

离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区 灰霾天气的影响

陈训来^{1, 2} 冯业荣³ 范绍佳^{1*} 李江南¹ 林文实¹ 王安宇¹ 冯瑞权⁴

1 中山大学大气科学系/季风与环境研究中心, 广州 510275

2 深圳市气象局, 深圳 518040

3 广州中心气象台, 广州 510080

4 澳门地球物理暨气象局, 澳门

摘 要 不同类型的背景场和海陆风对珠江三角洲地区大气灰霾有不同的影响。作者主要利用空气质量模式系统 Models-3 (MM5/SMOKE/CMAQ) 研究离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲一次灰霾天气的影响, 结果表明, 中尺度气象模式 MM5 对珠江三角洲地区这次灰霾天气的气象模拟, 较好地模拟了风速和风向的变化。多尺度空气质量模式 CMAQ 模拟出了 PM₁₀ 浓度的变化, 与观测值比较一致。在这次灰霾天气过程中, 由于离岸型背景风与陆风风向一致, 在陆风维持的情况下, 内陆源区的 PM₁₀ 被输送到沿海地区, 导致沿海城市和海面上 PM₁₀ 浓度比较高; 而在海风维持的情况下, 海风与离岸型背景风方向相反, 造成海风较小, 致使整个珠江三角洲地区灰霾天气都比较严重。敏感性试验结果表明离岸背景风和海陆风的相互作用对灰霾天气的生成与分布有重大的影响。

关键词 背景风 海陆风 灰霾天气 PM₁₀

文章编号 1006-9895 (2008) 03-0530-13

中图分类号 X16

文献标识码 A

Effect of the Off-Shore Background Flow and Sea-land Breezes on Haze Weather over the Pearl River Delta Region

CHEN Xun-Lai^{1, 2}, FENG Ye-Rong³, FAN Shao-Jia¹, LI Jiang-Nan¹,
LIN Wen-Shi¹, WANG An-Yu¹, and FONG Soi-Kun⁴

1 Monsoon and Environmental Research Center/Department of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

2 Shenzhen Meteorology Bureau, Shenzhen 518040

3 Guangzhou Central Meteorological Observatory, Guangzhou 510080

4 Macao Geophysical and Meteorological Bureau, Macao

Abstract The effects on atmosphere haze over the Pearl River Delta (PRD) are different with the different background flow and sea-land breezes (SLBs). In this paper, the Models-3 modeling system is used to study the role of the off-shore background flow and the SLBs played on haze weather over the PRD region during the period of 26-30 September 2004. The modeling system includes air pollutant emission model SMOKE, meteorological data from MM5, and Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) (Version 4.5), a 3D chemistry transport air quality model. A three-level-nested grid domain with spatial resolutions of 36, 12 and 4 km is designed for the study region.

收稿日期 2006-11-14, 2007-08-07 收修定稿

资助项目 国家“863”项目 2006AA12Z207, 国家重点基础研究发展规划项目 2002CB410801

作者简介 陈训来, 男, 1979 年出生, 博士, 主要从事中尺度数值预报与模拟研究。E-mail: cxlxun@163.com

* 通讯作者 E-mail: eesfsj@mail.sysu.edu.cn

The comparison between the observation and model results shows that the model is able to reproduce the main characteristics of the surface winds and directions. The modeling system can simulate the variations of particulate matter with aerodynamic diameter less than $10\text{ }\mu\text{m}$ (PM_{10}). The land breeze (LB) direction is coincident with the off-shore background flow. As a result, PM_{10} can be transported to the coast and ocean area by the LB, leading to high PM_{10} concentration. The sea breeze (SB) that wind direction is opposite to the off-shore background flow is small, causing the entire PRD region heavy haze weather. The sensitivity experiment results show that the interaction between off-shore background flow and the SLB has important effects on the generation and distribution of haze weather.

Key words background flow, sea and land breezes, haze weather, PM_{10}

1 引言

近年来,随着珠江三角洲工业化和城市群的快速发展,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。在珠江三角洲城市群上空长期稳定存在“亚洲棕色云”^[1],我国学者称之为灰霾天气^[2]。灰霾的严重程度与 PM_{10} (粒径小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的气溶胶) 浓度成正比,从 2001~2004 年,珠江三角洲年灰霾天数明显增加, PM_{10} 有一半的月均值超过国家二级标准的日均值浓度限值 ($150\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[3]。

珠江三角洲海岸线曲折、地形复杂,海陆风发生频繁,每年出现较强海陆风约有 50~70 天^[4]。近年来,不少学者对珠江三角洲地区的海陆风进行过研究,有些对海陆风形成的动力机制进行仔细的诊断分析和数值模拟^[5, 6]。Liu 等^[7, 8]和 Ding 等^[9]研究了海陆风与珠江三角洲地区高臭氧 (O_3) 污染的关系。在国外,Helms 等^[10]研究过不同方向的背景风对海陆风强度的影响, Kallos 等^[11]研究过希腊雅典地区离岸型背景风与海陆风及相应城市污染的关系,指出背景风与海风辐合的地方容易导致污染物的积聚,产生高污染事件。关于珠江三角洲地区离岸型背景风和海陆风对灰霾天气影响的研究在国内还没有见到。

本研究主要特点是结合空气质量模式研究离岸型背景风和海陆风环流对珠江三角洲地区大气灰霾影响。

我们的研究是使用空气质量模式进行的,空气质量模式是一项复杂的系统工程,是不断地进步和发展的^[12]。目前较先进的空气质量模式是美国环保总局开发的第三代空气质量模式系统 Model-3^[13],它是由中尺度气象模式 MM5、排放源处理程序 SMOKE^[14]和多尺度空气质量模式 CMAQ 组成,可对多种污染物进行模拟^[15~17]。张美根

等^[18~22]用耦合了 RAMS 的 CMAQ 模式系统研究二氧化硫、硫酸盐气溶胶和 O_3 及其前体物的空间分布和变化特征,发现 CMAQ 模式的模拟结果和观测值具有很好的一致性。冯业荣等^[23]和魏晓琳等^[24]利用 Models-3 模式研究了热带气旋对珠江三角洲地区灰霾天气和臭氧的影响。这些工作对本文的研究都有很重要的参考意义。

2 模式资料和方案设计

2.1 模式资料

(1) 本文应用 MM5v3.6 版本提供气象背景资料,模式采用三重嵌套网格(如图 1),中心坐标 (23.0°N , 113.0°E),网格点数依次为 65×49 (DOM1,东西向格点数为 65,南北向格点数为 49), 91×61 (DOM2) 和 124×97 (DOM3),相应格距为 36 km、12 km 和 4 km,垂直方向分为 36 层,为了详细研究海陆风的作用,在低层划分更细致,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,第三重嵌套不采用任何积云参数化方案,云物理过程用了简单冰相显示方案,大气辐射方案为 CCM2, MM5 模式中使用四维资料同化 (FDDA) 技术。模式的初始和边界资料采用 NCEP ($1^\circ\times 1^\circ$) 6 小时一次的再分析格点资料和地面探空常规观测资料,以及美国地理调查局 (USGS) 的 30 秒分辨率 (约 $0.9\text{ km}\times 0.9\text{ km}$) 地形高度资料。

使用气象化学界面处理程序 MCIP 将 MM5 输出结果转换为应用程序界面 (I/O API) 格式文件,提供给 SMOKE 模式和 CMAQ 模式。

(2) SMOKE 模式可以处理点源、面源、移动源和生物源。首先,使用 SMOKE 模式对华南地区的污染源排放资料进行前期处理,包括增加国家、地区码、工厂码、烟囱码、时区等,点源资料是由广东省环保局提供的广东省内大型主要工业点源,

