

高怡, 张美根, 朱凌云, 等. 2010. 2008年奥运会期间北京地区大气 O₃浓度模拟分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 643-651. Gao Yi, Zhang Meigen, Zhu Lingyun, et al. 2010. Numerical analysis of atmospheric O₃ concentrations over Beijing during the 2008 Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 643-651.

2008年奥运会期间北京地区大气 O₃浓度模拟分析

高怡¹ 张美根¹ 朱凌云^{1,2} 唐贵谦¹

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室, 北京 100029

2 山西省气象科学研究所, 太原 030002

摘要 利用空气质量模式系统 RAMS-CMAQ 模拟分析了 2008 年 8 月北京及周边地区近地面 O₃ 浓度的时空变化。分析结果表明, 模式系统可以较好地模拟污染物以及气象要素的变化特征和区域分布情况; 奥运会期间的污染控制对 O₃ 浓度的降低有明显的作用, 但是在一些有利的气象条件下, O₃ 易达到较高浓度: 8 月 2 日、24 日 14 时 (北京时间) 左右 O₃ 浓度都在 0.22 mg·m⁻³ 以上, 其中 2 日北京地区处于辐合的弱风场中, 风速为 1.5~2.5 m·s⁻¹, 24 日则是处于自南向北的有输送作用的风场中, 风速为 3.5~6.5 m·s⁻¹; 污染控制对北京周边地区的效果要好于北京市区。

关键词 空气质量模式 RAMS-CMAQ O₃

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0643-09 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

Numerical Analysis of Atmospheric O₃ Concentrations over Beijing during the 2008 Olympic Games

GAO Yi¹, ZHANG Meigen¹, ZHU Lingyun^{1,2}, and TANG Guiqian¹

1 *State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Shanxi Province Research Institute of Meteorological Science, Taiyuan 030002*

Abstract RAMS-CMAQ, a coupled regional air quality modeling system, is used to analyze the temporal and spatial variations of the surface O₃ concentration over Beijing and its surrounding areas in August 2008. The result indicates that the model can generally reproduce the main observational feature of O₃ and the wind, and the pollution control can reduce the O₃ concentration noticeably. On the other hand, analysis of the formation of high O₃ concentration indicates that the O₃ concentration would be high under the favorable weather condition, for example, on both 2 August and 24 August, when there is convergence in a weak wind field or the southerly wind transports air pollutions. The impact of the pollution control in August is better in the surrounding areas than in the urban districts of Beijing.

Key words air quality modeling system, RAMS-CMAQ, O₃

收稿日期 2010-04-06 收到, 2010-07-21 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划“京津渤区域复合污染过程、生态毒理效应及控制修复原理”(2007CB407303)和国家科技支撑计划课题“基于环境一号等国产卫星的区域环境空气遥感监测应用技术与软件开发”(2008BAC34B04)

作者简介 高怡, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气物理与大气环境研究。E-mail: gaoyi1886@hotmail.com

1 引言

北京申奥成功后,北京的空气质量备受世人关注。北京市政府向国际奥委会承诺 SO_2 、 NO_2 和地面 O_3 的浓度达到世界卫生组织建议的标准,灰尘颗粒物的浓度基本符合发达国家主要城市的标准。对空气污染的治理,一直都是举办奥运会的重要部分,北京在奥运会期间更是实施了分时段的强制措施来强力保障奥运会顺利进行。这些措施包括加强机动车管理,对车辆进行限行;停止施工工地部分作业;重点污染企业停产和限产;燃煤设施污染减排,减少有机废物等。中国科学院于 2007 和 2008 年建立了以北京市为中心、覆盖北京周边区域的独立立体监测网,与多模式模拟及现场实验模拟相应的预测、预警平台,以定量检验和预测 2008 年第 29 届北京奥运会空气质量保障方案的有效性。

大气 O_3 作为对流层重要的污染物之一,越来越受到人们的关注。近年来,许多观测研究(孙扬等, 2006; Wang Tao et al., 2006; 宗雪梅等, 2007; 安俊岭等, 2008) 都表明,由于夏季的强日照会加剧氮氧化物的化学反应,再加上持续的静稳天气,北京夏季 O_3 易达到较高的浓度。Wang et al. (2008) 对 2007 年 8 月 7 日至 9 月 30 日的北京空气质量进行研究,发现这个时段的 SO_2 、 CO 的浓度低于国家二级空气质量标准,而 PM_{10} 和 O_3 的浓度则高于该标准。多种空气质量模式应用于对 O_3 的研究中(An et al., 2001; Wang et al., 2006; Li et al., 2007; Xu et al., 2008; 王自发等, 2008), 指出了光化学作用主导着 O_3 的生成,气象条件则是非常重要的影响因素。Streets et al. (2007) 利用 CMAQ 模式对奥运场馆处的 O_3 浓度进行模拟分析,指出在控制措施下污染物浓度的减少是必然的,但是即使关闭所有的局地人为源, O_3 的浓度依然会在不利的天气条件下达到高值,另外,离北京较远的源排放对北京的影响也很大。

为了分析评估奥运会期间所采取的污染控制措施以及其他一些因素对 O_3 浓度所产生的影响,以便更好地控制 O_3 浓度,本文应用 RAMS-CMAQ 空气质量模式对 2008 年 8 月奥运会期间

的大气 O_3 浓度的时空变化过程进行模拟,将模拟所得的 O_3 浓度值以及气象要素值同观测值进行了对比,再进一步对两个高浓度 O_3 事件进行分析,并设计了一个敏感性试验,模拟了无污染控制下的 O_3 浓度,以讨论污染控制对 O_3 浓度时空变化的影响。

