DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2021.07.022

空气质量模式在重庆主城区预报效果检验订正

芦　华[1]，　吴　钰[1]，　刘伯骏[2]，　高阳华[1]，　李振亮[3]

1. 重庆市气象科学研究所，重庆 401147；2. 重庆市气象台，重庆 401147；
3. 重庆市环境科学研究院，重庆 401147

摘要：针对 CUACE 和 CMAQ 模式在重庆市主城区对 $PM_{2.5}$、O_3 和能见度的预报水平，分别进行了统计检验和分级检验分析，结果表明，CUACE 模式对 $PM_{2.5}$ 预报准确度高于 CMAQ 模式，对 O_3 和能见度的预报水平较低，略差于 CMAQ 模式，两种模式对于超标污染物和低能见度天气预报的准确率较低，存在一定的虚报和漏报；通过多元线性回归对预报结果进行订正，并对订正结果进行检验，发现订正后的预报值标准化平均偏差降低至 0.5 以内，平均平方根误差也明显降低，相关系数显著提高，偏差分布范围变窄，对超标污染物和低能见度天气的预报准确度有所提高.

关　键　词：CUACE；CMAQ；$PM_{2.5}$；O_3；能见度；检验；多元线性回归

中图分类号：X51　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673－9868(2021)07－0176－09

生态文明的建设，对环境气象提出了更多的要求，公众对健康环境的需求也越来越迫切. 随着国民经济和城市化进程的快速发展，工业耗煤量、机动车拥有量以及农作物秸秆燃烧量等不断增加，都市霾天气急剧增多. 空气污染已经成为典型的城市“气象病”之一，引起公众的广泛关注[1-2]. 重庆位于四川盆地东缘，地势呈南北高、中间低，地形沿河流、山脉起伏，其中主城区三面环山，地形闭塞，常年处于高湿条件下，有利于雾和霾的形成，容易形成低能见度天气[3-7]. 过去依据经验以及上级预报产品指导得到的结果，无法在时效性和分辨率上达到公众的要求，因此研发重庆山地高分辨率雾霾数值预报系统十分必要.

空气质量预报的方法可归纳为统计方法和数值预报方法. 过去依据经验和统计的预报方法，在理论和时效性等方面无法满足需求. 近年来，气象与大气化学模式相结合的数值预报研究发展迅速，具有完备的理论基础，以及高时空分辨率和时效性高等优点. 目前，数值预报已成为空气质量预报的主要趋势[8]. 国外城市空气质量数值预报经验经历了第一代模式模拟系统如 EKMA 和 ISC3，第二代模式模拟系统如 ADMS 和 CAMx 等，如今，由美国环保署开发推荐的第三代空气质量模式，核心为空气质量模式 CMAQ，该模式在国内外区域和城市空气质量预报中多有应用和研究[9-11]. 重庆市气象局基于现有的数值天气预报系统(SSRAFS)[12]开展了本地化的环境气象数值预报系统建设，引入 CMAQ 模式进行本地化研究，为污染天气的预报提供了良好的技术支撑和一定的参考价值. 重庆市气象局先后引入了国内外的空气质量模式，2016 年引入了中国气象局化学天气数值预报系统(CMA Unified Atmospheric Chemistry Environment，CUACE)，该模式为北京奥运会、上海世博会等活动提供气象服务，现为我国环境气象、雾和霾的数值预报业务系统[13-17].

收稿日期：2020－01－09

基金项目：重庆市气象局创新团队项目(ZHCXTD-202023，ZHCXTD-202003)；重庆市科委技术创新与应用示范项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0003).

作者简介：芦　华，硕士，工程师，主要从事空气质量预报及相关研究.

由于空气质量模式机理尚未完善，输入的计算数据本身存在偏差，使得模式预报结果存在一定的不确定性，针对 CMAQ 预报效果，国内外学者先后在多个区域开展了检验和订正研究[11,18-22]，CUACE 预报的相关检验订正研究也在各地开展[13-17]，研究发现模式预报结果在各地应用存在不同程度的偏差，后处理订正方法可以有效地订正模式预报的偏差，川渝地区是空气质量问题较为严重的区域之一，且地形条件复杂，模式的本地化应用具有独特性[10,17]，因此开展空气质量模式在重庆本地化应用检验研究很有必要，重庆市相关研究起步较晚，对于引入模式本地化效果的评估较少，本研究对重庆市主城区大气成分和能见度的逐时预报进行了统计对比分析，并进行逐日分级定量化检验评估. 过去，重庆地区空气污染的主要类型为 SO_2 和 PM_{10}，随着相关治理措施的实行，目前的污染类型主要表现为细颗粒物污染[3,6,23]，另外 O_3 亦逐步成为我国重点区域的主要污染物[17]. 因此本研究主要选取了 $PM_{2.5}$、O_3 和能见度预报水平作为检验的对象，并通过多元线性回归方法对预报值进行滚动订正，并检验订正效果.

