

珠三角灰霾数值预报模式与业务运行评估

邓涛¹ 邓雪娇¹ 吴兑¹ 谭浩波¹ 李菲¹ 冯业荣² 郑君瑜³ 廖碧婷¹

(1 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080; 2 广东省气象台, 广州 510080;

3 华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要: 基于中尺度气象模式 (MM5)、排放源模式 (SMOKE) 和大气化学模式 (CMAQ), 耦合本地排放源清单, 建立并业务化运行了珠三角区域大气灰霾数值模式预报系统。该系统考虑了气象过程、气相与液相化学过程、非均相化学过程、气溶胶过程和干湿沉降过程, 能够很好地预报各种气溶胶对能见度的消光贡献以及灰霾现象的发生、持续和消亡过程。从预报的能见度和站点观测资料以及MODIS AOD区域分布对比来看, 该套模式系统对典型灰霾过程的能见度时空分布有较好的模拟能力。从全年业务预报运行来看, 能见度预报和观测值有较好的一致性。在旱季灰霾多发季节, 预报效果较好。全年平均来看, 市区TS评分达到0.67, 预报效率EH达到0.89; 郊区, TS评分达到0.37, 预报效率EH达到0.83。研究表明, 模式系统对灰霾以及能见度量级有较好预报能力, 能达到业务运行要求。

关键词: CMAQ, 灰霾, 能见度, 数值模式, 业务化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2012.06.005

Study on Numerical Forecast Model of Haze over Pearl River Delta Region and Routine Business Assessment

Deng Tao¹, Deng Xuejiao¹, Wu Dui¹, Tan Haobo¹, Li Fei¹, Feng Yerong², Zheng Junyu³, Liao Biting¹

(1 Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080

2 Guangdong Provincial Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

3 College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006)

Abstract: In this study, haze numerical model forecast system was established and run daily by coupling MM5, SMOKE and CMAQ models over Pearl River Delta which used the local sources emission inventories. The meteorological processes, gas-phase chemistry, aqueous-phase chemistry, aerosol processes, heterogeneous chemistry and deposition processes can be calculated in this modeling system. And the aerosol and extinction contribution, as well as processes of haze initiating, weakening, and intensifying, could be well simulated. By comparison with the forecast and site observations visibility, as well as the regional distribution of MODIS AOD, the spatial and temporal distribution of visibility could be well simulated by this modeling system during a typical haze process. Judging by the running annual business forecast, visibility forecasts were in good agreement with observations. The forecast was better in the dry season (haze season). In urban areas, the annual average TS score was up to 0.67, forecast efficiency EH was up to 0.89; In suburban districts, the TS was 0.37, the EH was up to 0.83. The study showed that, the model system had a good forecasting ability for haze and magnitude of visibility to achieve business operational requirements.

Keywords: CMAQ, haze, visibility, numerical model, operational

1 引言

珠三角城市化的高速发展产生和排放大量的大气污染物。污染物排放量大大超过了环境承载能力, 局部地区大气质量退化。大量的气溶胶粒子不但导致能

能见度下降^[1], 影响人体健康^[2], 还对天气气候 (边界层结构、辐射、云雨) 可能存在显著的影响^[3-5]。有研究^[6-10]表明, 近年来珠江三角洲地区大气能见度明显下降, 往往出现严重的大气灰霾现象。第16届亚运会在广州举行, 亚运会正值珠三角容易发生灰霾的季节。因此, 研制并建立珠三角大气灰霾预报系统, 为亚运会以及日常公众提供灰霾预报产品, 同时为政府提供治理的科学依据, 是十分必要的。

之前, 珠三角在业务上做大气灰霾预报主要是用统计学的方法^[11], 大致上能预报出短期趋势, 但对造成灰霾天气的科学机理缺乏充分的考虑, 它并不能提供逐时的高时空分辨率的预测产品。更重要的是, 在

收稿日期: 2012年2月26日; 修回日期: 2012年8月23日

第一作者: 邓涛 (1982—), Email: tdeng@grmc.gov.cn

资助信息: 国家重点基础研究 973 项目 (2011CB403403); 国家自然科学基金 (41205123); 广东省 2006 年环保专项基金 (2006354); 广东省自然科学基金 (10151008019000004); 广东省科技计划项目 (2010A030200011); 广东省气象局气象科技项目 (2008B07); 热带海洋气象科学研究基金 (201007)

