

向伟玲, 安俊岭, 王自发, 等. 2010. 北京奥运会期间 CBM-Z 化学机制的模拟应用 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 551–559. Xiang Weiling, An Junling, Wang Zifa, et al. 2010. Application of CBM-Z chemical mechanism during Beijing Olympics [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 551–559.

北京奥运会期间 CBM-Z 化学机制的模拟应用

向伟玲^{1,2,3} 安俊岭¹ 王自发^{1,2} 吴其重^{1,2,3} 唐晓^{1,2,3}

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

2 中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用 CBM-Z 化学机制模拟了中国科学院大气物理研究所气象塔站在北京奥运会期间高臭氧时段 O₃ 浓度的日变化, 评估了气象条件、北京奥运会加强控制措施以及 O₃ 前体物浓度对近地面 O₃ 生成的影响。结果表明: (1) CBM-Z 化学机制较好地模拟了北京奥运会期间典型时段气象塔站 O₃、NO、NO₂ 日变化特征。(2) 有利于局地高臭氧事件发生的气象条件非常相似; 北京奥运会加强控制措施的实施显著减少了 NO_x 及 VOCs 的排放量, 导致近地面 O₃ 浓度的明显下降。(3) 奥运会期间 VOCs 和 CO 是影响气象塔站 O₃ 生成量的关键因素。

关键词 O₃ NO_x CBM-Z 化学机制 325 m 气象塔 北京奥运会

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0551-09 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

Application of CBM-Z Chemical Mechanism during Beijing Olympics

XIANG Weiling^{1,2,3}, AN Junling¹, WANG Zifa^{1,2}, WU Qizhong^{1,2,3}, and TANG Xiao^{1,2,3}

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

2 Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract CBM-Z chemical mechanism was used to simulate ozone diurnal concentration at 325-m meteorological tower in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, and evaluated the influences of meteorological conditions, control measures, and precursors of ozone on concentration of surface ozone. The results show that CBM-Z chemical mechanism reproduces diurnal concentration of ozone, nitric oxide, and nitrogen dioxide at the 325-m meteorological tower during Beijing Olympics well, there are very similar meteorological conditions while local ozone episodes occur, Volatile Organic Compounds (VOCs) and nitrogen oxides emissions reduced through practicing environmental control measures, which induce apparent reduction of surface ozone concentration, and the key factors which affecting the concentration of ozone are VOCs and carbon monoxide.

Key words ozone, nitrogen oxides, CBM-Z chemical mechanism, Beijing Olympics, 325-m meteorological tower

收稿日期 2010-04-06 收到, 2010-07-21 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重大项目 KZCX1-YW-06-04、国家自然科学基金项目 40905055、国家自然科学基金青年基金项目 40805051、北京市重点学科项目

作者简介 向伟玲, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事大气环境研究。E-mail: xwl11@sohu.com

1 引言

城市近地面臭氧 (O_3) 主要是由人类活动排放的挥发性有机物 (VOCs)、氮氧化物 (NO 和 NO_2) 和一氧化碳 (CO) 等在太阳光的作用下经过一系列复杂的光化学反应生成。近地面高浓度 O_3 直接威胁着人类和动物的健康, 同时对区域气候和生态环境也产生重要影响 (周秀骥, 1996, 1997; 王明星, 1999; 刘建栋等, 2004)。因此, 开展近地面 O_3 的研究具有重要的科学意义。

北京奥运会成功申办以后, 北京市的大气污染问题受到国内外密切关注。为切实履行申奥环保承诺, 改善北京市大气环境质量, 北京市联动周边 6 省区制订改善能源结构、严格新车排放标准、调整工业结构、加强施工管理等方面的措施治理大气环境。北京奥运会前夕, 北京市环境保护局及相关部门又联合制定了奥运会期间加强控制措施, 即在 7 月 20 日~9 月 20 日, 实施加强机动车管理、加强道路清洁、严格控制施工重点工序、重点污染企业减排和实施极端不利气象条件下的污染控制应急措施等措施, 旨在确保奥运会期间良好的空气质量 (北京市环境保护局, 2009)。在众多的大气环境治理措施中, 也包括为了减少近地面 O_3 含量而做的努力, 如调整工业结构、加强机动车管理、石化企业减排等。奥运会结束后, 科学评估气象条件和环保措施对奥运会期间 O_3 生成量的贡献成为关注的焦点, 同时, 确定影响奥运会期间 O_3 生成量的主要前体物也显得尤为重要, 这可为今后制定 O_3 控制措施提供科学依据。

目前, 借助数值模拟分析研究 O_3 问题取得了很多研究成果, 数值模拟已经成为研究大气 O_3 强有力的手段之一。Sillman et al. (1995) 利用模式与观测相结合的手段研究了亚特兰大 O_3 的形成与前体物的关系; 罗蕊等 (2006) 利用 OZIPR 模式模拟研究了深圳市前体物 VOCs 和 NO_x 对 O_3 生成的影响, 并指出 O_3 的生成量受 VOCs 浓度控制; 余琦等 (2004) 通过 CB-IV 机制模拟研究了前体物 VOCs 和 NO_x 初始浓度比、排放量比的变化对 O_3 浓度的影响, 指出 VOCs 浓度的增加对 O_3 浓度具有促进和抑制双重作用; 王雪松和李兴生 (2002) 通过综合空气质量模式研究了 O_3 形成过