1　资料与方法

1.1　使用资料

本研究分析使用了 2017 年 2 月 17 日到 2018 年 2 月 16 日的污染物实测资料，数据来自中国环境监测总站(http://106.37.208.233:20035/)公布的重庆市主城区 17 个国控监测点逐时观测资料. 并选取了同时期与环境监测点最近的自动气象站能见度数据. 另外，研究使用到 2017 年 2 月 17 日到 2018 年 2 月 16 日 WRF-CMAQ 和 CUACE 模式的逐时 $PM_{2.5}$、O_3 和能见度预报产品，其中 WRF 版本为 V3.5.1，物理参数化方案采用 MYJ 边界层方案、BMJ 积云参数化方案、WSM6 微物理过程，CMAQ 版本为 V4.7.1，水平输送和垂直输送采用 ppm 方案，水平扩散采用 multi-scale 方案，垂直扩散采用 eddy 方案，气相化学机制采用 cb05cl 机制，气溶胶为 AERO4 方案，WRF 初始场使用了美国国家环境预报中心(NCEP)的全球预报系统(GFS)资料，空间分辨率 0.5°×0.5°，3 h 时间间隔[24-26]；CUACE 模式由气象模块 MM5 和化学模块组成，MM5 采用混合冰相单参数 Reisner 方案、GRELL 积云参数化方案、MRF 边界层参数化方案和 RRTM 辐射方案，化学模块考虑了比较完善的微量气体、气溶胶的物理化学过程，由国家气象中心每日下发指导产品[14-16]. CMAQ 模式每日 16 时起报，CUACE 模式每日 20 时起报，预报未来 72 h 的污染物质量浓度及能见度等相关量，本研究取模式次日 0 到 24 时预报值，通过临近插值法得到 17 个空气质量监测站点的大气成分和能见度监测数据，即查找距离站点最近的格点值插值为站点值，求取 17 个站点观测值和预报值的区域平均，进行相关检验. 其中，自动观测的能见度上限为 35 km，且能见度范围大于 10 km 时即认为能见度好[27-28]，因此删除了能见度预报值大于 35 km 的模式预报和相应观测值进行检验分析.

1.2　研究方法

1.2.1　检验方法

检验采用统计检验和分级检验，统计检验选择指标包括平均偏差 *MB*、标准化平均偏差 *MNB*、平均平方根误差 *RMSE*(公式 1—3)和相关系数 *R*. 其中，$m(i)$为预报值，$o(i)$为观测值，平均偏差主要反映了预报值与观测值的差值情况，平均平方根误差主要反映预报值围绕观测值的变化情况，可以用来对比数据的离散程度.

$$MB=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m(i)-o(i)) \tag{1}$$

$$MNB=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(m(i)-o(i))}{o(i)} \tag{2}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(m(i)-o(i))^2}{n}} \tag{3}$$

分级检验从超标污染物和较差能见度预报的角度来评价模式预报的效果[18-19]. 通过阈值的设定，将模式预报和观测值对比散点分布划分为 4 个区间，然后分别计算相关的指标，进行预报效果检验，本研究选取的指标包括准确率、成功率、虚报率和漏报率，如图 1 所示.

对于 $PM_{2.5}$ 和 O_3 质量浓度的分级检验，参考文献[27]，设定 $PM_{2.5}$ 质量浓度阈值为 75 $\mu g/m^3$，O_3 质量浓度阈值为 200 $\mu g/m^3$，计算公式见公式 4－7：

$$准确率=\frac{b+c}{a+b+c+d} \tag{4}$$

$$成功率=\frac{b}{a+b+d} \tag{5}$$

$$虚报率=\frac{a}{a+b} \tag{6}$$

$$漏报率=\frac{d}{b+d} \tag{7}$$

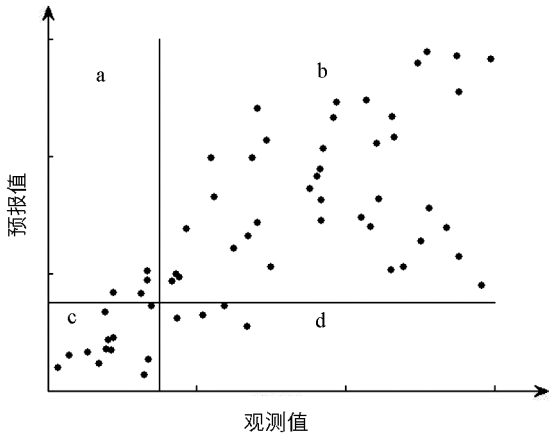

图 1 分级检验示意图

对于能见度，参考文献[28]，设定能见度的阈值为 2.0 km，分级检验公式见公式(8)－(11)：

$$准确率=\frac{b+c}{a+b+c+d} \tag{8}$$

$$成功率=\frac{c}{a+c+d} \tag{9}$$

$$虚报率=\frac{d}{c+d} \tag{10}$$

$$漏报率=\frac{a}{a+c} \tag{11}$$

1.2.2 *订正方法*

本研究采用了多元线性回归方法对 2017 年 2 月到 2018 年 2 月 $PM_{2.5}$、O_3 和能见度预报值进行了订正，并对订正结果进行了对比分析. 考虑到大气成分与气象要素之间存在密切相关，订正过程中考虑了基本气象要素，包括近地面风速、方向、温度、相对湿度以及气压作为自变量，另外还考虑了前期的污染物质量浓度以及能见度，通过计算发现自变量与实时观测值的相关性较好，可以通过 95%置信度水平的显著性检验. 订正采用预报日前的 10 日的观测值、模拟值以及 5 种气象要素建立滚动的线性回归模型，假设模型具有一定延续性，对未来 24 h 模式预报值进行逐时滚动订正.