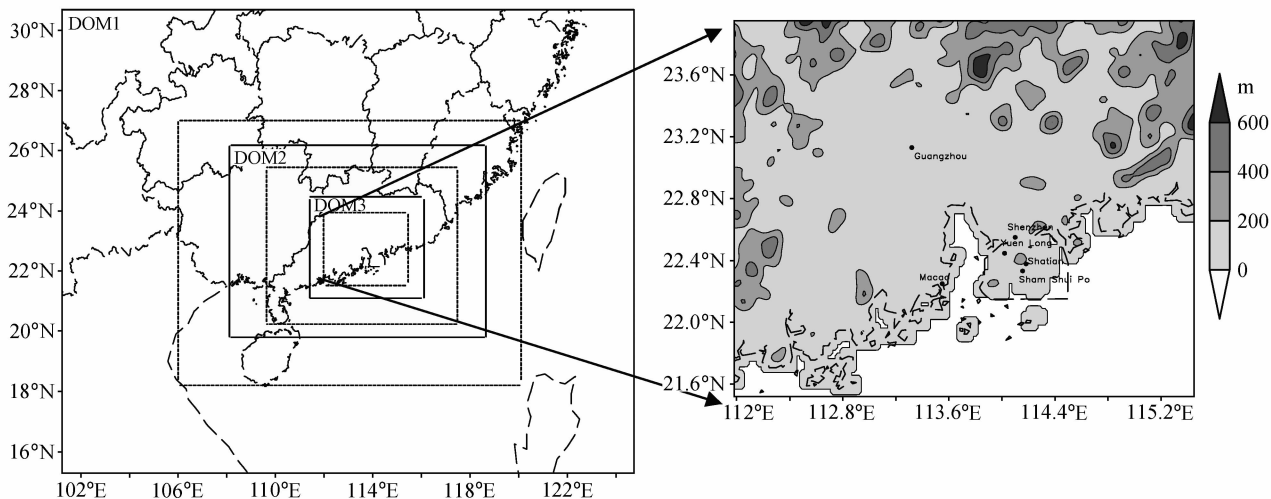


图1 模式范围。实线：MM5 区域；虚线：CMAQ 区域；阴影：地形高度（单位：m）

Fig. 1 Domain configurations used for MM5 modeling (solid domains) and CMAQ (dashed domains) modeling. Shading: terrain height

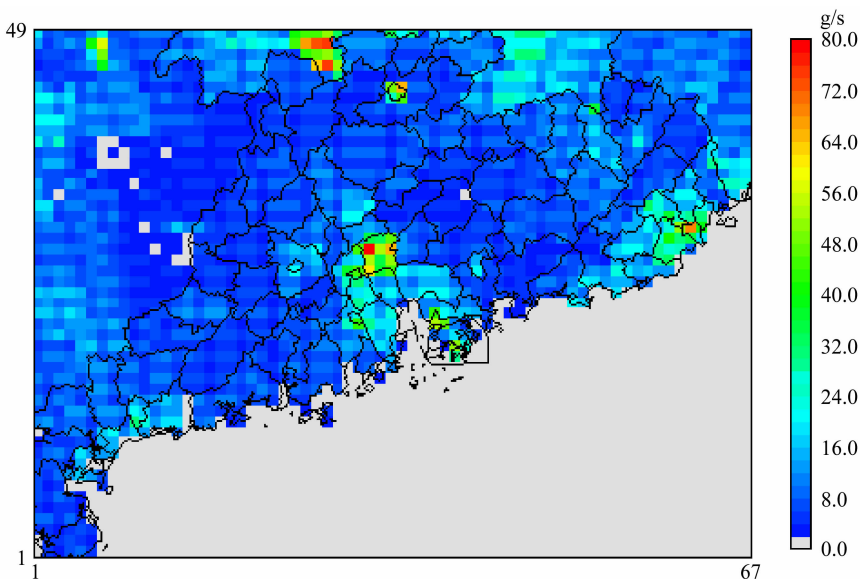


图2 模式区域 DOM2 的 PM_{10} 源排放分布

Fig. 2 Spatial distribution of PM_{10} emissions for Domain 2

目前还暂时缺少广东省外的点源数据；面源资料根据美国自依阿华大学全球和区域环境研究中心的 $1^\circ \times 1^\circ$ 排放清单^[25]；机动车移动源通过收集华南地区的各种机动车数量、种类的数据，以基本区域为单位，计算不同车型在不同道路上一年的行驶总里程数 VMT（Vehicle Miles Traveled），利用 SMOKE 中的机动车排放模式 MOBILE6^[26] 计算机动车的排放量^[27]；生物源根据 SMOKE 模式中的 BEIS3 方法和 MM5 模式中下垫面植被类型资料估算生物源排放，即按照每个网格内各种植被类型所

占的百分比来计算生物排放量。最后，建立符合模式要求的污染源资料数据，污染物包括 SO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NO_x 、CO、VOCs 和 NH_3 等。图 2 是模拟区域 DOM2 中 PM_{10} 的源排放分布[在 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ 面积上每秒钟排放 PM_{10} 的质量数（单位：g）]，可以发现在珠江三角洲地区 PM_{10} 的排放量比较大。

(3) 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。目前在 CMAQ 中使用 CB-IV、RADM2 和 SPARC99 三种

化学机制。在气溶胶模式中, 根据气溶胶的不同来源和粒子的分布采用粗模态、积聚态和核模态表示粒子, 描述了气溶胶的演变过程。关于模式系统的更多内容参阅文献[12]。本文中使用的 CMAQ4.5 版本, 模式采用包含液相和气溶胶过程的第四代碳键化学机制 CB4-AE-AQ 模拟大气颗粒物变化过程, 水平方向上的格距与 MM5 格距相同, CMAQ 的第一重嵌套网格点为 42×30 范围主要覆盖广东、广西、福建和海南等省(图 1 虚线); 第二重嵌套网格点为 67×49 , 主要范围为广东省; 第三重嵌套主要区域为珠江三角洲地区, 网格点为 91×69 , 垂直方向为 21 层。模式的初始浓度场和侧边界浓度场根据珠江三角洲地区监测站观测的平均值进行了调整, 使其能应用于珠江三角洲地区, 如 SO_2 和 O_3 的初始值 9×10^{-9} 和 42×10^{-9} 。

2.2 方案设计

我们选择的个例是 2004 年 9 月 26~30 日, 在这段时间内珠江三角洲地区出现了灰霾天气, 特别是在 9 月 28 日, 澳门、香港、广州、深圳等地区污染指数都很高, 最高的是澳门地区, 根据澳门的观测, 最低能见度为 $3 \sim 5 \text{ km}$ ^[28], 按照灰霾指数与警报分级表的划分属于重度灰霾天气^[2], 与此同时珠江三角地区的背景风和海陆风都很明显。

(1) 为了研究离岸型背景风和海陆风对这次灰霾天气的影响, 我们设计了一个模拟试验(控制试验): 用 MM5 和 CMAQ 从 2004 年 9 月 26 日 08 时开始积分 96 个小时, 主要模拟 9 月 28 日离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气过程的影响。

(2) 为了研究离岸型背景风和海陆风对这次灰霾天气影响的相互作用, 我们设计了一个减弱背景风场的敏感性试验, 即将 MM5 模式 9 月 26 日 08 时初始场和边界场的水平风速均取为零, 仅依靠高度场、温度场和湿度场对模式积分。积分的结果可以探讨减弱背景风场对海陆风以及灰霾天气过程的影响。

3 天气形势概况

2004 年 9 月 28 日 08 时(北京时, 下同)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, 珠江三角地区天气形势稳定, 天气晴朗, 近地面为偏北风, 这样的

天气条件有利于灰霾天气的产生。

4 数值模拟试验的结果分析

4.1 气象场和 PM_{10} 浓度的模拟结果

4.1.1 气象场

空气污染物主要是由污染物的排放量和气象条件这两个内外因素所共同决定, 气象条件对大气颗粒物的形成、转化、扩散、输送和清除起着非常重要的作用, 因此气象条件模拟是对空气污染物模拟的前提。