程中不同排放源的贡献; 安俊岭 (2006) 通过资料分析和模式模拟的方法研究了北京近交通干线地区 O_3 的生成效率, 提出消减交通主干道地区的 VOCs 排放量能有效降低该地区 O_3 浓度; 蒋维楣等 (2001) 研究了南京市低层大气中 O_3 的形成机制, 并分析了植物排放有机物对 O_3 生成的贡献; 杨昕和李兴生 (1999) 结合气象模式和区域化学模式对中国地区近地面 O_3 变化进行数值模拟, 得到了污染地区近地面 O_3 变化主要受光化学作用控制的结论; 李冰等 (1998) 通过制作 EKMA 曲线制订出了兰州西固石油化工区光化学烟雾总量控制的方法。上述研究利用数值模拟方法得出了很多重要的结论, 为环保政策的制定提供了科学依据, 更为本文工作的开展提供了良好的理论研究基础。

CBM-Z 化学机制是在 CBM-IV 基础上发展起来的物种更多、反应更完善、适用性更广的化学机制 (Zaveri and Peters, 1999), 已经被国内外一些先进的空气质量模式使用, 如 WRF-CHEM 和 NAQPMS。本文利用 CBM-Z 化学机制模拟北京奥运会期间高臭氧时段 O_3 浓度的日变化, 评估气象条件、北京市奥运会加强控制措施及前体物对近地面 O_3 生成的影响。

2 方法与资料

2.1 模式介绍

CBM-Z 是基于 CBM-IV 发展的按结构分类的一个新的归纳化学机理。化学反应方程增加至 176 个, 反应物种增加至 67 个, 其中涉及光化学反应的物种为 20 个。相对 CBM-IV, CBM-Z 在活性长寿命物种及中间产物的化学反应、无机物的化学反应、活性烷烃、石蜡以及芳香烃的化学反应、若干自由基以及异戊二烯的化学反应等方面考虑得更为全面, 同时该机制还发展了包括背景条件、城市、远郊和生物区以及海洋等 5 个反应场景的反应模式。CBM-Z 机制适用性更广 (Wang et al., 2006) (表 1)。

2.2 模拟时段选择和模式参数设置

奥运会期间北京市空气质量整体较好, 未出现污染超标现象。8 月 8~24 日北京市空气污染指数 (API) 逐日变化可知, 奥运会期间 API 值均小于 100, API 值相对较高的时段 (> 60) 分别

表 1 CBM-Z 化学反应机制与 CBM-IV 化学反应机制对比
Table 1 Comparison between chemical mechanisms CBM-Z and CBM-IV

类型	尺度	物种	反应方程
CBM-IV	城市	34	81
CBM-Z	全球/区域/城市	67	176

为 8 月 8~10 日、8 月 13~14 日、8 月 20~21 日 (图 1)。在这 3 个时段中, 大气物理研究所气象塔观测的近地面 (8 m) O_3 小时浓度后两时段相对较高, 即 8 月 13 日 15 时 (北京时间, 下同) 为 76 ppb、8 月 20 日 12 时达 86.7 ppb (10^{-9}), CO 小时浓度相应出现了 2 个高值, NO_x 小时浓度也相对较高 (图 2)。

对 O_3 生成影响较大的气象条件主要有太阳辐射、气温、相对湿度、大气压强、风向和风速等。高压天气系统、强太阳辐射、高温、低湿、弱风等都有利于 O_3 的生成。8 月 13 日和 8 月 20 日均为高压系统控制, 天气以晴为主, 太阳总辐射较强, 中午均超过 $800 W \cdot m^2$ 。温度与太阳总辐射呈现明显的一致性, 随着太阳辐射的增强, 温度随之上升, 两日最高温度均在 $31^\circ C$ 以上, 最低温度也高于 $22^\circ C$ 。这两日相对湿度维持在 $50\% \sim 90\%$ 之间, 与温度存在显著的反相关关系。两日风速均较小, 白天风速大于夜晚, 夜间基本为静风, 白天风速均在 $2 m \cdot s^{-1}$ 以下, 最大风速出现在 8 月 20 日 14 时, 为 $1.8 m \cdot s^{-1}$; 8 月 13 日风向以南风为主, 8 月 20 日风向时有变化, 但均以偏南、偏北风向为主 (图 3、4)。

8 月 13 日和 20 日的气象条件非常有利于 O_3 生成, 故选择该时段进行模拟。

CBM-Z 模式需要输入的参数主要有经纬度、海拔高度、模拟起始时间、模拟时段、积分步长、混合层高度、温度、相对湿度、大气压强及各物种浓度等。由于奥运会期间各物种排放量存在很大的不确定性, 从而对 CBM-Z 模式模拟结果精度产生影响。因此, 将各物种逐时观测浓度 (除 O_3) 引入模式, 取代各物种每小时排放量在模拟过程中的作用。另外, 各物种的沉积过程不予考虑。