气象背景与污染物排放发生突变的情况下,统计模型不能提供可靠的预测结果。预报产品不能满足当今空气质量预报和评估的需求。同时在机理分析上难以给政府提供合理有效的决策依据。近年来不少学者^[12-15]利用Model-3/CMAQ模式系统对不同的大气污染过程进行了数值模拟研究。张美根等^[16]利用CMAQ模式对TRACE-P和ACE-Asia观测试验期间东亚地区含硫化合物的传输和化学转化进行模拟。权建农等^[17]利用CMAQ模式模拟了中国西南和华南地区的硫沉降。模式中详细考虑了各种物理化学过程对SO₂输送、转化和沉降过程的影响。程兴宏等^[18]利用源同化技术以及卫星资料对空气质量的模拟效果有明显的改进。Feng等^[19]利用MM5/SMOKE/CMAQ模式系统模拟台风外围下沉气流对珠三角地区的PM₁₀浓度的影响,模式较好地模拟出了大气污染物的变化趋势,与观测结果比较一致。上述的研究均表明CMAQ模式系统在空气质量模拟预报中具有较好的应用。针对珠三角城市群大气灰霾的精细化数值预报在业务研究尚不多见,本研究结合本地排放源清单,耦合MM5-CMAQ-SMOKE,建立的珠三角大气灰霾数值模式预报系统,研究模式系统的对典型个例模拟效果以及评估系统全年业务运行的预报效果。

2 方法与数据

2.1 模式介绍

本研究建立了耦合气象预测模型MM5,大气排放源清单时空分布分配模型SMOKE和大气化学质量模型CMAQ组成的空气质量暨大气灰霾模式预报系统。MM5是由美国宾州大学(PSU)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合开发的中尺度气象预报模式,包括地形资料处理、地面资料处理、探空资料处理、客观分析、初始化、数值预报、后处理等模块,是一个比较完善的模拟系统,同时具有多重嵌套及易于定位于不同地理位置的能力^[20]。

大气排放源清单是大气化学模型最重要的基础输入数据,对于模拟二次污染物、了解某一地区的空气污染状况和预测污染趋势都有重要作用。而现有的大气污染物排放清单是以年和地区计量的,大气化学模式需要输入给基于网格和逐时的大气质量模型的污染物排放数据,所以必须研制适用的大气排放源清单时空分布分配模型。SMOKE(Sparse Matrix Operator Kernel Emission)是由美国北卡罗莱纳州立大学环境模拟中心所开发的排放源前处理模式,SMOKE为空气质量模式(CMAQ)提供三维时变相同空间分辨率的污染源资料,能处理标准的气态污染物(如CO, NO_x, VOC, NH₃, SO₂),颗粒物(如

PM_{2.5}, PM₁₀),以及大量的有毒污染物(如水银,苯,PCBB,PCDD,农药等)。SMOKE还包括处理点源、面源、移动源和生物源等模块。根据排放源的工业类型(SCC),给出排放的时间变化;根据模式的需求,把VOC、颗粒物等排放源处理成模式物种;根据地理信息资料,把行政区域的污染源分配到各种投影的网格;计算点源的抬升和为PinG做准备。事实上SMOKE除了进行源处理,还包括排放模式。生物源包括了BEI3,可以直接用land use资料计算天然源排放;移动源包括了mobile,可以直接用公路的车流量计算。由于现有的大气污染物排放清单是以年和地区计量的,而CMAQ要求网格化每小时的排放量。SMOKE需要输入的是气象场和排放源清单。SMOKE可以将点源、面源、移动源和生物源处理成网格化逐时的排放源数据,并合成同一个排放源文件^[21]。准确的排放源清单对于空气质量预报结果的优劣起到关键的作用,而详细的排放信息和数据是很难获取的,这也是我国开展空气质量数值预报的一大难题。

本研究以SMOKE(version2.4)模型为基础进行修改,建立适用于珠三角大气灰霾数值预报系统的污染物排放时空分布模型。

美国国家环境保护署开发的大气化学质量模型CMAQ代表着当前主流的大气化学、污染物迁移和沉降的最新研究成果,是一个多尺度的能够模拟从城市到区域的欧拉型大气质量模型,它能模拟多个污染物在大气中的迁移扩散和化学反应,包括臭氧、气溶胶成分(PM₁₀和PM_{2.5})及酸沉降等。CMAQ模式系统综合考虑了气象过程、气相与液相化学过程、非均相化学过程、气溶胶过程和干湿沉降过程,能够很好地预报各种气溶胶对能见度的消光贡献以及灰霾现象的发生、持续和消亡过程。CMAQ模式需要气象模式的结果作为气象驱动场。SMOKE的结果为网格化时空变化的排放源输入到CMAQ模式。CMAQ模式包括有四个模块,包括初始和边界模块(ICON和BCON)、光解率计算模块(JPROC)和大气化学模块(CCTM)。ICON为模式提供两种初始条件的选择,一种是模式默认的污染物浓度初值,一般第一次模拟的时候选用;另一种是前一天最后一个时次的模拟结果作为第二天的初始值。BCON同样也为模拟提供两种边界条件的选择。一种是模式默认的污染物浓度边界值,一般模拟第一层嵌套时选用;另一种是母嵌套的模拟结果作为子嵌套的边界条件。CCTM是CMAQ的核心模块,用于对主要大气化学过程、输送和沉降过程进行模拟。共包含有下列数种机制:平流、扩散和对流算法;气相化学;云混合与液相化

