

基于 CMAQ 模式产品的福州市空气质量预报系统

陈彬彬*,林长城,杨 凯,林 文,王 宏,余永江 (福建省气象科学研究所,福建 福州 350001)

摘要: 利用 CMAQ(Community Multiscale Air Quality Model)模式预报产品和福州市 2007 年 1 月至 2010 年 6 月大气污染物的观测资料以及常规地面气象观测资料,根据动力-统计相结合的预报方法,通过多元线性逐步回归,建立不同天气系统下 CMAQ 模式产品和多类预报因子相结合的日污染物浓度预报模型.结果表明,影响福州市的天气系统共分为大陆高压、副热带高压、切变、暖区辐合、高空槽、台风和热带辐合带 7 类天气型.在暖区辐合、高空槽和大陆高压控制下,福州市的空气质量较差,而副热带高压和台风系统影响时,福州市的空气质量最好.日污染物浓度预报方程置信度均为 $P=0.000$,模型有统计学意义.利用模型对 2010 年 7~12 月福州市各污染物浓度进行预报效果回代检验,模型对 PM_{10} 的污染指数等级预报正确率达到了 71.3%,对 SO_2 和 NO_2 的级别预报正确率达到了 100%,日报综合评分平均达 88.8 分.

关键词: CMAQ 模式; 空气质量; 多元回归; 预报模型; 福州市

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)10-1744-09

Air quality forecasting system based on model products of CMAQ in Fuzhou City. CHEN Bin-bin*, LIN Chang-cheng, YANG Kai, LIN Wen, WANG Hong, YU Yong-jiang (Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001, China). *China Environmental Science*, 2012,32(10): 1744~1752

Abstract: Based on the forecasting products of Community Multiscale Air Quality Model (CMAQ), observation of air pollutants and the conventional ground meteorological data from January 2007 to June 2010 in Fuzhou City, Fujian Province, China, the models were developed to forecast daily air pollutant concentration for various weather systems by statistical-dynamic forecast method and multivariate linear stepwise regression. The models featured both CMAQ forecast products and various other forecast parameters. The results showed that there were 7 weather systems influencing Fuzhou City: continental high, subtropical high, shear, warm sectors convergence, upper trough, typhoon and tropical convergence. The air quality was poor under the control of warm sectors convergence, upper trough or continental high weather systems. In contrast, when Fuzhou was under the control of subtropical high or typhoon, the air quality was better. The p-value associated with the forecast functions of air pollutant level was 0.000, so the models were statistically significant. The models were tested on the air pollutant data in Fuzhou from June to December 2010 by back substitution. The forecast accuracy of the models on contamination index level of PM_{10} reached 71.3%, while the forecast accuracy on SO_2 and NO_2 were 100%. The comprehensive score of daily air quality forecast in the city of Fuzhou was 88.8 points on average.

Key words: CMAQ model; air quality; multiple regression; forecasting model; Fuzhou City

早期空气质量预报是以天气形势和气象状况为主要对象的污染潜势预报,20 世纪 60 年代后期逐渐发展起大气污染物浓度的统计预报方法以及基于湍流统计理论的半经验数值模型^[1],近年来气象模式和污染模式相结合的数值预报系统研究迅速发展,数值预报以其完善的理论基础、合理的模式设计、定时定量的预报效果成为空气污染预报的发展趋势^[2].我国在污染潜势预报^[3-5]和浓度统计预报^[6-8]方面做了许多工作,数

值预报研究近几年也逐步开展,如中国科学院大气物理所自行研制的城市空气污染数值预报模式在天津、济南等城市进行预报试验,表现出较好的预报性能^[9-11].中国气象科学研究院开发的

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 环境保护公益性行业专项(201009004);福建省自然科学基金(2010J01243);福建省气象局 2006 年开放式气象科学研究基金项目(2006K05)

* 责任作者, 工程师, bbchen_2005@163.com

非静稳多箱大气污染浓度预报和潜势预报系统 CAPPS^[12-13],已在国内多个区域气象中心和重点城市推广运行.国外的城市空气质量数值模式经历了第一代空气质量模式系统如 EKMA^[14]和 ISC3^[15-16]模式,和第二代空气质量模式系统如 UAM^[17],RADM^[18],CAM_x^[19]和 ADMS^[20]模式等,如今由美国环保总局发布的第三代空气质量模式 Models-3^[21-22]在国内使用也较为广泛. Models-3 由中尺度气象模式 MM5、污染源排放模式 SMOKE 和多尺度空气质量模式 CMAQ 3 部分组成,其核心是空气质量模式 CMAQ^[23-25].目前国内 Models-3 模式主要应用于区域尺度^[26-29]的模拟研究,应用到城市尺度^[30-31]的空气质量预报还处于研发阶段.国家科技部城市环境项目实施的 BECAPEX 试验中,成功应用 CMAQ 模式实施了北京及周边地区污染物浓度的预报试验^[32].项目组与国家气象中心有关人员进一步将模式移植到中国气象局国家气象中心神威计算机上,实现了华北区域准业务化运行^[33].

