1204607)

作者简介: 瞿元昊 (1990—), 男, 工程师, E-mail: qyh611@126.com; * 责任作者, E-mail: metxujm@163.com

Biography: QU Yuanhao (1990—), male, engineer, E-mail: qyh611@126.com; * Corresponding author, E-mail: metxujm@163.com

2006;白永清等,2016),在大气污染治理调控、气候变化应对等领域得到深入应用(Wang *et al.*,2006).空气质量数值模式利用数值方法解析物质的质量守恒方程得到污染物的空间分布和时间变化.在建立质量守恒方程时需要准确刻画污染物在大气中经历的各种物理、化学过程,比如平流、垂直扩散、湿沉降、气相化学、气溶胶动力化学等.目前天气模式、大气化学传输模式对上述过程的描述及对关键影响因子的计算还不完善,人为和自然排放清单都存在巨大的不确定性并且难以实现动态更新(钟方潜等,2017;曹国良等,2011;于燕等,2017),模式的初始和边界条件需要利用卫星和地面观测资料进行优化,这些都是制约空气质量数值模式水平的因素.周广强等(2016)评估了华东区域环境气象数值模式(RAEMS)对2014—2015年中国东部183个城市 $PM_{2.5}$ 的预报性能,发现只有1/3城市的标准偏差低于10%.为了提高空气质量模式预报结果的可用性,很多学者采用数学方法对模式的输出结果进行修正,降低模式的预报偏差.其中借鉴天气集合预报的思路,基于多个空气质量模式的集合预报技术近年来得到重视和发展.如王自发等(2009)建立了北京空气质量多模式集成预报系统(EMS-Beijing),对3个模式进行算术平均的效果优于单模式.但一些学者的研究则发现算术平均集成在趋势预报和偏差上都低于个别单模式,而采用多元线性回归、BP神经网络等方法集成则明显提高了预报效果(张伟等,2010;黄思等,2015).陈焕盛等(2013)在广州的试验也获得类似的结论,并提出采用更好的集成方法是改进多模式预报的途径.

多模式最优集成方法(Optimal Consensus Forecast, OCF)首先由Woodcock(2005)提出,其优势是能够综合体现各模式预报结果的优势,又不会因为其中一个或者两个模式的性能变化使得集成预报发生较大改变,因而被广泛应用于气象要素的集成预报并取得很好效果.漆梁波等(2007)采用不同方法对多个模式的要素预报进行集成,发现OCF对温度和相对湿度的预报准确率较卡尔曼滤波提高约2%,而且预报水平已经与主观预报相当.朱占云等(2016)利用OCF集成预报浙江的面雨量同样取得较好的评分.吴剑斌等(2017)基于4个空气质量模式(NAQPMS、CMAQ、CAM_x、WRF-Chem),将此方法应用于臭氧数值预报的效果明显优于单模式.本文利用PANDA空气质量数值模式系统(7个模

式)对长三角6个城市(上海、合肥、南京、苏州、杭州、宁波)的 $PM_{2.5}$ 质量浓度预报进行OCF集成,通过和单模式及算术平均集成预报结果进行对比,评估OCF对城市 $PM_{2.5}$ 质量浓度预报、等级预报和趋势预报的性能,以期提升预报的准确率,在实际业务中为我国城市空气质量预报提供新的思路和方法.

2 资料与方法(Data and methodology)

2.1 观测资料来源

上海逐小时和逐日的 $PM_{2.5}$ 质量浓度资料由上海市环境监测中心提供,合肥、南京、苏州、杭州、宁波5个城市的 $PM_{2.5}$ 质量浓度数据来自全国城市空气质量实时发布平台(<http://113.108.142.147:20035/emcpublish/>).降雨日数据由上海市气候中心提供,时间段为2016年6月—2017年5月.

2.2 数值模式

2014年欧盟第七科技框架计划(FP7)设立了MarcoPolo-Panda项目,中国和欧洲的科学家合作研究中国的空气质量问题.其中MarcoPolo项目侧重于利用卫星数据估算排放清单、不同行业的贡献、改善其空间分配方法;PANDA项目侧重于建立数值模式系统,提供全球和区域尺度空气质量的预报工具,为地方部门改进大气污染治理提供科学依据.自2016年5月开始,PANDA项目建立了空气质量多模式预报系统包括7个模式,分别为欧洲中期天气预报中心(ECWMF)的IFS、荷兰气象研究所(KNMI)的CHIMERE、德国马普气象研究所(MPI-M)的WRF-Chem-MPI、芬兰气象研究所(FMI)的SLAM、挪威气象局(MetNo)的EMEP、荷兰应用科学组织(TNO)的LOTOS、上海市气象局(SMS)的WRF-Chem-SMS.除IFS是全球模式,其余均为区域模式.每天7个模式的预报数据上传到KNMI统一处理,预报结果通过<http://www.marcopolo-panda.eu/sample-page/>网站显示查询.KNMI为本研究提供了7个模式对2016年6月—2017年5月长三角上海、合肥、南京、苏州、杭州、宁波6个城市 $PM_{2.5}$ 质量浓度逐小时预报数据.

