

基于 Models-3 的自修正空气质量预报系统及其效果检验

陆成伟¹, 周来东¹, 邓也¹, 宋丹林¹, 田红¹, 康雪², 周子航¹, 胡翔¹

(1.成都市环境科学保护研究院, 成都 610072; 2.成都市气象局, 成都 610072)

摘要 本文介绍了一个以 Models-3 为基础的自动化空气质量数值预报系统, 该系统通过 Gambas、Yabasic 和 R 语言等工具进行开发, 集成 WRF-SMOKE-CMAQ 三个模式, 可通过监测数据进行自动修正, 完成空气质量业务数值预报, 并将结果发布到 Web 服务器上进行呈现。该系统对硬件的要求较低, 将部署于一台 DELL Optiplex 9010 工作站上, 设置 6km—2km 双层嵌套, 进行成都市空气质量数值预报。本文分析了成都市 2014 年 1 月 1 日至 2014 年 12 月 31 日的空气质量数值预报结果, 评价系统对成都市 NO₂、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、O₃、CO 以及空气质量指数 (AQI) 的预报效果。结果显示, 系统对于成都市 2014 年空气质量变化情况趋势的预报效果较好, 302 天有效预报中, 24 小时直接预报的空气质量等级准确率为 58.27%, AQI 预报相关系数 0.71, 观测值自动修正预报对 24 小时空气质量预报具有明显改善效果, 使其等级预报准确率达到 64.9%, 相关系数提高到 0.89。

关键词 成都市; Models-3; 空气质量预报; 自动修正

中图分类号: X831

文章编号: 1674-6252 (2016) 02-0102-08

文献标识码: A

DOI: 10.16868/j.cnki.1674-6252.2016.02.102

A Models-3 Based Self-correcting Air Quality Forecast System and the Estimation

Lu Chengwei¹, Zhou Laidong¹, Deng Ye¹, Song Danlin¹, Tian Hong¹, Kang Xue², Zhou Zihang¹, Hu Xiang¹

(1.Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu 610072;

2.Chengdu Meteorological Bureau, Chengdu 610072)

Abstract: A Models-3 based self-correcting air quality forecast system was discussed in this paper, the automated system was developed with Gambas, Yabasic and R language, which integrates 3 models including WRF, SMOKE and CMAQ. The forecast system captures monitor data from network, corrects the concentrations of different pollutants, and then public the results via web server. The hardware requirements of forecast system is relatively low and it was deployed on a DELL Optiplex 9010 workstation with a 6km-2km nested domain, giving operational air quality forecast for Chengdu. A estimation of the system was performed with 2014 forecasted concentrations and AQI, the results showed that the system well reflected the air quality variations in 2014, the hit rate of 24h direct forecast on air quality grads was 58.27% with a correlation coefficient of 0.71, and the corrected 24h forecast had a hit rate of 64.9% with a correlation coefficient of 0.89, the self-correcting method can improve the 24h forecast of Chengdu.

Keywords: Chengdu City; Models-3; Air quality forecast; CMAQ; Auto Correction

引言

成都市位于四川盆地西部, 东北部为德阳市, 西南与雅安市相连, 南接眉山, 东南毗邻资阳市, 西北紧靠阿坝自治州, 东西横距 192km, 南北纵距 166km, 面积 12 390km², 属于内陆城市。成都市东西两翼高差近

5000m, 由于地表海拔高度差异显著, 直接造成水、热等气候要素的空间分布不均, 西部山区温度低于东部平原地区, 成都市全年静风频率高, 相对湿度较高, 容易出现逆温现象, 不利的气象条件造成成都市易出现污染积累, 并发生雾霾天气, 从而使成都市对空气质量数值预报的需求迫切。

资助项目: 成环科研 ky2013 第 020 号。

作者简介: 陆成伟 (1987—), 助理工程师, 主要研究方向为空气质量数值模拟与预报。

本文介绍了一个基于 Models-3 的业务化空气质量数值预报系统, 该系统以 CMAQ 为核心模式, 使用 Yabasic 语言开发相应的业务化支持软件, 实现空气质量的业务化数值预报, 并将系统部署于小型工作站上, 在较低的硬件成本上实现空气质量的业务化预报。本文最后对该系统 2014 年一年的空气质量数值预报结果进行分析, 评价该系统的预报效果。

1 系统构成

Models-3 空气质量模拟系统为美国 EPA 于 1998 年提出的, 以第三代空气质量模式 CMAQ 为核心, 包括 MMS/WRF 气象模式和 SMOKE 排放清单处理模式, 其应用范围涵盖与空气质量的数值模拟相关的评价、分析和决策支持等方面, 可用于 NO₂、SO₂、颗粒物和臭氧等问题的模拟^[1-9], 在国内外也有成功将 CMAQ 模式用于空气质量数值预报的案例^[10, 11]。由于空气质量数值预报在我国尚处起步阶段, 各地预报员能力水平差异较大, 因此在进行自修正空气质量预报系统设计时有必要开发一个基于图形用户界面的可视化工具, 方便预报员对业务预报系统进行简单的操作和必要的控制。该预报系统使用 GAMBAS 语言^[12]开发系统监控模块, GAMBAS 最初由 Benoît Minisini 开发, 为 Linux 下的一款高效快速图形化应用程序开发工具, 具有较好的移植性。业务预报系统主要完成 Models-3 的整个运行流程, 包括调用 WRF 模式实现气象场数值预报、调用 SMOKE 模式动态生成排放清单, 并将气象数据和排放数据输入 CMAQ 模式, 进行大气污染物浓度数值预报。业务预报系统需要满足高稳定性、高效率 and 低资源占用等要求。Yabasic 语言为德国计算机工程师 Marc-Oliver Ihm 开发, 具有体积小、跨平台的特点, 可以非常便捷地对多种模式进行交互, 且稳定性高, 故用于开发业务预报系统。该预报系统还包括: 监测数据收集模块, 用于获取准实时空气质量监测数据; 预报产品处理系统, 在该系统中生成每日所需的预报产品, 结合实测数据进行修正预报, 并对预报数据进行管理和回顾评价; 预报产品发布系统, 用于提供 Web 访问支持。系统目前部署于一台 DELL Optiplex 9010 工作站上, 系统配置一枚 Intel I7-3770 四核 CPU, 配置 8GB 内存和 4TB 硬盘用于文件备份, 1TB 硬盘用于系统运行。