学；气溶胶模块，气溶胶粒子被分为三种模态，即爱根核、积聚核和粗核。爱根核和积聚核粒子往往是由燃烧过程和化学转化过程产生。粗核粒子主要是由风吹尘和海盐组成；干沉降过程和网格烟团过程等。CMAQ所做的嵌套在BCON模块中完成，只是单向嵌套，即子嵌套对母嵌套并没有反馈作用。

2.2 模式参数设置和输入数据

(1) MM5使用T639资料作为边界和初始场，地形数据和下垫面分类数据为30sUSGS数据。为了尽可能真实地模拟出珠三角地区的气象场，建立了三重嵌套的模式区域。模拟区域设计见表1。

表1 MM5模式区域

嵌套区域	网格数	分辨率 (km)	起点经度 (°E)	起点纬度 (°N)	终点经度 (°E)	终点纬度 (°N)
1	184×283	27	81.789	1.989	161.950	44.103
2	163×223	9	107.373	16.581	127.733	29.450
3	130×172	3	110.820	21.139	115.914	24.716

模式的垂直分辨率为25层，取地形追随静力气压垂直坐标。本文所用的MM5 (version3.7) 采取以下物理方案：混合相微物理方案、Grell积云方案（本文中第一、二嵌套的模式区域采用Grell积云方案，而第三重区域没有使用积云方案）、MRF边界层方案、RRTM长波辐射方案、Noah陆面过程方案。化学机理：选用改进的CBM-IV机理（CB4-AE3-AQ, CB-IV gas-phase mechanism, 4rd generation CMAQ aerosol mechanism with sea salt, aqueous/cloud chemistry），该机理同时考虑了液相和气溶胶化学；化学机理利用QSSA解法求解。

(2) 气象场输入：逐时的气象场输入采用MM5的模拟结果，包括高度和气压场、风场、温度场、水汽场、云量、降水以及垂直扩散系数等。气象场通过MCIP模块转换。MCIP将气象模式计算的结果转换成io/api格式，对于气象场范围的抽取，MCIP选择非边界整齐，即从气象场的西南角开始选定起始点，输入抽取的网格数。CMAQ和SMOKE模拟采用相同的三层单向嵌套网格，网格数分别为：第一层182×138，第二层98×74，第三层152×110。水平分辨率和垂直分层与气象模式相同。输出一共有9个文件，包括有网格和坐标描述文件、时间独立二维的边界气象场、时间独立的二维和三维交叉网格点气象场、时间独立的二维网格点气象场、随时间变化的三维边界气象场、随时间变化的二维和三维交叉网格点气象场、随时间变化三维网格点气象场。

(3) 排放源清单输入：第一、二重嵌套源清单数据来自INTEX-B 2006亚洲排放源清单。第三重嵌套的珠三角源清单以2006年作为基准年普查的本地

化的珠江三角洲大气排放源清单^[22-24]，该清单收集了大量本地排放源基础数据，包括了SO₂，NO_x，CO，PM₁₀，PM_{2.5}和VOC等主要污染物，涵盖了电厂、工业源、移动源、含VOC产品源、扬尘源、天然源及其他源，结合排放源时间变化特征活动数据及高分辨率的人口矢量数据、道路网数据和土地利用数据，该清单能代表最新珠江三角洲排放源特征的高时空分辨率动态分布。同时考虑海盐气溶胶的作用。

(4) 初始条件和边界条件设置：为减少初始条件的影 响，模拟结果的分析选取模拟第7d以后的时段进行；利用前一次模拟结果作为下一次模拟的初始条件，利用前一天模拟结果作为后一天模拟的初始条件，母嵌套模拟结果作为子嵌套模拟的边界条件，模式分析工作在第三层模拟区域（即珠三角地区）内进行。

(5) 光解条件：大气中光化学反应主要靠痕量气体的光解驱动。光化辐射是光化学反应的驱动力，光解率影响参与光化学反应物种的反应强度及生命周期。因此，准确地估算光化辐射通量和物种的光解率，对空气质量模式模拟与光化学反应密切相关的物种时空分布的合理性至关重要。JPROC模块为CCTM计算物种光解率。光解率的计算需要提供各种相关物种的吸收截面和光化学量子产率，另外还需要如下输入文件——太阳辐射的波长函数、大气廓线（包括臭氧、气溶胶以及温湿压等）、臭氧柱含量等资料。

(6) 模拟结果后处理：模式每小时输出一次模拟结果；模式自带的pave软件只能读入小于2G的文件，限制了大文件的使用，所以开发使用Matlab软件对输出结果进行后处理显示。