气象塔站地处 ($39^\circ 9' N$, $116^\circ 4' E$), 海拔高度为 49 m。模拟时段为 08 时至 20 时, 积分步长为 300 s, 模拟起始时间为 07 时。混合层高度取 08 时为 300 m, 逐时增加至 14 时达到最大值 1500 m, 而后缓慢下降, 至 20 时下降到 1000 m (贺千山和毛节泰, 2005)。逐时温度、逐时相对湿度均来自 325 m 气象塔的同步观测资料。逐时大气压强取自北京大学同步观测资料。 NO 、 NO_2 、 CO 等物种的逐时浓度为气象塔 8 m 高度处实测小时平均浓度, O_3 初始浓度同样取自气象塔 8 m 高度处实测小时平均浓度; VOCs 各物种浓度来自中国科学院大气物理研究所王跃思等人的观测结果, 包括丙烷、丁烷、异丁烷、异戊烷、戊烷、2,2-二甲基丁烷、环戊烷、2,3-二甲基丁烷、异己烷、己烷、甲基环戊烷、环己烷、2-甲基己烷、庚烷、异丁烯/丁烯、异戊二烯、辛烷、苯、甲苯、乙苯、间 (对) 二甲苯、邻二甲苯等 48 个物种。若令 X_1 、 X_2 、 $\dots$ 、 X_{47} 、 X_{48} 分别代表观测物种丙烷、异丁烷、异戊烷、戊烷、2,2-二甲基丁烷、环戊烷、2,3-二甲基丁烷、异己烷、3-甲基戊烷、己烷、甲基环戊烷、2,4-二甲基戊烷、环己

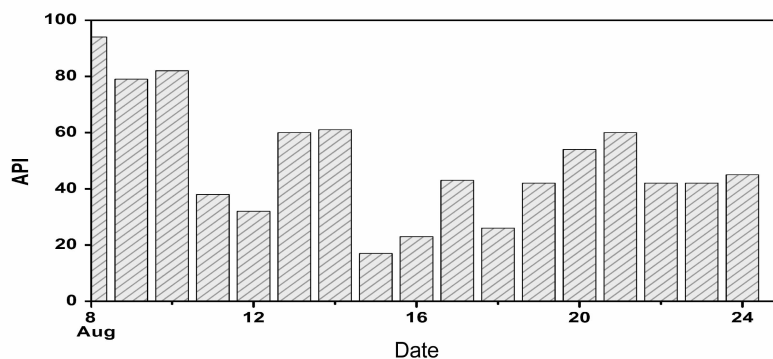


图 1 2008 年奥运会期间北京市空气污染指数 (API) 逐日变化

Fig. 1 Air Pollution Index (API) daily variation in Beijing during the Olympics of 2008

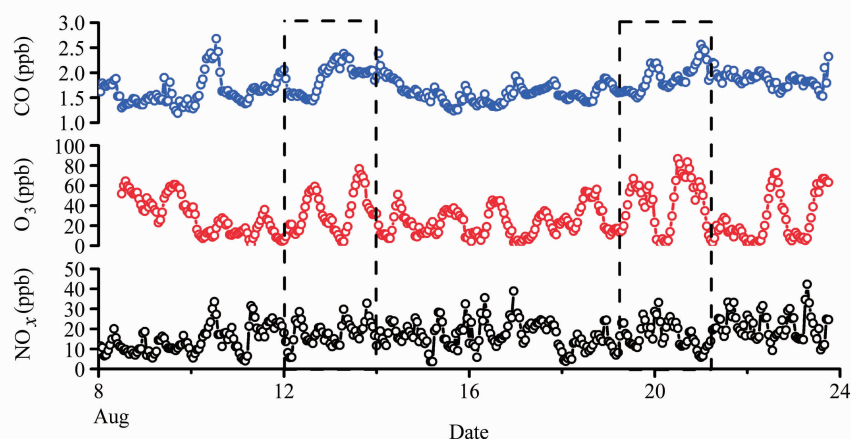


图2 2008年奥运会期间气象塔近地面(8 m) O_3 、 NO_x 及CO小时浓度观测值

Fig. 2 Concentrations of surface O_3 , NO_x , and CO (8 m) at 325 m meteorological tower in Beijing during the Olympics of 2008