福州市在污染物浓度变化规律及其与气象条件的关系方面开展了一系列研究^[6,34],同时先后引进了数值预报模式 CAPPS1-3,目前 CAPPS3 已投入业务试运行^[35-36].但由于 CAPPS3 在 Linux 操作系统下使用,需要在 Linux 和 Windows 系统间通过局域网交换大量数据,在实际业务使用中有一定不便,因此,本研究利用目前由中国气象科学研究所和国家气象中心联合下发的 CMAQ 模式产品,旨在根据 CMAQ-MOS 动力-统计相结合^[33]的原理,结合由福建省环保部门进行的空气质量监测资料,利用常规地面气象观测资料,开展基于 CMAQ 模式产品的城市空气质量精细预报研究,从而建立一套方便输入常规业务资料的城市空气质量预报模型.

1 资料与方法

1.1 资料介绍

本文使用的资料包括 CMAQ 模式预报产品和福州市 3 个测点的观测资料以及常规地面气象观测资料.资料时间为 2007 年 1 月至 2010 年 12 月,利用 2007 年 1 月至 2010 年 6 月的资料进

行预报模型建立,2010 年 7 月~12 月的资料进行预报效果回代检验.

大气污染资料取自福州市环境监测站设置的五四北站(119.2989°E,26.1092°N),紫阳站(119.3189°E,26.0792°N)和师大站(119.3033°E,26.0394°N)监测的 SO₂、NO₂和 PM₁₀3 种大气污染物每日的监测数据,监测时段为前 1 日 12:00~当日 11:00,市区空气质量日均值为这 3 个站的算术平均值.

地面气象因子采用常规气象资料,计有 42 项,主要为气压、气温、相对湿度、露点、水汽压、风速、降水量的日均值(降水量为累积值)、极大值、极小值和极值差,以及 24h 变压、变温、总云量、低云量、日照数、降水时间和不同等级降水(小雨-暴雨)雨强和频数等,观测时段为前 1 日 12:00~当日 11:00.

CMAQ 模式产品由国家气象中心下发,气象场采用国家气象中心 MM5 数值预报产品,人为源产生的 NO_x、CO、SO₂、VOCs 和 NH₃ 来自美国依阿华大学全球和区域环境研究中心 1°×1°排放清单,自然源排放的 NO_x 和 VOCs 采用全球 GEIA 1°×1°每月的排放清单,化学机制采用 RADM2^[33].每天 08:00 起报,预报未来 5 种污染物(PM₁₀, SO₂,NO₂,O₃,CO)的浓度,预报有效时效为 66h,即起报日 14:00 至第 4d 08:00 为输出时段,其中 08:00~14:00 时为积分稳定阶段,每隔 6h 输出一次.预报产品包括 5 种污染物浓度的 12 个时次和 3d 日平均值 2 种.预报范围包括全国各省市,空间分辨率为 36km.模式结果经过后处理插值到 0.5°×0.5°网格上.本研究以模式第 1 个预报日 08:00~次日 08:00 的预报产品作为模式输出的日均值,用之与实测值进行对比分析.

1.2 CMAQ 预报产品时间序列的确立

读取覆盖福州市经纬度范围(118.38~120.52°E、25.27~26.65°N)的网格 4 个格点的 CMAQ 模式数值产品资料.为了确定 CMAQ 预报产品的时间序列,以 3 个监测站为基点,分别求算最近点、极值点和相关系数高值点时间序列,以及 4 个格点资料的算术平均值和距离平方倒数加权平均值序列,代表 CMAQ 模式对该监测站

点的预报产品.利用归一化均方差 NMSE 判断模

拟值对实测值的拟合程度. $NMSE = \frac{(C_p - C_0)^2}{C_p^2}$,

其中 C_p 为模拟浓度值, C_0 为实测浓度值,NMSE 值越接近 0,说明模拟值与实测值越吻合.结果表明,4 个格点资料的算术平均值序列与站点空气质量日均值序列拟合程度最高(表 1),因此以其时间序列作为 CMAQ 模式对站点的预报产品.

表 1 CMAQ 模式产品格点值与站点污染物实测值的拟合情况

Table 1 The comparison between grid point values of CMAQ model products and actual value of pollutants measured

站点	污染物	极值点	最近点	相关系数 高值点	距离平方 倒数加权 平均	算术 平均
五四北 站	PM ₁₀	0.443	1.851	1.975	0.640	0.298
	SO ₂	0.721	0.533	0.925	0.630	0.417
	NO ₂	0.435	4.960	1.168	0.340	0.268
紫阳站	PM ₁₀	0.369	1.525	0.296	0.595	0.287
	SO ₂	0.748	0.510	0.996	0.638	0.386
	NO ₂	0.277	10.780	0.261	0.949	0.287
师大站	PM ₁₀	0.379	1.847	0.269	0.588	0.255
	SO ₂	0.705	0.736	0.912	0.660	0.399
	NO ₂	0.520	3.428	0.483	0.206	0.270

1.3 CMAQ-MOS 模型

根据动力-统计相结合的预报方法,利用多元线性统计模型,即通过逐步回归的方法,用前期的污染物观测资料和气象要素观测资料以及 CMAQ 模式产品,建立模式产品和多类预报因子相结合的日污染物浓度预报模型.应用 SPSS 统计软件完成数据的统计分析.利用模型对后期的污染物浓度进行预报效果回代检验.统计模型如(1)式:

$$\langle C_n \rangle = g + a \cdot [C_{n-1}] + b \cdot [CMAQ_n] + \tilde{c} \cdot \tilde{M} \quad (1)$$

设第 n 天为预报日,前一天(第 $n-1$ 天)为起报日. $\langle C_n \rangle$ 为预报量,表示预报日某种污染物的浓度; $[C_{n-1}]$ 代表起报日该种污染物的观测浓度; $[CMAQ_n]$ 代表预报日该种污染物的 CMAQ 模

式预报产品; $\tilde{M} = \begin{pmatrix} M_1^{n-1} \\ M_2^{n-1} \\ \vdots \\ M_m^{n-1} \end{pmatrix}$ 代表起报日 m 种气象

要素观测值; a, b 为系数, $\tilde{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix}$ 为系数矩阵, g

为常数.