2.3 OCF方法

OCF的基本思路是对预报成员进行权重平均.首先对各模式的预报结果进行滚动检验,根据检验结果赋予每个模式不同的权重系数,然后对每个模式进行加权平均.采取滚动检验的目的是考虑各模

式在不同阶段的预报表现可能存在差异.OCF 主要分两步:

第一步,对各模式的预报结果进行偏差校正.根据式(1)计算各模式在过去一段时间的平均偏差(MB_{sw}),然后根据 MB_{sw} 对各模式的预报结果进行校正(式(2)),目的是减小各模式之间预报性能的差异.式中 FCT 为预报值,OBS 为观测值, k 为向后滑动天数,FA 为偏差校正后的预报值.前期试验结果表明在上海平滑窗以 10 d 为最佳,故本文 m 取为 10 d.吴剑斌等(2017)在计算平均偏差时,为剔除极端值和缺测值影响,选取四分位数和中位数作为计算样本,本文平滑窗相对较短且模式缺测值较少,因此计算中只是剔除了极端值(极大值和极小值).

第二步,进行权重平均集成.首先根据式(3)计算各模式(偏差校正后)在过去一段时间的平均绝对误差 E ,然后根据式(4)计算各模式的权重系数 W ,绝对误差越大,则权重系数越小.最后根据式(5)对各模式进行加权平均获得集成预报结果 F_{OCF} ,式中, n 为模式样本数.

$$MB_{sw} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (FCT_k - OBS_k) \quad (1)$$

$$FA = FCT / (1 + MB_{sw}) \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |FA_k - OBS_k| \quad (3)$$

$$W_i = E_i^{-1} / (E_1^{-1} + E_2^{-1} + \dots + E_n^{-1}) \quad (4)$$

$$F_{OCF} = FA_1 \times W_1 + FA_2 \times W_2 + \dots + FA_n \times W_n \quad (5)$$

2.4 评估方法

2.4.1 平均偏差和均方根误差 参照周广强等(2016)对 PM_{2.5} 质量浓度预报的评估方法,选取平均偏差(MB)和均方根误差(RMSE)分别表征预报值与观测值的绝对差异、预报偏差的集中度(式(6)、式(7)).

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (FCT_i - OBS_i) \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (FCT_i - OBS_i)^2} \quad (7)$$

2.4.2 空报率、漏报率、TS 评分 污染预报的准确性是空气质量预报水平的重要指标.选择漏报率、空报率和 TS 评分作为污染预报的评估指标.我国《环境空气质量标准》(GB3095-2012)规定,判别 PM_{2.5} 污染日的阈值是日均质量浓度为 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.漏报率 PO 表示没有预报出的污染日数占实际污染日数的

比率(式(8)).空报率 FAR 表示预报的污染日中没有发生的比率(式(9)),TS 评分反映污染日有效预报的准确程度(式(10)).式中的参数说明见表 1.漏报率和空报率越低、TS 评分越高,表示污染日预报性能越好.

表 1 污染预报检验的参数

Table 1 Description of the parameters for pollution forecasting evaluation

| 实况 | 预报 | |
|----|-----|-----|
| | 优良 | 污染 |
| 优良 | a | b |
| 污染 | c | d |

$$PO = c / (c + d) \quad (8)$$

$$FAR = b / (b + d) \quad (9)$$

$$TS = d / (b + c + d) \quad (10)$$

2.4.3 预报精度评分 TI 在城市空气质量预报业务中,除了要求预报员准确预报污染等级,同时要求准确预报平均质量浓度,目的是提高空气质量预报的精准度,为公众提供更加精细的服务.本文采用胡鸣等(2015)提出的方法对日均质量浓度的预报精度进行评分(式(11)).

在空气质量预报业务中,PM_{2.5} 预报精度评分 TI 根据预报值与实况值之间的差别计算得到.如果差别过大出现得分为负数的情况,则以 0 分代替;若实况为优(日均质量浓度小于等于 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),则分母以优等级的最大值(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)代替. f_0 为污染预报附加分(胡鸣等,2015),如实况和预报值都为中度污染,则 TI 相应加 4 分.

$$TI = 1 - \max\left(1 - \frac{|FCT - OBS|}{\max(OBS, 35)}, 0\right) \times 100\% + f_0 \quad (11)$$

表 2 污染预报附加得分(f_0)

Table 2 Additional scores for air pollution forecast

| 实况 | 预报 | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| | 优良 | 轻度 | 中度 | 重度 | 严重 |
| 优良 | 0 | 0 | -1 | -2 | -4 |
| 轻度 | 0 | 2 | 0 | -1 | -2 |
| 中度 | -2 | 0 | 4 | 0 | -1 |
| 重度 | -4 | -2 | 0 | 8 | 1 |
| 严重 | -8 | -4 | -2 | 1 | 10 |