2 观测数据

污染物浓度的观测数据来自中国科学院在 2008 年奥运会期间进行的北京以及周边地区的观测项目,本文主要用的是奥运村站点的 O_3 浓度数据。 O_3 的观测仪器是美国热电环境设备公司生产的 49C 紫外光度法 O_3 分析仪。气象参数的数据来自于中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔,它位于北京市正北的三环与四环路之间,距三环约 1 km,观测点东边 200 m 处为南北走向的八达岭高速公路,北边 50 m 为东西走向的北土城西路,其上一共设置了 15 个观测平台,每层提供风速、风向、温度以及相对湿度的连续测量。

3 模式介绍

模式系统由 CMAQ (Community Multi-Scale Air Quality modeling system) (Byun and Ching, 1999) 和 RAMS (Pielke et al., 1992) 两部分组成。其中 CMAQ 是美国环保局研制的第三代空气质量预报和评估系统 MODEL-3 的主要运算核心,可进行多种尺度下对流层 O_3 、气溶胶、酸沉降、能见度等的预报和研究。RAMS 则是一个完善的中尺度动力学模式,目前广泛应用于理论研究和天气预报业务中。RAMS 对天气过程和边界层的结构描述较为详细,而且使用的网格也和 CMAQ 中的核心部分 CCTM 所用网格一致,因此使用它提供的气象场以及参数来驱动 CMAQ。RAMS-CMAQ 模式系统先后应用于东亚地区 SO_2 、对流层 O_3 、氮氧化物等的演变过程的相关研究中(张美根, 2005a, 2005b; Gao et al., 2009)。

模拟采用两重网格,其中粗网格水平格距为 64 km,模拟区域覆盖整个东亚地区,细网格水平网格距为 16 km,模拟区域以北京 (40°N , 116°E) 为中心,面积为 $1440 \text{ km} \times 1504 \text{ km}$ 。垂直方向共

分为 15 层，顶高度约为 20.7 km，第一层厚度约为 100 m。模拟时段为 2008 年 6 月 8 日至 8 月 31

日，气象场由 RAMS 模拟产生，其边界条件和初始条件取自 NCAR FNL 资料。人为排放源取自

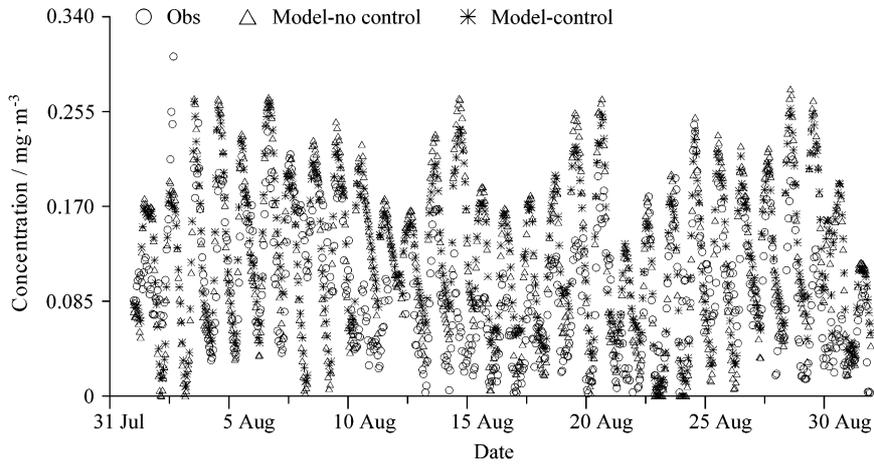


图 1 2008 年 8 月奥运村站观测的 O₃ 小时平均值以及相应的污染控制和无污染控制下的模拟值

Fig. 1 Observed and simulated hourly averaged O₃ concentration with and without emissions control at Aoyuncun station in Aug 2008