2 CMAQ-MOS 预报模型建立

2.1 天气分型

污染物浓度变化与空气污染气象条件密切相关,不同天气系统的宏观热力结构和动力结构有很大不同,对污染物的水平扩散和垂直输送能力有较大影响.研究表明^[35],福州市在不同天气系统影响下 PM₁₀ 的浓度和不同等级空气污染的出现率存在明显差异,因此,本文以 08:00 850hPa 高空图为主(结合地面图和 500hPa 高空图作判别),根据厦门、福州、邵武、南昌、赣州、大陈、衢州、汕头、台北和花莲十个探空站 850hPa 的风向,对影响福州市的天气系统进行天气类型划分,从而建立不同天气型下的污染物预报方程.共分为大陆高压(G)、副热带高压(B)、切变(C)、暖区辐合(F)、高空槽(U)、台风(T)和热带辐合带(R)等 7 类天气型,分型说明详见表 2.

2.2 不同天气系统下各污染物浓度概况

由表 3 和表 4 可见,在暖区辐合、高空槽和大陆高压控制下,福州市的空气质量较差,各种污染物的平均浓度、浓度极大值均比其他天气系统影响下的高,PM₁₀ 浓度等级出现Ⅲ级及以上污染的可能性也更高.而副热带高压和台风系统影响时,福州市的空气质量最好,不仅各种污染物平均浓度相对较低,而且 3 种污染物的浓度等级均没有出现Ⅲ级及以上污染,其中,NO₂ 的浓度等级均达到了 I 级水平,SO₂ 也仅有一天出现了Ⅱ级,其余天数均维持在 I 级.

在统计时段中,福州市共有 5 次明显受到了北方沙尘天气影响,空气质量出现Ⅲ级以上污染,

分别为 2007 年 1 月 30 日~2 月 1 日,2009 年 4 月 26 日,2009 年 12 月 25 日~27 日,2010 年 3 月 20 日~23 日,2010 年 4 月 29 日~30 日.2010 年 3 月 20 日~23 日是近几年影响福州市最为典型的一次北方沙尘天气,3 月 20 日福州市受高空槽控制,PM₁₀ 浓度由前一日的 0.125mg/m³ 升至 0.180mg/m³;3 月 21 日影响福州市的天气系统转为热带辐合带,但 PM₁₀ 的浓度值仍达到了 0.361mg/m³(该值也是福州市受热带辐合带系统影响时出现的浓度最大值);3 月 22 日~23 日,福州市受暖区辐合系统控制,PM₁₀ 的浓度值达到了自 有空气质量监测以来的最大值 1.034mg/m³.

表 2 影响福州市的天气型分类

Table 2 The classification of weather types influencing the city of Fuzhou

850hPa 天气型	说明	天气型属性
大陆高压	含冷高压脊、变性冷高压底部、变性冷高压后部(夏季除外,G 后 850hPa 位势米 \geq 1520)	G 前:非降水系统 G 底:存在降水可能性 G 后:非降水系统
切变	含(低涡)冷式切变、暖式切变,风向、风速有气旋性切变	C:降水系统
高空槽	气场呈现南高北低,准南北向的槽线从北面低涡中心向南伸出	U 后:非降水系统 U 前:降水系统
暖区辐合	一致的西南风或东南风(夏季除外,850hPa 位势米 $<$ 1520)	F:存在暖区降水可能性
副热带高压	含副热带高压(500 hPa 位势米 \geq 5880)以及副热带高压边缘(500 hPa 位势米 $<$ 5880),时间:6 月 15 日~9 月 15 日(850hPa 位势米 \geq 1540)	B:非降水系统 B 边缘:存在降水可能性
台风	含登陆台风、台风倒槽、台风外围(850hPa 位势米 \leq 1480)	T:降水系统 T 外围:非降水系统
热带辐合带	含热带辐合带(ITCZ)、热带辐合带外围、东风波、南海低压倒槽	R :降水系统 R 外围:非降水系统

表 3 不同天气系统影响下福州市各种污染物的浓度概况(mg/m³)Table 3 The air pollutants concentration under the influence of various weather systems (mg/m³)

天气系统	PM ₁₀			SO ₂			NO ₂		
	平均值	极大值	极小值	平均值	极大值	极小值	平均值	极大值	极小值
大陆高压	0.073	0.262	0.009	0.020	0.102	0.003	0.045	0.145	0.011
副热带高压	0.060	0.120	0.018	0.016	0.068	0.004	0.036	0.064	0.014
切变	0.059	0.197	0.009	0.017	0.062	0.003	0.045	0.100	0.010
暖区辐合	0.098	1.034	0.015	0.024	0.090	0.004	0.054	0.108	0.011
高空槽	0.077	0.215	0.013	0.020	0.099	0.003	0.053	0.111	0.011
台风	0.042	0.121	0.010	0.011	0.034	0.003	0.028	0.059	0.010
热带辐合带	0.059	0.361	0.018	0.015	0.049	0.004	0.032	0.067	0.013

