

珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究^{*}

陈训来¹, 冯业荣², 王安宇¹, 李江南¹, 范绍佳¹, 林建恒³, 冯瑞权³

(1. 中山大学季风与环境研究中心 大气科学系, 广东 广州 510275

2. 广州中心气象台, 广东 广州 510080 3. 澳门地球物理暨气象局, 澳门)

摘 要: 主要利用美国第三代空气质量模式系统 Models3 (MM5/SMOKE/CMAQ), 设计三重嵌套网格对 2004 年 9 月 26—30 日珠江三角洲城市群一次灰霾天气过程进行数值研究。通过对主要大气污染物如 PM_{10} 、 CO 、 SO_2 和 NO_x 的模式结果与观测对比分析表明, 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, 再现了污染物浓度呈周期性日变化的重要特征。结果还表明, 在这次灰霾天气过程中珠江三角洲城市群大气污染物的水平分布具有区域性, 存在 3 个高值中心, 污染物的高值中心对应着大城市。污染物主要积聚在大气边界层内, 形成近地面高浓度, 这是造成此次灰霾天气的直接原因。

关键词: 城市群; 灰霾; 大气污染物; 珠江三角洲

中图分类号: X131.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 04-0103-05

珠江三角洲位于广东省中南部、濒临南海, 城市化速度非常快, 是我国典型的城市群之一。近年来, 珠江三角洲空气质量呈恶化趋势, 气溶胶污染问题日益突出, 灰霾天气逐年增多^[1-2]。范绍佳等^[3]对影响珠江三角洲地区的大气灰霾的气象条件进行了观测和研究。但对珠江三角洲地区灰霾天气过程中主要大气污染物的时空分布和变化规律还需要进一步研究, 而利用完善的空气质量数值模式系统是一个有效的手段。

空气质量数值模式经过近 20 年的发展, 已经由简单的高斯模式逐步发展到使用于各种尺度大气污染研究的复杂数值预报系统, 其中美国环保局研制的第三代空气质量模式系统 Models-3 是目前最先进, 应用最广泛的空气质量预报模式^[4]。国内外许多学者利用该模式进行了空气污染研究^[5-10]。本文利用该模式对珠江三角洲城市群的一次灰霾天气的大气污染物进行数值研究, 更好地了解该地区大气污染物的时空分布特征。

1 模式简介及实验设计

1.1 模式简介

空气质量模式系统 Models3 是由中尺度气象模式 MM5、排放源处理程序 SMOKE 和化学输送模式 CMAQ 组成的 (MM5/SMOKE/CMAQ)。MM5 提供气象背景场, 输出的气象资料通过气象化学界面处理程序 (MCIP) 模块处理后提供给 SMOKE 和

CMAQ 模块^[11]。SMOKE^[12] 是美国北卡罗莱纳大学开发的污染源处理模式, 它将排放源清单数据处理成空气质量模式要求的数据, 可以处理点源、面源、移动源和生物源。CMAQ 是 Models-3 的核心部分, 是多污染物、多尺度的空气质量模式系统, 全面考虑了光化学氧化剂、气溶胶、酸沉降等污染问题。Models3 系统充分考虑了控制各种大气污染物运动变化的物理化学过程, 对污染物的输送、扩散等过程有较好的处理。

1.2 试验设计

本文应用 MM5 3.6 版本, 模式系统采用三重嵌套网格进行数值模拟 (如图 1 实线), 中心坐标 $23.0^{\circ}N$ $113.0^{\circ}E$, 格距为 36、12 和 4 km, 格点数依次为 65×49 、 91×61 和 124×97 。垂直方向分为 36 层, 在低层划分的更细致, 顶层为 100 hPa。边界层物理过程采用的都是 MRF 方案, 积云对流参数化最外面两重嵌套采用 Grell 方案, 第 3 重嵌套为显式方案, 模式中都采用了简单冰相的云物理过程方案, 大气辐射方案为 CCM2。模式的初始和侧边界资料采用 NCEP ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$) 6 h 一次的再分析格点资料和地面探空常规观测资料, 底边界采用美国地理调查局 (USGS) 的 30 s 分辨率 (约 $0.9 km \times 0.9 km$) 地形高度资料。