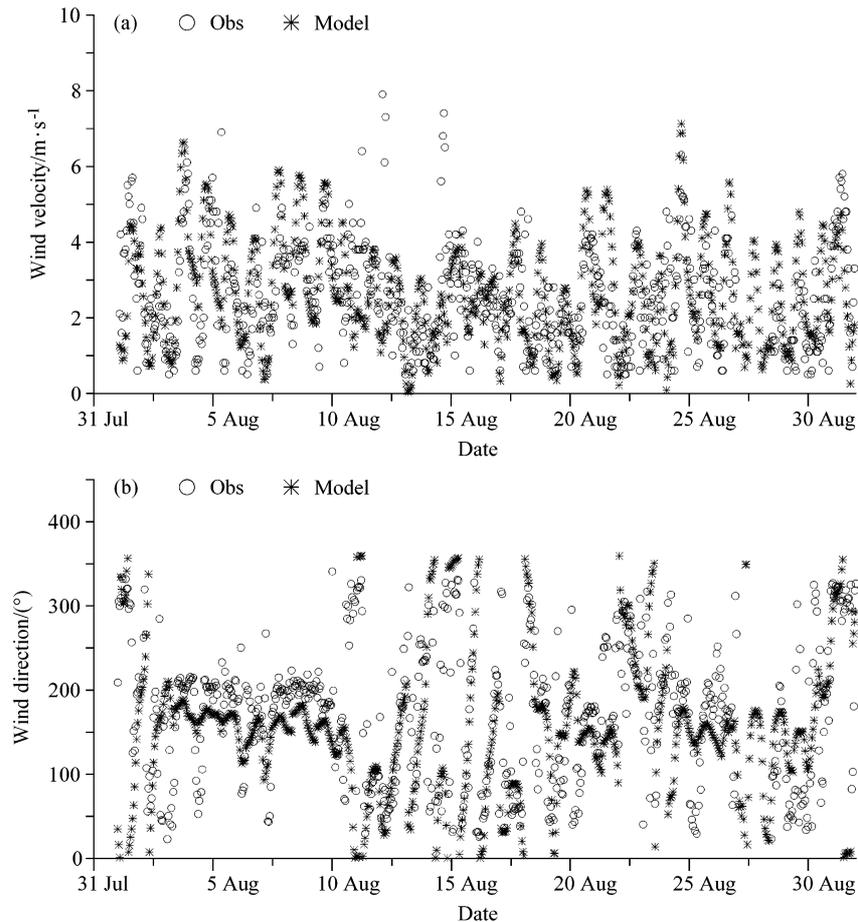


图 2 2008 年 8 月 325 m 气象塔观测的 (a) 风速和 (b) 风向小时平均值以及相应的污染控制下的模拟值

Fig. 2 Observed and simulated hourly averaged (a) wind velocity and (b) wind direction with emissions control at Beijing 325-m Meteorological Tower in Aug 2008

Streets et al. (2003) 的排放清单, 生物质燃烧、植被排放、飞机排放等排放源则采用了 GEIA (Global Emission Inventory Activity) /ACCENT (Atmospheric Composition Change, the European Network of Excellence) 的 $1^\circ(\text{纬度}) \times 1^\circ(\text{经度})$ 排放清单。

4 分析与讨论

4.1 模式验证

在奥运会前及期间, 北京及其周边地区的污染控制历经以下几个阶段: 7月20日至8月7日, 北京市内开始实施机动车单双号限行, 据估算北京地区污染排放降低了30%, 周边地区降低了15%; 8月8~24日是奥运会时段, 在先前的基础上加强了污染控制, 据估算北京地区污染物排放降低了45%, 周边地区降低了30%; 8月25~31日恢复到奥运会开幕式前的控制强度。 O_3 观测资料(见图1)来自于奥运村站, 它位于国家体育场鸟巢附近的中国科学院遥感应用研究所5层楼楼顶; 风速、风向资料则是来自于中国科学院大气物理研究所325 m气象塔(见图2), 观测高度约为102 m。两个站点所处地理位置比较接近, 因此一同用于模式验证中。

图3则是2008年8月观测的 O_3 浓度大于 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (国家空气质量二级标准) 的时间序列图。经过统计, 8月超标的小时数占整个月份的15.5%, 其中8月1~9日、22~28日超标的小时数分别占有超标小时数的61%、30%。8月10~21日超标的小时数很少, 这与从8月8~24日加强污染控制具有一致性, 污染控制是有一

定作用的。比较观测值和模拟值可以发现, 模式很好地反映了 O_3 浓度、风速、风向随时间变化的特征, 除了对 O_3 浓度的模拟在12~18日稍高之外, 模拟值和观测值都具有较好的一致性。因此, 模式系统可以为下面的讨论提供污染物浓度和气象参数。

4.2 高浓度 O_3 事件分析

对奥运村站点8月的 O_3 浓度观测值进行分析, 发现虽然在奥运会期间采取了许多控制措施来降低污染气体的浓度, 但 O_3 的浓度依然有持续高值出现。

从图4可以看到, 8月2日和24日的11~17时(北京时间, 下同)的 O_3 浓度都远远超过了 O_3 浓度的国家二级标准 ($0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 2日的 O_3 最高浓度达到 $0.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 24日则达到 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。同时, 这两个时间段的气温也很高(在 $29 \sim 33^\circ\text{C}$ 之间), 且 O_3 的变化和温度的变化具有一致性, 故选取这两个时段来分析化学过程、输送过

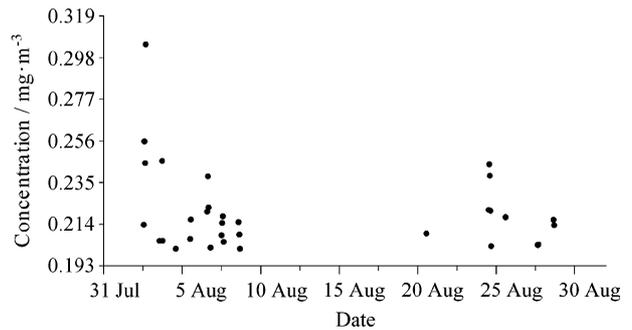


图3 2008年8月观测的 O_3 浓度大于 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的时间序列图

Fig.3 Time series of the hourly averaged O_3 concentration which is more than $0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$

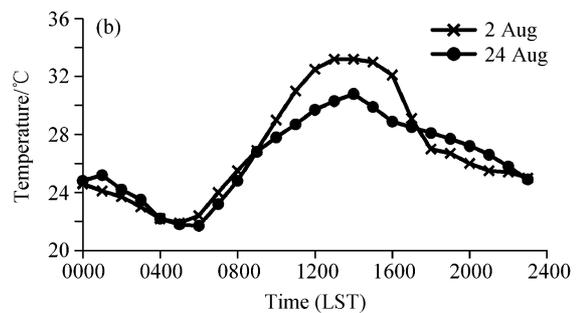
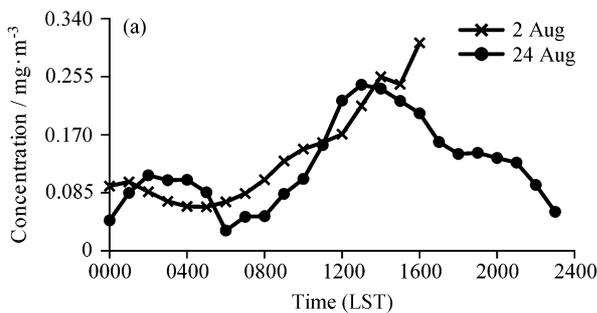