表 4 不同天气系统影响下福州市各种污染物不同等级的出现率(%)

Table 4 The occurrence rates of levels of various air pollutants under the influence of different weather systems (%)

天气系统	PM ₁₀			SO ₂			NO ₂		
	I 级	II 级	III 级及以上	I 级	II 级	III 级及以上	I 级	II 级	III 级及以上
大陆高压	28.8	68.5	2.7	95.6	4.4	0	93.2	6.4	0.4
副热带高压	33.3	66.7	0	99.5	0.5	0	100	0	0
切变	45.8	52.5	1.7	97.9	2.1	0	96.6	3.4	0
暖区辐合	18.9	72.4	8.7	92.1	7.9	0	88.2	11.8	0
高空槽	29.6	64.5	5.9	94.6	5.4	0	88.7	11.3	0
台风	77.6	22.4	0	100	0	0	100	0	0
热带辐合带	50.7	46.4	2.9	100	0	0	100	0	0

表 5 不同天气系统影响下 PM₁₀、SO₂、NO₂ 日平均浓度预报方程

Table 5 The predictive equations of daily mean concentration of PM₁₀, SO₂ and NO₂ under the influence of various weather systems

项目	天气系统	复相关系数 R	均方差 F	样本数	方程
PM ₁₀	大陆高压	0.7400	74.2	437	$C_P=1.8566+0.5057C_0-0.2074C_C-0.002496X_9-0.001734X_4+0.002307X_{18}-0.009613X_{26}-0.04078X_{32}$
	副热带高压	0.6302	16.7	159	$C_P=0.09510+0.5090C_0-0.3034C_C-0.002420X_9+0.0003941X_{14}+0.001010X_{23}-0.002071X_{24}$
	高空槽	0.6058	13.0	165	$C_P=0.1793+0.3674C_0-0.08989C_C-0.003068X_2-0.0007127X_{13}-0.003396X_{37}-0.007551X_{34}-0.0005738X_{35}$
	暖区辐合	0.7910	23.6	122	$C_P=-3.9635+0.3468C_0-0.1320C_C+0.002136X_1+0.004114X_3-0.001098X_{12}+0.006886X_{29}-0.01404X_{26}+0.0005589X_{30}$
	切变	0.5812	18.2	221	$C_P=0.09707+0.4893C_0-0.1260C_C+0.001183X_1-0.001319X_6-0.0005912X_{12}-0.008398X_{28}$
	热带辐合带	0.9565	57.3	58	$C_P=-0.1671+1.9415C_0-4.8852C_C-0.01053X_1+0.01693X_6+0.001999X_{13}+0.04075X_{28}+0.03451X_{18}-0.02407X_{22}+0.007319X_{15}$
台风	0.7133	10.7	92	$C_P=0.06047+0.4085C_0-0.2398C_C+0.001276X_1-0.006490X_2+0.0005783X_{14}-0.0009107X_{21}-0.003339X_{22}-0.001035X_{24}$	
SO ₂	大陆高压	0.7399	86.9	438	$C_P=0.3932+0.6936C_0+0.08034C_C-0.0003751X_3-0.0005406X_9-0.001951X_{28}+0.00002374X_{25}$
	副热带高压	0.6725	15.5	159	$C_P=0.01233+0.5993C_0-0.07000C_C+0.0006749X_1-0.0001315X_{13}-0.0007570X_{22}+0.0008064X_{10}-0.003597X_{35}+0.001982X_{38}$
	高空槽	0.6794	16.7	165	$C_P=0.02316+0.4169C_0+0.1247C_C+0.001652X_{33}-0.0006480X_{24}+0.0006010X_1-0.0004558X_{30}-0.001644X_{20}+0.001477X_{16}$
	暖区辐合	0.7762	18.9	122	$C_P=-0.4841+0.7957C_0-0.2575C_C+0.001441X_1-0.0002277X_{12}-0.001198X_{10}+0.00006793X_{25}+0.001048X_2+0.0002555X_{30}+0.0005168X_4$
	切变	0.7313	35.2	222	$C_P=0.03845+0.5382C_0+0.08511C_C-0.0003153X_{12}-0.003425X_{28}-0.002285X_{26}+0.0002552X_{36}+0.00005191X_{25}$
	热带辐合带	0.7991	12.6	58	$C_P=0.6398+0.5210C_0+0.3777C_C-0.0006233X_4-0.0005909X_{20}-0.002533X_{32}+0.001154X_{33}-0.001077X_{37}$
台风	0.6741	11.8	92	$C_P=0.006060+0.3891C_0-0.04799C_C-0.001246X_2-0.0004208X_9+0.0001470X_{12}-0.0004724X_{38}$	
NO ₂	大陆高压	0.8056	113.5	438	$C_P=0.3892+0.6885C_0+0.03705C_C+0.008084X_3-0.008436X_5-0.007136X_6-0.001101X_9+0.002060X_{26}$
	副热带高压	0.7533	33.2	159	$C_P=0.01131+0.7943C_0-0.03808C_C-0.0004304X_{20}+0.003191X_{26}+0.0003599X_{23}-0.0002834X_{31}$
	高空槽	0.7052	26.0	165	$C_P=-0.4335+0.6124C_0+0.009962C_C-0.001168X_2+0.009723X_3-0.006207X_4-0.003061X_5$
	暖区辐合	0.8338	37.2	122	$C_P=-1.8865+0.8182C_0-0.06887C_C-0.001911X_{10}-0.0005010X_{13}+0.004429X_{27}+0.001675X_{24}+0.001909X_3$
	切变	0.8036	55.7	222	$C_P=0.009820+0.8609C_0-0.02080C_C-0.001093X_2-0.001382X_6-0.0002886X_{11}+0.002716X_{24}+0.0001970X_{25}$
	热带辐合带	0.7131	8.8	58	$C_P=0.04733+0.5552C_0-0.06020C_C-0.002198X_6-0.001430X_{16}+0.001952X_{29}+0.0006002X_{33}$
台风	0.7836	19.1	92	$C_P=0.02296+0.7311C_0-0.07440C_C-0.002460X_2-0.0008069X_6-0.0005831X_8+0.001750X_{27}+0.0002185X_{41}$	