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 单个模式预报偏差分析

由于 PANDA 系统中每个模式采用的排放清

单、气象初始场、物理化学方案等都存在差异,因此不同模式的预报结果必然存在一定偏差.图 1 统计了 2016 年 6 月—2017 年 5 月各模式预报上海 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度的平均偏差分布,可见除了 SMS 和 LOTOS,其余模式均存在明显的系统偏差,其中 EMEP、MPI、CHIMMER 和 SLAM 的中位数都偏高 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上 (EMEP 偏高了 $30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),而 IFS 则偏低 $8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,说明 OCF 校正各模式系统偏差的必要性.此外,从各模式偏差的箱体长度 (1/4~3/4 的分位数) 可以看出, SMS、LOTOS 和 CHIMMER 的离散度较小,尤其是 SMS 和 LOTOS 基本集中在 $-10 \sim 10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间.相比之下, IFS、SLAM 和 MPI 预报偏差的离散度较大,1/4~3/4 的分位数相差 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.对比 7 个模式的偏差分布可见, SMS 和 LOTOS 的预报表现较好.

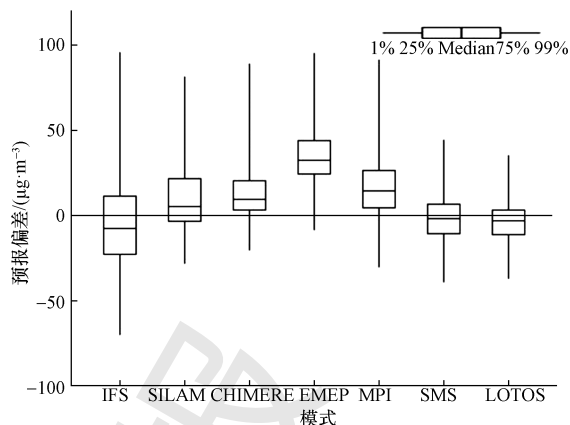


图 1 PANDA 系统各模式预报上海 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度偏差的箱体分布

Fig.1 Box plot of the mean errors of daily $PM_{2.5}$ mass concentration by PANDA models

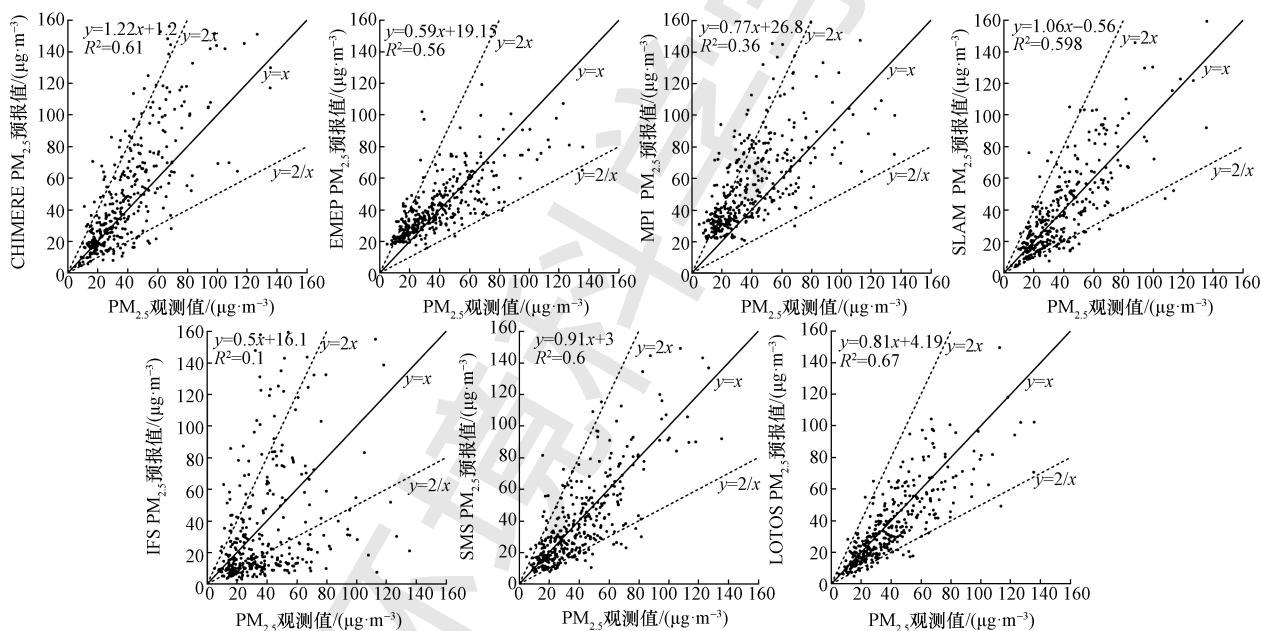


图 2 PANDA 系统各模式预报上海 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度和实况的散点图

Fig.2 Scatter plots of daily $PM_{2.5}$ mass concentration between PANDA model forecasts and observations

