

晏平仲, 王喜全, 王自发, 等. 2010. 北京奥运会期间 NO_2 浓度降低原因分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 609–615. Yan Pingzhong, Wang Xiquan, Wang Zifa, et al. 2010. Analysis of decreases in NO_2 concentrations during Beijing Olympic Games in 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 609–615.

北京奥运会期间 NO_2 浓度降低原因分析

晏平仲^{1,2} 王喜全¹ 王自发^{1,3} 吴其重^{1,2}

1 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

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

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

摘要 2002~2008年, 北京市城区和近郊8月的 NO_2 月均浓度大体呈现逐年下降趋势, 其中前5年二者均以每年约10%的降幅下降, 2008年发生显著下降, 降幅达40%左右。利用嵌套网格空气质量模式系统(NAQPM/IAP), 采用敏感性试验方法, 评估了气象条件与污染控制措施对北京奥运会期间大气 NO_2 浓度降低的影响, 评估不同污染控制措施对 NO_2 浓度降低的作用。研究结果表明, 污染控制措施是 NO_2 浓度降低的主要影响因素, 其中面源的污染控制措施对于 NO_2 浓度降低的作用最明显。

关键词 NO_2 嵌套网格空气质量模式系统 污染控制措施 北京奥运会

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0609-07 **中图分类号** P402 **文献标识码** A

Analysis of Decreases in NO_2 Concentrations during Beijing Olympic Games in 2008

YAN Pingzhong^{1,2}, WANG Xiquan¹, WANG Zifa^{1,3}, and WU qizhong^{1,2}

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

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

Abstract Monthly mean NO_2 concentrations in both urban and suburban areas of Beijing generally decreased in August from 2002 to 2008, with a decreasing rate of about 10% during the first five years and nearly 40% in 2008. Based on sensitivity studies with a Nested Air Quality Prediction Modeling System (NAQPM/IAP), quantitative assessments of the impacts of weather conditions and pollutant controlling measures on decreases in NO_2 concentrations were made during Beijing Olympic Games in 2008. The impact of area and point emission controlling measures on NO_2 concentrations was compared. The results indicates that pollutant controlling measures play a key role in decreases in NO_2 concentrations during Beijing Olympic Games while the August weather condition in 2008 is more favorable for dispersion and scavenging of air pollutants compared with that in 2006. Area emission controlling meas-

收稿日期 2010-04-06 收到, 2010-05-28 收到修定稿

资助项目 北京市科委重大项目“北京及近周边区域大气复合污染形成机制及防控措施研究示范”课题“区域大气污染模拟、预测、预警与示范”, 北京市重点学科项目(大气物理学与大气环境)研究生科学创新研究和社会实践资助专项

作者简介 晏平仲, 男, 1984年出生, 博士研究生, 主要从事城市大气污染数值模拟研究。E-mail: missfield@gmail.com

通讯作者 王自发, zifawang@hotmail.com

ures are more effective than point emission controlling measures for decreases in NO_2 concentrations.

Key words NO_2 , pollutant controlling measures, Nested Air Quality Prediction Modeling System (NAQPMS/IAP), Beijing Olympic Games

1 引言

氮氧化物 (NO_x) 是对流层大气中重要的痕量气体, 在对流层臭氧和二次气溶胶的生成和转化过程中起重要作用 (唐孝炎等, 2006)。研究表明, 机动车尾气排放是城市大气中氮氧化物的最主要来源, 约占 74% 左右 (Hao and Wang, 2005); 此外, 工业中化石燃料的燃烧也是氮氧化物的重要来源。90% 以上的氮氧化物以 NO 的形式排放到大气中, 之后迅速被大气氧化剂氧化为 NO_2 。我国环保部门将氮氧化物列为 3 种常规大气污染物之一, 采用 NO_2 日均浓度表征大气中氮氧化物的污染水平。