注: C_P、C₀、C_C分别为预报日污染物的浓度、起报日污染物的观测浓度和预报日污染物的CMAQ模式预报产品,mg/m³; X₁:24 h变压; X₂:24 h变温; X₃:气压; X₄:日最高气压; X₅:日最低气压; X₆:日气压极差; X₇:气温; X₈:日最高气温; X₉:日最低气温; X₁₀:日温度极差; X₁₁:相对湿度; X₁₂:日最大相对湿度; X₁₃:日最小相对湿度; X₁₄:日相对湿度极差; X₁₅:露点温度; X₁₆:日最高露点温度; X₁₈:日露点温度极差; X₁₉:水汽压; X₂₀:日最高水汽压; X₂₁:日最低水汽压; X₂₂:日水汽压极差; X₂₃:总云量; X₂₄:低云量; X₂₅:日照时数; X₂₆:风速; X₂₇:日最大风速; X₂₈:日最小风速; X₂₉:日风速极差; X₃₀:日降水量; X₃₁:逐时最大雨量; X₃₂:逐时最小雨量; X₃₃:日雨量极差; X₃₄:降水时间; X₃₅:小雨雨强; X₃₆:小雨频数; X₃₇:中雨雨强; X₃₈:中雨频数; X₃₉:暴雨雨强; X₄₀:暴雨频数。其中,气压和水汽压单位为hPa,气温和露点温度单位为℃,相对湿度单位为%,日照时数和降水时间单位为h,风速单位为m/s,降水量单位为mm,降水雨强单位为mm/h,降水频数单位为1

2.3 预报模型建立

考虑到日常业务的实用性,经分析比较,采用起报日前 1 日 12:00 至起报日 11:00 的常规地面气象观测资料的 24h 平均值及其计算衍生值进行回归分析,运用逐步回归分析的方法,将 2007 年 1 月至 2010 年 6 月的污染物浓度观测资料和 CMAQ 模式产品及气象因子作为预报对象和预报因子,建立不同天气系统下各种污染物日平均浓度的数学模型,方程置信度均为 $P=0.000$,模型有统计学意义,所得方程见表 5.

3 CMAQ-MOS 模型预报结果分析

3.1 效果检验

利用上述预报方程,对 2010 年 7~12 月的观测资料进行预报效果回代检验.对比各污染物的预

报浓度和观测浓度,二者的变化趋势较一致(图 1),相关系数在 0.5554~0.7084 之间(图 2),均通过了置信度水平为 0.01 的显著性检验.根据空气污染指数对应的污染物浓度限值,推算出各污染物的空气质量级别,将实况与预报各等级出现次数进行比较,结果见表 6.其中正确率为污染等级预报正确天数除以预报总天数.由表 6 可知,方程对 SO_2 和 NO_2 的级别预报正确率达到了 100%,对 PM_{10} I 级和 II 级的预报结果较理想,正确率均在 70% 左右,但对高浓度污染的预报能力较差,2010 年 7 月~12 月福州市的空气质量有 3d 出现了 III 级污染,报对 1 次,漏报 2 次,空报 2 次.由于福州市的空气质量较好,出现 III 级及以上污染的概率小,参加建模统计的高污染样本数少,因此模式对高污染天气的预报能力仍有待于进一步检验.