图 2 显示了 7 个模式预报值和观测值的散点分布,图中黑色实线表示 1:1 线,虚线分别表示 1:1/2 和 1:2 线.散点集中在实线附近表示预报值和观测更加逼近.两根虚线之间代表观测值的 0.5~2 倍范围区间.由图可见, SMS 和 LOTOS 的预报值和观测更加一致,90% 以上的预报值分布在观测的 0.5~2 倍区间范围内. CHIMMER、EMEP 和 MPI 的预报值较观测偏高,散点基本位于黑色实线上方,尤其 CHIMMER 和 EMEP 偏高更加明显,95% 以上的预报值位于黑色实线上方.7 个模式中, IFS 的预报值

分布最为离散,其中 50% 的预报值分布在观测值的 0.5~2 倍区间范围之外,表明预报偏差最大.计算 7 个模式预报和观测的相关系数发现, LOTOS 的相关系数最高为 0.82, IFS 最低为 0.32.

3.2 OCF 对上海 $PM_{2.5}$ 的预报评估

图 3 显示了 OCF 预报 $PM_{2.5}$ 日均质量浓度偏差的频数分布,可见 42% 的预报偏差位于 $-5 \sim 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内,明显好于 7 个模式中预报效果较好的 LOTOS (35%) 和 SMS (31%). 偏差大于 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的预报结果只占 11%. 从分布形态看, OCF 的偏差分

布略向右偏,表明预报较观测略偏高(偏高的样本数占 57%).OCF 预报和观测的散点基本集中在 1:1 线附近(图略),相关系数达到 0.86,预报值未落在在观测值 0.5~2 倍区间范围之外的散点只占 3%,集中度好于单个模式.

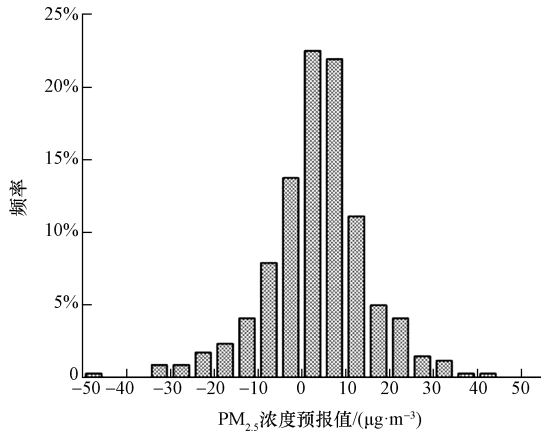


图 3 OCF 预报上海 PM_{2.5} 日均质量浓度的偏差频数分布

Fig.3 The frequency distribution of the mean errors of daily PM_{2.5} mass concentrations forecasted by OCF

表 3 统计了 OCF 和单个模式的预报指标,同时也对比 OCF 和集合平均(AVE)的预报效果.在 7 个预报模式中,对于 PM_{2.5}的预报,SMS 和 LOTUS 的平均偏差和均方根误差明显小于其他模式;除了 IFS 和 MPI,其他模式的相关系数都在 0.7 以上,其中 LOTUS 最高;对于污染等级的预报,SMS 的空报率最低(45%),其次为 LOTUS 为 50%,而其他模式的空报率都在 65% 以上.EMEP、CHIMMER 和 SLAM

的漏报率较低,且明显低于空报率,表明上述 3 个模式的预报结果明显偏高,这和前文的结论一致.综合空报率、漏报率和 TS 评分 3 项指标可见,SMS 对污染等级的预报效果最好,表现为空报、漏报少,TS 评分高.对于精度预报评分 TI,LOTOS 最高(78.5),其次为 SMS.综上可以看出 SMS 和 LOTUS 对上海 PM_{2.5}的预报性能明显优于其他模式.

将 OCF 的结果和单个模式对比发现,除了平均偏差和漏报率,OCF 的各项指标都优于单个模式,其中 TS 评分达到 0.66,空报率降至 25%,明显提高了对污染等级的预报技巧.而且 OCF 精度评分 TI 达到 80.9,均方根误差降至 12 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,相关系数达到 0.86,表明 OCF 预报的 PM_{2.5}日均质量浓度、变化趋势和实况更加接近.综上可见,采用 OCF 对 PANDA 系统中各模式进行权重平均后,明显减小了 PM_{2.5}质量浓度的预报偏差,提高了趋势预报和等级预报的技巧,预报性能优于单个模式.表 3 也将 OCF 和另一种经常使用的集合方法 AVE 进行对比,发现 AVE 除了漏报率略低于 OCF,其余各项检验指标较 OCF 都明显偏差,而且也不如模式中表现较好的 SMS 和 LOTUS.这和黄思等(2015)的结论相一致,即当模式之间的预报性能有明显差异时,算术平均并不能有效提升系统的预报效果.相比之下 OCF 能够根据前期的滚动检验降低个别模式的权重,使预报结果偏向好的模式,从而克服了 AVE 的缺点.需要指出的是,集合系统的整体预报性能越高,各模式的预报水平越接近,OCF 的效果才会越好(漆梁波等, 2007).