为了检验模式对形势的模拟结果, 利用模式中 DOM2 区域的模拟结果与 NCEP 再分析资料进行了对比, 其中 NCEP 资料通过 MM5 插值到网格点上, 由于 NCEP 资料的时间分辨率是 6 小时, 所以给出的是 9 月 28 日 08 时和 20 时的结果。图 3 是控制试验模拟和 NCEP 资料的地面水平风场分布图, 通过对比可以发现, 两者的水平风场分布形势十分一致: 在 28 日 08 时, 在模拟区域范围内均为一致的偏北风, 珠江三角洲地区受陆风控制; 到了晚上 20 时, 广东沿海地区受海风影响, 珠江三角洲地区为偏南风, 海陆风的日变化比较明显, 这说明模式成功地模拟出了海陆风的变化过程。

在我们的敏感性试验方案中背景风是多层的, 在 NCEP 资料影响陆风的多层背景风中, 作用较大的是海陆风上层与其相邻(如 850 hPa 层)的背景风, 从图 4c、d 上可以看出, 无论陆风还是海风盛行期间, 850 hPa 的背景风都是东北风; 在模拟的 850 hPa 结果中(图 4a、b)背景风是东北风这一点也模拟出来了。

图 5 是珠江口附近监测站(位置如图 1)观测的温度、风速和风向随时间变化结果及模拟值。从图 5 中可以看出, 模式较好地模拟出了温度的日变化特征, 模拟的温度值与观测值比较吻合。对风速的模拟, 在大部分监测站, 模式模拟风速大小和变化趋势与观测值比较符合, 风速为 $1 \sim 5 \text{ m/s}$, 在深水埗站模拟的风速比观测值较大, 这可能与模式的初始场有关。模式较成功地模拟出了监测站风向的变化, 包括海陆风的日变化, 这对于研究离岸背景风和海陆风对灰霾天气的影响是非常重要的。

表 1 是模拟值与观测值对比的一些统计结果。主要包括线性相关系数 R , 平均偏差 B 、平均绝对误差 G 、平方根误差 S 和平均相对误差 F ^[29], 其

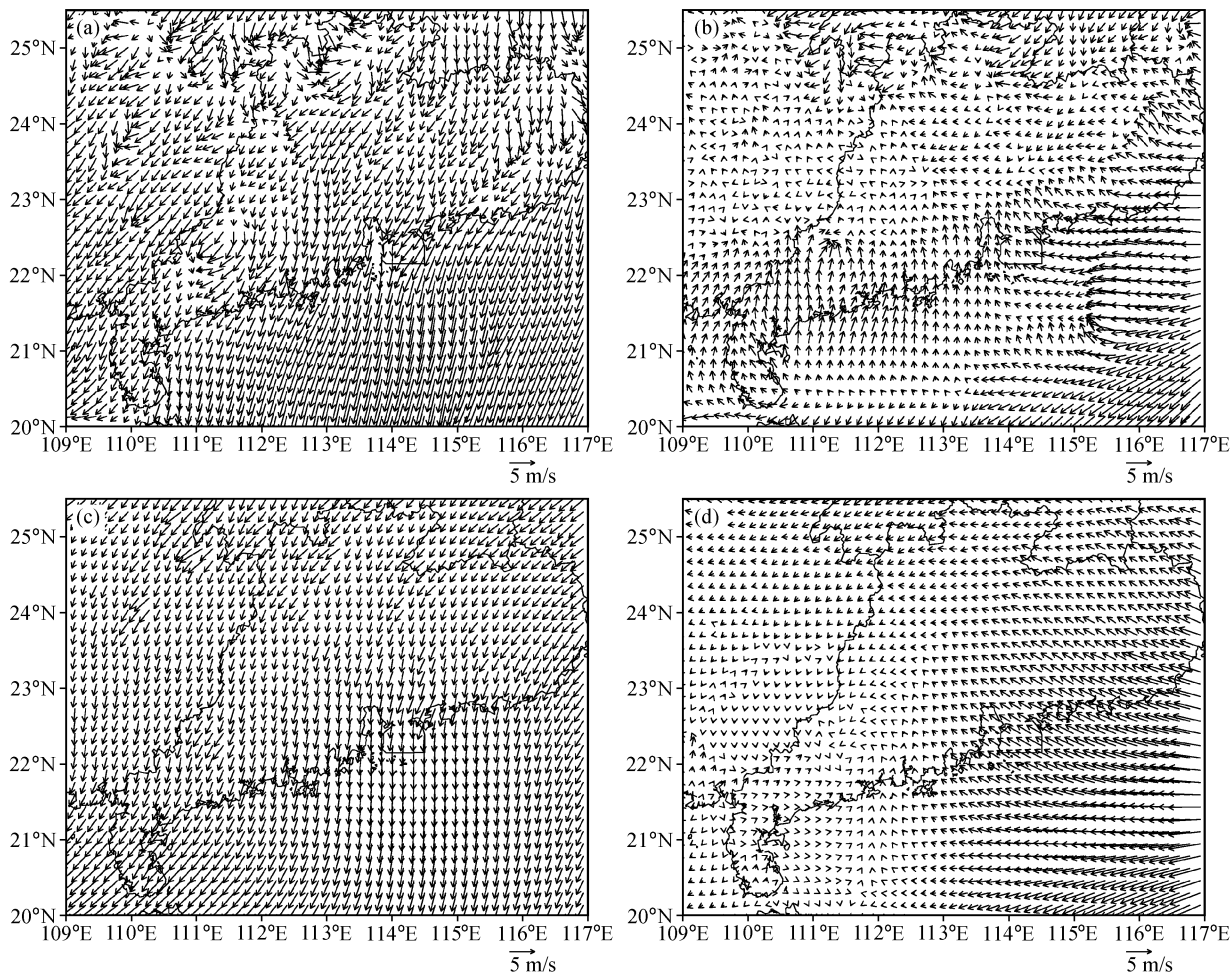


图3 9月28日控制试验模拟结果(a、b)和NCEP资料计算(c、d)的地面水平风场分布图:(a、c)08时;(b、d)20时
Fig. 3 The simulated (a, b) and NCEP (c, d) wind fields at surface for (a, c) 0800 LST and (b, d) 2000 LST on 28 Sep 2004

中:

$$B = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (C_{j,k}^m - C_{j,k}^o), \tag{1}$$

$$G = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N |C_{j,k}^m - C_{j,k}^o|, \tag{2}$$

$$S = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \left[\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (C_{j,k}^m - C_{j,k}^o)^2 \right]^{1/2}, \tag{3}$$

$$F = \frac{1}{MN} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N \frac{|C_{j,k}^m - C_{j,k}^o|}{(C_{j,k}^m + C_{j,k}^o)/2}, \tag{4}$$

式中, C^m 和 C^o 代表模式计算浓度和观测浓度, M 为观测站点数, N 为观测时次数。

由表1可以看出,模拟温度的平均值比观测平均值偏低0.4℃,两者有很好的相关,线性相关系数(R)为0.88,平均偏差 B 、平均绝对误差 G 、平方根误差 S 和平均相对误差 F 也都很小,分别为

表1 模拟值与观测值对比的统计结果				
Table 1 Quantitative performance statistics for temperature, wind speed, wind direction and PM ₁₀ concentration				
	温度	风速	风向	PM ₁₀ 浓度
观测平均值	28.6℃	1.99 m/s	167.3度	96.2 μg/m ³
模拟平均值	28.2℃	2.57 m/s	116.6度	79.9 μg/m ³
相关系数	0.88℃	0.52 m/s	0.24度	0.32 μg/m ³
平均偏差	0.65℃	0.58 m/s	-50.73度	-16.38 μg/m ³
平均绝对误差	1.15℃	1.04 m/s	104.8度	27.97 μg/m ³
平方根误差	1.41℃	1.29 m/s	142.89度	35.99 μg/m ³
平均相对误差	4.1%	51.7%	74.6%	28.7%

0.65℃、1.15℃、1.41℃和4.1%,这进一步说明温度的模拟与实测有很好的 consistency。风速模拟平均值略高于观测平均值,相关系数为0.52,也有很好的相关性,平均偏差 B 、平均绝对误差 G 和平方根误差 S 的值分别为0.58 m/s、1.04 m/s和1.29 m/s,