1.1 系统监控模块

系统监控模块为一个驻留在系统内存中的程序, 用于检测监测数据收集模块和业务预报模块是否正常运行, 同时可以提供基本的操作和预报结果的查看。通过该系统, 可以对空气质量预报系统进行全面监控和简单操作, 并可进行自修正空气质量预报系统的各项参数设置, 包括 WRF、SMOKE 和 CMAQ 的运行参数、系统预报长度和系统插件启用情况等。该模块的另一重要功能为定时检测 NCEP 服务器上 GFS 全球预报系统某一预报时次的输出数据是否可以下载, 并在可下载时自动开始气象数据的下载。

该系统目前采用 GMT00 时的 0.25° 分辨率预报场作为初始场, 进行含当日在内的 96 小时的数值预报, 预报进程开始于每日中午 12:00, 每隔 20 分钟检测一次 GFS 气象数据是否可以下载, 通常情况下, 使用 8M 宽带可以在两小时内完成数据下载, 随后系统监控模块将启动空气质量的数值预报流程。为了尽可能地保证系统运行的稳定性, 进入 2015 年后, 课题组租用阿里云服务器实现远端前日 GMT12 时 1° 分辨率的预报数据自动备份。系统监控模块运行于图形界面, 操作人员可查看系统运行状态, 并对自修正空气质量预报系统进行操作, 其运行界面如图 1 所示。



图 1 系统监控模块运行界面

1.2 业务预报系统

业务预报系统是自修正空气质量预报系统的核心组件, 该系统耦合 WRF 模式、SMOKE 模式和 CMAQ 模式, 处理模式参数修改、运行和文件处理, 依次调用三个模式完成天气数值预报、排放清单动态处理和空气质量数值预报, 并处理与模型嵌套运行相关的初始条件、边界条件生成, 运行流程如图 2 所示。

业务预报系统首先按预报长度、模式理化参数配置等信息进行修改, 检验气象数据下载是否包括第一个时次的初始场, 以及预报长度所需的最后一个时次的预报场, 并启动 WRF 模式进行气象数值预报。现阶段自修正空气质量预报系统设置进行双层嵌套, 外层为 88 × 88 × 6km 的网格, 包括四川盆地的大部分地区, 内层为 121 × 96 × 2km 的高分辨率网格, 包括成都市行政区划, WRF 模式的气象参数设置参考现有研究成果^[16], WRF 模式运行完成后, 需要对 WRF 模式的输出数据进行归档处理, 随后调用 CMAQ 模式的 MCIP 模块将 WRF 模式的输出数据转换为 IOAPI 格式。气象模式转换完成后, 首先调用 CMAQ 模式的 ICON 模块, 从前一天的预报结果中计算本次数值预报的各污染物初始浓度, 进行热启动, 使每日的初始浓度具有合理的空间分布, 随后业务预报系统调用 SMOKE 模式处理排放清单, 进行时间分配、空间分配和垂直分配, 生成 CMAQ 模式所需要的 netCDF 排放清单。

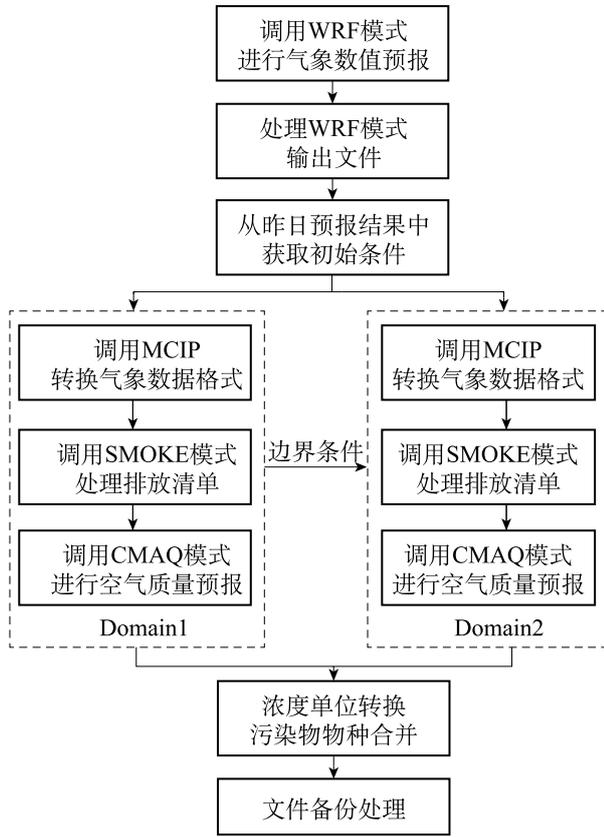


图2 业务预报系统运行流程^[13]