上世纪后 20 年间, 伴随着经济高速发展和城市范围不断扩张, 机动车尾气排放和工业燃烧排放迅猛增加, 北京大气中氮氧化物污染呈现加重恶化趋势。2001 年中国申奥成功后, “绿色奥运”的承诺使北京的空气质量状况更加受到了全世界的关注。分析 2002~2008 年 8 月北京市大气污染监测站点 NO_2 浓度资料 (数据来源于北京市环境保护局空气质量月报) 和同期北京市机动车保有量资料 (数据来源于北京市交通发展研究中心网页) 表明, 2002~2008 年间, 虽然北京市机动车保有量的年增长幅度约为 10%, 但每年 8 月城区和近的 NO_2 月均浓度却呈现逐年下降趋势, 其中 2002~2006 年, 二者以约 10% 的降幅下降, 2008 年显著下降, 降幅达到 40% 左右。

大气污染物浓度取决于污染源排放和气象条件因素。在北京奥运会期间 NO_2 浓度实现显著降低后, 准确评估气象条件和污染控制措施在空气质量改善中的作用, 特别是各类污染控制措施的作用, 对环境保护部门进一步治理工作具有重要意义。

利用嵌套网格空气质量模式系统 (NAQPMS/IAP), 采用敏感性试验方法, 评估气象条件与污染控制措施对北京奥运会期间 NO_2 浓度降低的作用, 特别是各类污染控制措施的作用。

2 研究方法

2.1 模式介绍

嵌套网格空气质量模式系统 NAQPMS/IAP (王自发等, 1997, 2006) 是中国科学院大气物理研究所基于三维欧拉型氧化物输送模式自主发展的多尺度、多物种模拟系统, 应用于区域和城市尺度污染问题研究, 在全国多个省市 (北京、上海、沈阳、深圳、郑州和台湾等) 已投入业务应用。NAQPMS/IAP 模式系统由气象模块和化学输送模块两部分组成, 气象模块采用宾夕法尼亚州立大学和美国国家大气研究中心研发的第五代中尺度天气预报模式 MM5, 化学输送模块由中国科学院大气物理研究所研发, 采用 CBM-Z 气相化学机制 (Zaveri and Peters, 1999)。该模式系统的详细介绍见文献王自发等 (1997, 2006)。

2.2 模式参数设置

应用双向嵌套技术, 设置从东亚地区到北京市的四重嵌套区域 (见图 2): 第一区域 (D1) 为东亚地区, 网格水平分辨率 81 km; 第二区域 (D2) 为华北地区, 网格水平分辨率 27 km; 第三区域 (D3) 为京津冀地区, 网格水平分辨率 9 km; 第四区域 (D4) 为北京市及其周边地区, 网格水平分辨率 3 km。模式设定垂直方向采用地形追随坐标系, 从地面到海拔 10 km 处不均匀地分为 10 层; 2 km 以下分为 5 层, 有利于模式考虑边界层污染物分布规律。

人为排放源中面源主要来源于 TRACE-P 大型观测实验中 Streets et al. (2003) 提供的空间分辨率 $6'$ (大约 10 km) 的排放源资料, 引进 SMOKE 排放处理模型结合 GIS 工具处理面源, 以区县为单位考虑多元空间分配因子 (如人口分布、路网密度、农田分布等) 插值到模式网格。点源清单包含北京和天津详细工业和锅炉、华北电厂、河北省重点工业等 (点源清单数据分别由北京市环境保护局、清华大学、中国环境科学研究院及北京工业大学多家单位提供), 考虑排放烟