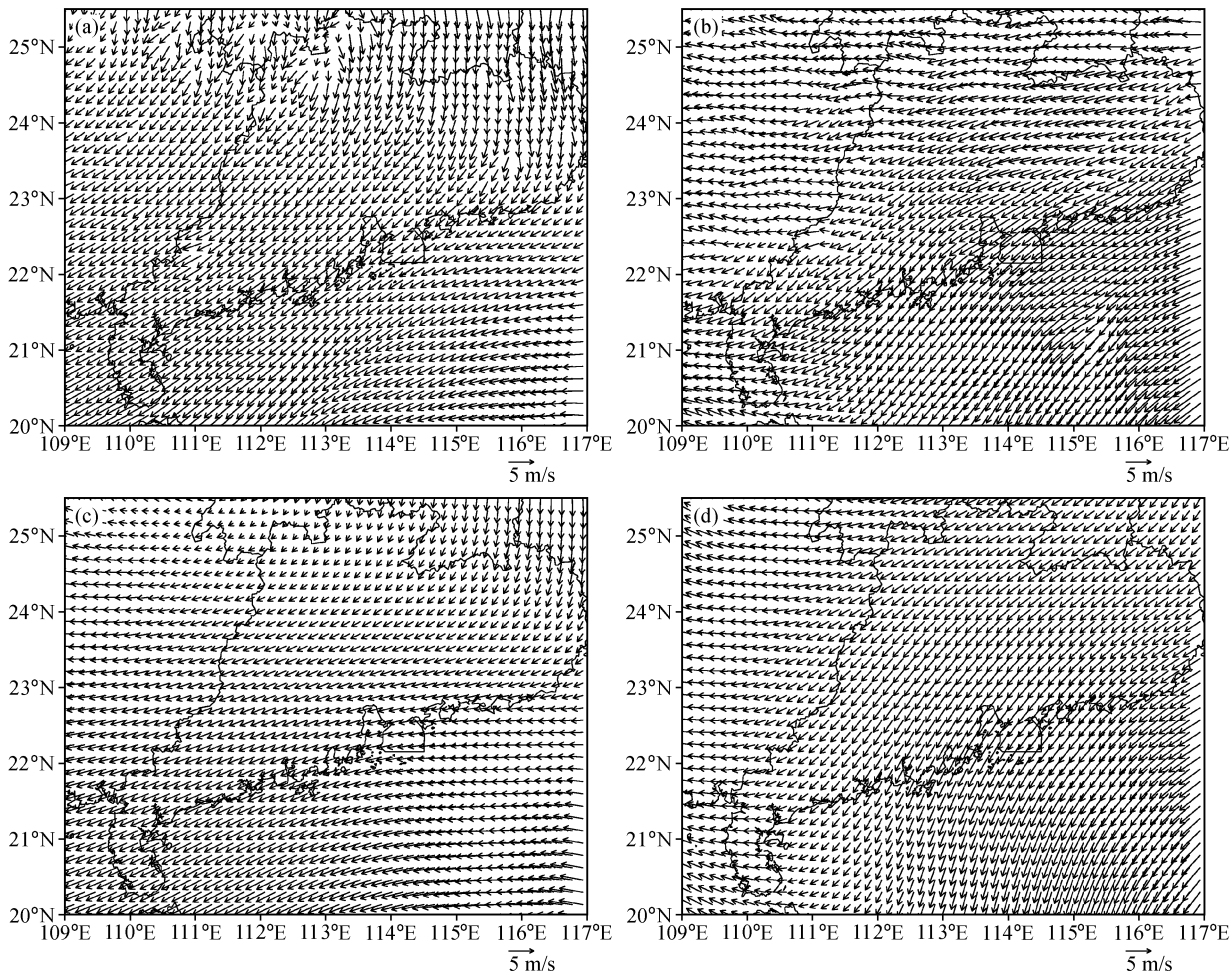


图 4 同图 3，但为 850 hPa 的风场分布
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 850-hPa wind

平均相对误差的值比较大，为 51.7%。对于风向，模拟平均值与观测平均值相关系数比较小，为 0.24；平均偏差 B 、平均绝对误差 G 、平方根误差 S 和平均相对误差 F 分别为 -50.73 度、104.8 度、142.89 度和 74.6%，这是由于地形、建筑物等对风向的局地影响所致，只能模拟出风向大致的变化趋势和总的规律。

4.1.2 PM_{10} 的浓度

珠江三角洲地区集中了水泥、陶瓷、发电等许多大型工厂，这些工厂排放的黑炭和煤尘等颗粒物严重影响了珠江三角洲地区空气质量和能见度。下面，我们对比分析了澳门和香港共四个监测站结果。图 6 是模拟和观测 PM_{10} 浓度随时间变化图，模拟结果与观测值的变化趋势比较一致，但由于空气质量模式系统自身和排放源资料等引起的误差，

所以模拟值与观测值还存在一定的差异，几个站点模拟的平均值为 $79.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，比观测平均值 $96.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 偏小（表 1），平方根误差为 $35.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均相对误差分为 28.7%。虽然如此，我们认为模拟的结果还是证明 Models-3 模式系统的模拟对于这次灰霾天气的研究还是可用的。从图 6 上可以看出，9 月 26 日之后 PM_{10} 浓度逐渐升高，9 月 28 日左右是这次灰霾过程的峰值，模拟的结果也是如此，特别是 28 日澳门 PM_{10} 浓度非常高。在 9 月 29 日之后 PM_{10} 浓度迅速下降，这些都和观测事实十分一致。需指出的是澳门模拟值比实际观测值低很多，这是因为观测站的位置在澳门大潭山，大潭山周围是海域，所以模式中澳门是一个区域（ $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ ），它基本上是海洋区，显然海洋区要比陆地 PM_{10} 浓度小得多。