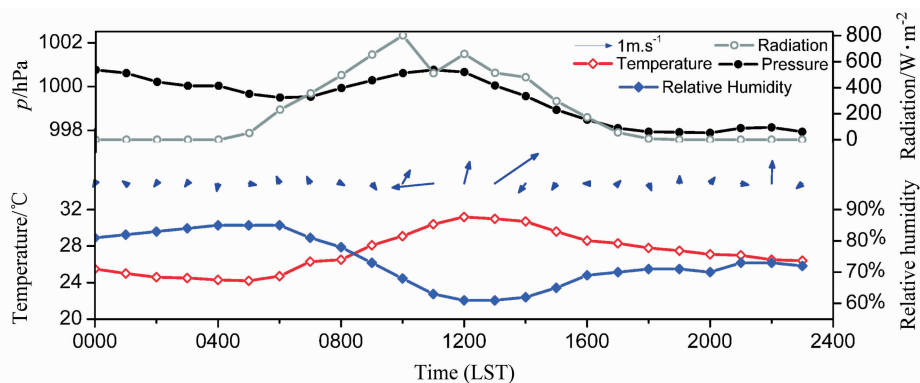


图3 8月13日近地面(8 m)气象要素日变化

Fig. 3 Diurnal variation of surface meteorological elements of 13 Aug 2008

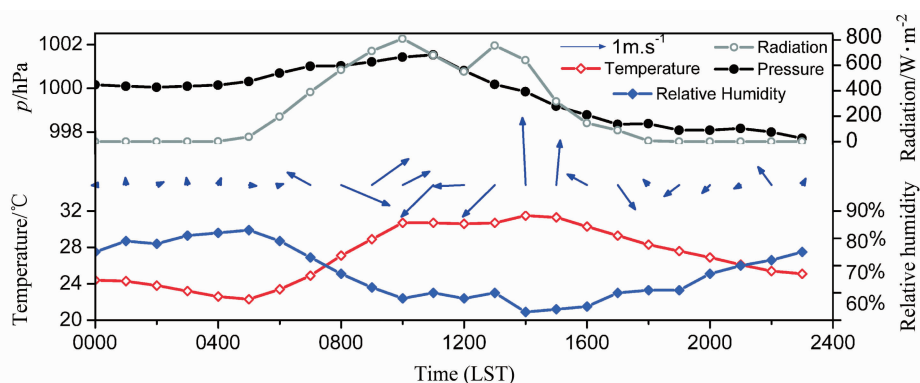


图4 同图3, 但为8月20日

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for 20 Aug 2008

烷、2-甲基己烷、2,3-二甲基戊烷、庚烷、3-甲基庚烷、2,2,4-三甲基戊烷、2-甲基庚烷、甲基环己烷、2,3,4-三甲基戊烷、3-甲基庚烷、辛烷、丙烯、1-丁烯、1,3-丁二烯、反-2-丁烯、

顺-2-丁烯、2-甲基-2-丁烯、1-戊烯、异戊二烯、反-2-戊烯、顺-2-戊烯、3-甲基-1-丁烯、环戊烯、4-甲基-1-戊烯、反-2-己烯、顺-2-己烯、苯、甲苯、乙苯、*m-p*-二甲苯、苯乙烯、

邻-二甲苯、异丙苯、丙苯、1,3,5-三甲基苯、1,2,4-三甲基苯等的浓度, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 依次表示 CBM-Z 模式的物种烷烃 (PAR)、烯烃 (OLE)、甲苯 (TOL)、二甲苯 (XYL)、异戊二烯 (ISOP) 的浓度, 则两者的关系如下 (U. S. Environmental Protection Agency, 1989):

$$Y_1 = X_1 + X_2 + X_3 + L + X_{22} + X_{23} + \frac{1}{3}X_{24} + \frac{1}{2}X_{25} + \frac{1}{2}X_{27} + \frac{1}{2}X_{28} + \frac{3}{5}X_{29} + \frac{3}{5}X_{30} + \frac{3}{5}X_{32} + \frac{3}{5}X_{33} + \frac{3}{5}X_{34} + \frac{3}{5}X_{35} + \frac{2}{3}X_{36} + \frac{2}{3}X_{37} + \frac{2}{3}X_{38} + X_{39} + \frac{1}{8}X_{41} + \frac{3}{4}X_{43} + \frac{2}{9}X_{45} + \frac{2}{9}X_{46}, \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{2}{3}X_{24} + \frac{1}{2}X_{25} + X_{26} + \frac{1}{2}X_{27} + \frac{1}{2}X_{28} + \frac{2}{5}X_{29} + \frac{2}{5}X_{30} + \frac{2}{5}X_{32} + \frac{2}{5}X_{33} + \frac{2}{5}X_{34} + \frac{2}{5}X_{35} + \frac{1}{3}X_{36} + \frac{1}{3}X_{37} + \frac{1}{3}X_{38} + \frac{1}{4}X_{43}, \quad (2)$$

$$Y_3 = X_{40} + \frac{7}{8}X_{41} + \frac{7}{9}X_{45} + \frac{7}{9}X_{46}, \quad (3)$$

$$Y_4 = X_{42} + X_{44} + X_{47} + X_{48}, \quad (4)$$

$$Y_5 = Y_{31}. \quad (5)$$

其他未观测的物种取其背景值 (An et al., 2002)。

3 模拟结果及分析

3.1 O_3 及 NO_x 模拟效果评估

图 5、6 分别为 8 月 13 日和 20 日 O_3 、 NO_x 观测与模拟值对比图。8 月 13 日 O_3 浓度具有明显的日变化特征, 早晨浓度较低, 小于 20 ppb, 随着太阳辐射的增强, O_3 浓度随之上升, 到 15 时出现 O_3 浓度峰值, 约 76.8 ppb, 随后随着太阳辐射的减弱, O_3 浓度缓慢下降, 18 时 O_3 浓度为 62.6 ppb, 而后迅速下降, 19 时 O_3 浓度降低为 42.1 ppb。 O_3 模拟浓度与观测值具有较好的一致性, 但早晨的模拟值略高于观测浓度, 模拟峰值出现在 13 时, 约 71.5 ppb。8 月 20 日 O_3 观测结果出现 2 个峰值, 第一个峰值出现在 12 时, 约 86.8 ppb, 第二个峰