3 研究结果

气象能见度是灰霾最直观体现，能见度与表征气溶胶光学特性参数的消光系数成倒数关系，能见度（大气灰霾）的研究与预报本质上是对气溶胶的预报和研究。能见度高低实质上由气溶胶的消光特性所决定^[25]。模式对各种气溶胶成分谱对能见度的消光作用进行参数化^[26-27]，采用公式（1）：

$$\beta_e = 10_{\text{空气分子}} + 3 \times f(RH)_{\text{湿度增长函数}} [1.375 \times (\text{SO}_4^{2-})_{\text{硫酸盐}} + 1.29 \times (\text{NO}_3^-)_{\text{硝酸盐}} + 4 \times 1.4 \times (\text{OC})_{\text{有机气溶胶}} + 10 \times (\text{EC})_{\text{元素碳}} + 1 \times (\text{Soil})_{\text{地壳元素}} + 0.6 \times (\text{CM})_{\text{海盐、土壤尘等粗粒子}}] \quad (1)$$

式中， β_e 为大气消光系数； $f(RH)$ 是气溶胶的湿度增长函数， RH 为相对湿度。

广东省气象局位于广州市中心，利用该站点能见度资料代表市区能见度，番禺大气成分站位于番禺南村镇大岗山，地处珠三角腹地，能代表珠三角地区污染物充分混合的状况，利用该站点能见度资料代表整个珠三角平均能见度水平。

3.1 典型个例分析

2009年12月22—26日, 珠三角地区受变性高压出海控制, 出现了典型的灰霾过程, 日均能见度小于10km, 最低能见度不足1km。12月22日以前冷空气南下控制珠三角地区, 能见度维持在较高水平。直到22日, 珠三角地区转为变性高压出海控制, 地面风向由偏东北风转为偏东南风, 加上喇叭口的地形特征, 区域内风速较小污染物难于扩散, 同时东南风带来大量的水汽, 使得气溶胶吸湿增长导致能见度的进一步恶化, 形成灰霾现象。直到27日以后, 灰霾过程才结束。

从图1可以看到, 模式系统能较好地预报出清洁过程到灰霾过程再到灰霾结束能见度的转变。不管是代表污染水平较高市中心还是代表珠三角平均状况的番禺大气成分站, 模式能很好地预报出能见度的日变化趋势, 和观测资料对比来看, 市区的模拟效果比番禺的好, 而市区的模拟值比观测值略低, 番禺的模拟值比观测值偏大, 日变化幅度更大。

图2为本次过程模式预报的广东省区域地面能见度分布, 分别对应的是灰霾发生前(21日)、灰霾过程中(23日)和灰霾结束后(28日)午后14时。图3为华南区域来自MODIS卫星AOD产品(图片来自香港科技大学网站), 和图2取最近的时间比较。可以看到, 在21日中午, 广东省受冷空气南下控制, 整

个区域偏东北风, 珠三角地区扩散条件很好, 能见度较高, 污染物在东北风的输送下影响在粤西地区。从AOD来看, 珠三角区域非常低, 粤西地区略大。23日转为变性高压出海控制, 整个区域受偏东南风影响, 珠三角区域能见度恶化, 出现灰霾过程。同时粤北地区和广西东部能见度也较低。这些区域AOD也出现高值。28日又转为东北风, 珠三角地区能见度好转, 灰霾结束时, 粤西地区能见度同样受到影响, 但仍属高能见度。AOD分布也与地面能见度有较好的对应关系。从单点和区域分布的比较来看, 该模式系统能很好地模拟出这次典型灰霾过程中能见度的时空变化。

3.2 全年预报业务评分

利用2010年全年广东省气象局和番禺大气成分站能见度日均值和模式系统预报值进行业务评分。根据《霾的观测和预报等级标准》, 霾是大量的极细微的干尘粒等均匀地浮游在空中, 使得水平能见度小于10km的空气普遍混浊现象。剔除有降水、沙尘暴、扬沙、浮沉、烟幕、吹雪、雪暴等天气现象, 按照日均值为10km划分等级进行业务评分^[28]。评分中所用的统计公式为