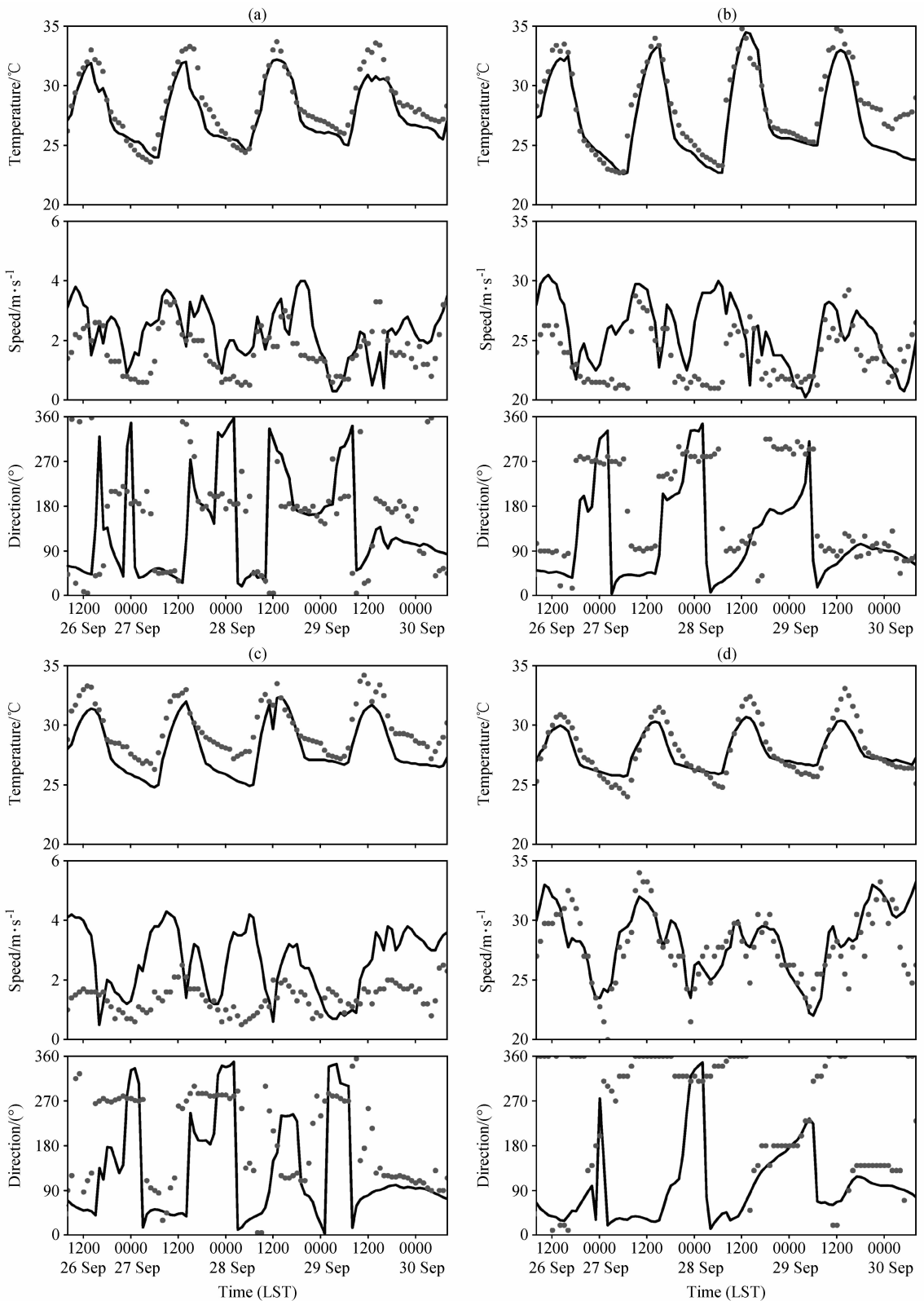


图 5 2004 年监测站风速、风向和温度的模拟值(实线)与观测值(圆点)对比图: (a) 元朗; (b) 沙田; (c) 深水埗; (d) 澳门大潭山; (e) 广州; (f) 深圳

Fig. 5 Time series of simulated (solid line) and observed (dot) temperature, wind speed and wind direction at (a) Yuen Long, (b) Shatian, (c) Sham Shui Po, (d) Macao Taipa Grande, (e) Guangzhou, (f) Shenzhen in 2004

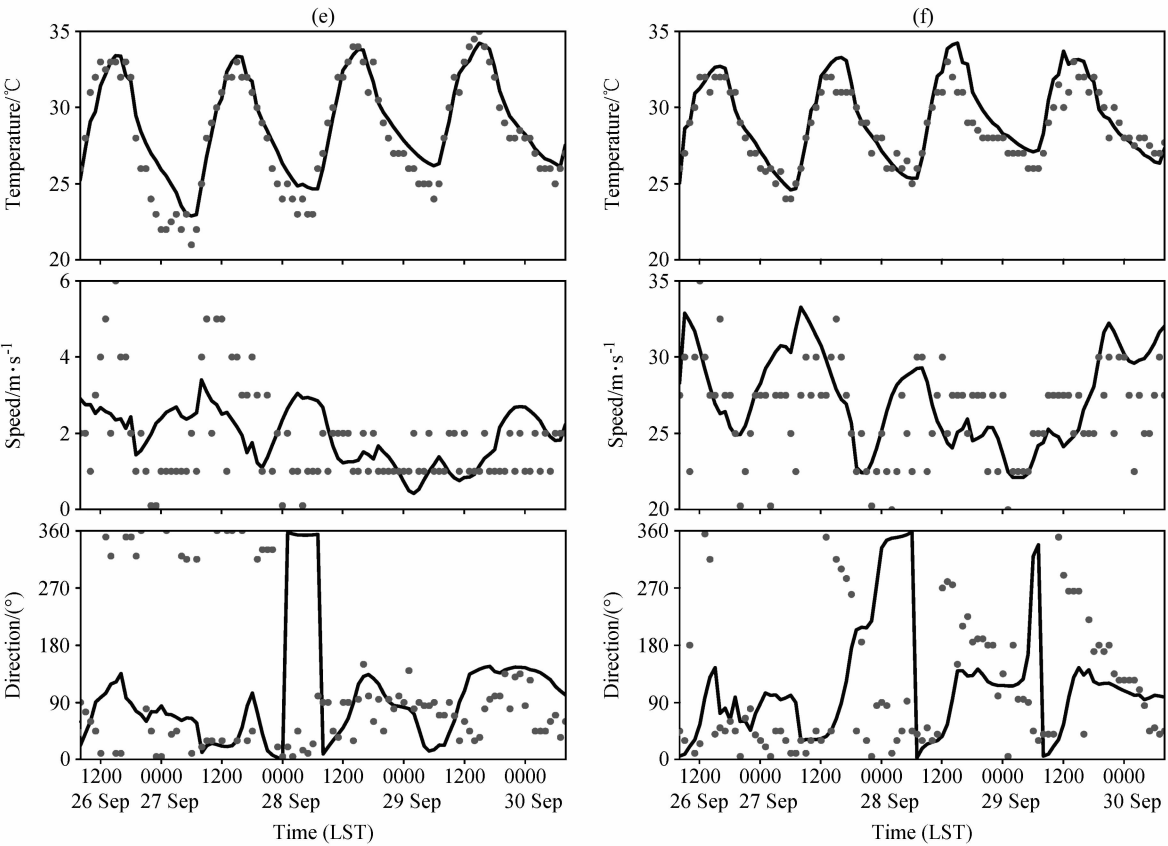


图 5（续）
Fig. 5（Continued）

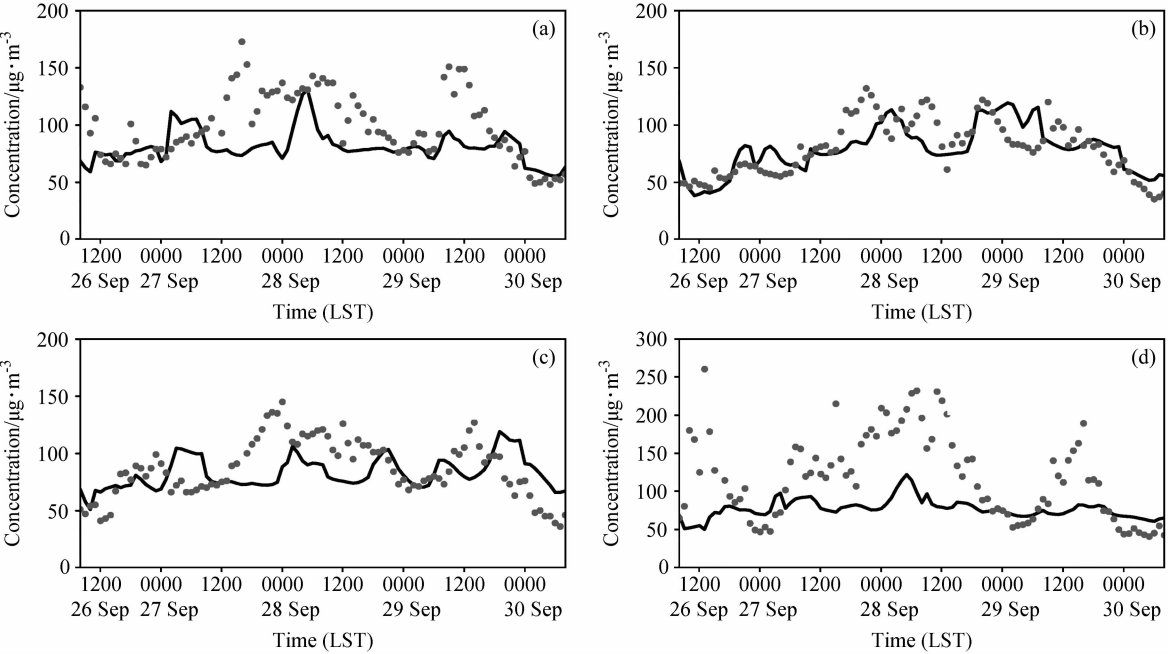


图 6 四个监测站模拟（实线）和观测（圆点）PM₁₀浓度随时间变化图：（a）元朗；（b）沙田；（c）深水埗；（d）澳门大潭山
Fig. 6 Time series of simulated (solid line) and observed (dot) PM₁₀ concentration at (a) Yuen Long, (b) Shatian, (c) Sham Shui Po, (d) Macao Taipa Grande