本文中 CMAQ 模式采用第四代碳键化学机制 CB4-AE-AQ 模拟大气颗粒物变化过程。CMAQ 也是采用三重嵌套网格 (图 1 虚线), 格距与 MM5

* 收稿日期: 2006-09-21

基金项目: 国家“973”计划资助项目 (2002CB410801); 广西科学攻关基金资助项目 (0322022-4)

作者简介: 陈训来 (1979 生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 李江南; E-mail: essji@mail.sysu.edu.cn

相同, 但模拟区域范围比 MM5 小, 其目的是为了减少 MM5 的侧边界对 CMAQ 模拟区域气象场的影响, 从而减少对 CMAQ 模拟结果的影响。CMAQ 的格点数分别为 42×30 、 67×49 和 91×69 其中第三重嵌套主要区域为珠江三角洲地区, 垂直方向均为 21 层。模式的初始浓度场和侧边界浓度场根据实际进行了调整, 使其能应用于珠江三角洲地区。

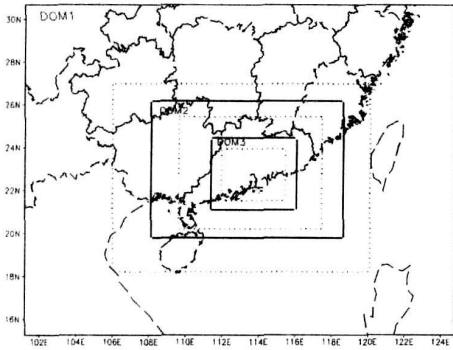


图 1 模式范围 (实线为 MM5 区域范围, 虚线为 CMAQ 区域范围)

Fig 1 Domain architecture for MM5-CMAQ used for this application
 (solid line for MM5 domain, dashed line for CMAQ domain)

2 天气形势

珠江三角洲主要城市空气污染指数资料, 每年 9 月至次年 4 月是珠江三角洲空气质量较差的时期。本文选取模拟时间为 2004 年 9 月 26—30 日, 2004 年 9 月 26 日在西北太平洋上有一热带气旋 0422 号“米雷”(图略), 受热带气旋外围下沉气流的影响, 珠三角地区天气形势稳定, 天气晴朗, 风速较小, 大气污染物不易扩散, 导致该地区空气污染加重, 能见度下降, 其中澳门最低能见度为 3~5 km, 按照灰霾指数与警报分级表的划分属于重度灰霾天气^[13]。

3 结果与讨论

气象模式 MM5 和污染模式 CMAQ 每 1 h 输出一组模拟结果, 下面根据第 3 重嵌套的模拟结果分析这次灰霾天气过程中珠江三角洲城市群大气污染物的时空分布特征。

3.1 模式结果与观测的对比

分别选取香港元朗和澳门北区的观测结果与模拟结果进行对比分析。元朗站位于香港西北部, 是发展迅速的一个新市镇; 澳门北区位于澳门市政局化验所附近, 是一个高密度住宅区监测站。两个监

测站的结果反映珠江三角洲城市空气质量的污染水平。图 2 是 PM_{10} 、 CO 、 SO_2 和 NO_x 模拟结果与观测值对比。对 PM_{10} 的模拟, 模式结果与观测值的变化趋势比较一致, 能够模拟出 27、28 日的 PM_{10} 浓度高值, 以及 29 日 PM_{10} 浓度逐渐减小清除的过程。模拟结果最小值与观测值吻合的比较好, 但最大值比实测偏小。从 CO 的观测结果中可以看出, 两个监测站 CO 浓度都有明显的日变化, 白天浓度低, 晚上浓度高, 模式再现了 CO 的日变化, 模拟的峰值与观测值较一致。 SO_2 观测值与 CO 一样也是呈波峰、波谷周期震荡, 但 SO_2 浓度是白天高, 晚上低, 模拟结果与观测值相似, 但模拟的最大值比观测值要小。对 NO_x 的日变化, 观测结果表明中午 NO_x 浓度最低, 夜间浓度最高, 这与中午时分光解作用最强、夜里光解作用最弱有关。模式很好的反映了 NO_x 的日变化, 但模拟的最小值小于观测值。总之, 模式很好的模拟了珠江三角洲大气污染物的变化趋势, 再现了污染物日变化特征, 模拟值比观测值还存在一定的误差, 这主要由模式系统误差造成的, 包括输入的气象场 (温度、风速和风向等) 与观测值有一定的误差。