$$TS = N_a / (N_a + N_b + N_c) \quad (2)$$

$$NH = N_b / (N_a + N_b) \quad (3)$$

$$PO = N_c / (N_a + N_c) \quad (4)$$

$$EH = (N_a + N_d) / (N_a + N_b + N_c + N_d) \quad (5)$$

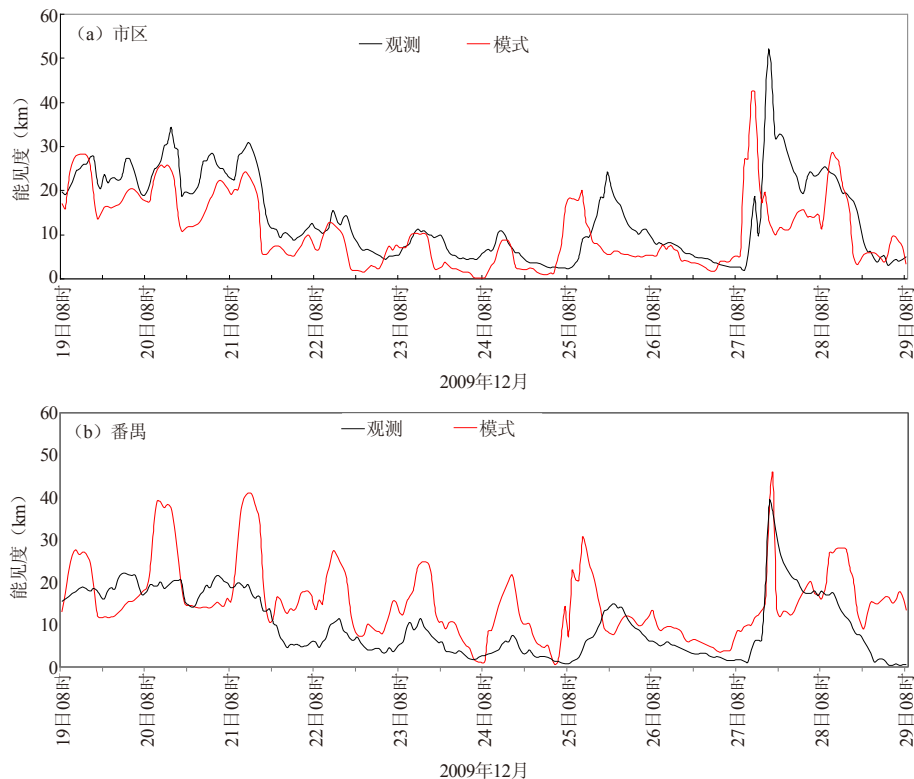


图1 观测和模式能见度对比

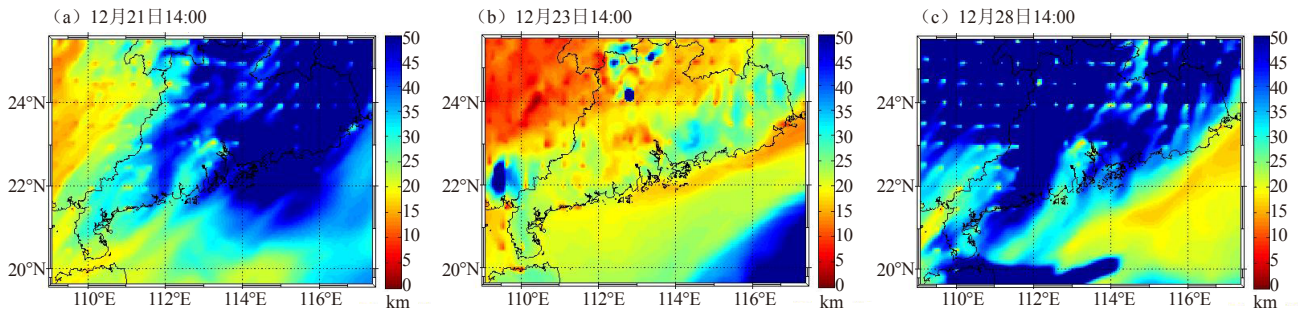


图2 广东省区域地面能见度分布

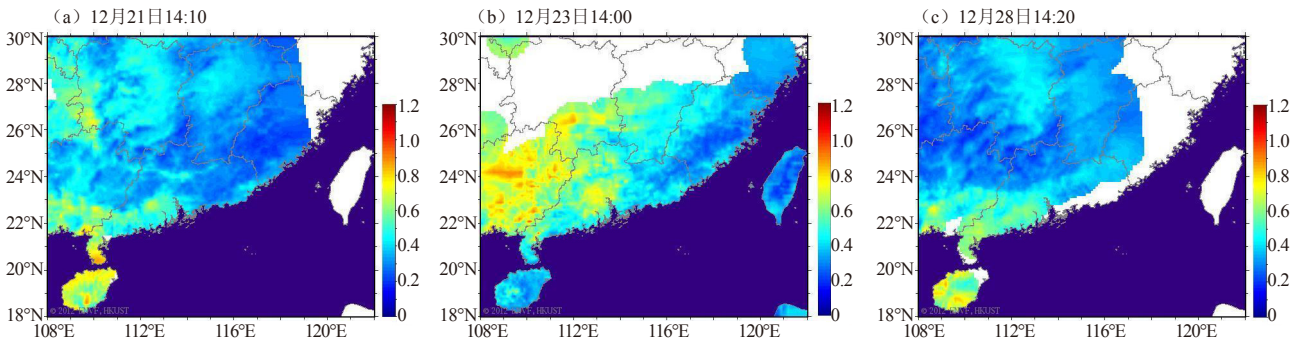


图3 华南区域MODIS AOD分布

其中, N_a 为实况能见度低于10km并预报正确的天数, N_b 和 N_c 分别为模式空报和漏报的能见度低于10km, N_d 为实况能见度高于10km并预报正确的天数, TS 为 TS 评分, NH 为空报率, PO 为漏报率, EH 为预报效率。灰霾预报较好时, TS 和 EH 较大, NH 和 PO 较小。