2 结果与讨论

2.1 模式预报和订正效果统计分析

表 1 计算得到预报值与观测值逐时相关统计参数，可以看到 CUACE 模式对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的预报 *MB* 值较小，为－0.02 $\mu g/m^3$，较为理想，*MNB* 为 0.29，*RMSE* 为 31.27 $\mu g/m^3$，CUACE 模式对 $PM_{2.5}$ 的质量浓度高估 29%，低于 50%，模拟效果相对较好[18]. 相比较而言，CMAQ 模式对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的预报值偏差相比 CUACE 较大，*MNB* 为 1.49，结合图 2 分析发现，主要原因为秋冬季 CMAQ 模式对 $PM_{2.5}$ 质量浓度存在显著高估，通过多元线性回归订正，CUACE 和 CMAQ 预报 $PM_{2.5}$ 质量浓度的 *MNB* 分别降低至 0.17 和 0.19，*RMSE* 分别降低至 20.52 $\mu g/m^3$ 和 21.80 $\mu g/m^3$，订正后的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与实测值偏差较小，预报效果较为理想；对 O_3 质量浓度，CUACE 模式预报的 *MB* 和 *NMB* 相比 CMAQ 模式较大，CMAQ 模式预报 O_3 质量浓度的 *MB* 较小，为 1.57 $\mu g/m^3$，*MNB* 为 0.40，模拟高估 40%，而 CUACE 模式预报的 *MNB* 达到 2.68，表明 CUACE 预报 O_3 质量浓度结果显著偏大，结合图 2 可知 CUACE 系统对 O_3 质量浓度在秋冬季模拟存在明显高估，受到气象场影响较大，两个模式使用气象场不同，从而使得 O_3 质量浓度预报效果存在一定差异，通过后处理订正，*MNB* 降低至 0.19 和 0.21，*RMSE* 显著减小，预报偏差显著降低，准确率提高；对于能见度的预报，两个模式预报存在较大偏差，CUACE 和 CMAQ 模式对能见度的 *MNB* 值分别达到了 4.16 和 2.38，分析图 2 可知，模式预报的能见度相比观测值存在明显系统性偏差，其中 CUACE 模式的系统性偏差更显著，CMAQ 模式对能见度的预报值相比观测值

平均高 6.22 km，CUACE 模式平均偏高 12.22 km，通过多元线性回归方法对预报结果进行订正，系统性偏差有效得到降低，CUACE 和 CMAQ 的 *MNB* 值分别降低至 0.34 和 0.41，*MB* 和 *RMSE* 也显著降低，从统计参数来看，对能见度预报的订正效果较为理想.

表 1　$PM_{2.5}$、O_3 和能见度预报与订正结果统计检验

要素		CUACE 模式			CMAQ 模式		
		MB	*MNB*	*RMSE*	*MB*	*MNB*	*RMSE*
$PM_{2.5}$	预报	−0.02 μg/m³	0.29	31.27 μg/m³	39.12 μg/m³	1.49	98.04 μg/m³
	订正	−0.41 μg/m³	0.17	20.52 μg/m³	−0.82 μg/m³	0.19	21.80 μg/m³
O_3	预报	38.48 μg/m³	2.68	59.43 μg/m³	1.57 μg/m³	0.40	39.63 μg/m³
	订正	0.92 μg/m³	0.19	21.20 μg/m³	1.22 μg/m³	0.21	20.82 μg/m³
能见度	预报	12.22 km	4.16	15.62 km	6.22 km	2.38	10.77 km
	订正	0.28 km	0.34	3.90 km	0.42 km	0.41	4.27 km