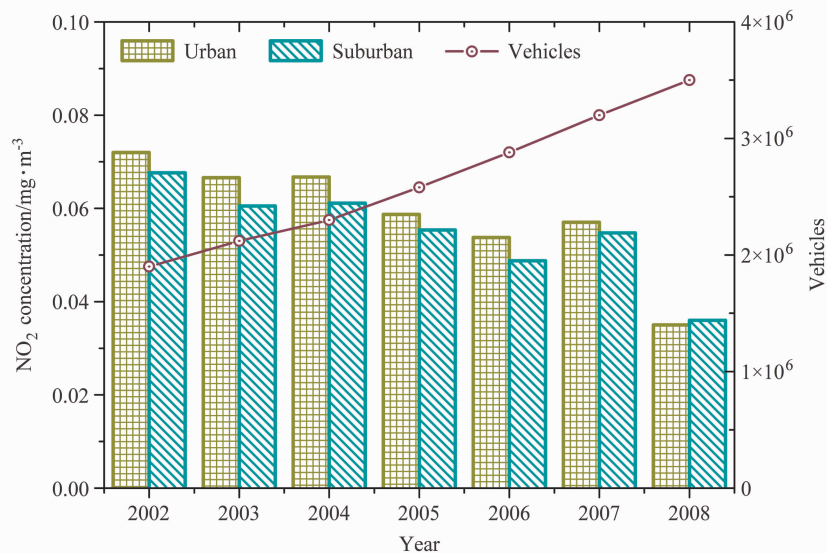
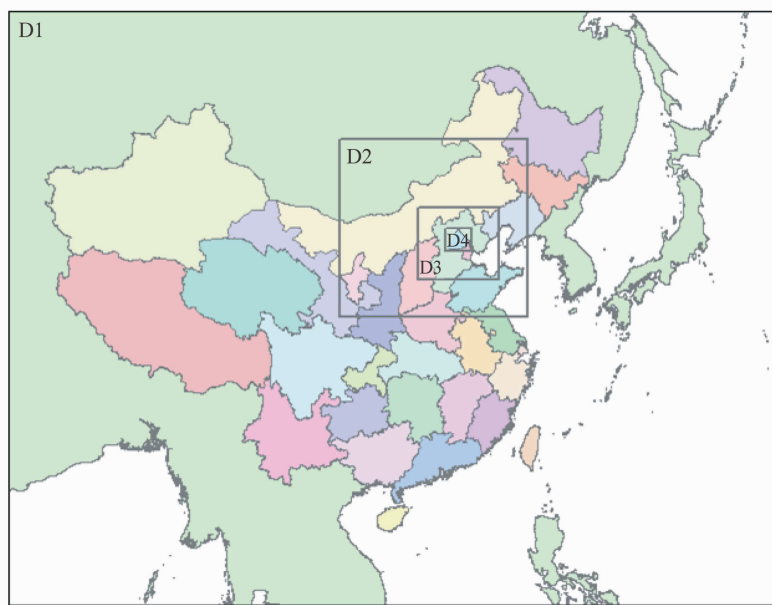
图1 2002~2008年北京8月NO₂月均浓度与机动车保有量年变化Fig. 1 Annual variations in monthly mean concentrations of NO₂ and vehicular population in Beijing in August during 2002–2008

图2 NAQPMS/IAP的模拟区域设置

Fig. 2 Modeling domain in the NAQPMS/IAP

流上升过程，收集烟囱高度、出流温度、出流速度等点源基本信息输入 SMOKE 模型，缺失信息依据行业分类采用 SMOKE 模型缺省值。图 3 为研究时段北京市及周边地区的 NO_x 排放速率，NO_x 排放高值主要集中在城八区。

基准情景模拟时段为 2006 年 8 月。为了减少初始浓度对模拟结果的影响，采用北京市环境保护中心空气质量业务预报系统中相应时段预

报结果作为初始条件输入启动模拟。

3 敏感性试验设计

敏感性试验是研究各种因子的影响程度、方式和机理的一种有力工具，广泛应用于边界层物理和环境化学等诸多领域。通过采用 2006 年 8 月与 2008 年 8 月两个不同气象条件（因子 *M*）以及