图4 2008年8月2日和24日奥运村站观测的(a)每小时平均 O_3 浓度值和(b)温度值

Fig.4 Observed (a) hourly averaged O_3 concentration and (b) temperature at Aoyuncun station on 2 Aug and 24 Aug 2008

程对模拟区域内的 O₃ 浓度变化过程的影响。

4.2.1 8 月 2 日 O₃ 浓度水平分布

在 11~16 时，太阳辐射比较强，气温比较高，O₃ 在这种有利条件下就会加速生成，如果这时的气象条件不利于高浓度的 O₃ 扩散，其浓度就

会持续增高。从图 5 可以看出，在 11~16 时，北京地区（包括市区、郊区）以及涿州、廊坊、香河等北京的周边地区都处于较弱的风场中，风速较小，大约是 1.5~2.5 m·s⁻¹，风场是辐合的而且在连续的几个小时内都在这一区域缓慢移动甚

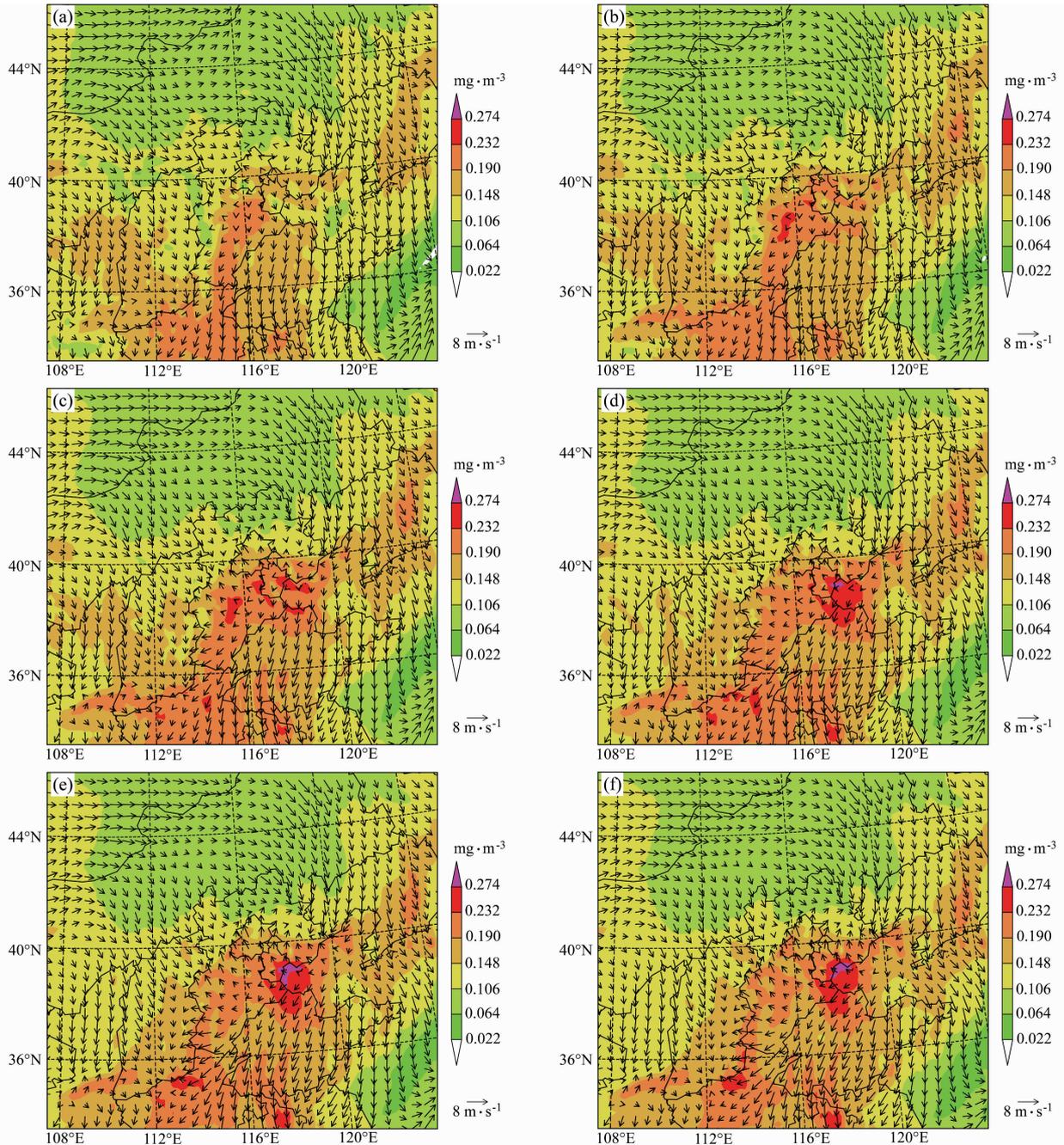


图 5 2008 年 8 月 2 日 11~16 时模式最底层（地面上约 100 m）O₃ 每小时平均浓度的水平分布及其相应的风场：（a）11 时；（b）12 时；（c）13 时；（d）14 时；（e）15 时；（f）16 时