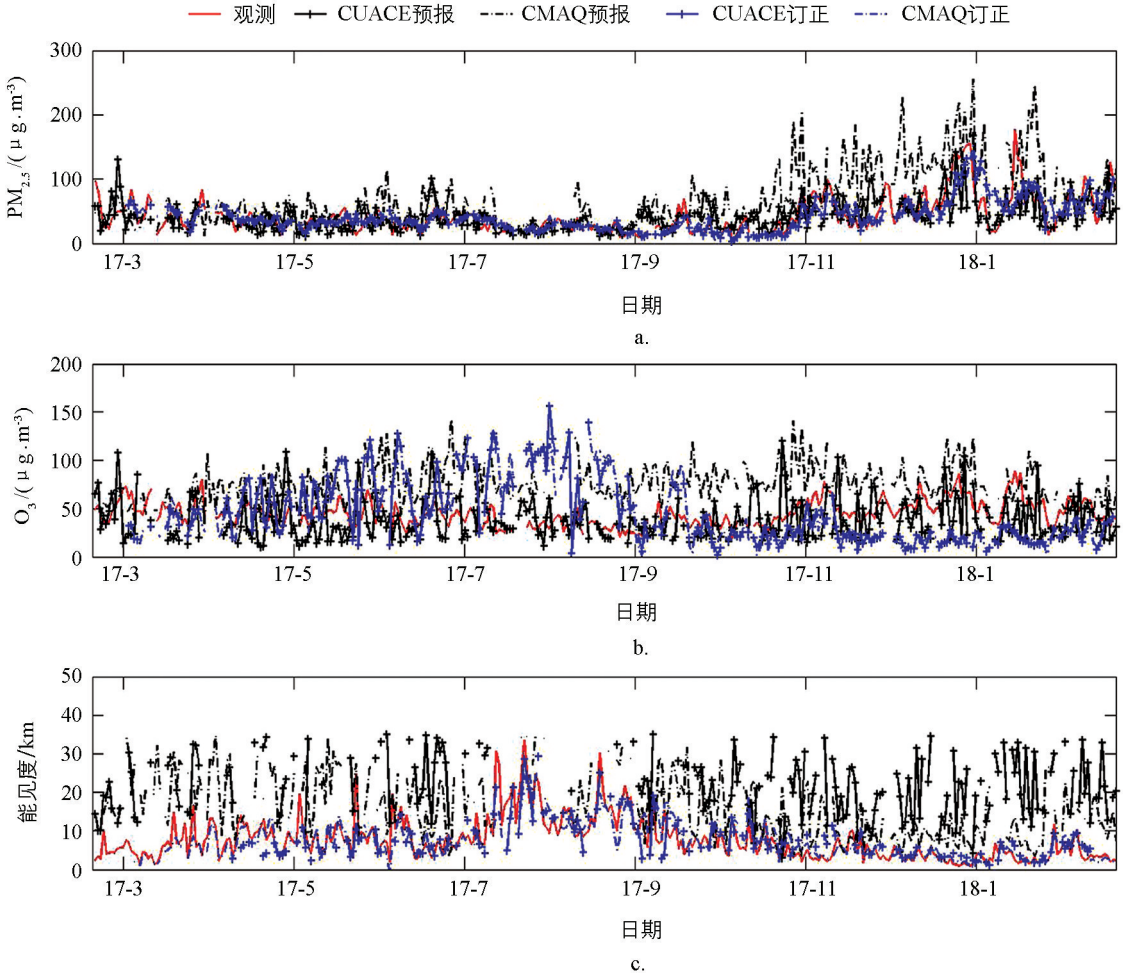

图 2　$PM_{2.5}$、O_3 和能见度观测、预报与订正结果时间变化图

相关系数反应模式预报值和观测值之间相关关系的密切程度，可以反映模式对于相关量变化趋势的预报水平. 图 3 为 CUACE 和 CMAQ 模式对于 $PM_{2.5}$、O_3 和能见度逐时预报值与观测值的散点分布图. 由图 3a 与 3d 可知，模式对 $PM_{2.5}$ 质量浓度预报值与观测值的拟合线均位于参考线上侧，表明模式预报值相比观测值普遍偏大，其中 CUACE 模式对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的预报值和观测值的相关系数为 0.44，CMAQ 仅为 0.24，CMAQ 模式预报值与观测值散点分布相对更分散，CUACE 模式的散点分布集中在参考线附近，而 CMAQ 拟合线更靠近 *Y* 轴，因此 CUACE 模式预报 $PM_{2.5}$ 质量浓度相比 CMAQ 模式更加接近实测值，

订正后的 $PM_{2.5}$ 预报值与实测值的相关性显著提高，相关系数分别达到了 0.72 和 0.69，散点分布更加集中在参考线两侧，拟合线靠近参考线，订正结果对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的趋势预报水平大大提高. 对比图 3b 和 3e 可知，模式对 O_3 质量浓度的预报同样普遍偏大，CMAQ 模式的散点相比 CUACE 较为分散，但 CMAQ 模式的拟合线相比 CUACE 略靠近参考线，CUACE 模式和 CMAQ 模式预报 O_3 质量浓度与观测值的相关系数分别为 0.42 和 0.59，结合表 1 可知造成这种情况的原因是 CUACE 模式对 O_3 质量浓度在秋冬季存在明显高估，总体来讲，CMAQ 模式对于 O_3 质量浓度趋势变化模拟效果更好，订正后的预报值拟合线更靠近参考线，相关系数提升至 0.88 和 0.86，散点分布更集中. 能见度的模拟值相比观测值显著偏高，相关系数分别为 0.19 和 0.27，结合表 1 可知，模式对于能见度的预报整体偏大，拟合线靠近 Y 轴，相关性较小，其中 CUACE 的预报偏差相比 CMAQ 偏差更显著，通过订正，相关性提高到 0.73 和 0.75，拟合线靠近参考线，对于能见度变化趋势的预报显著提高.