从表2可以看到, 模式系统对能见度级别有较好的预报能力, 在市区的能见度预报要比番禺郊区的效果好, 灰霾多发生的季节1—4月及10—12月, TS 评分和 EH 预报效率较高, 说明预报正确的天数较多, 而在市区5—8月和番禺郊区7, 8, 10月, N_a , N_b 和 N_c 均为0, 虽然不作统计, 但预报级别也全部正确。全年平均来看, 广东省气象局站点能见度预报 TS 评分为0.67, EH 预报效率为0.89, NH 空报率为0.28, PO 漏

报率为0.1。番禺大气成分站点能见度预报 TS 评分为0.37, EH 预报效率为0.83, NH 空报率为0.08, PO 漏报率为0.61。说明模式系统对灰霾预报效果较好。从预报错误的天数来看, 市区空报比较明显, 而番禺郊区漏报比较明显。

从图4可以看到, 模式系统能预报出能见度的季节性变化趋势。1—5月及10—12月的能见度预报值和观测值比较接近, 而6—9月由于受雨季降水落区的影响, 能见度预报具体数值误差较大。在市区的能见度预报要比郊区的效果好。市区预报值略比观测值偏低, 而番禺郊区预报值比观测偏高。总体上, 模式系统对能见度量级有较好的预报能力, 能达到业务要求。

表2a 2010年市区站点能见度预报评分

	N_a	N_b	N_c	N_d	TS	NH	PO	EH
1月	11	4	1	3	0.688	0.267	0.083	0.737
2月	10	1	0	2	0.909	0.091	0.000	0.923
3月	10	2	1	8	0.769	0.167	0.091	0.857
4月	4	0	0	3	1.000	0.000	0.000	1.000
5月	0	0	0	12				1.000
6月	0	0	0	10				1.000
7月	0	0	0	21				1.000
8月	0	0	0	17				1.000
9月	1	0	0	5	1.000	0.000	0.000	1.000
10月	2	0	0	25	1.000	0.000	0.000	1.000
11月	3	3	2	21	0.375	0.500	0.400	0.828
12月	6	8	1	11	0.400	0.571	0.143	0.654

表2b 2010年郊区站点能见度预报评分

	N_a	N_b	N_c	N_d	TS	NH	PO	EH
1月	7	0	8	2	0.467	0.000	0.533	0.529
2月	2	0	3	6	0.400	0.000	0.600	0.727
3月	4	0	6	12	0.400	0.000	0.600	0.727
4月	0	0	5	6	0.000	0.000	1.000	0.545
5月	0	0	3	18	0.000	0.000	1.000	0.857
6月	0	0	1	9	0.000	0.000	1.000	0.900
7月	0	0	0	17				1.000
8月	0	0	0	17				1.000
9月	0	0	2	14	0.000	0.000	1.000	0.875
10月	0	0	0	27				1.000
11月	2	0	3	23	0.400	0.000	0.600	0.893
12月	7	2	4	13	0.538	0.222	0.364	0.769