气象数据和排放清单数据处理完成后，业务预报模块将分别对外层网格 Domain 1 和内层网格 Domain 2 进行空气质量数值预报。处理外层网格预报流程时，使用基于统计数据的网格边界浓度，随后使用 CCTM 模块完成数值预报过程，并在线计算光化学反应速率和干沉降速率。Domain1 计算完成后，业务预报系统通过 BCON 模块从 Domain1 的预报结果中获取 Domain 2 的边界输入输出浓度，进而完成成都市辖区空气质量数值预报。由于 CCTM 模块输出的污染物浓度主要为体积浓度，且以模型组分为主，故需要通过模型物种计算器对污染物物种进行合并和单位转换，模型物种计算器基于 CMAQ 的 COMBINE 组件，除 COMBINE 组件中所包含的大气污染物浓度外，还同时计算相对湿度、降水、干

湿沉降、地面风速、风向、温度等基本要素。

1.3 监测数据收集模块

自修正空气质量预报系统包含一个准实时监测数据收集模块，使用 Python 语言和 SGMLParser^[14,15] 开发，该模块定时解析成都市环境监测中心站实时空气质量监测数据发布网页，提取相关数据后存储至 SQLite 数据库中，并将该数据用于空气质量数值预报效果的比对和修正。

1.4 预报数据处理系统

预报数据处理系统主要使用 R 语言^[17] 开发，通过 RNetCDF 库^[18] 处理模型物种计算器输出的 netCDF 文件，计算 AQI 值，并制作必要的产品。预报数据处理系统根据中国环境监测总站出具的 AQI 指数计算方法^[19] 计算预报所得的 AQI 指数，并绘制预报所需的气象条件变化图、大气污染物浓度变化图等信息。

预报数据处理模块生成的产品包括成都市中心城区未来三天空气质量直接预报结果、四川盆地 PM_{2.5} 逐时变化趋势图、各预报点位污染物浓度逐时变化序列图、各预报点位气象要素逐时变化序列图、地面及四个气压层风速、温度、相对湿度等要素的逐时变化图，以及垂直剖面上的温度、风速和相对湿度的逐时变化图。此外，预报数据处理模块还调用 ARWPOST 和 Grads 绘制地面风场、地面温度、剖面温度、剖面风速、剖面相对湿度以及 925hPa、850hPa、700hPa、500hPa 四个气压层上的风场和湿度场，调用 Verdi 程序绘制地面污染物浓度逐时空间分布，并生成 GIF 格式动画，部分产品如图 3 所示。

预报数据处理系统的另一重要功能则是实现空气质量跟踪自动修正预报，修正预报基于现阶段监测数据。由于目前排放源清单统计数据质量和制作水平的制约，使用数值预报提供未来空气质量的变化趋势信息，并在此基础上通过监测数据进行浓度修正，可以有效减少重污染天气的漏报，自修正空气质量预报系统在每日上午 9:00 至 10:00 间出具含当日在内的四日空气质量数值预报，因此编写程序获取出具预报时刻前 8 小时的空气质量实测数据与直接预报中前 8 小时的预报浓度进行计算，计算二者相关系数 R，并分情况进行空气质量数值预报修正，如下式：

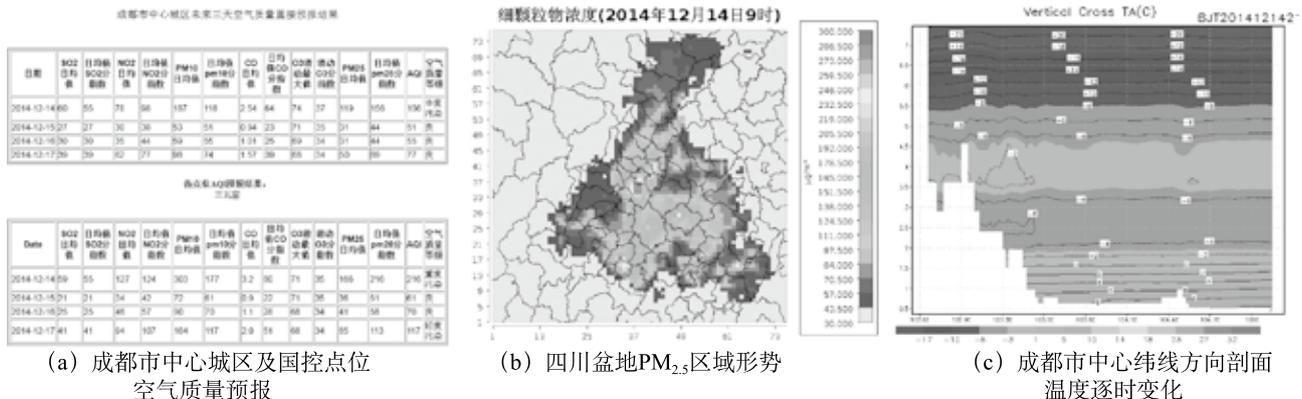


图3 自修正空气质量预报空气质量预报产品

$$\begin{cases} R \geq 0.5 \Rightarrow C_{\text{mod_out}} = a \cdot C_{\text{mod}} + b \\ R < 0.5 \Rightarrow C_{\text{mod_out}} = k \cdot C_{\text{mod}} \end{cases} \quad (1)$$