3.2 城市群大气污染物平均浓度的水平分布特征

图 3 是模拟期间近地面大气污染物的平均浓度。从图 3 (a) PM_{10} 地面浓度分布图中可以看出, PM_{10} 有 3 个高值中心, 最大浓度值位于广州、佛山地区, 在这段时间内 PM_{10} 最大平均浓度达到 $150 \mu g \cdot m^{-3}$, 其次位于在珠江口西岸江门、中山附近和东岸的深圳、香港地区。模拟结果中这 3 个最大中心值与通过 MODIS 卫星观测气溶胶反演的中心比较一致^[8]。图 3 (b) 是地面 CO 体积分数 $\varphi(CO)$ 的分布, 从图可以发现 $\varphi(CO)$ 分布与 PM_{10} 基本相同, 也有 3 个高值中心, $\varphi(CO)$ 最大值位于香港地区, 约为 0.5×10^{-6} , 其次是广州、佛山地区, 体积分数为 0.4×10^{-6} , 在珠海、澳门也呈现高值中心, 平均体积分数达 0.3×10^{-6} 。图 3 (c) 是 SO_2 浓度的分布, 高体积分数的 SO_2 主要分布在广州、佛山及其周边地区, 最大浓度为 35×10^{-9} , NO_x 的分布 (图 3 (d)) 基本与 SO_2 的分布相似, 体积分数值高于 SO_2 的体积分数值, 其中心在广州、佛山最大体积分数值为 80×10^{-9} , 在香港、深圳地区的最大体积分数值达 100×10^{-9} , 这也说明珠三角的酸雨类型逐渐由硫酸型向硫酸硝酸复合型转变。总体上, 珠江三角洲地区污染物排放主要来源于城市机动车尾气、工厂和居民生活排放等, 大气污染物分布具有区域性, 存在 3 个高值中心, 且污染物的高值中心对应着大城市。