4.2 离岸型背景风和海陆风对灰霾天气的影响

用 9 月 28 日陆风和海风情况下地面 PM_{10} 的浓度和风场来分析离岸型背景风和海陆风对灰霾天气的影响。

由于背景风与陆风风向相近, 陆风出现较早, 海风出现较晚, 所以, 我们分别用 06 时和 23 时代表陆风和海风的情况。图 7a 是 9 月 28 日 06 时陆风情况下地面 PM_{10} 浓度和风场模拟结果。此时整个珠江三角洲区域为偏北风, 离岸型背景风与陆风风向相近, 最大风速为 4 m/s 左右。在陆风维持的情况下, 偏北风将内陆源区(如广州地区)的 PM_{10} 输送到沿海地区, 造成了整个内陆排放源区域的 PM_{10} 浓度大大降低。由于海洋面混合层高度较低(图略), PM_{10} 在较低的边界层内得到积累, 导致沿海城市及近海海面 PM_{10} 浓度比较高, 在珠江口两侧沿海处为 PM_{10} 浓度的大区, 特别是西侧, PM_{10} 可超过 $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 这也是澳门出现特别严重灰霾天气的原因。

在离岸型背景风的影响下, 海风出现的时间比较晚, 中午的时候在海岸线附近开始发展, 珠江口两岸的监测站转为偏南风(图 5)。随着海风的逐渐增强, 海风向内陆渗入距离也逐渐加大。由于珠江三角洲地区海岸线非常复杂, 不同地方海风深入内陆距离也不一样, 至 28 日 23 时, 海风还很明显, 这与 Ding 等^[9]的研究结果十分一致。图 7b 是海风

情况下的地面 PM_{10} 浓度和风场模拟结果, 从图上可以看出, 在香港以东来自大亚湾的海风向内陆可深入 60~80 km, 而在珠江口以西因为地势较平坦, 海风深入内陆约 100~120 km。深入内陆的海风与离岸型背景风在 23.2°N 附近形成一个辐合中心。值得注意的是, 由于离岸背景风的影响, 海风比较弱, 所以海风对灰霾天气的维持是比较有利的, 在海风维持的情况下, 如广州、深圳、香港等污染源区都是 PM_{10} 的高值区, 也就是说如果海风比较强, 海风对 PM_{10} 的扩散有一定的帮助, 但如果在离岸型背景风和海风相反的情况下, 海风比较小, 对 PM_{10} 的扩散影响就不大。

5 敏感性试验结果分析

为了进一步研究背景风和海陆风对这次灰霾天气影响的相互作用, 我们设计了一个敏感性试验。需指出的是, 数值试验有它很大的局限性, 完全去除背景风的影响是不可能的, 我们在初始场里去除背景风的效果其实只是大大减弱背景风的影响而已。为了与模拟结果进行对比, 下面仍然用 9 月 28 日陆风和海风情况下地面 PM_{10} 的浓度和风场来进行分析。图 8 与图 7 相似, 但为敏感性试验的结果。在 28 日 06 时(图 8a), 减弱背景风场的作用时, 偏北风强度明显减小, 弱的偏北风不能把 PM_{10} 输送到海洋面上。同时珠江三角洲内陆区域内陆风

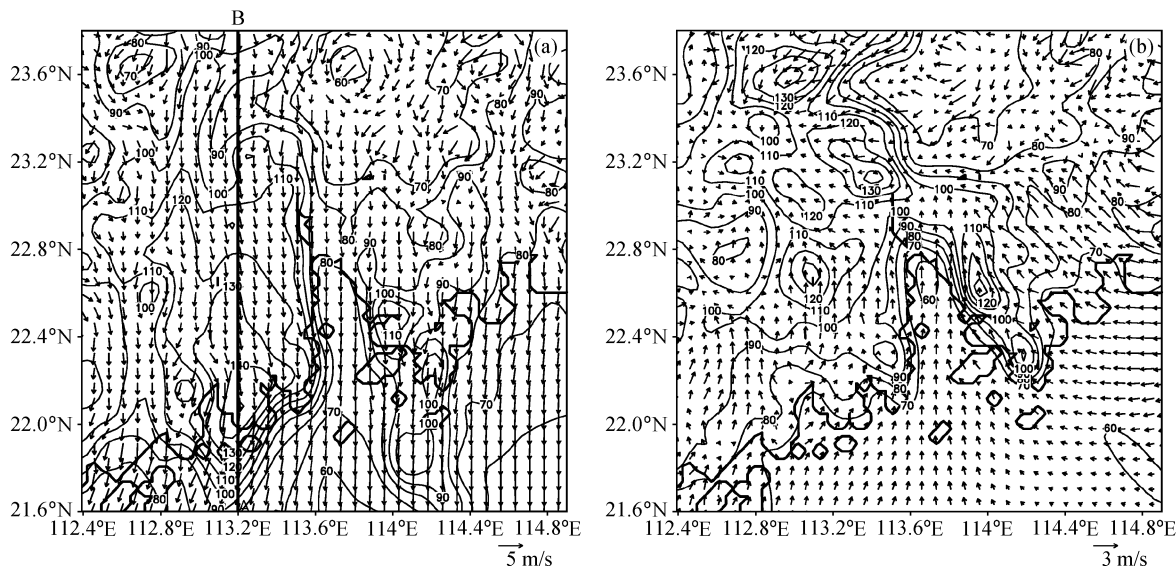


图 7 2004 年 9 月 28 日控制试验模拟的地面 PM_{10} 浓度(单位: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)和风场模拟: (a) 06 时; (b) 23 时

Fig. 7 The simulated PM_{10} concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) and wind fields at surface in the model experiment for (a) 0600 LST, (b) 2300 LST on 28 Sep 2004