表 3 PANDA 系统各模式、OCF、AVE 对上海 PM_{2.5}的预报评估

Table 3 Performance evaluation of PM_{2.5} forecasts by PANDA models, OCF and AVE

| 系统模式 | 平均偏差/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | 相关系数 | 均方根误差/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | 精度评分 TI | 污染空报率 | 污染漏报率 | 污染 TS 评分 |
|---------|------------------------------------------|------|-------------------------------------------|---------|-------|-------|----------|
| IFS | -8.6 | 0.32 | 34.5 | 49.8 | 88% | 74% | 0.09 |
| SILAM | 11.3 | 0.77 | 26.7 | 65.2 | 70% | 16% | 0.29 |
| CHIMERE | 14.5 | 0.76 | 25.3 | 65.8 | 65% | 11% | 0.34 |
| EMEP | 35.3 | 0.73 | 41.1 | 26.7 | 82% | 8% | 0.18 |
| MPI | 17.9 | 0.65 | 30.6 | 55.1 | 76% | 27% | 0.22 |
| SMS | -0.9 | 0.78 | 16.7 | 73.3 | 45% | 16% | 0.5 |
| LOTOS | -3.2 | 0.82 | 13.9 | 78.5 | 50% | 50% | 0.33 |
| AVE | 10.5 | 0.81 | 18.3 | 69.8 | 59% | 14% | 0.38 |
| OCF | 1.2 | 0.86 | 12 | 80.9 | 25% | 16% | 0.66 |

3.3 OCF 在冬夏两季的预报效果对比

PM_{2.5}具有明显的季节变化,一般表现为冬季高、夏季低的特点.表 4 统计了 PANDA 系统各模式

及 OCF 对冬夏两季 PM_{2.5}预报的平均偏差、相关系数、均方根误差和精度 TI 评分.首先除了 EMEP 和 MPI,其他模式夏季的 TI 评分都高于冬季,主要是

因为高污染事件一般都发生在冬季,增加了预报难度(许建明等,2016).值得注意的是,除了 IFS 和 SLAM 其他模式夏季的相关系数反而低于冬季,即夏季的趋势预报效果较冬季偏差,可能的原因是夏季 $PM_{2.5}$ 逐日变化幅度较小导致趋势预报的难度增大.对比 OCF 和各模式发现,冬夏两季 OCF 预报的相关系数和 TI 评分都高于单个模式,其中在冬季的

提高更加显著,和最优单模式 LOTUS 相比,相关系数从 0.81 提高到 0.87, TI 评分从 74.1 提高到 77.1. 另外 OCF 在冬季的污染 TS 评分为 0.78, 同样优于单个模式.但 OCF 在冬夏两季的预报偏差分别为 -1.2 和 $4 \mu g \cdot m^{-3}$, 要高于 LOTUS 和 SMS, 显然是受到了其他模式的影响,说明 OCF 仅依据绝对偏差计算权重系数的方法存在局限.

表 4 PANDA 系统各模式、OCF 对冬夏两季上海 $PM_{2.5}$ 的预报评估

Table 4 Performance evaluation of $PM_{2.5}$ forecasts in summer and winter by PANDA models and OCF

| 模式 | 夏季 | | | | 冬季 | | | |
|---------|-----------------------------------|------|------------------------------------|-------|-----------------------------------|------|------------------------------------|-------|
| | 预报偏差/ ($\mu g \cdot m^{-3}$) | 相关系数 | 均方根误差/ ($\mu g \cdot m^{-3}$) | TI 评分 | 预报偏差/ ($\mu g \cdot m^{-3}$) | 相关系数 | 均方根误差/ ($\mu g \cdot m^{-3}$) | TI 评分 |
| IFS | -18 | 0.46 | 23.9 | 54.4 | 5.9 | 0.20 | 51.5 | 39.2 |
| SILAM | 5.8 | 0.72 | 25.7 | 71.6 | 16.0 | 0.72 | 28.6 | 58.5 |
| CHIMERE | 12.4 | 0.65 | 24.4 | 70.1 | 18.7 | 0.76 | 31.5 | 60.1 |
| EMEP | 36.2 | 0.62 | 42.2 | 23.2 | 33.5 | 0.7 | 42.3 | 35.4 |
| MPI | 26.8 | 0.69 | 38.4 | 45.3 | 8.3 | 0.72 | 23.7 | 62.9 |
| SMS | -0.4 | 0.72 | 16.0 | 70.9 | -1.0 | 0.75 | 22.2 | 69.7 |
| LOTOS | -5.0 | 0.77 | 13.4 | 78.9 | -0.4 | 0.81 | 19.8 | 74.1 |
| OCF | 4.0 | 0.79 | 12.9 | 80.2 | -1.2 | 0.87 | 15.9 | 77.1 |

3.4 OCF 在降雨日和非降雨日的预报效果对比

降雨日的 $PM_{2.5}$ 预报一直是业务中的难点,降雨对气溶胶具有湿清除作用(赵海波等,2005;周广强等,2017).许建明等(2017)通过观测发现上海降雨日的 $PM_{2.5}$ 质量浓度较非降雨日下降约 30%.但降雨对 $PM_{2.5}$ 的清除效率却非常复杂,和雨滴谱、气溶胶