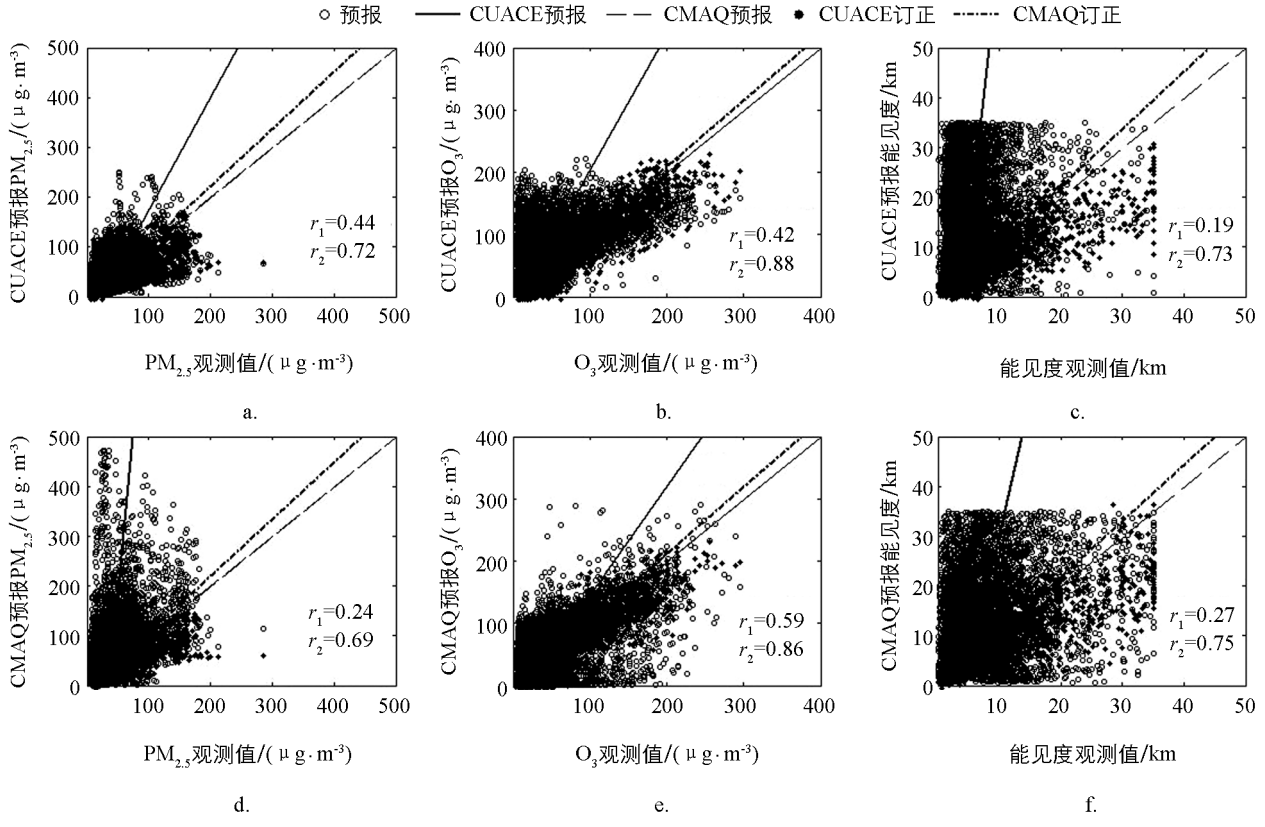

图 3 $PM_{2.5}$、O_3 和能见度预报与订正结果散点分布图

图 4 为 2017 年 2 月 17 日到 2018 年 2 月 16 日重庆主城区 CUACE 和 CMAQ 模式逐时预报值与同时期观测值差值的概率分布特征图. 分析图 4a 与 4d 可知模式对于 $PM_{2.5}$ 质量浓度的预报偏差概率分布基本表现为正态分布特征，其中 CUACE 模式预报偏差 85.1%集中在(−40，40] μg/m³，最大频率为 32.2%，出现在(−20，0] μg/m³，61.3%的偏差集中在(−20，20] μg/m³，通过订正，79.0%的偏差分布在(−20，20] μg/m³，最大偏差 41.4%在(0，20] μg/m³；CMAQ 模式预报偏差分布较宽，最大频率为 23.1%，出现在(0，20] μg/m³，模式预报偏差的 63.7%集中在(−40，40] μg/m³，42.0%的偏差集中在(−20，20] μg/m³，拟合线最高频为正，偏差整体大于 0，订正后的 CMAQ 预报偏差 75.9%分布在(−20，20] μg/m³，最大偏差为 37.3%在(−20，0] μg/m³. 对 O_3 质量浓度的预报，CUACE 的偏差最高频率不是十分突出，(0，20]，(20，40]，(40，60]，(60，80] μg/m³ 频率基本都在 15%左右，其中(40，60] μg/m³ 频率为 16.4%，略高于其他几个区间，分布整体大于 0，预报存在明显正偏差，订正后 73.5%的偏差集中在(−20，20] μg/m³，最大频率 42.3%在(0，20] μg/m³；CMAQ 模式预报偏差最高频率 30.0%出现在(−20，0] μg/m³，73.9%的偏差集中在(−40，40] μg/m³，47.9%的预报偏差集中在(−20，20] μg/m³，相比 CUACE 模拟偏差相对集中，且在正负区间分布较均匀，订正后的

CMAQ 预报偏差 74.1%集中在(－20，20] μg/m³，最大频率 43.8%出现在(0，20] μg/m³．能见度的预报偏差，CUACE 模式预报存在显著系统性高估，偏差集中在(0，25] km，其间每个间隔内的偏差基本在 12%～13%，相比 CMAQ 模式分布较宽，76.7%的偏差集中在(0，25] km，CMAQ 模式偏差 76.9%集中在(－5，20] km，存在系统性高估，但相比 CUACE 偏差较小，最大偏差出现在(0，10] km，其中(0，5] km 为 22.8%，(5，10] km 为 21.5%，模式对能见度的预报普遍存在高估，偏差分布不是很集中，后处理订正可以显著修正预报偏差，80%以上偏差集中在(－5，5] km.