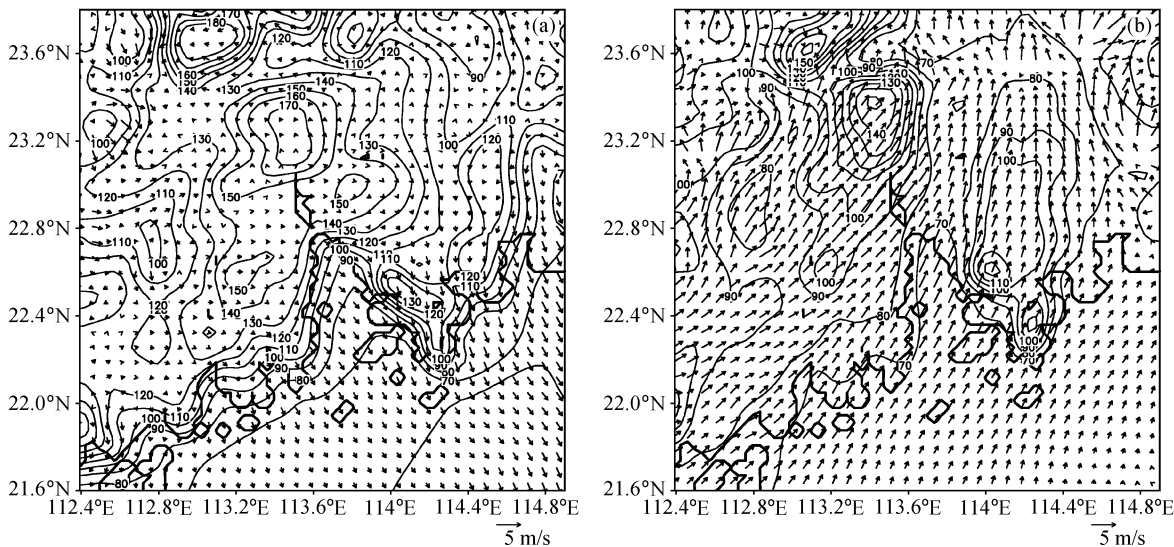


图8 同图7, 但为敏感性试验

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the sensitivity experiment

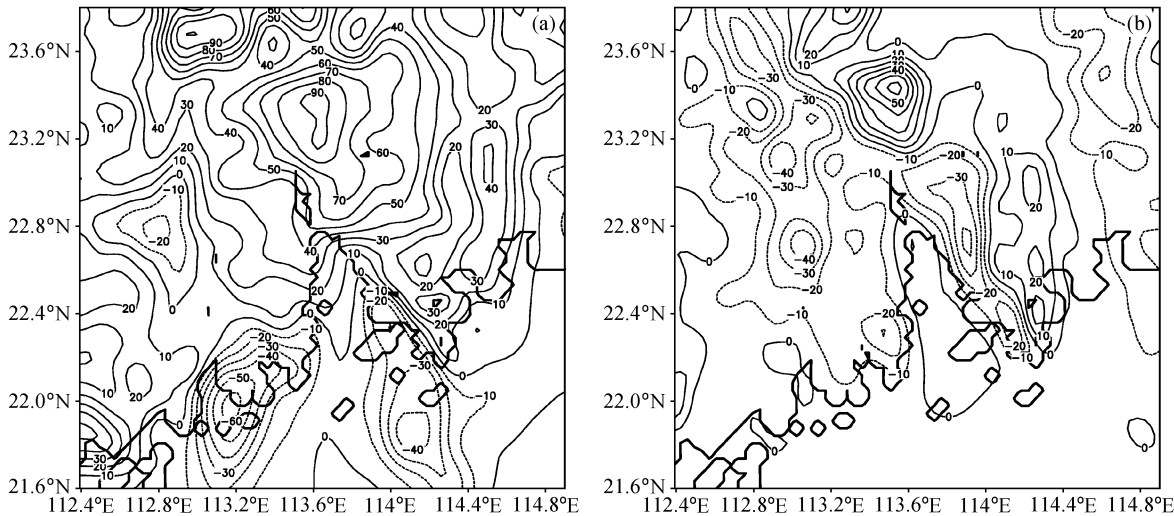


图9 2004年9月28日敏感性试验与模拟试验地面PM₁₀浓度的差值图(单位: μg/m³): (a) 06时; (b) 23时

Fig. 9 Differences of PM₁₀ concentration (μg/m³) between the sensitivity and model experiments for (a) 0600 LST, (b) 2300 LST on 28 Sep 2004

风速很小, 导致颗粒物在排放源区附近积聚, PM₁₀浓度非常高, 其中在广州附近最大浓度超过170 μg/m³。从敏感性试验与模拟试验PM₁₀浓度的差值图[敏感性试验减模拟试验(下同), 图9a]上可以看出, 在内陆源区内普遍是正值, 最大正值中心可达90 μg/m³, 即离岸型背景风在陆风情况下对珠江三角洲内陆地区污染物的清除起着非常重要的作用。在沿海地区附近为浓度负值中心, 这是因为在模拟结果中陆风和背景风共同作用把PM₁₀浓度输送到沿海地区造成的。从图8b可以看出,

在28日23时, 减弱离岸型背景风场后, 海风强度明显变大, 风速最大可以达到6.5 m/s, 在珠江口西岸海风向内陆深入距离最远160 km, 较强的海风有助于PM₁₀的扩散, 使珠江三角洲内陆地区的污染物浓度减小, 空气质量略有改善, 在珠江口两岸都是如此。在海风的北界由于海风的减弱, PM₁₀浓度有所增加。由图9b也可以看出, 模拟试验与敏感性试验的差值在城市群区域范围内都是负值, PM₁₀浓度减小。

综上所述, 不难看出对珠江三角洲灰霾天气来

说, 离岸型背景风和海陆风的相互作用对灰霾天气的成因和分布都有密切的关系。

6 结论与讨论

本文主要利用空气质量模式系统 Models-3 (MM5/SMOKE/CMAQ) 对 2004 年 9 月 26~30 日期间珠江三角洲地区出现的一次灰霾天气过程进行数值研究, 并讨论了离岸背景风和海陆风对这次灰霾天气的影响。

(1) 中尺度气象模式 MM5 较好地模拟了珠江三角洲地区这次灰霾天气的离岸背景风和海陆风的风速和风向的变化。多尺度空气质量模式 CMAQ 模拟出了 PM_{10} 浓度的变化, 与观测值比较一致。

(2) 从数值模拟试验的结果来看, 对这次灰霾

天气过程, 在陆风维持的情况下, 由于离岸型背景风与陆风风向一致, 将 PM_{10} 输送到海边, 造成灰霾天气主要出现在沿海城市和近海海面, 尤其是澳门地区出现了 PM_{10} 的极端高值。而在海风维持的情况下, 由于海风较小, 整个珠江三角洲地区灰霾天气都比较严重。

(3) 敏感性试验结果表明离岸背景风和海陆风的相互作用对灰霾天气生成和分布有很密切的关系。

(4) 关于海陆风的垂直结构对污染物 PM_{10} 浓度的影响, 我们做了初步的分析, 图 10 是沿 113.2°E (即图 7 中的 AB 线) 海陆风的流场及 PM_{10} 浓度的垂直剖面图, 阴影部分为 PM_{10} 浓度。从图 10a 可以看出, 在 28 日 06 时, 陆风发生于比

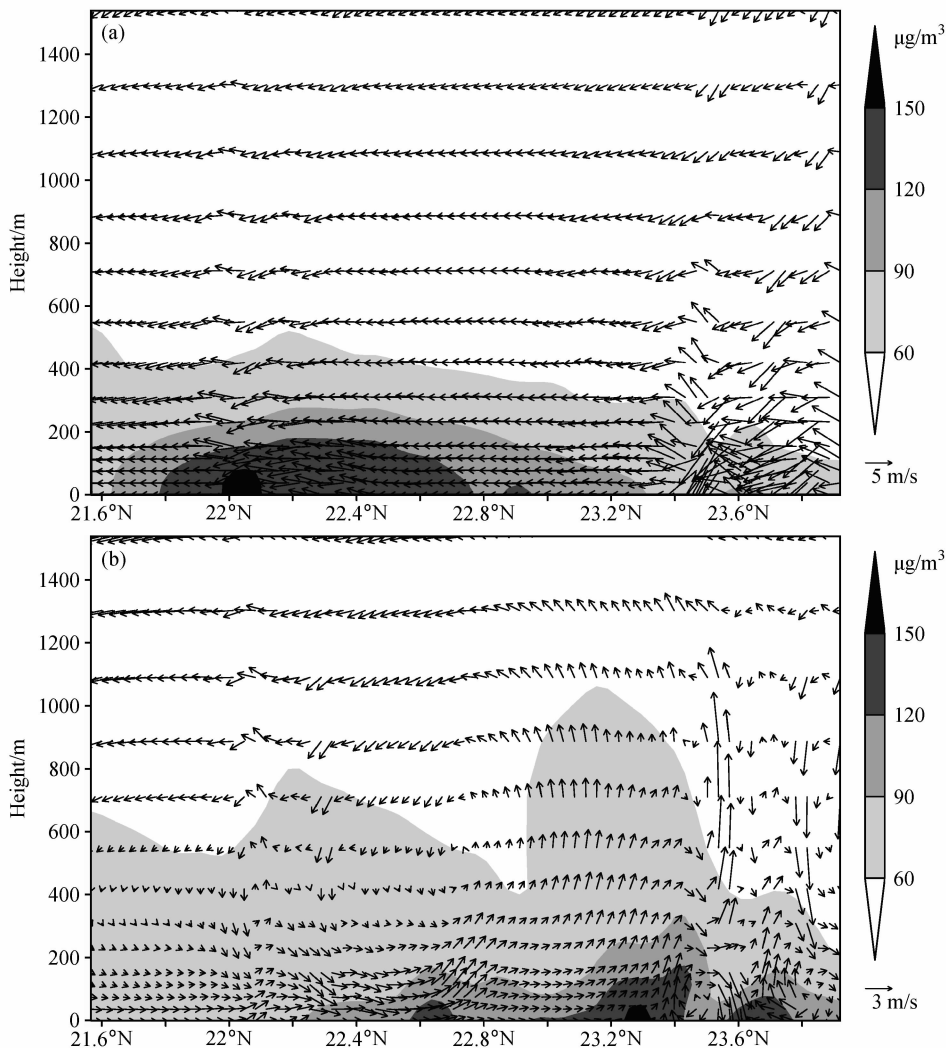


图 10 2004 年 9 月 28 日 PM_{10} 浓度 (阴影) 沿 113.2°E (图 7a 中 AB 线) 的垂直分布: (a) 06 时; (b) 23 时。箭头: 风矢量