$$k = \frac{\text{mean}(C_{\text{obs_8}})}{\text{mean}(C_{\text{mod_8}})}$$

式中, $C_{\text{mod_out}}$ 为修正预报修正后的预报浓度; C_{mod} 为模式直接输出的预报浓度; $C_{\text{mod_8}}$ 为预报出具的时间前8小时的逐时模式输出浓度; $C_{\text{obs_8}}$ 为预报出具的时间前8小时的逐时实测浓度; 计算 $C_{\text{mod_8}}$ 和 $C_{\text{obs_8}}$ 的相关系数 R , 当相关系数 $R \geq 0.5$ 时, 认为两组数据达到中等相关性, 并在此基础上求得 $C_{\text{mod_8}}$ 和 $C_{\text{obs_8}}$ 的一元线性拟合方程的斜率 a 和截距 b , 并使用 a 和 b 对模式输出浓度 C_{mod} 进行修正; 当相关系数 $R < 0.5$ 时, 认为两组数据相关性不佳, 此时以两组数据均值的比例计算得到浓度修正系数 k , 并以此对预报数据进行修正。运用两种修正方法修正后的六种污染物浓度再按照AQI计算方法进行计算, 得到修正预报。

预报数据处理系统每天评价前日空气质量直接预报的效果, 该功能主要使用 R 语言实现, 部分统计和绘图功能来自 openair 库^[20], 使用 RMarkdown 库^[21]生成回顾评价报告。评价报告包括预报浓度数据对比、主要气象参数回顾、污染物浓度变化时间序列、统计指标分析和预报对比, 其中预报浓度数据对比列出各污染物逐时浓度变化数据, 主要气象参数回顾则主要给出模式预报的风玫瑰图、边界层高度两个指标, 污染物浓度变化时间序列则以图表形式显示预报数据与实测数据的变化情况, 统计指标分析则从 FAC2 系数、平均偏差、平均误差、标准化平均偏差、标准化平均误差、均方根误差和相关系数 R 等方面对预报效果进行综合评价, 最后将预报的 AQI 报表与实测的 AQI 报表进行对比。建立空气质量预报回顾评价体系有助于分析空气质量预报中存在的问题, 以便改进预报效果, 因此回顾评价以未进行修正的直接预报结果为评价对象。

1.5 空气质量预报发布模块

空气质量预报发布模块由三部分组成, 分别为基于 Linux Msmtp 和 Mutt 构架的电子邮件发布系统^[22]、基于 Apache 建立的 Web 服务器^[23]和使用百度地图 API 的开发的 WEBGIS 发布系统。

Linux 操作系统下, Msmtp 和 Mutt 的组合经常被用于设备的自动邮件预警, 使用这两个程序实现邮件的发送系统不需要建立本地邮件服务器, 仅需使用支持 smtp 认证的公共邮箱即可, 省去了本地邮件服务器的架构和维护工作。Apache 服务器用于支持通过浏览器对预报结果进行访问, 配置本地路径为 Apache 服务器的访问路径, 并开放 80 端口用于架设 Web 服务器, 并通过 NAT 地址映射实现互联网访问。百度地图 API^[24] 则提供了一套免费的、详细的在线地图资源, 使用百度地图 API 开发的 GIS 发布系统无须授权费用, 可直观展现空气质量数值预报的结果, 百度地图可以显示行政区划图和矢量标注, 标注物的颜色符合环境空气质量指数 (AQI) 技术规定。如图 4 所示。



图4 基于Baidu地图API的预报发布系统

2 自修正空气质量预报系统效果评价

自修正空气质量预报系统于 2013 年 12 月 15 日开始投入试运行, 2014 年 1 月 1 日开始提供业务预报, 并业务化运行至今, 取 2014 年预报数据, 共出具有效预报 302 天, 参照我国 AQI 评价标准, 对 24 小时直接预报的 NO_2 日均值、 SO_2 日均值、 PM_{10} 日均值、 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值、 O_3 小时最大、 O_3 8 小时滑动最大和 CO 日均值进行统计评价, 分别评价其 FAC2 系数、平均偏差 MB、平均误差 MGE、归一化平均偏差 NMB、归一化平均误差 NMGE、均方根误差 RMSE 以及相关系数 R , 结果如表 1 所示。

表1 不同污染物预报效果统计分析

污染物	样本量	FAC2 系数	平均偏差	平均误差	归一化平均偏差	归一化平均误差	均方根误差	相关系数
POL	N		MB	MGE	NMB	NMGE	RMSE	R
NO_2	297	91.25%	-8.84	15.79	-15.07%	26.93%	20.37	0.46
SO_2	297	70.03%	9.68	11.18	50.74%	58.62%	15.28	0.50
PM_{10}	297	83.84%	-17.32	43.19	-14.20%	35.43%	62.78	0.62
$\text{PM}_{2.5}$	297	82.83%	-15.91	27.13	-21.08%	35.95%	43.98	0.71
O_3 小时最大	297	78.79%	-18.67	38.82	-18.69%	38.87%	55.32	0.38
O_3 8 小时滑动最大	297	79.41%	-6.79	31.39	-8.37%	38.71%	40.64	0.39
CO	297	95.62%	-0.09	0.35	-7.47%	29.26%	0.46	0.30