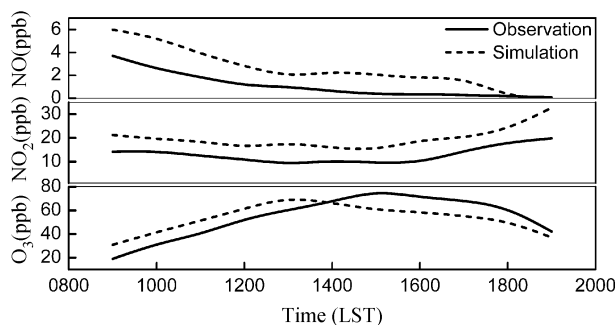


图 5 2008 年 8 月 13 日 O_3 、 NO_x 模拟结果与观测对比

Fig. 5 Comparisons of O_3 , NO_x between simulation and observation on 13 Aug 2008

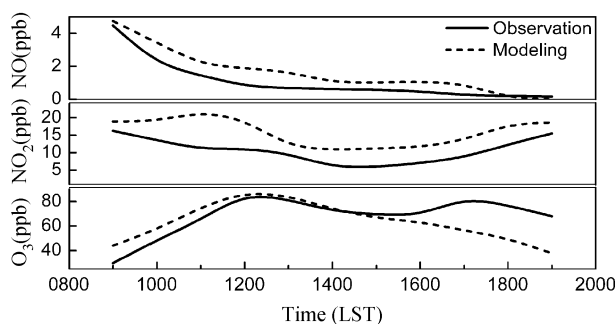


图 6 同图 5, 但为 2008 年 8 月 20 日

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for 20 Aug 2008

值出现在 17 时, 为 83.5 ppb。 O_3 模拟值在 16 时之前与观测值较为吻合, 峰值出现的时刻也模拟得很好。17 时第二个 O_3 峰值模式未反映出来, 该峰值的出现可能与水平输送或垂直输送有关。

8 月 13 日与 20 日 NO 观测值均早晨高, 而后逐时递减, 至 18 时接近零值。8 月 13 日 NO_2 浓度早晨至中午时段逐渐减小、午后逐渐增加, 白天保持在 15 ppb 以上; 8 月 20 日 NO_2 浓度变化趋势与 8 月 13 日略有不同, 9 时至 11 时逐渐增加, 而后迅速下降, 13 时至 16 时维持在 12 ppb 左右, 之后逐渐增加。CBM-Z 模式较好地模拟了 8 月 13 日与 20 日 NO 、 NO_2 的日变化特征。

3.2 奥运会期间气象条件和控制措施对 O_3 生成的影响

3.2.1 气象条件对 O_3 生成的影响

2007 年 8 月奥运会测试赛期间及 2008 年 7 月底都曾发生了 O_3 超标事件, 将在此期间典型 O_3 超标日 (2007 年 8 月 12 日、2008 年 7 月 22 日) 的气象场替换 2008 年 8 月 13 日和 20 日气象场, 污染

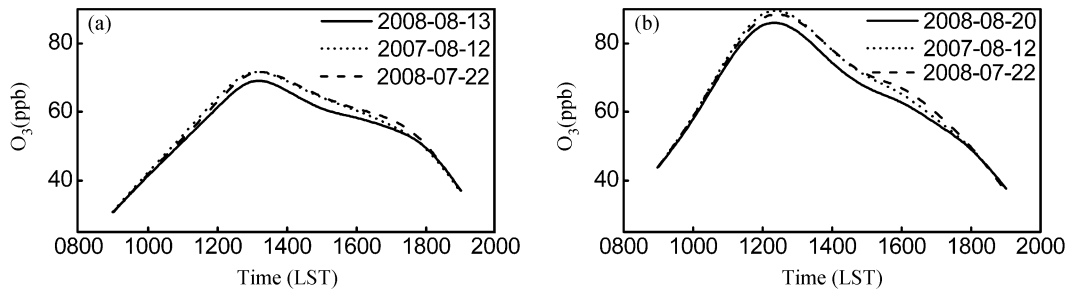


图7 (a) 2008年8月13日、(b) 2008年8月20日与不同气象条件下(2007年8月12日和2008年7月22日) O₃模拟结果对比
Fig. 7 Comparisons of simulated O₃ between (a) 13 Aug 2008, (b) 20 Aug 2008 and under different meteorological conditions (12 Aug 2007 and 22 Jul 2008)

物浓度场依然使用2008年8月13日和20日浓度场,输入CBM-Z模式,进行模拟计算,以此说明气象条件对O₃生成的影响,结果见图7。当气象场改变为2007年8月12日和2008年7月22日气象场时,O₃的模拟浓度与2008年8月13日和20日气象场时的O₃模拟浓度未发生较大改变,O₃小时平均浓度增加量小于3 ppb,小时最大浓度增加量低于4 ppb。这充分说明有助于局地高O₃事件发生的气象条件非常相似。

3.2.2 奥运会加强控制措施对O₃生成的影响

通过奥运会加强控制措施的实施,奥运会期间空气质量得到了明显改善。其中,中国科学院大气物理研究所325 m气象塔站点的O₃小时浓度下降了20%,NO_x日均浓度下降了48%,VOCs日均浓度减少了44.3%(烷烃52.2%,烯烃43.75%,苯及苯系物38.95%),CO浓度未发生变化(北京市环境保护局,2008)。