Fig. 10 Vertical distribution of PM_{10} concentration (shading) along 113.2°E at (a) 0600 LST, (b) 2300 LST on 28 Sep 2004. Arrows: wind vectors

较低的高度, PM_{10} 主要位于 400~600 m 以下的边界层内, 近地面 PM_{10} 浓度最大; 随高度升高, PM_{10} 浓度逐渐降低, 这与冯业荣等^[23] 研究结果一致。受陆风环流的影响, PM_{10} 被向南输送到沿海地区和海洋面上, 形成一个高值中心。到了晚上 23 时 (图 10b), 海风锋有明显的上升气流, 由于海风温度较高, 所以海风区对流和湍流较强, 可以将 PM_{10} 向上的输送比陆风要高。积聚在海洋面及沿海地区的 PM_{10} 被海风环流向内陆输送, 积聚在较低的边界层内, 逐渐积累, 在城市群区域形成高浓度中心。对此我们还要进行更仔细的分析 and 数值试验。

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和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 (References)

- [1] Ramanathan V, Crutzen P J, Mitra A P, et al. The Indian Ocean experiment and the Asian brown cloud. *Current Science*, 2002, **83** (8): 947~955
- [2] 吴兑. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. *气象*, 2005, **31** (4): 3~7
Wu D. A discuss on the difference between haze and fog and the warning of ash haze weather. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2005, **31** (4): 3~7
- [3] 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
Wu D, Bi X Y, Deng X J, et al. Effect of atmospheric haze on the deterioration of visibility over the Pearl River Delta. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (4): 510~517
- [4] 张立凤, 张铭, 林宏源. 珠江口地区海陆风系的研究. *大气科学*, 1999, **23** (5): 581~589
Zhang L F, Zhang M, Lam P. Study of sea-land breeze system in the mouth area of the Zhujiang River. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1999, **23** (5): 581~589
- [5] Lin W S, Wang A Y, Wu C S, et al. A case modeling of sea-land breeze in Macao and its neighborhood. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (6): 1231~1240
- [6] 佟华, 陈仲良, 桑建国. 城市边界层数值模式研究以及在香港地区复杂地形下的应用. *大气科学*, 2004, **28** (6): 957~978
Tong H, Chan J C L, Sang J G. A study of urban boundary layer model and its application in the Hong Kong area. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (6): 957~978
- [7] Liu H P, Chan J C L. Boundary-layer dynamics associated with a severe air pollution episode in Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 2002, **36** (12): 2013~2025
- [8] Liu H P, Chan J C L. An investigation of air pollution patterns under sea-land breeze during a severe air pollution episode in Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 2002, **36** (4): 591~601
- [9] Ding A J, Wang T, Zhao M, et al. Simulation of sea-land breezes and a discussion of their implications on the transport of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China. *Atmos. Environ.*, 2004, **38** (39): 6737~6750
- [10] Helmis C G, Papadopoulos K H, Kalogiros J A, et al. Influence of background flow on evolution of Saronic Gulf sea breeze. *Atmos. Environ.*, 1995, **29** (24): 3689~3701
- [11] Kallos G, Kassomenos P, Piekle R. Synoptic and mesoscale weather conditions during air pollution episodes in Athens, Greece. *Bound.-Layer Meteor.*, 1993, **62** (1): 163~184
- [12] 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用. *大气科学*, 2006, **30** (5): 778~790
Wang Z F, Xie F Y, Wang X Q, et al. Development and application of nested air quality prediction modeling system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (5): 778~790
- [13] Byun D W, Ching J K S. Science algorithms of the EPA models-3 community multi-scale air quality (CMAQ) modeling system. NERL, Research Triangle Park. NC. 1999. 425pp
- [14] Carolina Environmental Program. SMOKE v2.2 User's Manual, University of North Carolina at Chapel Hill, 2005. 426pp
- [15] Zhang Y, Liu P, Queen A, et al. A comprehensive performance evaluation of MM5-CMAQ for the summer 1999 Southern Oxidants Study episode. Part II: Gas and aerosol predictions. *Atmos. Environ.*, 2006, **40** (26): 4839~4855
- [16] Eder B, Yu S. A performance evaluation of the 2004 release of Models-3 CMAQ. *Atmos. Environ.*, 2006, **40** (26): 4811~4824
- [17] Arnold J R, Dennis R L. Testing CMAQ chemistry sensitivities in base case and emissions control runs at SEARCH and SOS99 surface sites in the southeastern US. *Atmos. Environ.*, 2006, **40** (26): 5027~5040
- [18] Zhang M G, Uno I, Carmichael G R, et al. Large-scale structure of trace gas and trace gas and aerosol distributions over the western Pacific Ocean during TRACE-P. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108** (D21), 8820, doi: 10.1029/2002JD002946
- [19] 张美根, 徐永福, Uno I, 等. 东亚地区春季二氧化硫的输送和转化过程研究 I. 模式及其验证. *大气科学*, 2004, **28** (3): 321~329
Zhang M G, Xu Y F, Uno I, et al. A study of sulfur transport and transformation over East Asia in the springtime. I. Model system and its verification. *Chinese Journal of Atmos-*

- pheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 321~329
- [20] Zhang M G, Uno I, Yashida Y, et al. Transport and transformation of sulfur compounds over East Asia during the TRACE-P and ACE-Asia campaigns. *Atmos. Environ.*, 2004, **38** (40): 6947~6959
- [21] 张美根. 多尺度空气质量模式系统及其验证 I. 模式系统介绍与气象要素模拟. 大气科学, 2005, **29** (5): 805~813
Zhang M G. A multi-scale air quality modeling system and its evaluation. I. Introduction to the model system and simulation of meteorological parameters. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (5): 805~813
- [22] 张美根. 多尺度空气质量模式系统及其验证 II. 东亚地区对流层臭氧及其前提物模拟. 大气科学, 2005, **29** (6): 926~936
Zhang M G. A multi-scale air quality modeling system and its evaluation. II. Simulation of tropospheric ozone and its precursors in East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (6): 926~936
- [23] Feng Y R, Wang A Y, Wu D, et al. The influence of tropical cyclone Melor on PM_{10} 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
- [24] Wei X L, Li Y S, Lam K S, et al. Impact of biogenic VOC emissions on a tropical cyclone related ozone in the Pearl River Delta region, China. *Atmos. Environ.*, 2007, **41** (36): 7851~7864
- [25] Streets D G, Bond G R, Carmichael S D, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108 (21): 8809. doi: 10.1029/2002JD003093
- [26] U. S. Environmental Protection Agency. User's Guide to MOBILE 6.1 and MOBILE 6.2, 2003. 261pp
- [27] 冯业荣, 王安宇, 吴兑, 等. 华南地区网格化在路机动车污染排放量估算与分析. 热带气象学报, 2007, **23** (3): 229~236
Feng Y R, Wang A Y, Wu D, et al. Calculations and analyses of gridded on-road vehicle emissions over southern China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2007, **23** (3): 229~236
- [28] 澳门地球暨物理气象局. 气象观测月报. 2004, 59pp
Macao Geophysical and Meteorological Bureau. Monthly Result of Observe Meteorological (in Chinese). 2004, 59pp
- [29] Yu S, Eder B, Dennis R, et al. On the development of new metrics for the evaluation of air quality models. *Atmospheric Science Letters*, 2005, **7**: 26~34