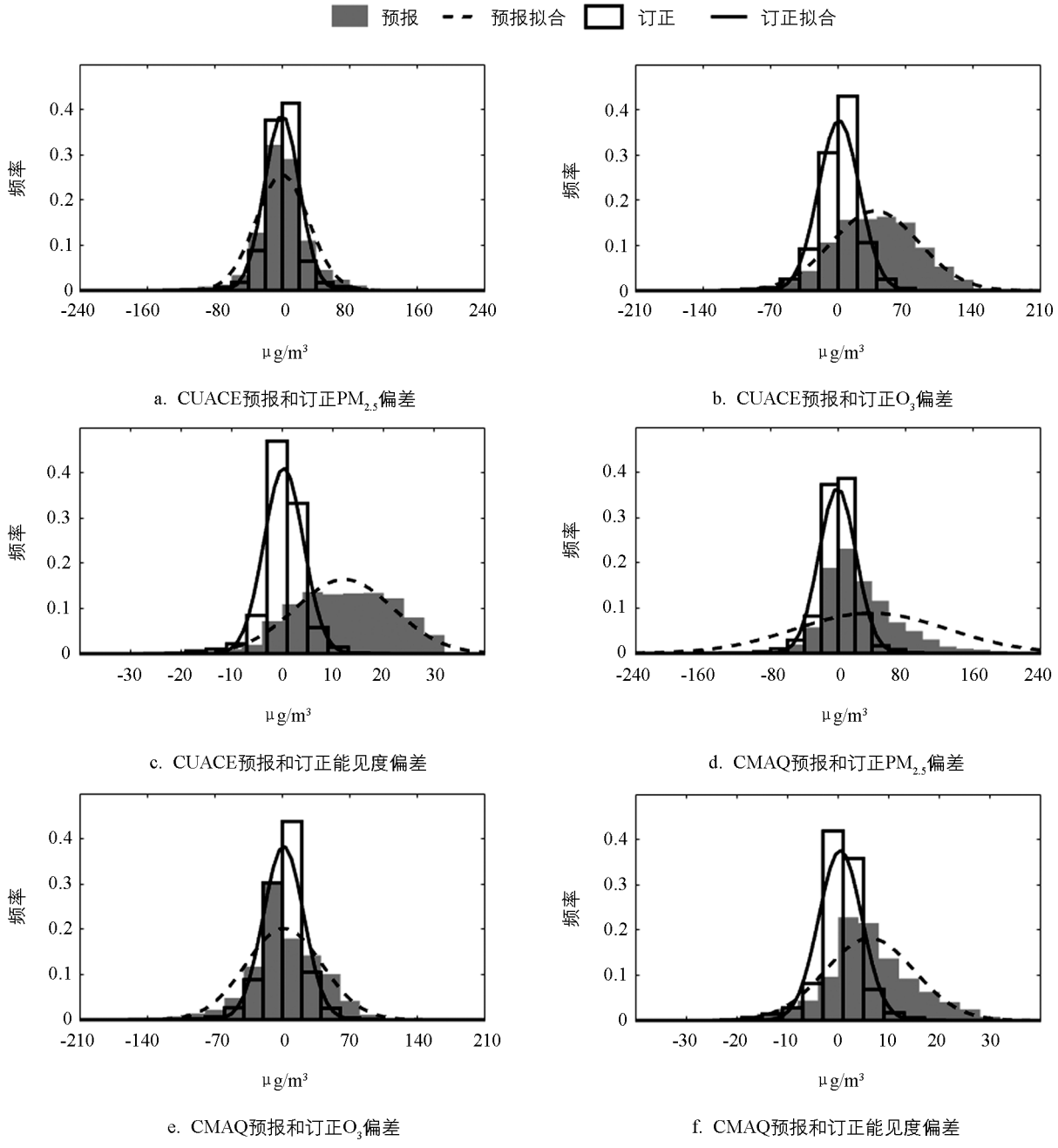

图 4　$PM_{2.5}$、O_3 和能见度预报与订正结果概率分布图

2.2　模式预报效果分级检验

图 2 给出了 2017 年 2 月 18 日到 2018 年 2 月 17 日重庆主城区 CUACE 和 CMAQ 模式对 $PM_{2.5}$、O_3 及能见度的逐日预报值、通过多元线性回归订正后的预报值以及观测值随时间变化曲线，$PM_{2.5}$ 的观测值集中在 0～200 μg/m³，11 月一次年 2 月间秋冬季 $PM_{2.5}$ 日均值明显升高，CUACE 模式模拟 $PM_{2.5}$ 主要波动范围在 0～200 μg/m³，CMAQ 模式在秋冬季对 $PM_{2.5}$ 质量浓度有明显高估，通过订正处理后的预报值

逐日变化曲线与实测值的变化趋势更为一致，模式在秋冬季对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的高估得到较好订正；O_3 的观测值主要集中在 0～150 $\mu g/m^3$，由于温度和光照原因，7－9 月夏秋季 O_3 质量浓度相比其他季节显著升高，其中 CUACE 模式对 10 月－次年 2 月间 O_3 质量浓度模拟效果不是很理想，存在明显高估，订正后 O_3 质量浓度值与实测值仍存在一定差异，春夏季存在高估，秋冬季为低估，可能是由于订正中使用自动站观测的气象要素建模，气象因子的观测值与中尺度模式预报值存在一定偏差，进而影响到 O_3 质量浓度的预报；能见度的分布主要为夏季高，冬季低，不仅与大气污染物质量浓度变化相关，还受到相对湿度、温度等气象因子变化引起的雾等过程的影响，CUACE 和 CMAQ 模式对能见度的预报均存在高估，订正处理后的能见度预报值与实测值变化趋势较为一致，对模式预报显著性高估有较好的修正效果.