利用加强措施期间上述各物种浓度的下降比例,将8月13日及20日325 m气象塔站8 m高度处NO_x、VOCs、O₃等物种实测浓度替换为未实施加强措施时的浓度,其他参数设置不变,模拟计算未实施加强措施情况下O₃的浓度。图8为实际情景与未实施加强措施情景下O₃模拟结果对比图。8月13日及20日未实施加强措施情景下O₃的小时浓度整体高于实际情况下浓度值。其中,8月13日模拟时段O₃小时平均浓度高出3.1 ppb,O₃最大小时浓度高出4.2 ppb;8月20日模拟时段O₃小时平均浓度高出9.7 ppb,O₃最大小时浓度高出17.5 ppb。同时计算氧化剂O_x在加强措施实施前后的变化量,其变化趋势与O₃类似,即8月13日O_x小时平均浓度高出13.7 ppb,O_x最大

小时浓度高出13.6 ppb,8月20日O_x小时平均浓度高出19.7 ppb,O_x最大小时浓度高出24.9 ppb。可见,实施奥运会加强控制措施后,NO_x及VOCs的大量削减使得近地面O₃浓度明显降低。

3.3 O₃生成的敏感性试验及分析

为了解奥运会期间气象塔站O₃前体物对其生成量的影响,设计了8组试验,分别模拟在各种前体物浓度状态下13日及20日O₃生成状况,如表2所示。

将CO浓度增加2倍时,O₃浓度普遍高于CO未改变时的浓度;将CO减少1/2时,O₃浓度普遍低于CO未减少时的O₃浓度。无论将NO_x浓度增加2倍还是减少1/2,8月13日和20日O₃的模拟值与未改变NO_x浓度时的模拟值差异不大。将VOCs浓度增加2倍时,8月13日和20日O₃模拟浓度整体升高。其中,8月13日O₃浓度平均增加了27%,最大小时浓度增加了32%;8月20日O₃浓度平均增加了20%,最大小时浓度增加了26%。将VOCs浓度减少1/2时,8月13日和20日O₃模拟浓度又出现整体下降。其中,8月13日

表2 8组敏感性试验设计

Table 2 Eight groups of sensitive experiments ppb

试验编号	物种浓度			
	CO	NO _x	VOCs	O ₃
A1	2C	C	C	C
A2	C/2	C	C	C
A3	C	2C	C	C
A4	C	C/2	C	C
A5	C	C	2C	C
A6	C	C	C/2	C
A7	C	2C	2C	C
A8	C	C/2	C/2	C

注: C为各物种实时观测浓度。

O₃浓度平均减少了 29%, 最大小时浓度减少了 26%; 8月20日 O₃浓度平均减少了 19%, 最大小时浓度减少了 33%。将 VOCs 与 NO_x同时增加 2 倍时, 8月13日和20日模拟 O₃浓度出现明显

整体增升。其中, 8月13日 O₃最大小时浓度达到了 120 ppb, 8月20日达到了 100 ppb, 比未改变 VOCs 与 NO_x时的 O₃最大浓度分别增加了 35 ppb 和 30 ppb (图9)。将 A5 与 A7 实验结果进行比较

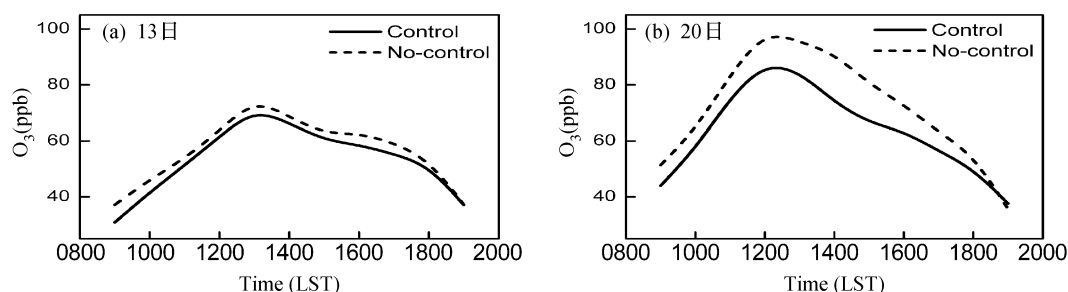


图8 实施与未实施加强措施条件下 O₃模拟结果对比: (a) 8月13日; (b) 8月20日

Fig. 8 Comparisons of simulated O₃ between conditions of control measures and no-control measures: (a) 13 Aug; (b) 20 Aug