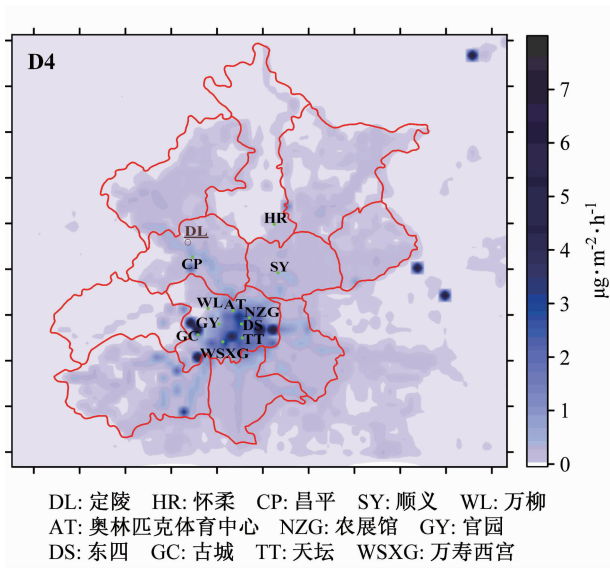


图3 NO_x排放速率与北京市国控监测站点分布。其中红色定陵站为区域本底站
Fig. 3 NO_x emission rates in Domain 4 and distributions of national monitor stations in Beijing, the red monitor station of Dingling is a regional background station

排放源中是否施加污染控制措施(因子 E)设计4组试验,评估气象条件与污染控制措施对NO₂浓度降低的影响;采用2008年8月的气象条件,分别在排放源中的面源(因子 A)与点源(因子 P)施加污染控制措施,设计4组试验,评估不同污染控制措施对NO₂浓度降低的影响。气象场采用相应时段6h间隔的NCEP全球气象再分析资料驱动中尺度气象模式MM5计算获得。排放源的削减量参考与大气污染控制相关的北京市政府通告和清华大学污染控制措施效果研究成果。

4 结果与讨论

4.1 气象条件与污染控制措施简述

评估气象条件对北京奥运会期间NO₂浓度降低的不同影响,即讨论北京奥运会期间的气象条件是否比以往同期更有利于大气中NO₂的扩散与清除。

分析2006、2008年8月北京观象台站3h间隔的MICAPS气象资料(表1)得出,2008年8月主导风向和风速与2006年一致,降水量增幅达到130%,降水频次增幅约20%。

评估污染控制措施的影响即讨论各种污染控制措施对于大气中NO₂浓度降低产生的效果。北京市政府针对氮氧化物采取的污染控制措施主要可归纳为机动车治理、工业停产搬迁和电场改造。机动车治理包括环保黄标车的淘汰改造、新车排放尾气标准和油品标准的提升以及货运机动车分时段分区域限行等,特别在奥运会期间,北京市政府临时采取了机动车单双号限行和黄标车禁止上路行驶等更为严格的机动车污染控制措施;电场改造主要指电厂锅炉推广使用低氮燃烧器。在模式排放源中,机动车治理和限行措施主要体现在对面源的削减,工业停产搬迁和电场改造措施主要体现在对点源的削减。

4.2 模式验证

利用2006年8月北京市大气污染国控监测站点NO₂的平均浓度对基准情景模拟结果进行验证,国控站点分布如图3所示。模拟样本数为624,模拟值与观测值具有较好的相关性,RC(模拟值与观测值比值的平均值)为1.02,MBE(平均偏差)为0.001,RMSE(误差均方根)为0.024。图4中大部分模拟值落在实在测值的0.5至2倍范围内,大体反映出北京市国控平均NO₂浓度的真实变化规律。图5中,北京地区实测NO₂浓度高值出现在城八区,模拟结果较好地反应出NO₂浓度的水平分布。综上所述,NAQPMS/IAP模式的模拟能够反映NO₂浓度的时空变化情况,为敏感性试验研究提供了较好的基础。

4.3 气象条件与污染控制措施影响分析

采用敏感性试验的方法设计4组试验:(1)基准情景F0,即气象场为2006年8月MM5模拟结果,排放源为2006年8月基准情景;(2)情景Fe,即气象场为2006年8月MM5模拟结果,排

表1 2006、2008年8月北京观象台站常规气象要素对比
Table 1 Meteorological factors at Guanxiangtai monitoring station of Beijing in Augu

年份	主导风向	风速/m·s ⁻¹	气压/hPa	降水量/mm	降水频次	露点/°C	能见度/km	温度/°C
2006	西南南	2.1	1078	58	29	20	14	26
2008	西南南	2.1	1087	135	35	19	18	26