Fig. 5 Horizontal distributions of the hourly averaged O₃ concentration and wind vectors for the lowest model layer (100 m above the ground) during 1100 LST - 1600 LST on 2 Aug 2008; (a) 1100 LST; (b) 1200 LST; (c) 1300 LST; (d) 1400 LST; (e) 1500 LST; (f) 1600 LST

至停滞不前,在这种气象条件下,光化学作用生成的 O_3 不断聚集。11 时浓度较高(在 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上)的区域在廊坊—涿州—保定一带,13 时后,风场辐合最强的部分稍稍向东移动,于是香河、天津一带变为高浓度值区(在 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以

上)。这个过程中, O_3 高浓度值的区域并没有扩大,但是 O_3 浓度却一直在增加。

4.2.2 8 月 24 日 O_3 浓度水平分布

8 月 24 日, O_3 的高值仍然是出现在 12~17 时的温度较高时段内。从图 6 可以看到,北京地

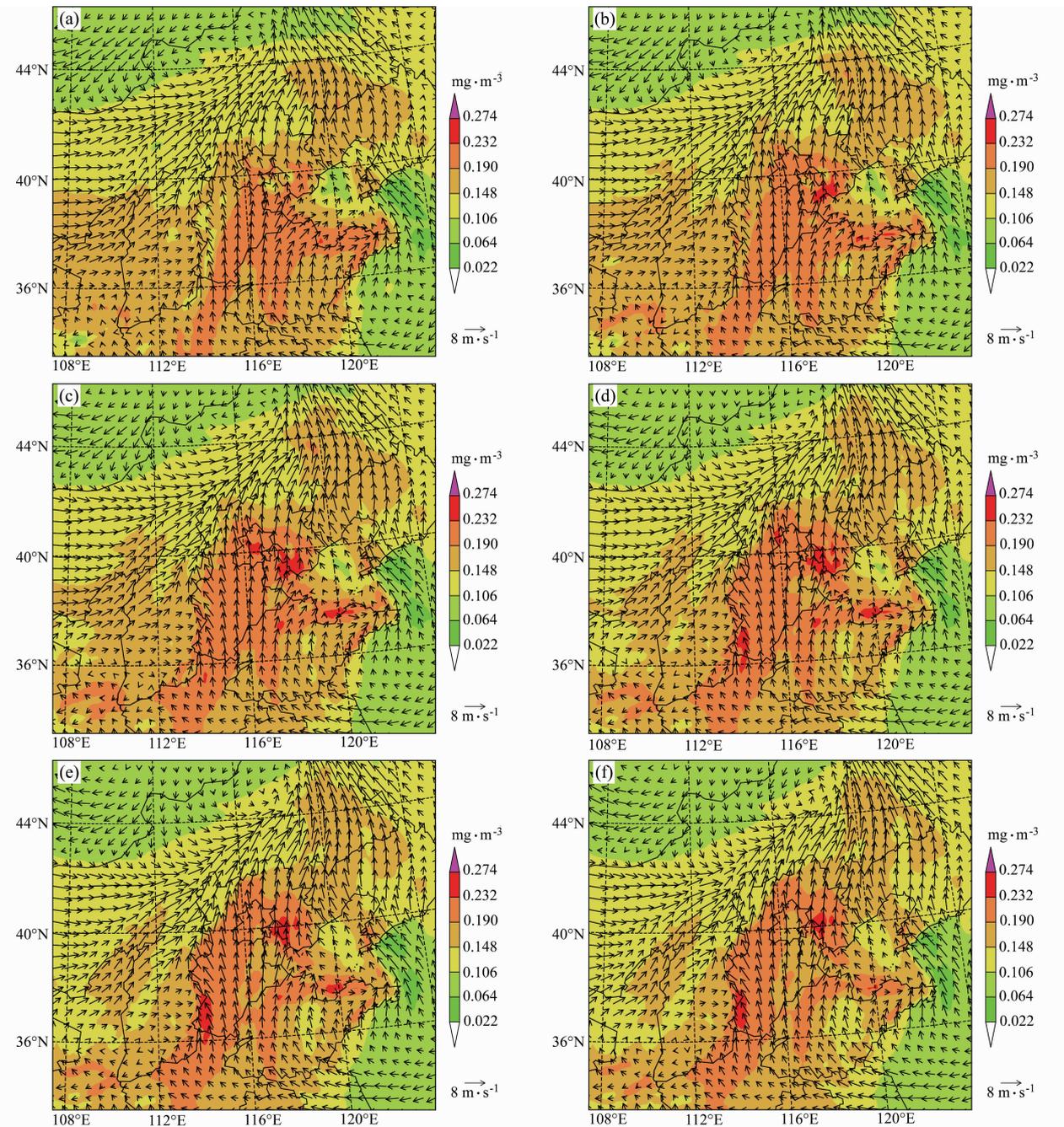


图 6 2008 年 8 月 24 日 12~17 时模式最底层(地面以上约 100 m) O_3 每小时平均浓度的水平分布及其相应的风场: (a) 12 时; (b) 13 时; (c) 14 时; (d) 15 时; (e) 16 时; (f) 17 时