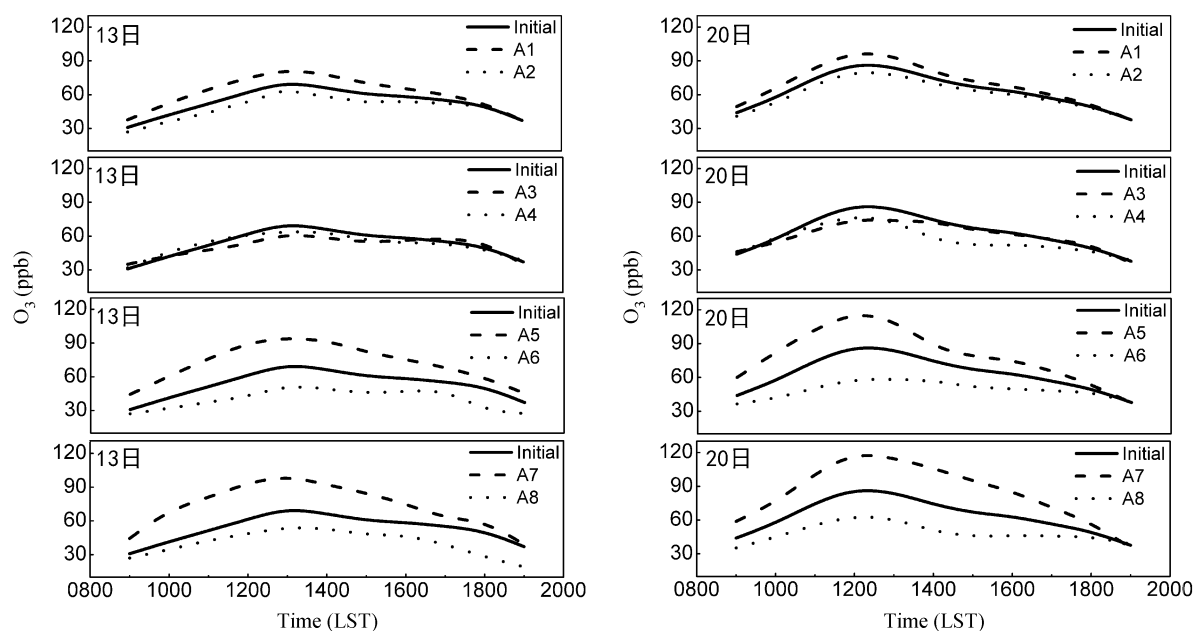


图9 8组敏感性试验与实际情况下 O₃模拟结果对比

Fig. 9 Comparisons of simulated O₃ between eight groups of sensitive experiments and base situation

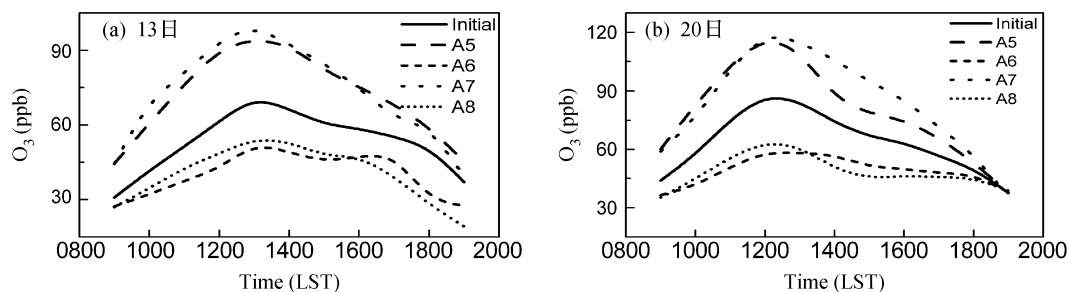


图10 A5、A6、A7、A8 敏感性试验与实际情况下 O₃模拟结果对比: (a) 13日; (b) 20日

Fig. 10 Comparisons of simulated O₃ between experiments A5, A6, A7, A8, and base situation: (a) 13 Aug; (b) 20 Aug

发现 (图 10), VOCs 与 NO_x 同时增加 2 倍时的 O_3 浓度与仅将 VOCs 增加 2 倍时的 O_3 浓度基本一致。将 VOCs 与 NO_x 同时减少到 1/2 时, 两日 O_3 浓度都出现明显的整体下降, O_3 最大小时浓度比 VOCs 与 NO_x 未改变时分别下降了 25 ppb 和 20 ppb。将 A6 与 A8 实验结果进行比较发现 (图 10), VOCs 与 NO_x 同时减小 1/2 时 O_3 浓度与仅将 VOCs 减小 1/2 时 O_3 浓度基本一致。

上述 8 组敏感性试验说明奥运会期间 VOCs 和 CO 是影响气象塔站 O_3 生成量的关键因素, 即 O_3 生成量主要受 VOCs 和 CO 浓度的影响, 这与安俊岭 (2006) 和石玉珍等 (2008) 的研究结果相一致。

4 结论

本文利用 CBM-Z 化学机制模拟了中国科学院大气物理研究所气象塔站奥运会期间高臭氧时段 O_3 日变化过程, 评估了气象条件、北京奥运会加强控制措施以及 O_3 前体物浓度对近地面 O_3 生成的影响。主要结论为: (1) CBM-Z 化学机制能够较好地模拟北京奥运会期间典型时段气象塔站 O_3 、NO、 NO_2 日变化特征。(2) 通过改变气象条件及污染物浓度的敏感性试验证明: 有利于局地高臭氧事件发生的气象条件非常相似, 奥运会加强控制措施的实施显著减少了 NO_x 及 VOCs 的排放量, 导致近地面 O_3 浓度的明显下降。(3) 通过 8 组影响 O_3 生成的敏感性试验得到奥运会期间 VOCs 和 CO 是影响气象塔站 O_3 生成量的关键因素。

参考文献 (References)