粒径谱等因素有关.而且降雨时温度、风速的变化会改变 $PM_{2.5}$ 的平流和扩散过程,从而抵消或者增强其湿清除效应.大约 50% 的降雨过程结束后 $PM_{2.5}$ 不降反升,因此给实际预报带来很大困难.本节分别检验有降雨和无降雨两种情况下 OCF 的表现,期望为降雨日的 $PM_{2.5}$ 预报提供参考.图 4 计算了降雨日和非

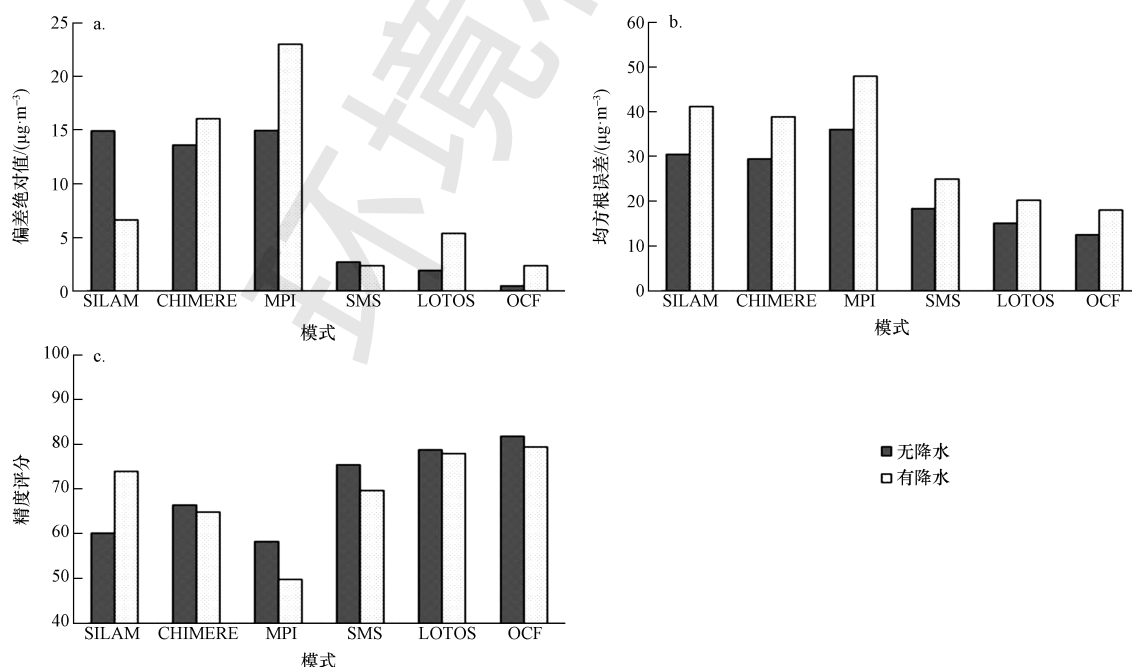


图 4 降雨日和非降雨日 PANDA 系统各模式和 OCF 对上海 $PM_{2.5}$ 预报效果评估(a. 偏差绝对值, b. 均方根误差, c. TI 评分)

Fig.4 Performance evaluation of $PM_{2.5}$ forecasts on rain and non-rain days respectively by PANDA models and OCF (a. absolute bias, b. root mean square error, c. TI marks)

降雨日各模式和 OCF 预报的日均 PM_{2.5} 质量浓度的平均偏差、均方根误差和 TI 评分。可见,和非降雨日相比,降雨日各模式预报的 PM_{2.5} 平均偏差、均方根误差都明显偏高, TI 评分偏低,表明有降雨时模式的预报技巧较低,一方面是因为模式对降雨预报的准确率较低,另外也说明模式采用的湿沉降方案并不完善。OCF 对降雨日的 PM_{2.5} 预报有一定改进,和最优单模式 LOTUS 相比,降雨日 OCF 预报的 PM_{2.5} 均方根误差降低了 10.9%, TI 评分分别提高了 1.8%,可为业务预报提供更好的参考。但相比之下,非降雨日 OCF 预报性能提高更加显著,和 LOTOS 相比均方根误差分别降低了 17.3%, TI 评分分别提高了 3.9%。可见 OCF 对降雨日 PM_{2.5} 的预报虽然有所改进,但幅度较小,没有非降雨日明显。这主要受目前模式对降雨时 PM_{2.5} 的预报水平较低限制。