通过分级检验(表 2)，可以看到 CUACE 和 CMAQ 模式预报 $PM_{2.5}$ 质量浓度的准确率分别为 84.2%和 68.0%，但是成功率相对较低，分别为 21.0%和 20.7%，其中 CUACE 模式的漏报率和虚报率分别达到 65.7%和 65.0%，说明 CUACE 模式对于超标污染物的预报准确度较低，而 CMAQ 模式虚报率高达 77.5%，漏报率只有 27.7%，说明 CMAQ 模式成功率低的原因主要由于模式对于超标污染物的高估；订正结果对 $PM_{2.5}$ 的预报准确率和成功率均有所提高. CUACE 预报的虚报率和漏报率降低，说明对超标污染物的预报准确度经过订正有所提高. CMAQ 预报订正结果对超标污染物的高估有所修正，但是漏报率却提高到 59.2%；CUACE 和 CMAQ 模式对 O_3 预报准确率较高，但是 CUACE 预报的成功率很低，只有 10.2%，漏报率和虚报率较高，说明 CUACE 对于超标的 O_3 质量浓度预报准确度不是很高，相比之下，CMAQ 模式对超标 O_3 的预报效果相对较好；通过订正处理，模式对于 O_3 预报的准确率和成功率升高，漏报率和虚报率降低，说明订正后的结果对于超标污染物的预报准确度有所提高；对于能见度的预报准确率较高，结合前文分析，可知能见度的预报虽然整体偏差较大，但是分级检验指标表现较好. CUACE 和 CMAQ 模式预报成功率均较低，分别只有 7.2%和 0.2%，而虚报率和漏报率很高，说明模式对于较差能见度的预报漏报和虚报较多，订正结果将 2 个模式对能见度预报的成功率均提高到 22.0%，同时虚报率和漏报率降低，订正结果对较差能见度预报水平有所提高.

表 2 $PM_{2.5}$、O_3 和能见度预报与订正分级检验

检验指标		CUACE 模式			CMAQ 模式		
		$PM_{2.5}$	O_3	能见度	$PM_{2.5}$	O_3	能见度
准确率	预报	84.2%	94.6%	88.4%	68.0%	96.7%	90.9%
	订正	90.5%	97.6%	91.1%	89.9%	97.6%	92.9%
成功率	预报	21.0%	10.2%	7.2%	20.7%	27.7%	0.2%
	订正	37.9%	46.4%	22.0%	31.1%	35.3%	22.0%
虚报率	预报	65.7%	78.9%	79.4%	77.5%	43.5%	99.0%
	订正	41.2%	17.4%	56.1%	43.2%	24.6%	46.0%
漏报率	预报	65.0%	83.7%	90.1%	27.7%	64.7%	99.8%
	订正	48.4%	48.6%	69.3%	59.2%	60.1%	72.9%

3 结 论

由统计检验结果可知，对于 $PM_{2.5}$ 质量浓度的预报，CUACE 统计参数优于 CMAQ 模式，散点分布较为集中，相关系数较高，预报偏差的概率分布相对集中在 0 左右，分布区间较窄，分级检验结果表明，CMAQ 模式对 $PM_{2.5}$ 质量浓度的预报准确率较低，虚报率较高，主要原因在于模式秋冬季对 $PM_{2.5}$ 质量浓度预报存在明显高估.

由于气象场不同等原因，对于 O_3 质量浓度的预报，CMAQ 模式的统计参数优于 CUACE 模式，CUACE 模式散点分布较为分散，相关系数低于 CMAQ 模式，预报偏差的概率分布区间较宽，预报偏差明显偏于正值，CUACE 模式对超标 O_3 质量浓度的预报水平较低，略差于 CMAQ 模式.

CUACE 和 CMAQ 模式对能见度的预报分别平均偏高 12.22 km 和 6.22 km，模式预报和观测值的相关系数较低，偏差的概率分布显著偏向正值，存在明显正偏差，分级检验的结果表明，模式对较差能见度的预报准确率很低，虚报和漏报较多.

通过多元线性回归对模式预报 $PM_{2.5}$、O_3 和能见度结果进行后处理订正，检验结果表明了订正结果能够有效修正模式预报偏差，*MNB* 均小于 0.5，结果较为理想，相关系数显著提高，订正结果散点分布相比原始预报结果集中在参考线两侧，拟合线贴近参考线，偏差概率分布范围变窄，$PM_{2.5}$ 和 O_3 的偏差超过 70%集中在(－20，20] $\mu g/m^3$，能见度预报偏差的 80%以上集中在(－5，5] km，对能见度预报存在的明显正偏差，实现有效订正，订正结果对较差能见度的预报准确率明显提高，虚报率和漏报率明显降低.

总的来讲，CUACE 模式对于 $PM_{2.5}$ 质量浓度预报效果较好，而 CMAQ 模式对于 O_3 和能见度的预报效果优于 CUACE 模式，但均存在明显偏差，模式对超标污染物的预报不甚理想，对于低能见度天气的预报准确度较低，通过多元线性回归方法订正结果，有效提高了模式对于大气成分和能见度的预报效果，尤其是对超标污染物和低能见度天气的预报准确度显著提高.

参考文献：

[1] 丁一汇，柳艳菊. 近 50 年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系 [J]. 中国科学：地球科学，2014，44(1)：37-48.

[2] 孙　彧，马振峰，牛　涛，等. 最近 40 年中国雾日数和霾日数的气候变化特征 [J]. 气候与环境研究，2013，18(3)：397-406.

[3] 梁　丹，王　彬，王云琦，等. 重庆市冬季 $PM_{2.5}$ 及气态污染物的分布特征与来源 [J]. 环境科学研究，2015，28(7)：1039-1046.

[4] ZHAO S P，YU Y，YIN D Y，et al. Spatial Patterns and Temporal Variations of Six Criteria Air Pollutants during 2015 to 2017 in the City Clusters of Sichuan Basin，China [J]. Science of the Total Environment，2018，624：540-557.

[5] CAI H K，GUI K，CHEN Q L. Changes in Haze Trends in the Sichuan-Chongqing Region，China，1980 to 2016 [J]. Atmosphere，2018，9(7)：277.