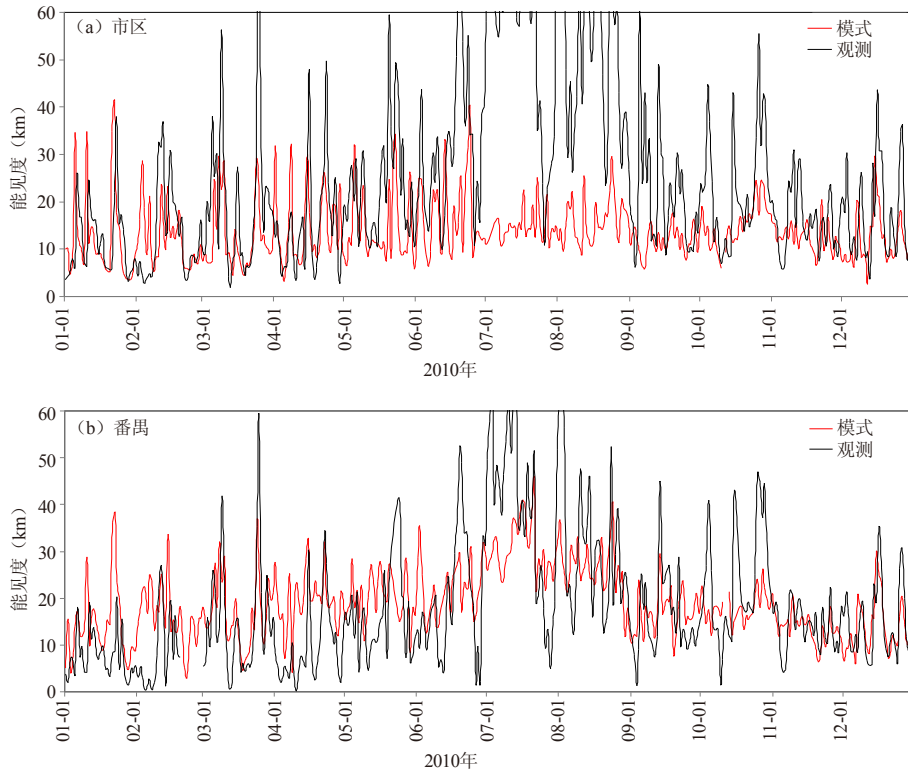


图4 2010年观测和模式能见度比较

4 结论

(1) 灰霾天气中, 影响能见度的主要是各种气溶胶的消光作用, 尤其二次气溶胶为主。大气灰霾(能见度)的预报本质上是对气溶胶的预报。本研究建立的珠三角灰霾数值模式预报系统(MM5-CMAQ-SMOKE), 耦合本地排放源清单, 该系统从气溶胶演变的物理化学过程着手, 综合考虑了气象过程、气相与液相化学过程、非均相化学过程、气溶胶过程和干湿沉降过程, 能够很好地预报各种气溶胶对能见度的消光贡献以及灰霾现象的发生、持续和消亡过程。系统在珠三角区域的分辨率达到3km, 对能见度实现了精细化的定时定点定量的预报。预报和观测结果随时间演变以及空间分布有较好的一致性。

(2) 全年平均来看, 广东省气象局站点能见度预报TS评分为0.67, EH预报效率为0.89。番禺大气成分站点能见度预报TS评分为0.37, EH预报效率为0.83。旱季能见度预报值和观测值比较接近, 雨季由于受降水落区的影响, 能见度预报具体数值误差较大。而由于受排放源分配的影响, 市区的预报效果要比郊区好。总体来看, 模式系统对灰霾以及能见度量级有较好预报能力, 能达到业务运行要求。

(3) 对于整体模式预报性能上, 在排放源分配、更精细化气象模式、气溶胶对气象场的反馈以及消光特性的本地化等方面有待进一步研究。

5 讨论

空气质量预报模式的预报精度取决于: (1) 准确的精细化气象场; (2) 准确的污染源清单; (3) 适合的化学机制; (4) 预报效果的检验与订正等。大气化学模式CMAQ本身没有预报的能力, 其预报的准确性依赖于本地区精细的完整的排放源清单以及精确的气象场数据。从全年预报效果图来看, 对于较低能见度(尤其能见度低于5km)的过程来看, 模式系统预报值往往偏高。这与气象模式预报的地面风场偏大以及边界层高度偏高有关。由于中尺度天气模式所采用的是气压追随坐标, 风速随高度变化对于地形等因素不敏感, 而实际上边界层内部的风场随高度的变化对地形是比较敏感的。出现典型低能见度过程的时候, 近地层往往以静小风为主, 加上珠三角特殊地形, 很容易形成气流停滞区, 而利用中尺度气象模式可以较好地预报出边界层以上大中尺度的天气形势, 而对于城市尺度乃至街区尺度的微气象变化, 模式模拟得到的风速往往偏大。而在静稳天气情况下, 珠三角地区边界层高度一般在500m以下。而中尺度天气模式模拟的边界层高度往往偏高。进一步在中尺度模式圈套更精细化采用高度地形追随坐标的边界层模式和冠层模式, 有望提高静稳天气情况下的气象场模拟精度。目前排放源清单是自下而上的统计得到, 虽然本研究采用本地最新的排放源数据, 但预报结果仍和

卫星AOD分布有所差别。由于源清单中面源占很大一部分比例，而面源是按照人口分配的，在市区的分配比例要高于郊区，所以在市区的空报率要多一些，而郊区的漏报率要多一些。如果进一步加入卫星资料订正排放源的分配，有望减少空、漏报率，提高整体预报效果。在整个模式系统上，没有考虑气溶胶的对气象场的辐射反馈作用，有研究表明，气溶胶会改变大气层结的稳定度^[29]、物种光解率^[30]，甚至影响云和降水^[31]。如果考虑气溶胶的反馈作用，会对气象场、物种光解率以及污染物浓度场的预报有所改进。最后，CMAQ模式计算能见度采用的参数化公式中的气溶胶的湿度增长函数和质量比消光系数是利用美国improve能见度观测站网拟合得到的。而在珠三角地区由于气象条件和气溶胶类型的不同，模式中气溶胶的湿度增长函数和质量比消光系数不一定能准确描述本地气溶胶的消光特性。利用珠三角大气成分站网长期的观测资料进行统计，拟合出适合本地的气溶胶的湿度增长函数和质量比消光系数，对模式预报的各类气溶胶成分重新计算其消光作用，有望提高能见度的预报效果。另外，整套模式系统采用单向耦合，排放源模式和大气化学模式利用气象模式输出的数据1h结果插值到每一个计算步长，会产生一定的误差，也没有考虑污染物对气象场反馈作用，进一步实现气象—排放源—化学模式的在线耦合能提高整个系统的模拟精度。

致谢：本文所使用MODIS AOD产品图片来自香港科技大学环境学院网站http://envf.ust.hk/dataview/modis_ll_aod_images/，对此表示感谢。