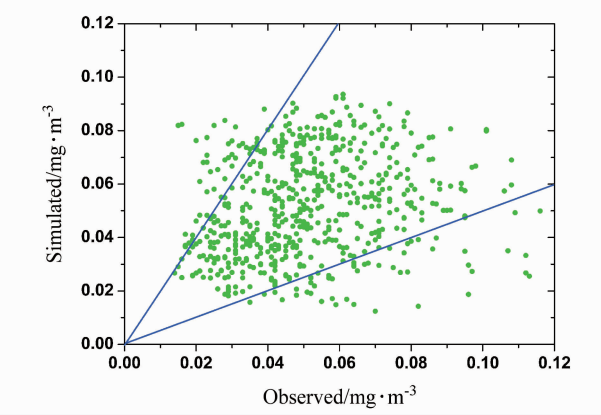


图 4 2006 年 8 月北京市大气污染国控监测站点 NO₂ 小时平均浓度模拟验证

Fig. 4 Scatter plot of simulated and observed hourly averaged concentrations of NO₂ at national monitoring stations of Beijing in August 2006

放源为施加污染控制措施的 2008 年 8 月排放情景；(3) 情景 Fm，即气象场为 2008 年 8 月 MM5 模拟结果，排放源为 2006 年 8 月基准情景；(4) 情景 Fem，即气象场为 2008 年 8 月 MM5 模拟结果，排放源为施加污染控制措施的 2008 年 8 月排放情景。模拟浓度和实测浓度均采用北京市大气污染国控监测站点 NO₂ 月均浓度进行对比，浓度变化率为该模拟情景国控站点 NO₂ 月均浓度与基准情景的比值，结果见表 2。试验 Fm 与 Fe 中 NO₂ 月均浓度水平分布见图 6。可以看出，污染控制措施的实施与气象场的变化使得 NO₂ 模拟浓度降幅分别为 55% 和 8%，二者共同作用下 NO₂ 模拟浓度降低 58%，模拟浓度与北京奥运会期间实测

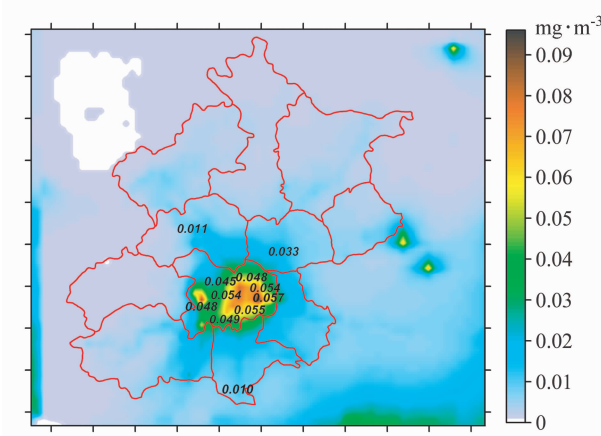


图 5 2006 年 8 月北京市 NO₂ 月均浓度模拟值空间分布与站点实测值对比

Fig. 5 Distribution of simulated and observed monthly averaged concentrations of NO₂ at national monitoring stations of Beijing in August 2006

浓度较为一致。由此判断大气污染控制措施的实施为北京奥运会期间 NO₂ 浓度降低的主要影响因素。

表 2 评估气象条件与污染控制措施影响的模拟试验设计及其结果

Table 2 Design of experiments on impacts of weather conditions and pollutant controlling measures by factor separation analysis and results

试验名称	气象场年份	排放源年份	NO _x 源总量 /t · a ⁻¹	模拟浓度 /mg · m ⁻³	浓度变化率	实测浓度 /mg · m ⁻³
F0	2006	2006	102476	0.053	—	0.052
Fe	2006	2008	76862	0.024	45%	—
Fm	2008	2006	102476	0.049	92%	—
Fem	2008	2008	76862	0.022	42%	0.023