[6] 曹庭伟，吴　锴，康　平，等. 成渝城市群臭氧污染特征及影响因素分析 [J]. 环境科学学报，2018，38(4)：1275-1284.

[7] 杨　茜，高阳华，李振亮. 重庆市霾天气下大气能见度与颗粒污染物的关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版)，2019，41(9)：134-140.

[8] 唐孝炎，张远航，邵　敏. 大气环境化学 [M]. 2 版. 北京：高等教育出版社：447-449.

[9] DENNIS R L，BYUN D W，NOVAK J H，et al. The Next Generation of Integrated Air Quality Modeling：EPA's Models-3 [J]. Atmospheric Environment，1996，30(12)：1925-1938.

[10] 程兴宏，刁志刚，胡江凯，等. 基于 CMAQ 模式和自适应偏最小二乘回归法的中国地区 $PM_{2.5}$ 浓度动力-统计预报方法研究 [J]. 环境科学学报，2016，36(8)：2771-2782.

[11] 谢　敏，钟流举，陈焕盛，等. CMAQ 模式及其修正预报在珠三角区域的应用检验 [J]. 环境科学与技术，2012，35(2)：96-101.

[12] 高　松，杜　钦，吴　钰，等. 重庆数值预报后处理系统技术研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版)，2018，43(11)：125-134.

[13] 李晓岚，马雁军，王扬锋，等. 基于 CUACE 系统沈阳地区春季空气质量预报的校验及修正 [J]. 气象与环境学报，2016，32(6)：10-18.

[14] 何金梅，刘　抗，王玉红，等. CUACE 模式在兰州城市空气质量预报中的检验订正 [J]. 干旱气象，2017，35(3)：495-501.

[15] 李　曼，张载勇，李淑娟，等. CUACE 系统在乌鲁木齐空气质量预报中的效果检验 [J]. 沙漠与绿洲气象，2014，8(5)：63-68.

[16] 杨关盈，邓学良，王　磊，等. 基于 CUACE 模式产品的订正方法比较研究 [J]. 气象科学，2017，37(6)：839-844.

[17] 吕梦瑶，程兴宏，张恒德，等. 基于自适应偏最小二乘回归法的 CUACE 模式污染物预报偏差订正改进方法研究 [J]. 环境科学学报，2018，38(7)：2735-2745.

[18] 王　茜，吴剑斌，林燕芬. CMAQ 模式及其修正技术在上海市 $PM_{2.5}$ 预报中的应用检验 [J]. 环境科学学报，2015，35(6)：1651-1656.

[19] 张岳军，张怀德，朱凌云，等. 太原市 $PM_{2.5}$ 预报统计修正模型及其应用检验 [J]. 环境科学研究，2018，31(7)：1207-1213.

[20] DJALALOVA I, DELLE MONACHE L, WILCZAK J. $PM_{2.5}$ Analog Forecast and Kalman Filter Post-Processing for the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Model [J]. Atmospheric Environment，2015，119：431-442.

[21] 黄 思，唐 晓，徐文帅，等. 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，2015，35(1)：56-64.

[22] 麦健华，于玲玲，邓 涛，等. 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，2018，34(1)：78-86.

[23] 李九彬，王建力. 2001－2011 年重庆市空气质量特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版)，2013，35(9)：145-153.

[24] 潘锦秀，晏平仲，孙 峰，等. 多元线性回归方法对北京地区 $PM_{2.5}$ 预报的改进应用 [J]. 中国环境监测，2019，35(2)：43-52.

[25] 李颖若，汪君霞，韩婷婷，等. 利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响 [J]. 环境科学，2019，40(3)：1024-1034.

[26] 吴 钰，谢 旻，高阳华，等. 利用集合均方根卡尔曼滤波反演重庆地区 SO_2 源排放 [J]. 环境科学研究，2018，31(1)：25-33.

[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 环境空气质量标准：GB 3095-2012 [S]. 北京：中国环境科学出版社，2016.

[28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 水平能见度等级：GB/T 33673-2017 [S]. 北京：气象出版社，2017.

Test and Correction of Forecast Effect by Air Quality Numerical Prediction Models in Chongqing Urban City

LU Hua[1], WU Zheng[1], LIU Bo-jun[2], GAO Yang-hua[1], LI Zhen-liang[3]

1. *Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China;*
2. *Chongqing Meteorological Observatory, Chongqing 401147, China;*
3. *Chongqing Institute of Environmental Science, Chongqing 401147, China*

Abstract: In this study, statistical test and hierarchical testare performed of the prediction levels of $PM_{2.5}$, O_3 concentration and visibility in the main urban area of Chongqing by the CUACE (CMA unified atmospheric prediction system)and the CMAQ (Community Multiscale Air Quality)models. The results show that the CUACE model has higher prediction accuracy for $PM_{2.5}$ than the CMAQ model, and its prediction-level of O_3 and visibility is low, slightly lower than that of the CMAQ model. This model has rather low accuracy for over-standard pollutants and poor visibility forecast, and has fairly high false report rate and failed alarm rate. The forecast results are corrected through multiple linear regression, and the corrected results are checked. The normalized average deviation of the corrected prediction values is found to have been reduced to 0.5 or less, the mean square root error is also significantly reduced, the correlation coefficient is significantly increased, the deviation distribution range is narrowed, and the forecast accuracy for over-standard pollutants and poor visibility is improved.

Key words: CUACE(CMA Unified Atmospheric Prediction System); CMAQ(Community Multiscale Air Quality); $PM_{2.5}$; O_3; visibility; test; multiple linear regression

责任编辑 包 颖