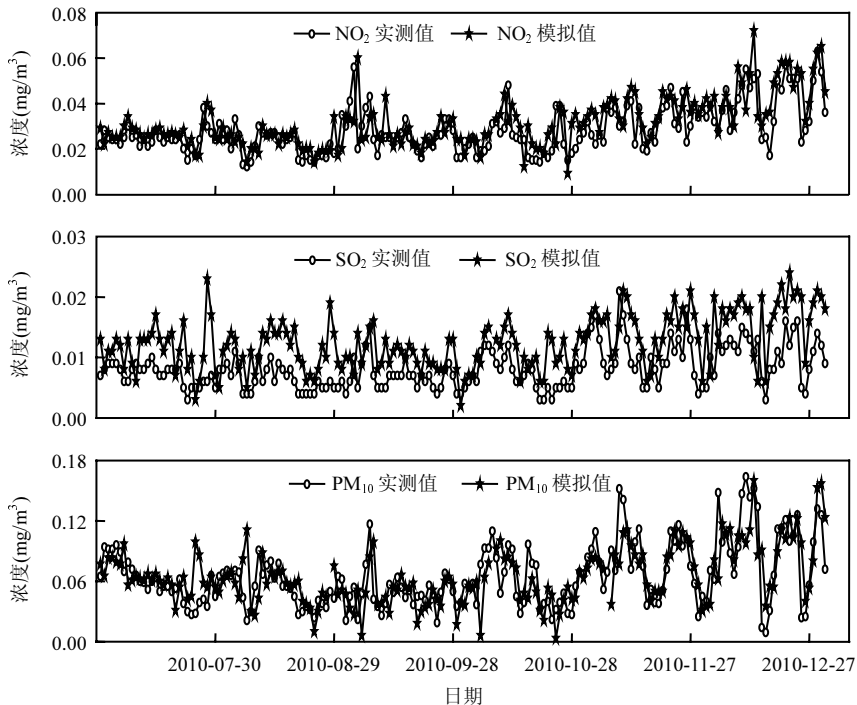


图 1 2010 年 7~12 月各污染物实测值与模型预报值对比

Fig.1 The observed and the simulated concentration of various air pollutants from June to December, 2010

根据《气象部门城市空气质量预报质量考核和管理暂行办法》^[37]对预报质量进行评分,各月的得分情况为 86.8~91.0 分,平均预报得分达 88.8 分.由表 7 可以看出,在大陆高压型和副热带高压型

控制下,模式对空气质量的拟合效果最好,这是因为这 2 种系统都较稳定,受其控制时各污染物浓度变化波动不大;而在有可能出现降水的切变、高空槽、台风和热带辐合带等几种天气系统影响时,

因为降水的出现与否、降水的强度和降水时间的长短这些因素都增加了预报难度,因此得分相对较低;而热带辐合带和台风系统还因为样本数太少加大了方程的不稳定性,因此预报效果最差.从对转折天气的预报评分结果看,除热带辐合带和

台风系统出现转折时CMAQ-MOS模型预报的平均得分较低外,其他系统转折天气的平均得分均在87~89分左右.当天气系统由暖区辐合、切变和热带辐合带转为其他系统控制时,模型的得分要比受这些系统控制时的平均得分高.

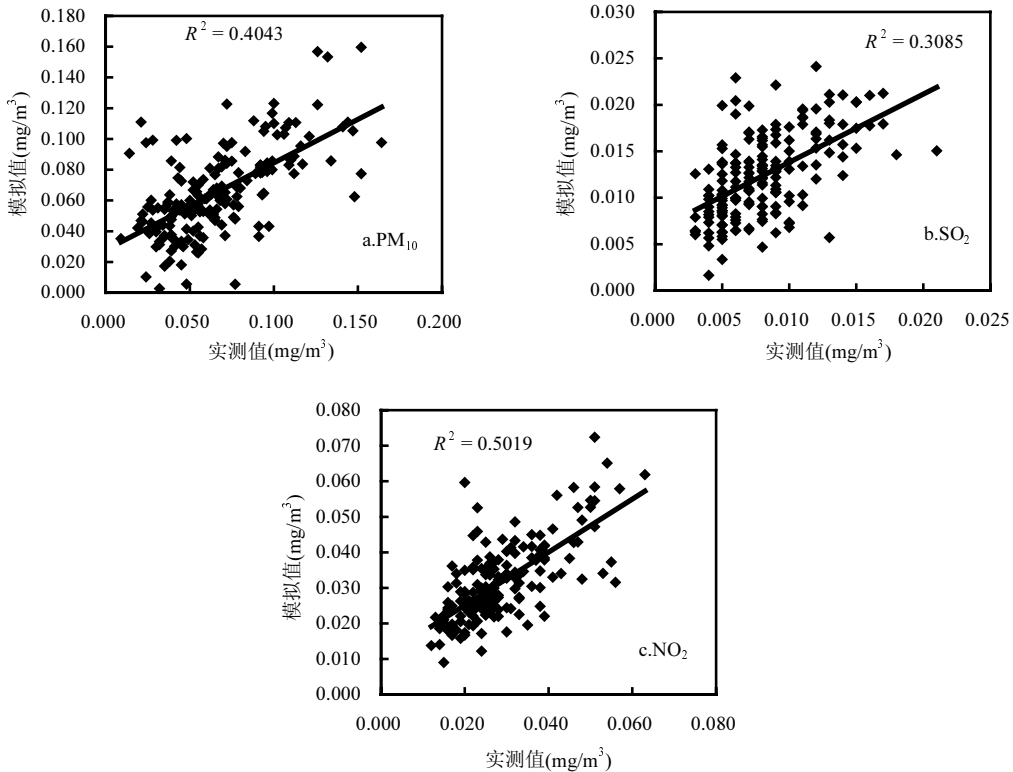


图2 2010年7月~12月各种污染物实测值与模型预报值散点

Fig.2 The scatter diagram of observed and simulated concentrations of various air pollutants from June to December, 2010

表6 利用回归方程回代检验结果(d)

Table 6 The results of back substitution test using regression equations (d)

污染物	级别	实况	预报	正确	空报	漏报	正确率 (%)	缺失
PM ₁₀	1	69	56	38	18	30	67.9	1
	2	112	122	90	32	20	73.8	2
	3	3	3	1	2	2	33.3	0
	小计	184	181	129	52	52	71.3	3
SO ₂	1	184	183	183			100	1
	小计	184	183	183			100	1
NO ₂	1	184	183	183			100	1
	小计	184	183	183			100	1