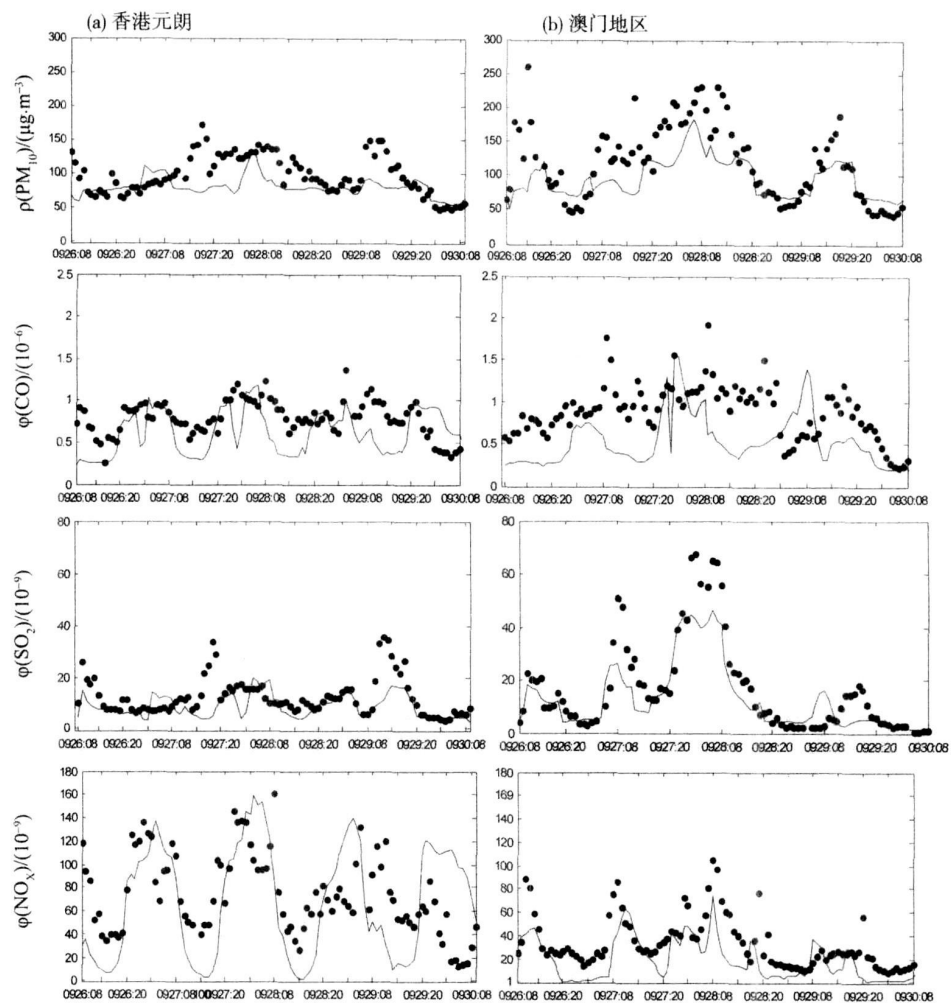


图 2 监测站大气污染物的模拟值（实线）和观测值（圆点）随时间变化图
Fig 2 Time series of simulation (solid line) and observed (dot) air pollutants

3.3 城市群大气污染物平均浓度的垂直分布特征

下面进一步分析本次灰霾过程中大气污染物的垂直分布情况，图 4 是模拟期间大气污染物沿 113.36°E (图 3 中 AB 线，经过广州) 的剖面平均分布。从图 4 可以看出， PM_{10} $70\mu g\cdot m^{-3}$ 集中在 600 m 以下的大气边界层内，近地面 PM_{10} 浓度最大，随高度升高，污染物浓度降低的很快。图 4 b 是 CO 的垂直分布，CO 主要集中在分布在 300 m 以下，CO 可以向南输送到海洋面上。 SO_2 在广州和江门存在两个高值中心 (图 4 c)，其中江门的高值中心位于 300 m，最大值约为 21×10^{-9} 。图 4 d 是 NO_x 的垂直分布， NO_x 也是主要分布在 600 m 以下的边界层内，高值中心与水平的高值中心相对应，向上浓度逐渐降低。珠江三角洲地区大气污染物在排放源区内的大气边界层内逐渐积聚，形成近地面高浓度，是造成这次灰霾天气的直接原因。

4 结 论

利用 Models3 (MM5/SMOKE/CMAQ) 空气质量模式系统，对 2004 年 9 月 26—30 日一次灰霾天气珠江三角洲城市群主要大气污染物进行数值研究，有以下结论：

(1) Models3 模式系统对于大气化学过程的描述比较全面细致，考虑了化学物种和气象要素之间的反馈作用，因此能够更加真实地反映实际大气的变化过程。该模式较好地模拟出了此次灰霾天气过程中珠江三角洲地区大气污染物 PM_{10} 、CO、 SO_2 和 NO_x 的日变化趋势，与观测结果比较一致。

(2) 模拟结果表明在珠江三角洲城市群的大气污染物的水平分布具有区域性，存在 3 个高值中心，污染物的高值中心对应着大城市。大气污染物主要积聚在大气边界层内，形成近地面高浓度，是造成这次灰霾天气的直接原因。