Fig. 6 Horizontal distributions of hourly averaged O_3 concentration and wind vectors for the lowest model layer (100 m above the ground) during 1200 LST–1700 LST on 24 Aug 2008: (a) 1200 LST; (b) 1300 LST; (c) 1400 LST; (d) 1500 LST; (e) 1600 LST; (f) 1700 LST

区及其周围地区处于较强的自南向北的风场中，风速约为 $3.5 \sim 6.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在 12 时，O₃ 浓度较高的区域为北京东南部以及河北省东南部，包括廊坊、涿州、保定、天津等地，在 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以上；14 时后风速加大，整个北京地区以及河北省北部地面 O₃ 浓度都达到了 $0.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，北京市内更是达到 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。到 16 时，河北省东南部的 O₃ 浓度开始下降，北京地区以及河北省北部的浓度依然很高。由此可见，风场可能起到传输的作用，不断地将南部产生的 O₃ 输送到北部，使 O₃ 聚集浓度升高。

由以上分析可知，太阳辐射仍然是与 O₃ 生成密切相关的，此外，辐合稳定的弱风场，或是具有输送作用的风场，都会使得 O₃ 浓度聚集升高。

4.3 污染控制对 O₃ 浓度的影响

排放源是影响 O₃ 浓度的重要因素，具体来

说，即 O₃ 的前体物 NO_x 以及 VOC 浓度的大小会直接决定 O₃ 的生成速率。研究表明 (Meng et al., 1997)，减少 NO_x 和减少 VOC 排放量对降低 O₃ 浓度的贡献是不同的。在 NO_x 浓度较低的情况下，O₃ 的生成速率是对 NO_x 敏感的，而当 NO_x 浓度较高时，O₃ 的生成反而会受到阻碍，这时它与 VOC 关系更为密切 (Chou et al., 2009)。

在敏感性实验中，分别将排放源设置为不控制和控制两种情况，分别模拟这两种情况下 O₃ 的浓度。从图 7 可见，在 8 月 2 日，污染控制时，整个北京及其周边地区的 O₃ 浓度基本都是减小的，而北京市区南部则一直在增加，且增加的区域没有明显移动，面积也没有增加；在 8 月 24 日，除了在 12 时北京市区的 O₃ 浓度有增加且此后浓度增加的区域减小并向北移动外，北京及其周边地区的 O₃ 浓度在污染控制下仍然是基本减小

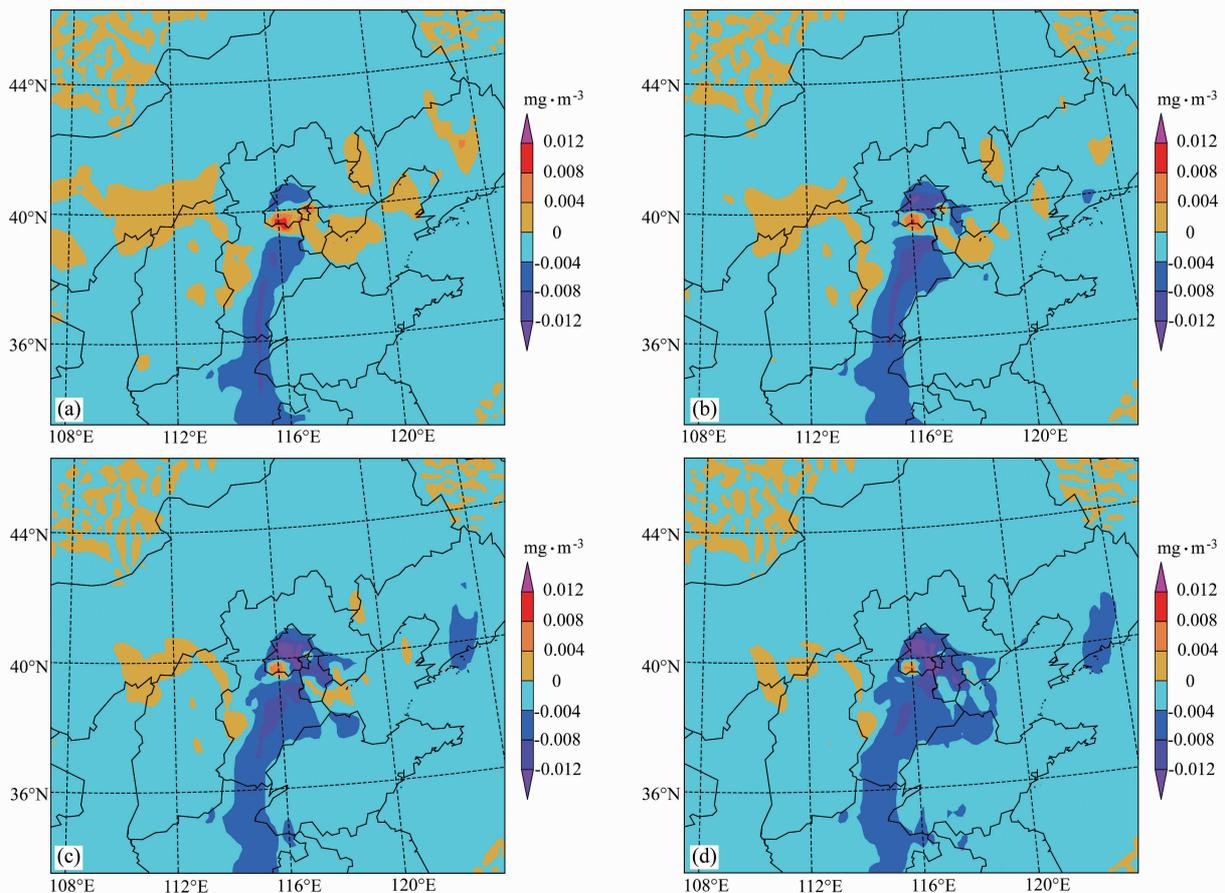


图 7 2008 年 8 月 2 日 11~14 时污染控制和无污染控制下模拟的 O₃ 浓度差异的水平分布：(a) 11 时；(b) 12 时；(c) 13 时；(d) 14 时