3.2 与其他预报方法对比

目前福州市开展空气质量预报的手段主要依托于统计预报和人工经验预报相结合,此外近几年分别引进了数值预报模式CAPPS1-3,先后投入业务试运行.本文将CMAQ-MOS模式与这3种预报方法的预报结果^[35]进行对比,结果见表8.从表8中可知,与统计预报和CAPPS模式相比,3种预报方法的评分结果相差不大,而在污染指数预报等级正确率方面,CMAQ-MOS模式的预报正确率均要高于统计预报和数值预报.由于CMAQ-MOS技术全面考虑了动力作用、

化学作用和污染源排放对污染物各种过程的影响^[33],将统计预报和数值模拟相结合,因此预报效果与单纯的统计预报或数值模拟预报相比有

其优势性.而与人工经验预报相比,CMAQ-MOS 模式的得分和等级预报正确率均比人工经验预报低.

表 7 2010 年 7 月~12 月不同天气系统下福州市空气质量预报评分结果

Table 7 The scores of air quality forecast under the influence of various weather systems from June to December, 2010

项目	大陆高压	副热带高压	高空槽	暖区辐合	切变	热带辐合带	台风
样本数	70	39	16	4	15	9	31
平均得分	90.3	92.2	87.5	88.9	86.0	81.3	85.1
转折天气平均得分	88.3	89.2	86.9	89.1	88.3	82.6	83.1

表 8 几种预报方法污染指数等级正确率和评分结果对比

Table 8 The comparison of different forecast methods on accuracy of contamination index level and overall scores

预报方法	SO ₂ 等级 正确率(%)	NO ₂ 等级 正确率(%)	PM ₁₀ 等级 正确率(%)	评分 结果
CAPPS3	100	94.5	70.3	88.8
统计预报	100	100	65.9	89.5
CMAQ-MOS	100	100	71.8	88.8
人工经验预报	100	100	74.7	91.5

最新一代空气质量模式 Models-3 植入了排放源 SMOKE 模块,在排放源清单不易获取的情况下,本研究引进 CMAQ 模式预报产品应用于福州市大气污染问题研究中,具有一定的参考意义.同时将各污染物的浓度分布情况按照天气型进行归类分析,建立的 CMAQ-MOS 模型能反映出不同天气系统下污染物的扩散规律,预报结果具有统一性,模型具有一定的预报能力.但由于应用 CMAQ 模式预报产品时,逐时的产品资料不易获得,而模式日均值输出结果的统计时效又和观测资料不一致,对 CMAQ-MOS 模式的预报结果有一定影响,如果能根据不同气象条件下城市空气质量的分布特征对预报结果进行人工订正,将使预报考核评分进一步提高.此外,CMAQ-MOS 模型的预报精度同样受到样本数制约,随着资料时间序列的积累,各污染物预报方程需不断订正,以使模式输出结果在今后的业务化预报工作中不断完善.本研究虽综合考虑了空气污染物观测资料、大气状态和模式产品进行空气质量预报,但未考虑每种预报因子所占权重,有待于今后进一步深入研究,以改进模式系统.

4 结论

4.1 影响福州市的天气系统共分为大陆高压、副热带高压、切变、暖区辐合、高空槽、台风和热带辐合带 7 类天气型.

4.2 在暖区辐合、高空槽和大陆高压控制下,福州市的空气质量较差,而副热带高压和台风系统影响时,福州市的空气质量最好.统计时段中共有 5 次明显受到北方沙尘天气影响,空气质量出现 III 级以上污染,2010 年 3 月 20 日~23 日是近几年影响福州市最为典型的一次北方沙尘天气,在暖区辐合系统控制下,PM₁₀ 浓度值达到了自有空气质量监测以来的最大值 1.034mg/m³.

4.3 日污染物浓度预报方程置信度均为 P=0.000,模型有统计学意义.对比各污染物的预报浓度和观测浓度,二者的变化趋势较一致,相关系数在 0.5554~0.7084 之间.

4.4 利用模型对 2010 年 7 月~12 月福州市各污染物浓度进行预报效果回代检验,模型对 PM₁₀ 的污染指数等级预报正确率达到了 71.3%,对 SO₂ 和 NO₂ 的级别预报正确率达到了 100%,日预报综合评分平均达 88.8 分.

参考文献:

- [1] 盛立芳,吴增茂,秦曾灏.城市空气质量数值预报的不确定性与可预报性 [J]. 青岛海洋大学学报, 1999,29(4):575-580.
- [2] 房小怡,蒋维楣,吴 润,等.城市空气质量数值预报模式系统及其应用 [J]. 环境科学学报, 2004,24(1):111-115.
- [3] 谈建国,陆国良,耿福海,等.上海夏季近地面臭氧浓度及其相关气象因子的分析和预报 [J]. 热带气象学报, 2007,23(5):515-520.