302个有效预报数据中,同时存在监测数据的预报数量为297个,因此参与统计的各污染物预报有效样本个数297个。FAC2系数为预报浓度在实测浓度的0.5~2倍的数量比例,可见除SO₂的FAC2系数偏低外,其余各预报指标的FAC2系数均在80%左右,部分预报项目的FAC2系数达到90%以上,说明预报浓度和实测浓度的偏差范围是可以接受的。平均偏差MB显示,除SO₂整体偏高为9.68外,其余指标均有偏低现象,其中以O₃小时最大浓度的偏低最为明显,其次为PM₁₀和PM_{2.5};归一化平均偏差显示,SO₂偏高达50%以上,而PM_{2.5}偏低达到21.08%,O₃小时最大浓度的偏低幅度也达到了18.69%。对比平均误差MGE和平均偏差MB,可见SO₂指标的MGE与|MB|差异不大,说明SO₂的偏差属于系统性偏高,而PM₁₀、PM_{2.5}、O₃小时最大、O₃8小时滑动最大等指标均有明显差异,可见这些指标的预报同时存在偏高和偏低的现象。均方根误差RMSE中,以PM₁₀最为显著,其次分别为O₃小时最大和PM_{2.5},可见这些指标预报浓度均值与对应实测均值之间的差异波动较大;相关系数R则表明趋势预报最佳的指标为PM_{2.5},其次为PM₁₀和SO₂。各指标时间序列图和散点图分别如图5至图11所示。

从日均值变化趋势上看,NO₂的预报日均值与对应

监测值日均值趋势较为符合,但在6~9月存在预报浓度偏低的现象,从散点图上也看出NO₂的预报日均值存在偏低现象;SO₂的预报结果中,前半年日均值变化趋势与实测值较为接近,后半年则出现明显偏高的现象,从散点分布上看,部分预报结果高于同期实测值的2倍;PM₁₀的预报结果趋势与监测值的趋势较为接近,从散点分布上可以看出,监测值浓度较高的时候预报值存在一定的偏低;PM_{2.5}的预报结果趋势与实测日均值较为接近,和PM₁₀一样,在监测值较高的时段存在一定的低报现象。O₃两个指标均存在明显的偏低现象,和实测数据相比,存在明显的偏低现象,且并未呈现夏季较高的现象,这可能和预报系统垂直高度层设置有关,拟在后期降低模式第一层的高度;CO的预报结果与实测结果的趋势较为一致,但相对而言波动较大,进入秋季以后,预报浓度和实测浓度相比存在一定的偏高现象。

分别统计24小时和96小时的直接预报和修正预报,与实测AQI数据对比,绘制时间序列图,如图12所示。

分别计算各预报AQI产品和实测AQI的平均偏差MB、平均误差MGE、归一化平均偏差NMB和归一化平均误差NMGE,以及均方根误差RMSE和相关系数R,结果如表2所示。

表2 不同预报时长效果对比

AQI 产品	平均偏差 MB	平均误差 MGE	归一化平均偏差 NMB	归一化平均误差 NMGE	均方根误差 RMSE	相关系数 R
24小时直接预报	-17	31	-15.76%	28.12%	49	0.71
24小时修正预报	-7	19	-6.11%	17.63%	30	0.89
96小时直接预报	-21	34	-19.35%	31.39%	51	0.66
96小时修正预报	-4	42	-3.41%	40.50%	60	0.50

可见,受限于修正预报得出的预报结果为线性修正后的结果,对于高污染天气和优良天气而言,96小时的修正预报上存在明显的滞后现象,而24小时修正预报则与实测结果的趋势较为吻合,相关系数R的结果显示,修正预报技术对24小时预报趋势的改善效果明显,相关系数达到0.89,而24小时直接为0.71,同时AQI预报的平均偏差和平均误差均得到了明显改善,RMSE的减小也说明修正预报技术降低了24小时预报AQI与实际AQI的差异波动。96小时预报为目前自修正空气质量预报系统的最长预报时长,直接预报相关系数为0.66,而修正预报技术对96小时预报的趋势产生了一定的影响,使其相关系数R下降为0.5,虽然修正预报有助于减小96小时预报的平均偏差,但同时也增大了其平均误差和均方根误差,导致96小时修正预报与实际结果间差异波动增大。

3 结论

(1) 基于Models-3开发的自修正空气质量预报系统可以在较低硬件投入下实现空气质量的业务化数值预报,

该系统可以直观进行模拟参数的配置,具备较高的可系统移植,插件系统在不影响主模块功能的情况下对系统功能进行扩展,具有较高的灵活性。

(2) 2014年,24小时直接预报等级准确天数为176天,等级和首要污染物均准确的天数为63天,24小时修正预报等级准确天数为196天,等级和首要污染物均准确的天数为121天,而96小时直接预报等级准确天数为167天,等级和首要污染物均准确的天数为58天,96小时修正预报等级准确天数为112天,等级和首要污染物均准确的天数为47天,可见使用实测数据对24小时数值预报进行修正后可明显改善其预报效果,但本文所用的修正方法对96小时预报的预报效果无明显改善效果。