参考文献

- [1] Wu D, Tie X X, Li C C, et al. An extremely low visibility event over the Guangzhou region: A case study. *Atmospheric Environment*, 2005, 39 (35): 6568-6577.
- [2] Tie X X, Wu D, Guy B, et al. Lung cancer mortality and exposure to atmospheric aerosol particles in Guangzhou, China. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(14): 2375-2377.
- [3] 邓涛, 张镭, 陈敏, 等. 高云和气溶胶辐射效应对边界层的影响. *大气科学*, 2010, 34(5): 979-987.
- [4] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟. *大气科学*, 1998, 22(4): 418-427.
- [5] Penner J E, et al. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect. *Nature*, 2004, 427: 231-234.
- [6] 邓雪娇. 珠江三角洲气溶胶的特征及其对能见度与地面臭氧变化的影响. 北京大学博士学位论文. 2008.
- [7] Deng X J, Tie X X, Wu D, et al. Long-term trend of visibility and its characterizations in the Pearl River Delta Region (PRD), China. *Atmospheric Environment*, 2008, 42 (7): 1424-1435.
- [8] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. *气象学报*, 2006, 64(4): 510-517.
- [9] 吴兑, 邓雪娇, 毕雪岩, 等. 细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降. *热带气象学报*, 2007, 23(1): 1-6.
- [10] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶云造成严重灰霾天气. *自然灾害学报*, 2006, 15(6): 77-83.
- [11] 吴兑, 邓雪娇, 林爱兰, 等. 广东省空气质量预报系统. *气象科技*, 2003, 31(6): 351-355.
- [12] Wang X, Zhang Y, Hu Y, et al. Process analysis and sensitivity study of regional ozone formation over the Pearl River Delta, China, during the PRIDE-PRD2004 campaign using the CMAQ model. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2009, 9: 26833-26880.
- [13] 陈训来, 冯业荣, 王安宇, 等. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究. *中山大学学报(自然科学版)*, 2007, 146(14): 103-107.
- [14] Xu X D, Xie L A, Cheng X H, et al. Application of an adaptive nudging scheme in air quality forecasting in China. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47: 2015-2114.
- [15] 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. *中国环境科学*, 2012, 32(2): 193-199.
- [16] 张美根, 徐永福, Uno Itsushi, 等. 东亚地区春季二氧化硫的输送与转化过程研究. *大气科学*, 2004, 28(3): 321-329.
- [17] 权建农, 张晓山, 段宁, 等. 中国西南和华南地区硫沉降数值模拟. *高原气象*, 2007, 26(2): 326-332.
- [18] 程宏兴, 徐祥德, 丁国安. CMAQ模式卫星产品源同化模型及其在空气质量预报中的应用研究. *中国科学D辑: 地球科学*, 2010, 40(4): 511-522.
- [19] Feng Y R, Wang A Y, Wu D, et al. The influence of tropical cyclone Melor on PM10 concentrations during an aerosol episode over the Pearl River Delta region of China: Numerical modeling versus observational analysis. *Atmos. Environ.*, 2007, 41(21): 4349-4365.
- [20] MMD/NCAR. PSU/NCAR Mesoscale Modeling System Tutorial Class Notes and User's Guide: MM5 Modeling System Version 3.4. 2001.
- [21] Carolina Environment Program. SMOKE v2.2 User's Manual. University of North Carolina at Chapel Hill, 2005.
- [22] 郑君瑜, 郑卓云, 王兆礼, 等. 珠江三角洲天然源VOCs排放量估算及时空分布特征. *中国环境科学*, 2009, 29(4): 345-350.
- [23] 郑君瑜, 车汶蔚, 王兆礼. 基于交通流量和路网的区域机动车污染物排放量空间分配方法. *环境科学学报*, 2009, 29(4): 815-821.
- [24] 郑君瑜, 张礼俊, 钟流举, 等. 珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征. *中国环境科学*, 2009, 29(5): 454-460.
- [25] 盛裴宣, 毛节泰, 李建国, 等. *大气物理*. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [26] Sisler J F, Malm W C. The relative importance of soluble aerosols to spatial and seasonal trends of impaired visibility in the United States. *Atmos Environ*, 1994, 28: 851-862.
- [27] Malm W C, Sisler J F, Huffman D, et al. Spatial and seasonal trends in particle concentration and optical extinction in the United States. *J Geophys Res*, 1994, 99: 1347-1370.
- [28] QX/T 113-2010 中华人民共和国气象行业标准: 霾的观测和预报等级标准.
- [29] 邓涛, 张镭, 吴兑, 等. 兰州地区高云和气溶胶光学特性及其辐射效应. *高原气象*, 2009, 29(1): 230-235.
- [30] Dicherson R, Kondragunta S, Stenichikov G, et al. The impact of aerosols on solar ultraviolet radiation and photochemical smog. *Science*, 1997, 278: 827 - 830.
- [31] Breon F M, Tanre D, Generoso S. Aerosol effect on cloud droplet size monitored from satellite. *Science*, 2002, 295: 834-838.