- 安俊岭. 2006. 北京近交通干线地区的 O_3 生成效率 [J]. 环境科学学报, 26 (4): 652–657. An Junling. 2006. Ozone production efficiency in Beijing area with high NO_x emissions [J]. Acta Scientiae Circumstantica (in Chinese), 26 (4): 652–657.
- An J., Ueda H., Wang Z., et al. 2002. Simulations of monthly mean nitrate concentrations in precipitation [J]. Atmos. Environ., 36 (26): 4159–4171.
- 北京市环境保护局. 2008. 北京奥运会空气质量监测与预报项目 [R]. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2008. Project of observation and forecast of air quality during Beijing Olympics [R].
- 北京市环境保护局. 2009. 北京奥运会空气质量保障工作的几点做法 [R]. http://www.zhb.gov.cn/ztbd/wfxch/jlly/200902/t20090220_134490.html. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2009. A few works on protection of air quality during Beijing Olympics [R]. http://www.zhb.gov.cn/ztbd/wfxch/jlly/200902/t20090220_134490.html.
- 贺千山, 毛节泰. 2005. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究 [J]. 气象学报, 63 (3): 572–483. He Qianshan, Mao Jietai. 2005. Observation of urban mixed layer at Beijing using a micro pulse lidar [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (3): 572–483.
- 蒋维楣, 蔡晨霞, 李昕. 2001. 城市底层大气 O_3 生成的模拟研究 [J]. 气象科学, 21 (2): 154–161. Jiang Weimei, Cai Chenxia, Li Xin. 2001. Simulation of the forming of ozone in the low layer air of urban area [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 21 (2): 154–161.
- 罗蕊, 王学中, 林国梁, 等. 2006. 一次污染物对 O_3 生成的影响研究 [J]. 环境科学研究, 19 (4): 26–30. Luo Rui, Wang Xuezhong, Lingliang, et al. 2006. Study on the impact of primary pollutants on ozone formation [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 19 (4): 26–30.
- 刘建栋, 周秀骥, 于强, 等. 2004. 近地层大气 O_3 对作物光合作用影响的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 28 (1): 59–68. Liu Jiandong, Zhou Xiujie, Yu Qiang, et al. 2004. A numerical simulation of the impacts of ozone in the ground layer atmosphere on crop photosynthesis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science (in Chinese), 28 (1): 59–68.
- 李冰, 陈长和, 余金香. 1998. 利用 EKMA 曲线制定光化学烟雾污染区域总量控制方案 [J]. 高原气象, 17 (2): 111–118. Li Bing, Chen Changhe, Yu Jinxiang. 1998. Designing photochemical smog pollution regional total control schemes by using EKMA diagram [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 17 (2): 111–118.
- Sillman S., Al-wali K I., Marsik F J., et al. 1995. Photochemistry of ozone formation in Atlanta GA-models and measurements [J]. Atmos. Environ., 29: 3055–3066.
- 石玉珍, 王庚辰, 徐永福. 2008. 北京市城近郊区光化学烟雾模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 84–92. Shi Yuzhen, Wang Gengchen, Xu Yongfu. 2008. Simulation study of photochemical smog in Beijing urban and suburban areas [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 84–92.
- U. S. Environmental Protection Agency. 1989. Procedures for applying city-specific EKMA (EPA2450/42892012) [Z]. Research Triangle Park, NC27711.
- 王明星. 1999. 大气化学 (2 版) [M]. 北京: 气象出版社, 316pp. Wang Mingxing. 1999. Atmospheric Chemistry (the second version) [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 316pp.
- 王雪松, 李金龙. 2002. 人为源排放 VOC 对北京地区 O_3 生成的贡献 [J]. 中国环境科学, 22 (6): 501–505. Wang Xuesong,

- Li Jinlong. 2002. The contribution of anthropogenic hydrocarbons to ozone formation in Beijing areas [J]. *China Environmental Science* (in Chinese), 22 (6): 501–505.
- Wang Z, Li J, Wang X, et al. 2006. Modeling of regional high ozone episode observed at two mountain sites (Mt. Tai and Huang) in East China [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, doi: 10.1007/s10874-006-9038-6.
- 余琦, 马蔚纯, 陈立民. 2004. 碳键机制 (CB4) 模拟大气化学光化学反应的研究 [J]. *复旦学报 (自然科学版)*, 43 (4): 633–639.
- Yu Qi, Ma Weichun, Chen Limin. 2004. A study on using carbon bond mechanism (CB-IV) to model atmospheric photochemical reaction [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)* (in Chinese), 43 (4): 633–639.
- 杨昕, 李兴生. 1999. 近地面 O_3 变化化学反应机理的数值研究 [J]. *大气科学*, 23 (4): 427–438.
- Yang Xin, Li Xingsheng. 1999. A numerical study of photochemical reaction mechanism of ozone variation in surface layer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (4): 427–438.
- Zaveri R Z, Peters L K. 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 30387–30415.
- 周秀骥. 1996. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 (一) [M]. 北京: 气象出版社, 23.
- Zhou Xiuji. 1996. *Atmospheric Ozone Change over China Region and Its Effects on Climate Environment I* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 23.
- 周秀骥. 1997. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 (二) [M]. 北京: 气象出版社, 19.
- Zhou Xiuji. 1997. *Atmospheric Ozone Change over China Region and Its Effects on Climate Environment II* [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 19.