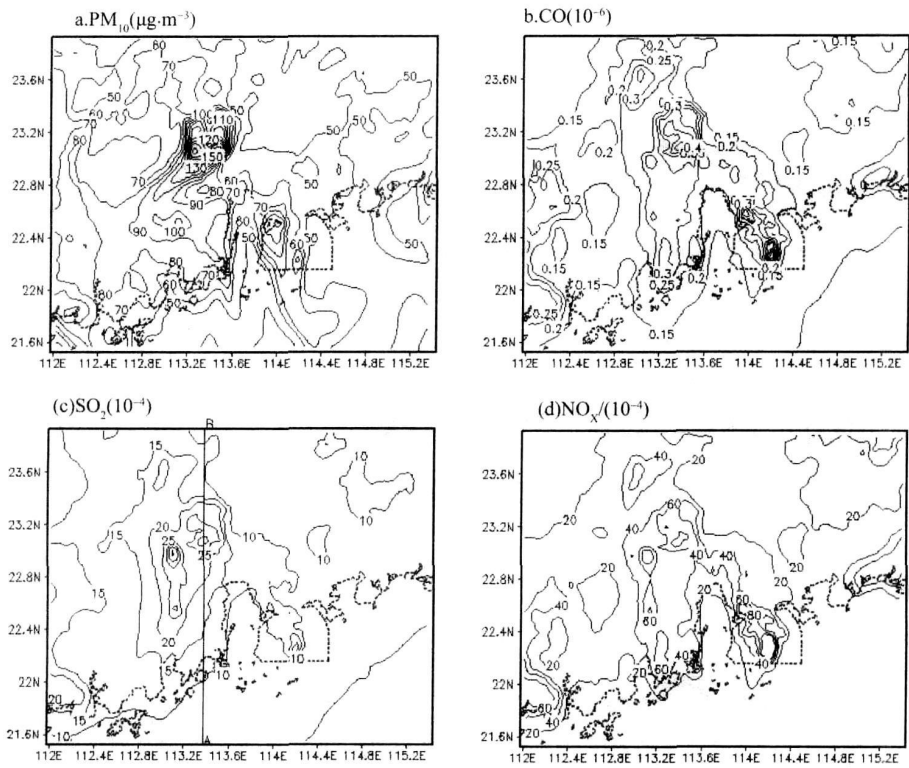


图 3 2004 年 9 月 26 日 08 时至 30 日 08 时地面污染物的体积分数
Fig 3 The average volume fraction of air pollutants from 26 to 30 September 2004

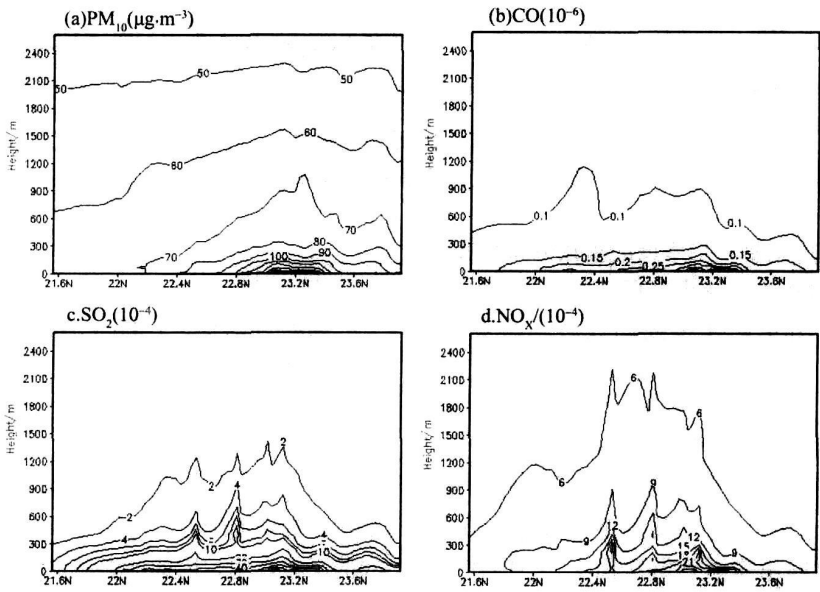


图 4 2004 年 9 月 26 日 00 时至 30 日 08 时污染物的平均浓度垂直分布 (沿 113.36°E)
Fig 4 Vertical contours of the average concentration of air pollutants from 26 to 30 September 2004

以上分析了利用 Model-3 模式系统对灰霾天气过程中珠江三角洲城市群主要大气污染分布进行了数值研究, 但造成大气灰霾的因素很多, 城市热岛、海陆风等中尺度环流对大气污染物的输送都有

重要作用, 这还需要做进一步深入的研究。
致谢: 本文使用了香港环境保护署、香港科技大学海岸与大气研究中心、澳门地球物理暨气象局污染物地面监测数据, 在此致谢!