3.5 OCF 对长三角其他城市的预报检验

前面的分析表明基于 PANDA 系统的 OCF 试验对上海 PM_{2.5} 的精度预报、趋势预报和等级预报都有明显改进。考虑到城市大气污染除了和本地排放、地理位置有关,还受大气环流形势变化影响 (Pasch *et al.*, 2011; 赵敬国等, 2015; 吴蒙等, 2015)。为了进一步考察 OCF 的适用性,本节选择了长三角其他 5 个城市(南京、杭州、合肥、苏州和宁波)进行类似的对比检验。图 5 用箱体图表示 5 个模式和 OCF 预报不同城市 PM_{2.5} 质量浓度的偏差分布。由图可见 PANDA 系统各模式在不同城市的表现有所差异,相比而言对内陆城市南京、合肥的预报偏差较大,中值约为 10~25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;杭州和苏州的预报偏差和上海接近(小于 10 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);各模式对宁波的预报偏差最小。单个模式中 LOTUS 的预报偏差和离散度最

小, SMS 和 LOTUS 的偏差相当,但离散度要大于 LOTUS。相比而言, OCF 的平均偏差基本小于 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,对南京、合肥的改进尤其明显,此外离散度也明显减小,除了宁波,对其余 4 个城市都有明显改进,可提高长三角地区的预报水平。

表 5 统计了 OCF 对 5 个城市预报的均方根误差、相关系数、TI 评分和 TS 评分。结果显示: OCF 对南京、杭州、合肥、苏州、宁波 5 个城市预报的 PM_{2.5} 均方根误差为 13~17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,和最优单模式相比,降幅都超过了 15%; TI 评分都大于 75,较最优单模式提高了 7%。除合肥以外 OCF 对其他 4 个城市预报的相关系数都超过 0.7,较最优单模式提高了 6%。对于 TS 评分而言,杭州、苏州和宁波的改进比较明显。总体而言,采用 OCF 后不但降低了均方根误差,且提高了相关系数和预报评分。可以看出,虽然各模式对于不同城市的表现有所差异,但 OCF 对每个城市的预报较最优单个模式都有明显改进,取得较好的预报效果。

表 5 OCF 对长三角重点城市 PM_{2.5} 的预报评估(括号内数值为相对于最优单模式变化幅度)

Table 5 Performance evaluation of PM_{2.5} forecasts in YRD by OCF, The changed percentage of OCF performance compared to the best member in PANDA models were presented in the bracket

| 城市 | 偏差绝对值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | 相关系数 | 均方根误差/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) | 精度评分 TI | 污染 TS 评分 |
|----|-----------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------|------------|------------|
| 南京 | 0.65(-93%) | 0.76(+6%) | 13.5(-28%) | 77.5(+14%) | 0.35(-12%) |
| 杭州 | 0.63(-65%) | 0.74(+19%) | 13.2(-24%) | 78.3(+8%) | 0.47(+21%) |
| 合肥 | 0.12(-98%) | 0.65(-1%) | 16.9(-16%) | 75.9(+7%) | 0.54(+8%) |
| 苏州 | 1.26(-18%) | 0.77(+8%) | 13.9(-16%) | 80.5(+7%) | 0.54(+17%) |
| 宁波 | 0.65(-93%) | 0.76(+6%) | 13.5(-28%) | 77.5(+14%) | 0.44(+26%) |

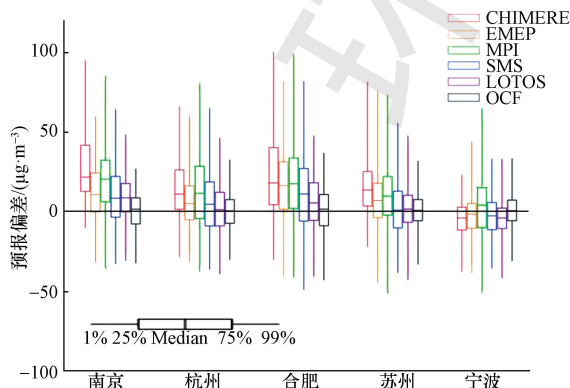


图 5 长三角重点城市 OCF 方法及各模式日均 PM_{2.5} 质量预报偏差的箱体分布

Fig.5 Box plot of the mean errors of daily PM_{2.5} mass concentration in YRD by PANDA models and OCF

4 结论 (Conclusions)

1) OCF 显著提高了城市 PM_{2.5} 污染等级预报、趋势预报和精度预报的技巧和最优单模式,均方根误差降低 1.9~5.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,相关系数提高 0.04~0.12(合肥除外), TS 评分提高 0.04~0.16(南京除外),精度评分 TI 提高 2.4~9.5,综合预报水平显著提高。

2) 和夏季相比(以上海为例), OCF 在冬季的提高更加显著,和最优单模式 (LOTUS) 相比,相关系数从 0.81 提高到 0.87,精度评分 TI 从 74.1 提高到 77.1。OCF 在冬季的污染 TS 评分为 0.78,同样优于单个模式。

3) 由于目前模式对降雨时 PM_{2.5} 的预报水平较

低,OCF对降雨日的 $PM_{2.5}$ 预报有一定改进(以上海为例),和最优单模式相比, $PM_{2.5}$ 均方根误差分别降低了 $2.21 \mu g \cdot m^{-3}$,精度评分TI分别提高了1.4,可为业务预报提供参考.但改进幅度较小,没有非降雨日明显.