(3) 目前采用的预报修正技术存在一定的局限性,下一步工作中应探索模式预报的气象、空气质量数据和相关实测值之间的关系,建立更为科学的预报修正技术。

(4) 系统可以在一定程度上把握成都市空气质量变化的节点,但进入冬季后,自修正空气质量预报系统对区域性重污染天气的把握能力有限,可在下一步工作中

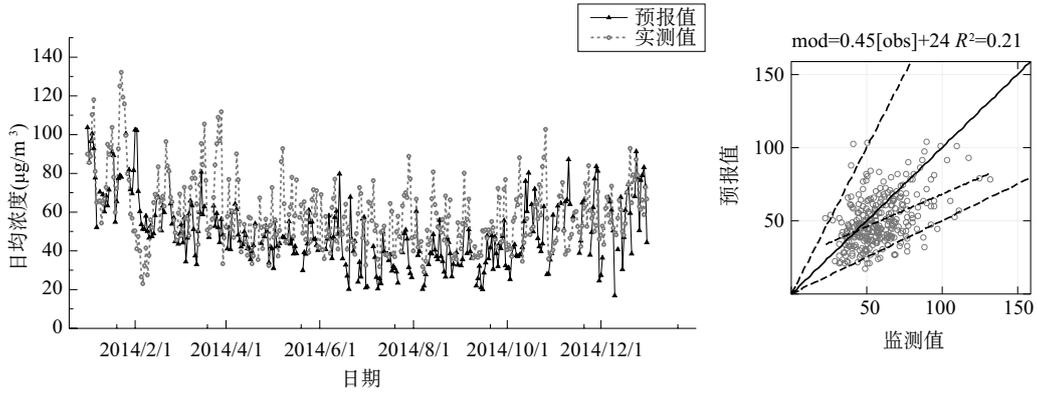


图5 NO₂日均值预报——实测时间序列图和散点图

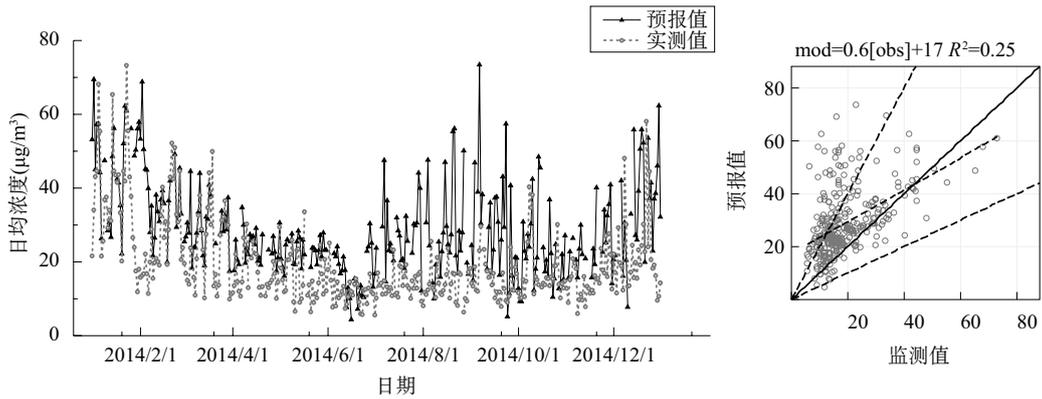


图6 SO₂日均值预报——实测时间序列图和散点图

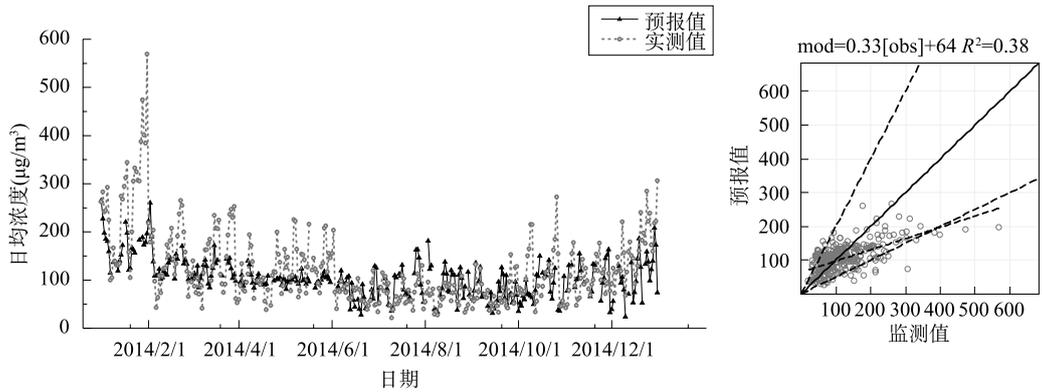


图7 PM₁₀日均值预报——实测时间序列图和散点图

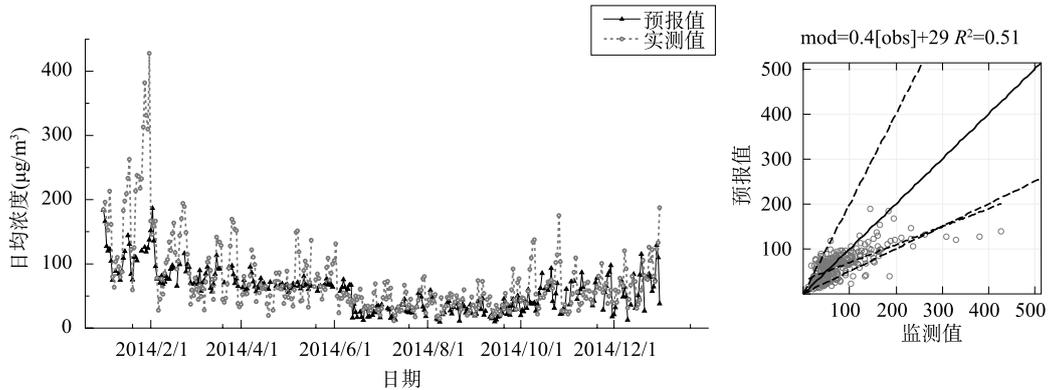


图8 PM_{2.5}日均值预报——实测时间序列图和散点图

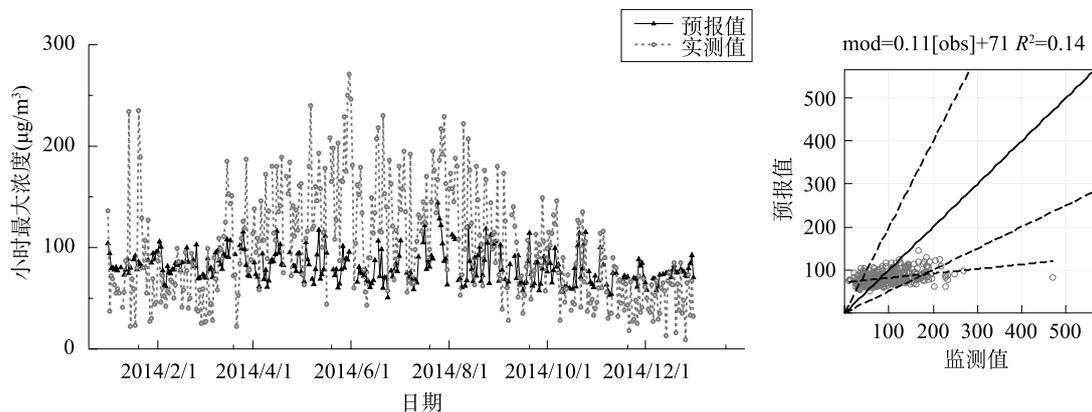


图9 O₃小时最大预报——实测时间序列图和散点图

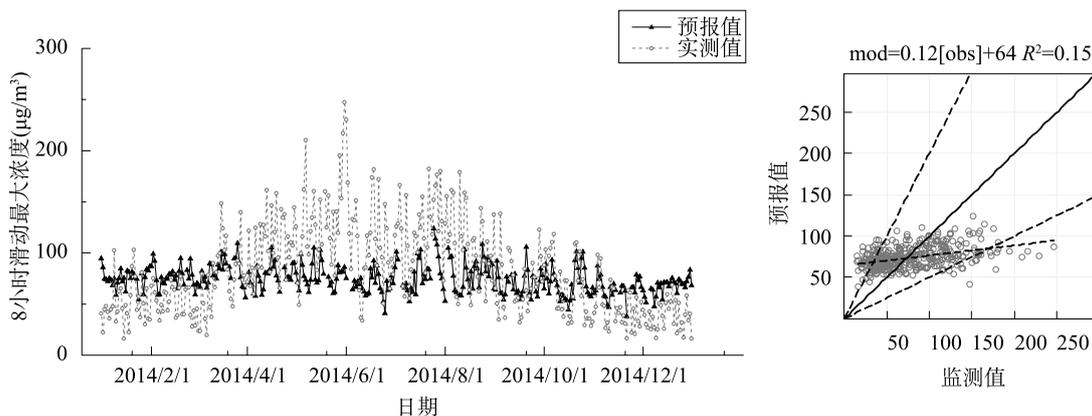


图10 O₃8小时滑动最大值预报——实测时间序列图和散点图