参考文献:

[1] 刘爱君, 杜尧东, 王惠英. 广州灰霾天气的气候特征分析[J]. 气象, 2004 30(12): 68—71.

[2] 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[J]. 气象学报, 2006 64(4): 510—517.

[3] 范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 珠江三角洲大气边界层概念模型的建立及其应用[J]. 热带气象学报, 2005 23(3): 286—293.

[4] 樊琦, 蒙伟光, 王雪梅, 等. 美国环保局第三代空气质量预报和评估系统[J]. 重庆环境科学, 2003 23(11): 134—137.

[5] ZHANG Y, LIU P, PUN B, et al. A comprehensive performance evaluation of MM5—CMAQ for Evaluation the summer 1999 southern oxidants study episode Part I: Evaluation protocols, databases and meteorological predictions[J]. Atmospheric Environment 2006 40: 4825—4838.

[6] ZHANG Y, LIU P, PUN B, et al. A comprehensive performance evaluation of MM5-CMAQ for Evaluation the summer 1999 southern oxidants study episode Part II: Gas and aerosol prediction[J]. Atmospheric Environment 2006 40: 4839—4855.

[7] ZHANG Y, LIU P, PUN B, et al. A comprehensive performance evaluation of MM5-CMAQ for Evaluation the summer 1999 southern oxidants study episode Part III: Diagnostic and mechanistic evaluations[J]. Atmospheric Environment 2006 40: 4856—4873.

[8] SOKHIR S, SAN Jose R, KIRW ROON N, et al. Prediction of ozone levels in London using the MM5—CMAQ modeling system[J]. Environmental Modeling Software 2006 21: 566—576.

[9] FENG Y R, WANG A Y, WU D, et al. The influence of tropical cyclone Mepron on PM10 concentrations during an aerosol episode over the Pearl River Delta Region of China: numerical modeling versus observational analysis[J]. Atmospheric Environment 2007 41(21): 4349—4365.

[10] 马雁军, 王扬锋, 刘宁微. 辽宁中部城市群主要大气污染物时空分布特征的数值模拟[J]. 气象与环境学报, 2006 22(2): 6—10.

[11] GRELL G A, DUDHIA J, STAUFFER D R. A description in the fifth generation PSU/NCAR mesoscale model (MM5)[J] // NCAR Tech. Note NCAR/TN 398+STR 1994 138.

[12] Carolina Environmental Program. SMOKE v2.2 User's Manual[R]. University of North Carolina at Chapel Hill 2005.

[13] 吴兑. 霾与雾的区别和灰霾天气预警建议[J]. 广东气象, 2004 1—4.

Numerical Experiment Research on Air Pollutants During Atmospheric Haze over the Multi cities of Pearl River Delta Region

CHEN Xun-lai¹, FENG Ye-rong², WANG An-yu¹, LI Jiang-nan¹, FAN Shao-jie¹, LAM Kin-hang³, FONG soi-kuai³
(1. Monsoon and Environmental Research Center / Department of Atmospheric Sciences, SUN Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
2. Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080, China;
3. Macao Geophysical and Meteorological Bureau, Macao, China)

Abstract: In this paper, the Models3 modeling system was used to study the distribution of air pollutants during a haze event over the multi cities of Pearl River Delta (PRD) Region during the period of September 26 to September 30, 2004. The modeling system included air pollutant emission model SMOKE, meteorological data from MM5 and Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) (Version 4.5), a 3-D chemistry transport air quality model. A 3-level-nested grid domain with spatial resolutions of 36 km, 12 km and 4 km was designed for the study region. The comparisons of observed and simulated PM₁₀, CO, SO₂ and NO_x indicated that the modeling system was able to simulate variations of pollutants over the PRD region well. Moreover, the model results showed that the spatial distribution of air pollutants had close relation to the source emission and there were three peaks over the PRD region. The air pollutants were mostly accumulated in the planetary boundary layer (PBL) and caused the formation of high concentrations at the surface.

Key words: multi cities, atmospheric haze, air pollutants, Pearl River Delta