4) OCF采用权重平均的方法集成各模式的预报结果,从而克服了平均集成方法的缺点.另外采用滚动检验的方法考虑了不同模式在不同阶段的表现存在差异,使得OCF优于任一模式的预报.通过本文试验对未来OCF的应用提出两点建议,首先仅采用绝对误差计算权重系数的方法存在局限,导致对精度预报的改进很显著,但对趋势预报和等级预报的改进有限;其次是系统偏差校正时需要选择最合适的时间长度,本文中平滑窗为10 d,但该值在其它城市和不同季节需针对性探讨.最后需要指出的是,集合系统的整体预报性能越高,各模式的预报水平越接近,OCF的效果才会越好.

参考文献(References):

- Boylan J, Russell A. 2006. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models [J]. *Atmospheric Environment*, 40(26):4946-4959
- 白永清, 祁海霞, 刘琳, 等. 2016. 华中区域环境气象数值预报系统及其初步应用[J]. *高原气象*, 35(6):1671-1682
- 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 2011. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单[J]. *科学通报*, 56(3):261-268
- 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 PM_{10} 预报效果评估[J]. *气候与环境研究*, 18(4):427-435
- Grell G, Peckham S, Schmitz R, et al. 2005. Fully coupled "online" chemistry within the WRF model[J]. *Atmospheric Environment*, 39:6957-6975
- 侯雪伟, 朱彬, 康汉青, 等. 2013. MOZART-4 大气化学模式模拟东亚季风对对流层污染物的影响: 模式验证[J]. *高原气象*, 32(2):2387-2401
- 胡鸣, 赵倩彪, 伏晴艳. 2015. 上海环境空气质量预报考核评分方法研究和应用[J]. *中国环境监测*, 31(4):54-57
- 黄思, 唐晓, 徐文帅, 等. 2015. 利用多模式集合和多元线性回归改进北京 PM_{10} 预报[J]. *环境科学学报*, 35(1):56-64
- 黄晓波, 殷晓鸿, 黄志炯, 等. 2016. 不同模式对珠三角地区细颗粒物污染模拟效果对比评估[J]. *环境科学学报*, 36(10):3505-3514
- Jeffery A, Clifford F. 2005. Performance of national weather service forecasts compared to operational, consensus, and weighted model output statistics [J]. *Weather and Forecasting*, 20:1034-1407
- Pasch A N, Macdonald C P, Gilliam R C, et al. 2011. Meteorological characteristics associated with $PM_{2.5}$ air pollution in Cleveland, Ohio, during the 2009-2010 Cleveland multiple air pollutants study [J]. *Atmospheric Environment*, 45(39):7026-7035
- 漆梁波, 曹晓岗, 夏立, 等. 2007. 上海区域要素客观预报方法效果检验[J]. *气象*, 33(9):9-18
- 王自发, 吴其重, 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
- 吴剑斌, 肖林鸿, 晏平仲, 等. 2017. 最优化集成方法在城市臭氧数值预报中的应用研究[J]. *中国环境监测*, 33(4):213-220
- 吴蒙, 吴兑, 范绍佳. 2015. 基于风廓线仪等资料的珠江三角洲污染气象条件研究[J]. *环境科学学报*, 35(3):619-629
- Wang Z F, Xie F Y, Wang X Q, et al. 2006. Development and application of nested air quality prediction modeling system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences-Chinese Edition*, 30(5):680-689
- Woodcock F, Engel C. 2005. Operational Consensus Forecast [J]. *Weather and Forecasting*, 20:101-111
- 许建明, 常炉予, 马井会, 等. 2016. 上海秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染天气形势的客观分型研究[J]. *环境科学学报*, 36(12):4303-4314
- 许建明, 高伟, 瞿元昊. 2017. 上海地区降雨清除 $PM_{2.5}$ 的观测研究[J]. *环境科学学报*, 37(9):3271-3279
- 于燕, 廖礼, 崔雪东, 等. 2017. 不同人为源排放清单对大气污染物浓度数值模拟的影响: 以浙江省为例[J]. *气候与环境研究*, 22(5):519-537
- 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
- 赵海波, 郑楚光. 2005. 降雨过程中气溶胶湿沉降的数值模拟[J]. *环境科学学报*, 25(12):1590-1596
- 赵敬国, 王式功, 张天宇, 等. 2015. 兰州市大气重污染气象成因分析[J]. *环境科学学报*, 35(5):1547-1555
- 钟方潜, 苏琪骅, 周任君, 等. 2017. 秸秆焚烧对区域城市空气质量影响的模拟分析[J]. *气候与环境研究*, 22(2):149-161
- 周广强, 高伟, 谷怡萱, 等. 2017. WRF-Chem模式降水对上海 $PM_{2.5}$ 预报的影响[J]. *环境科学学报*, 37(12):4476-4482
- 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
- 朱占云, 陈光宇, 姜瑜君, 等. 2016. 浙江省六大水库流域面雨量模式预报效果检验[J]. *气象与环境学报*, 32(3):28-33