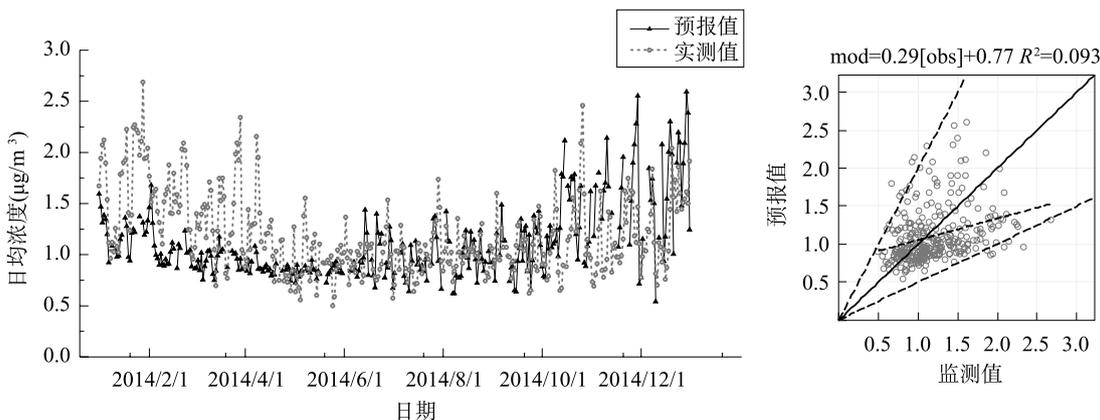


图11 CO预报——实测日均值时间序列图和散点图

增大预报范围，引入区域清单，加强区域性污染天气的预报能力。

参考文献

[1] 翟世贤, 安兴琴, 刘俊, 等. 不同时刻污染减排对北京市PM_{2.5}浓度的影响[J]. 中国环境科学, 2014, 34(06): 1369-1379.
 [2] Shrestha K L, Konda A, Kaga A, et al. High-resolution modeling and evaluation of ozone air quality of Osaka using

MM5-CMAQ system[J]. Journal of environmental sciences, 2009, 21(06): 782-789.
 [3] 刘俊, 安兴琴, 朱彤, 等. 京津冀及周边减排对北京市PM_{2.5}浓度下降评估研究[J]. 中国环境科学, 2014, 34(11): 2726-2733.
 [4] 张艳, 余绮, 伏晴艳, 等. 长江三角洲区域输送对上海市空气质量影响的特征分析[J]. 中国环境科学, 2010, 30(07): 914-923.
 [5] 权建农, 张晓山, 张蕾, 等. 我国燃煤汞沉降的数值模拟