Fig. 7 Horizontal distribution of the differences between simulated hourly averaged O₃ concentration with and without emissions control during 1100 LST - 1400 LST on 2 Aug 2008; (a) 1100 LST; (b) 1200 LST; (c) 1300 LST; (d) 1400 LST

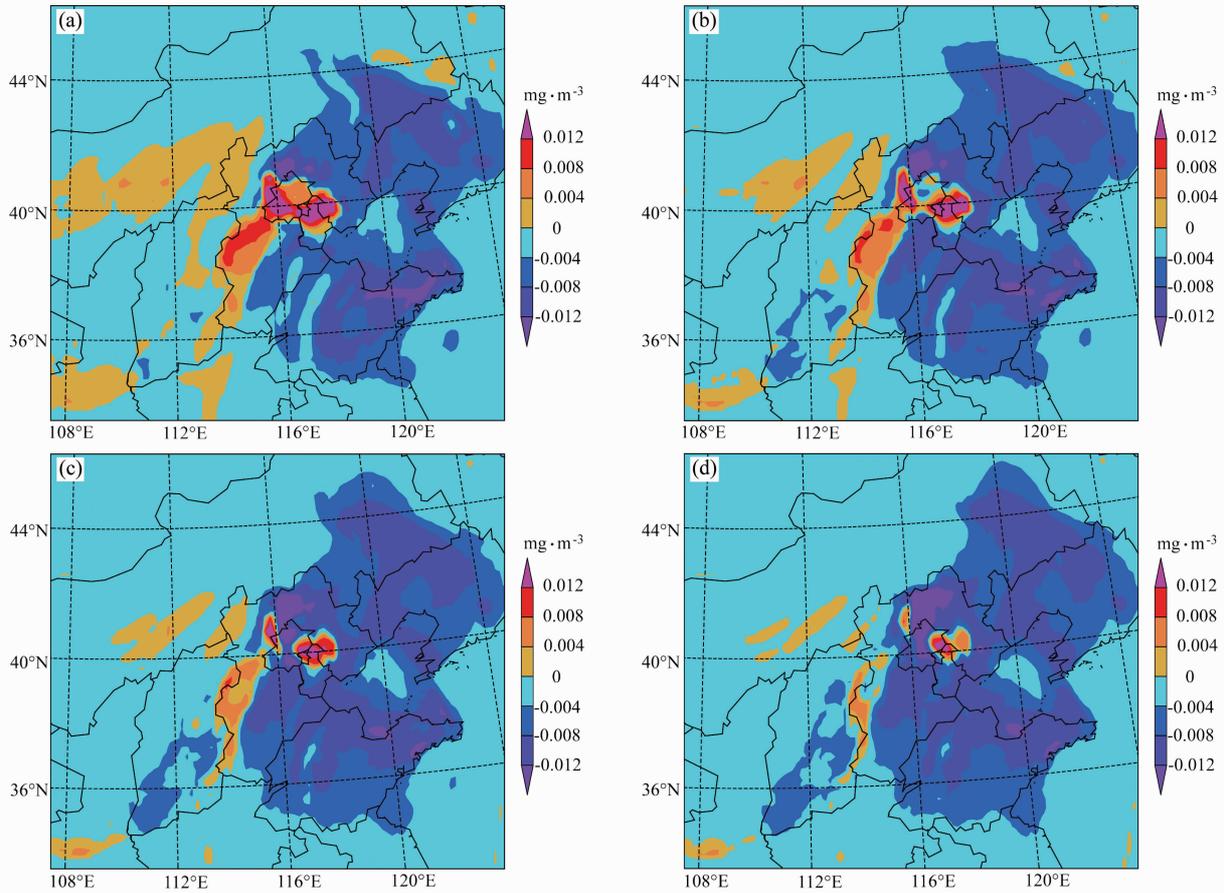


图 8 2008 年 8 月 24 日 12~15 时污染控制和无污染控制下模拟的 O_3 浓度差异的水平分布: (a) 12 时; (b) 13 时; (c) 14 时; (d) 15 时
Fig. 8 Horizontal distributions of the differences between simulated hourly averaged O_3 concentration with and without emissions control during 1200 LST–1500 LST on 24 Aug 2008; (a) 1200 LST; (b) 1300 LST; (c) 1400 LST; (d) 1500 LST

的 (见图 8)。总的来说, 8 月 2 日的污染控制下 O_3 浓度增加的区域面积要小于 8 月 24 日, 且都与各自的风场分布相符: 2 日此区域稳定不扩张, 而 24 日此区域则是随时间向北移动的。

由以上分析可知, 污染控制对北京地区 O_3 浓度的减少具有明显的作用, 其中北京市区偶有 O_3 浓度上升的情况出现, 而北京周边地区的效果则要好于北京市区。

5 结论

(1) 应用 RAMS-CMAQ 对 2008 年 8 月的 O_3 浓度以及风场等进行模拟, 将观测值与模拟值进行对比, 结果表明, 这一模式系统可以较好地模拟污染物以及气象要素的变化特征和区域分布情况。