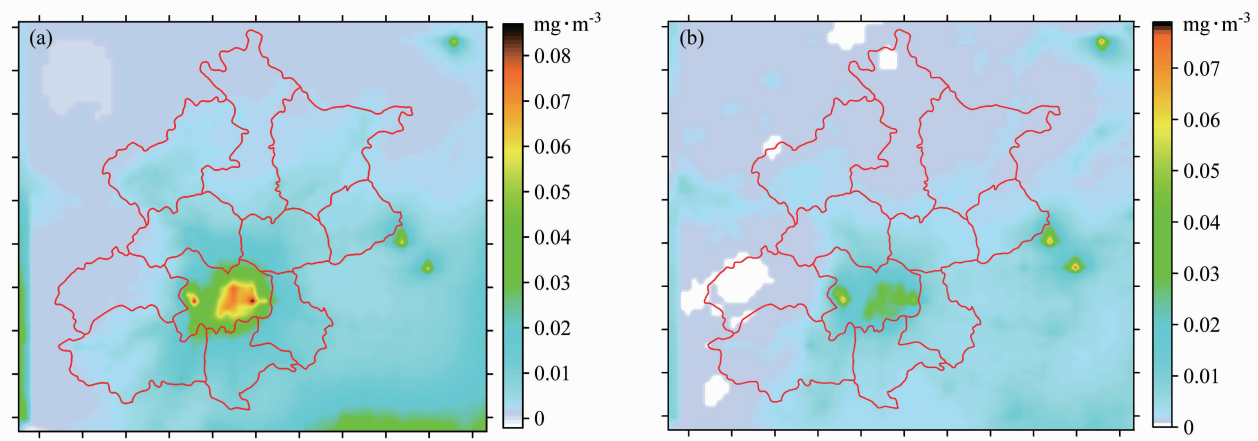


图 6 试验 (a) Fm 和 (b) Fe 中 NO₂ 月均浓度模拟值空间分布

Fig. 6 Distribution of simulated monthly mean concentrations of NO₂ in experiments (a) Fm and (b) Fe

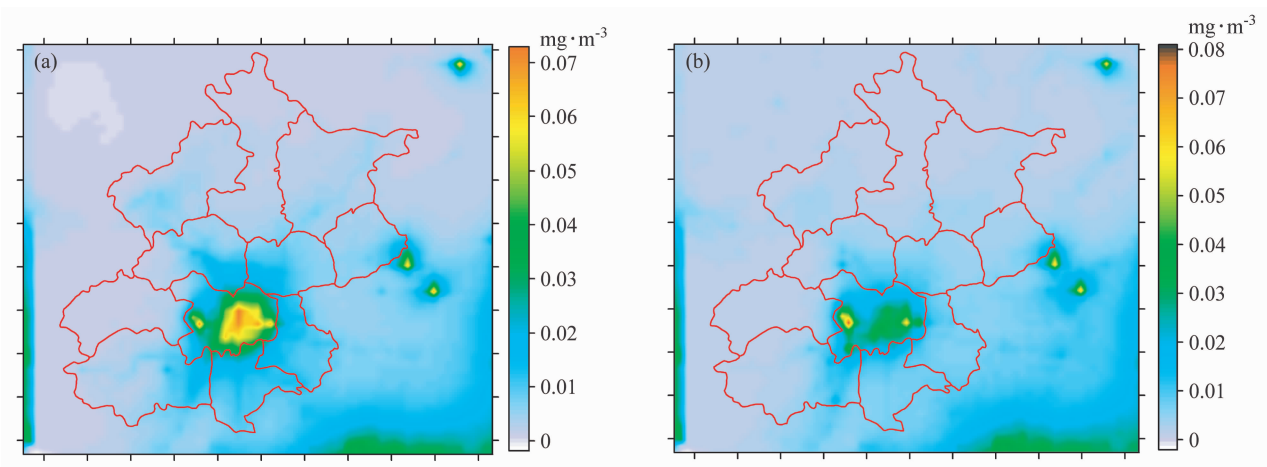


图 7 试验 (a) Ep 和 (b) Ea 中 NO₂ 月均浓度模拟值空间分布
Fig. 7 Distribution of simulated monthly mean concentrations of NO₂ in experiments (a) Ep and (b) Ea