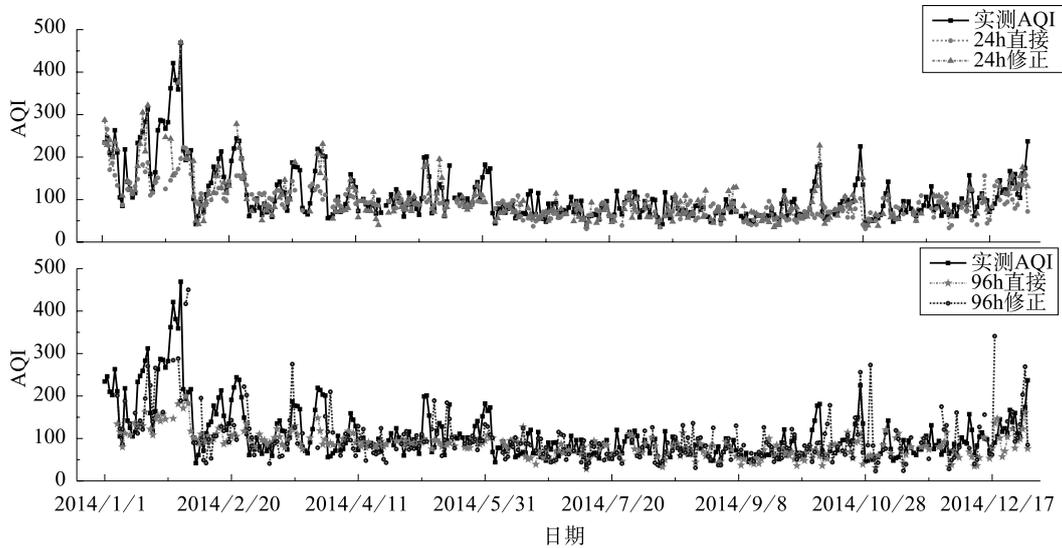


图 12 24小时和96小时直接预报与修正预报效果对比

- [J]. 高原气象, 2009, 28(01): 159-164.
- [6] MAI K, RYOZO O al. A numerical study of summer ozone concentration over the Kanto area of Japan using the MM5/CMAQ model[J]. Journal of environmental sciences, 2011, 23(02): 236-246.
- [7] ZHANG M G, HAN Z W, ZHU L Y. Simulation of atmospheric aerosols in East Asia using modeling system RAMS-CMAQ: model evaluation[J]. China particuology, 2007, 5(05): 321-327.
- [8] JOSE R S, PERE J L, MORANT J L, et al. The use of modern third-generation air quality models (MM5-EMIMO-CMAQ) for real-time operational air quality impact assessment of industrial plants[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2009, 9(1-2): 27-37.
- [9] Shi C E, Zhang B N. Tropospheric NO₂ columns over Northeastern North America: comparison of CMAQ model simulations with GOME satellite measurements[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2008, 25(01): 59-71.
- [10] 陈彬彬, 林长城, 杨凯, 等. 基于 CMAQ 模式产品的福州市空气质量预报系统 [J]. 中国环境科学, 2012, 32(10): 1744-1752.
- [11] 许建明, 徐祥德, 刘煜, 等. CMAQ-MOS 区域空气质量统计修正模型预报途径研究 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2005, (35) (SI): 131-144.
- [12] Bain M A. An introduction to Gambas[J]. Linux Journal, 2006, 2006(146): 1-5.
- [13] USEPA. Operational Guidance for the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System. [M/OL]. Chapel Hill, NC: University of North Carolina at Chapel Hill, 2010. [2010-09-11]. <http://www.cmascenter.org/cmaq/documentation/4.7.1/operational-Guidance-Docment.pdf>.
- [14] Python software foundation. SGMLlib Simple SGML parser[EB/OL].[2012-04-21]. <https://docs.python.org/2/library/sgmlib.html#module-sgmlib>.
- [15] 王琳琳. 基于 HTML Parser 的 Web 信息提取技术 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
- [16] 姚琳, 叶芝祥, 陆成伟, 等. 成都市空气质量预报中 WRF 的本地化参数选取 [J]. 成都信息工程学院学报, 2012, 27(05): 485-489.
- [17] Team R C. R: A language and environment for statistical computing [M/OL]. Vienna, Austria: 2014. [2016-03-10]. <https://cran.r-project.org/doc/manuals/fullrefman.pdf>.
- [18] Michna P. RNetCDF: R Interface to NetCDF Datasets. R package version 1.6. 3-1[EB/OL].[2012-08-02]. <http://CRAN.R-project.org/package=RNetCDF>.
- [19] 中国环境监测总站. 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 [EB/OL]. [2013-11-13]. www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news_38845.html.
- [20] Carslaw D C, Ropkins K. Openair—an R package for air quality data analysis. Environmental Modelling & Software, 2012, 27-28: 52-61.
- [21] Allaire J J, Cheng J, Xie Y H, et al. Rmarkdown: dynamic Documents for R. 2015.[EB/OL].[2014-06-03]. <http://rmarkdewn.rstudio.com/>.
- [22] 李雪白. 配置 mutt 做邮件客户端 [EB/OL]. [2011-05-30]. <http://home.ustc.edu.cn/~lixuebai/GNU/MuttConfig.html>.
- [23] 谢辉. 基于 Linux 系统下 Apache 软件的 Web 服务器设置 [J]. 计算机光盘软件与应用, 2014, (14): 78-79.
- [24] 百度地图. Javascript API 大众版 [EB/OL]. [2014-02-23]. <http://bsyun.baidu.com/index.php?title=jspopular>.