(2) 污染控制对 O_3 浓度的降低具有明显的作用, 但在一些气象条件下, 例如在较强的太阳辐射、较弱的辐合风场以及有利于区域输送的风场条件下, O_3 浓度易达到很高的值。

(3) 由于 O_3 和排放源排放的前体物之间并不是简单的线性减少的关系, 污染控制的不同会导致 O_3 前体物的浓度、组成发生变化, 进而对 O_3 浓度的变化产生不同的影响。模式模拟结果表明, 2008 年 8 月污染控制后, 北京及其周边地区 O_3 浓度在大部分时间是降低的, 其中北京周边地区的控制效果要稍好于北京市区。

参考文献 (References)

- An Junling, Huang Meiyuan, Wang Zifa, et al. 2001. Numerical regional air quality forecast tests over the mainland of China [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 130: 1781–1786.

- 安俊岭, 王跃思, 李昕, 等. 2008. 北京大气 O₃ 与 NO 的变化特征 [J]. 生态环境, 17 (4): 1420 - 1424. An Junling, Wang Yuesi, Li Xin, et al. 2008. Characteristics of atmospheric O₃ and NO_x concentrations in the urban area [J]. Ecology and Environment, 17 (4): 1420 - 1424.
- Byun D W, Ching J K S. 1999. Science algorithms of the EPA Models-3 community multi-scale air quality (CMAQ) modeling system [C]. NERL, Research Triangle Park, NC, 1999: 425.
- Chou C C K, Tsai C Y, Shiu C J, et al. 2009. Measurement of NO_y during Campaign of Air Quality Research in Beijing 2006 (CAREBeijing-2006): Implications for the ozone production efficiency of NO_x [J]. J. Geophys. Res., 114, D00G01, doi: 10.1029/2008JD010446.
- Gao Lijie, Zhang Meigen, Han Zhiwei. 2009. Model analysis of seasonal variations in tropospheric ozone and carbon monoxide over East Asia [J]. Advance in Atmospheric Sciences, 26 (2): 312 - 318.
- Li Jie, Wang Zifa, Akimoto H. 2007. Modeling study of ozone seasonal cycle in lower troposphere over East Asia [J]. J. Geophys. Res., 112, D22S25, doi: 10.1029/2006JD008209.
- Meng Z, Dabdub D, Seinfeld J H, et al. 1997. Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter [J]. Science, 277 (5322): 116 - 119.
- Pielke R A, Cotton W R, Walko R I, et al. 1992. A comprehensive meteorological modeling system RAMS [J]. Meteor. Atmos. Phys., 49: 69 - 91.
- Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. J. Geophys. Res., 108 (D21), 8809, doi: 10.1029/2002JD003093.
- Streets D G, Fu J S, Jang C J, et al. 2007. Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Atmos. Environ., 41: 480 - 492.
- 孙扬, 王跃思, 李昕, 等. 2006. 北京地区一次持续重污染过程 O₃、NO_x、CO 的垂直分布分析 [J]. 地球物理学报, 49 (6): 1616 - 1622. Sun Yang, Wang Yuesi, Li Xin, et al. 2006. An analysis for vertical distribution of O₃, NO_x and CO in the atmosphere during a serious air pollution in Beijing [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 49 (6): 1616 - 1622.
- Wang Wenxing, Chai Fahe, Zhang Kai, et al. 2008. Study on ambient air quality in Beijing for the summer 2008 Olympic Games [J]. Air Quality, Atmosphere and Health, 1: 31 - 36.
- Wang Zifa, Li Jie, Wang Xiquan. 2006. Modeling of regional high ozone episode observed at two mountain sites (Mt. Tai and Huang) in East China [J]. J. Atmos. Chem., 55: 253 - 272.
- 王自发, 李丽娜, 吴其重, 等. 2008. 区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究 [J]. 自然杂志, 30 (4): 194 - 198.
- Wang Zifa, Li Lina, Wu Qizhong, et al. 2008. Simulation of the impacts of regional transport on summer ozone levels over Beijing [J]. Chinese Journal of Nature (in Chinese), 30 (4): 194 - 198.
- Wang Tao, Ding A, Gao Jian, et al. 2006. Strong ozone production in urban plumes from Beijing, China [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L21806, doi: 10.1029/2006GL027689.
- Xu Jun, Zhang Yuanhang, Fu J S, et al. 2008. Process analysis of typical summertime ozone episodes over the Beijing area [J]. Science of the Total Environment, 399: 147 - 157.
- 张美根. 2005a. 多尺度空气质量模式系统极其验证 I. 模式系统介绍与气象要素模拟 [J]. 大气科学, 29 (5): 805 - 813. Zhang Meigen. 2005a. A multi-scale air quality modeling system and Its evaluation I. Introduction to the model system and simulation of meteorological parameters [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (5): 805 - 813.
- 张美根. 2005b. 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体物模拟 [J]. 大气科学, 29 (6): 926 - 936. Zhang Meigen. 2005b. A multi-scale air quality modeling system and its evaluation II. Simulation of tropospheric ozone and its precursors in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (6): 926 - 936.
- 宗雪梅, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 2007. 北京地区边界层大气臭氧浓度变化特征分析 [J]. 环境科学, 28 (11): 2615 - 2619. Zong Xuemei, Wang Gengchen, Chen Hongbin, et al. 2007. Analysis on concentration variety characteristics of atmospheric ozone under the boundary layer in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 28 (11): 2615 - 2619.