4.4 不同污染控制措施影响分析

采用同样方法分析不同污染控制措施的影响。气象场均为 2008 年 8 月气象场，设计 4 组试验：(1) 情景 E0，即排放源中点源、面源均为 2006 年 8 月基准情景；(2) 情景 Ea，即排放源中点源为 2006 年 8 月基准情景，面源施加污染控制措施的排放情景；(3) 情景 Ep，即排放源中点源为施加污染控制措施的排放情景，面源为 2006 年 8 月基准情景；(4) 情景 Eap，即排放源中点源、面源均为施加污染控制措施的排放情景。模拟浓度、实测浓度以及浓度变化率的含义同表 2，结果见表 3。试验 Ep 与 E0 中 NO₂ 月均浓度水平分布见图 7。可以看出，面源和点源的不同污染控制措施使得 NO₂ 模拟浓度降幅分别为 43% 和 10%，二者共同作用下 NO₂ 模拟浓度降低 55%，由此判断面源的污染控制措施作用更为明显。

表 3 评估面源与点源控制措施影响的模拟试验设计及其结果
Table 3 Design of experiments on impacts of pollutant controlling measures of area and point emissions by factor separation analysis and results

试验名称	控制措施	NO _x 源总量/t·a ⁻¹	模拟浓度/mg·m ⁻³	浓度变化率/%	实测浓度/mg·m ⁻³
E0	无，即 2006 年基准排放源	102476	0.049	—	—
Ea	仅控制面源	76862	0.028	57%	—
Ep	仅控制点源	102476	0.044	90%	—
Eap	点源、面源均控制	76862	0.022	45%	0.023

5 结论

利用嵌套网格空气质量模式系统 (NAQPMS/IAP)，采用敏感性试验方法，评估了气象条件与污染控制措施对北京奥运会期间 NO₂ 浓度降低的影响，并进一步评估了不同污染控制措施的作用，研究结果表明：

- (1) 模式的模拟结果与实测浓度具有较好的一致性，说明 NAQPMS/IAP 模式能够较为合理的模拟北京地区 NO₂ 的时空分布特征。
- (2) 以 2006 年 8 月为基准，北京奥运会的气象条件使得 NO₂ 浓度降低幅度为 8%；污染控制措施使得 NO₂ 浓度降低幅度为 55%，表明污染控制措施是北京奥运会期间 NO₂ 浓度降低的主要影响因素。
- (3) 面源和点源控制措施单独作用使得北京奥运会期间 NO₂ 浓度降低幅度分别为 43% 和 10%，其中面源控制措施对 NO₂ 浓度降低的作用更为明显。

参考文献 (References)

Hao J, Wang L. 2005. Improving urban air quality in China: Beijing case study [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 55 (9): 1298-1305.
清华大学. 2006. 北京市大气 PM10 和 O₃ 污染的控制战略和措施研究 [R]. Tsinghua University. 2006. Studies on PM10 and O₃ air quality controlling strategies and measures in Beijing [R].

- 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.
- 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 2006 大气环境化学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 217 - 232. Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, Shao Min. 2006. *Atmosphere Environmental Chemistry (V. 2)* [M] (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 217 - 232.
- 王自发, 黄美元, 何东阳, 等. 1997. 关于我国和东亚酸性物质的输送研究 I: 三维欧拉污染物输送实用模式 [J]. *大气科学*, 21 (3): 367 - 378. Wang Zifa, Huang Meiyuan, He Dongyang, et al. 1997. Studies on transport of acid substance in China and East Asia, Part I: 3-D Eulerian transport model for pollutants [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 21 (3): 367 - 378.
- 王自发, 谢付莹, 王喜全, 等. 2006. 嵌套网格空气质量预报模式系统的发展与应用 [J]. *大气科学*, 30 (5): 778 - 790. Wang Zifa, Xie Fuying, Wang Xiquan, et al. 2006. Development and application of nested air quality prediction modeling system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 778 - 790.
- Zaveri R A, Peters L K. 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. *J. Geophys. Res.*, 104 (D23): 30387 - 30415.