- [4] 胡春梅,刘德,陈道劲.重庆市空气污染扩散气象条件指标研究[J]. 气象科技, 2009,37(6):665-669.
- [5] 杨 静,李 霞,李 秦,等.乌鲁木齐近 30a 大气稳定性和混合层高度变化特征及与空气污染的关系[J]. 干旱区地理, 2011,5:37-42.
- [6] 冯宏芳,隋 平,邱丽霞.福州市污染物浓度时空分布及影响因素分析[J]. 气象科技, 2003,31(6):356-360.
- [7] 魏 璐,朱伟军,陈海山.郑州市空气质量统计预报方法探讨[J]. 南京气象学院学报, 2009,32(2):314-320.
- [8] 许 杨,王 凯,贾桥莲,等.2007-2008 年武汉市空气质量预报及检验[J]. 气象与环境学报, 2012,2:83-86.
- [9] 安俊岭,向伟玲,韩志伟,等.突发性大气污染监测与预报技术集成移动平台[J]. 中国环境科学, 2011,31(8):1241-1247.
- [10] 韩志伟,张美根,雷孝恩,等.城市空气污染数值预报试验[J]. 气候与环境研究, 1999,4(3):283-290.
- [11] 韩志伟,杜世勇,雷孝恩,等.城市空气污染数值预报模式系统及其应用[J]. 中国环境科学, 2002,22(3):202-206.
- [12] 朱 蓉,徐大海,孟燕君,等.城市空气污染数值预报系统 CAPPs 及其应用[J]. 应用气象学报, 2001,12(3):267-277.
- [13] 朱 蓉,徐大海,周朝东,等.CAPPs 在国家气象中心多城市污染指数数值预报业务系统中的应用[J]. 应用气象学报, 2002, 13(特刊):204-213.
- [14] Finlayson-Pitts B J, Pitts J N. Atmospheric chemistry: Fundamentals and experimental techniques [M]. New York: John Wiley and Sons, 1986.
- [15] User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume I : User Introductions [Z]. Washington: US EPA, EPA-454/B-95-003a, 1995.
- [16] User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume II : User Introductions [Z]. Washington: US EPA, EPA-454/B-95-003b, 1995.
- [17] Reynolds S D, Roth P M, Seinfeld J H. Mathematical modeling of photochemical pollution, I . Formulation of the model [J]. Atmos. Environ., 1973, 7:1033-1061.
- [18] Chang J S, Brosr R A, Isaksen I S A, et al. A three-dimensional acid deposition model: physical concepts and formulation [J]. J Geophys. Res., 1987,92:14681-14700.
- [19] ENVIRON. User's guide to the Comprehensive Air Quality Model with Extensions (CAMx) [Z]. ENVIRON International Corporation, Novato, CA, 2002.
- [20] Modeling Air Quality for London for Using ADMS-Urban [R]. London: Cambridge Environmental Research Consultants, 2003:10.
- [21] Dennis R L, Byun D W, Novak J H, et al. The next generation of integrated air quality modeling: EPA's Models-3 [J]. Atmos. Environ., 1996, 30(12): 1925-1938.
- [22] Models-3 Air Quality Modeling System [Z]. <http://www.epa.gov/asmdnerl/models3/doc>.
- [23] Byun D W, Ching J K S. Science Algorithms of the EPA Models-3 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) Modeling System [Z]. EPA Report, EPA/600/R-99/030, NERL, Research Triangle Park, NC, 1999.
- [24] Byun D W. Dynamically consistent for mulations in meterological and air quality models for multi-scale atmospheric applications: Part I. Governing Equations in Generalized Coordinate System [J]. J Atmos. Sci., 1999,56(21):3789-3807.
- [25] Byun D W. Dynamically consistent for mulations in meterological and air quality models for multi-scale atmospheric applications: Part II. Mass conservation issues [J]. J Atmos. Sci., 1999,56(21): 3808-3820.
- [26] Zhang M G, Xu Y F, Itsushi Uno. A Numerical Study of Tropospheric Ozone in the Springtime in East Asia [J]. Adv. Atmos. Sci., 2004, 21(2):163-170.
- [27] 李 莉,陈长虹,黄海英,等.应用 Models-3/CMAQ 研究长三角区域大气污染及输送[J]. 上海环境科学, 2007,4:25-31.
- [28] 邓 涛,吴 兑,邓雪娇,等.珠江三角洲一次典型复合型污染过程的模拟研究[J]. 中国环境科学, 2012,32(2):193-199.
- [29] 王丽涛,潘雪梅,郑 佳,等.河北及周边地区霾污染特征的模拟研究[J]. 环境科学学报, 2012,4:160-166.
- [30] 王扬锋,左洪超,马雁军,等.应用 Models-3 模式系统对沈阳市空气质量的数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2007,27(3):487-493.
- [31] 张 艳,余 琦,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(7):914-923.
- [32] 徐祥德,卞林根,丁国安,等.城市大气环境观测工程技术与原理[M].北京:气象出版社,2003:229-237.
- [33] 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(增刊 I):131-144.
- [34] 王 宏,林长城,蔡义勇,等.福州市空气质量状况时空变化及其与天气系统关系[J]. 气象科技, 2008,36(4):480-484.
- [35] 王 宏,石 钰,郑丽萍,等.区域空气质量数值预报模式 CAPPs3 在福建省的应用[J]. 环境科学与技术, 2010,33(6E): 271-275.
- [36] 王 宏,冯宏芳,石 钰,等. CAPPs3 模式在福州市预报效果检验[J]. 气象与环境学报, 2011,27(4):25-29.
- [37] 气象部门城市空气质量预报质量考核和管理暂行办法 [S]. 2001.

致谢: 感谢南京信息工程大学郑有飞教授对本文英文摘要的润色工作。

作者简介: 陈彬彬(1982-),女,福建福州人,工程师,硕士,从事大气物理与大气环境方面的研究.发表论文 3 篇。