

吴其重, 王自发, 李丽娜, 等. 2010. 北京奥运会空气质量保障方案京津冀地区措施评估 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 662–671. Wu Qizhong, Wang Zifa, Li Lina, et al. 2010. Assessment on the effectiveness of the air quality assurance program in Beijing–Tianjin–Hebei area during the Beijing Olympic Games period [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 662–671.

北京奥运会空气质量保障方案京津冀地区措施评估

吴其重^{1,2,3} 王自发¹ 李丽娜⁴ 高超^{1,3} 李杰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 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竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

4 北京市环境保护局, 北京 100048

摘要 采用嵌套网格空气质量预报模式系统 (NAQPMS) 源追踪方法, 研究了奥运会北京空气质量保障方案京津冀污染控制措施对北京城八区 (包括东城区、西城区、崇文区、宣武区、海淀区、朝阳区、丰台区和石景山区) 空气质量的影响, 量化基准、减排情景下京津冀地区对北京城八区 SO_2 、可吸入颗粒物 (PM_{10}) 浓度的贡献率。首先, 模式对比验证结果表明, NAQPMS 较好地模拟出奥运会同期 (2006 年 8 月) 北京空气质量状况。其次, 源追踪方法研究结果表明: 1) 除平谷县外, 其余各区县 SO_2 、 PM_{10} 浓度北京污染源贡献占主导地位, 特别是城八区, 北京污染源对 SO_2 、 PM_{10} 月平均浓度的贡献百分比都超过 80%。2) 保障方案污染减排情景下, 一方面北京污染源对城八区 SO_2 贡献浓度显著减小; 另一方面除张家口外, 天津、河北各源区对城八区 SO_2 贡献浓度略微下降, 综合效果下, 城八区 SO_2 浓度将显著下降。与此同时, 分析表明北京污染源对城八区 SO_2 浓度贡献效率将增加。3) 保障方案减排情景下, 北京污染源对城八区一次 PM_{10} 贡献浓度也显著减小, 而天津、河北各源区对城八区一次 PM_{10} 浓度则略有增加, 这与周边源区对城八区 SO_2 浓度贡献特征略有不同, 综合效果下, 北京本地强有力的颗粒物削减措施依然可有效降低城八区近地面 PM_{10} 浓度。

关键词 空气质量 污染控制措施 数值模拟 源追踪 北京奥运会

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0662-10 **中图分类号** X51 **文献标识码** A

Assessment on the Effectiveness of the Air Quality Assurance Program in Beijing–Tianjin–Hebei Area during the Beijing Olympic Games Period

WU Qizhong^{1,2,3}, WANG Zifa¹, LI Lina⁴, GAO Chao^{1,3}, and LI Jie¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, Beijing 100048

Abstract The Nested Air Quality Prediction Model System (NAQPMS) coupled with an on-line pollutant source tracking module is utilized to estimate the contributions of the air pollutants, i.e., SO_2 and PM_{10} , from Beijing

收稿日期 2010-05-07 收到, 2010-07-20 收到修定稿

资助项目 北京市科委项目 094201G801 和国家高技术研究发展计划项目 20060106A3004

作者简介 吴其重, 男, 1982 年出生, 博士, 讲师, 从事大气化学数值模拟、地球系统模式研究。E-mail: robotalpha@gmail.com

and its surrounding areas to urban Beijing under the air quality assurance program for Beijing Olympic Games quantitatively. The results indicate that: 1) The contribution of the local emissions of Beijing is predominant in the SO_2 and PM_{10} concentration in all counties except Pinggu County, especially in urban Beijing, where the contribution of Beijing emissions exceeds 80% of the SO_2 and PM_{10} concentrations. 2) Under the pollutant control measures in the air quality assurance program, the contribution of Beijing emissions to the SO_2 concentration in urban Beijing reduced significantly, and that of the surrounding areas (Tianjin and Hebei) to SO_2 concentration had a slight decline, thus, the SO_2 concentration in urban Beijing decreased significantly, but the contribution per unit emission of Beijing local emissions increased. 3) The contribution of Beijing emission to primary PM_{10} concentration in urban Beijing decreased significantly while the surrounding contributions had a slight increase, and therefore the PM_{10} concentration also decreased under the air quality assurance program.

Key words air quality, pollutant control measure, numerical simulation, source tracking, the Beijing Olympic Games

1 引言

随着 2008 年奥运会在北京召开，北京市的空气质量越来越引起人们的重视。为改善北京空气质量，针对本地污染物的排放，北京市近年来采取一系列大气污染控制措施，局地性重污染有所减少。Hao et al. (2007) 介绍了几年来北京电厂脱硫、除尘等治理措施，给出 2008 年北京电厂排放清单，研究结果表明，相对于 2000 年，北京 2008 年电厂 SO_2 、可吸入颗粒物 (PM_{10}) 排放量显著下降，六大电厂 SO_2 由 $10 \text{ 万 t} \cdot \text{a}^{-1}$ 削减到 2008 年的 $6123 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ， PM_{10} 排放由 $11633 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 削减到 $1726 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。经过多年努力，北京 SO_2 和 PM_{10} 浓度分别从 1998 年的 $0.120 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 1999 年的 $0.180 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (北京市环境保护局，2004a, 2004b) 下降到 2007 年的 $0.047 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.148 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (北京市环境保护局，2008)，然而这距奥运会承诺空气质量标准尚有距离。另一方面，大量研究显示，随着北京周边地区经济的加速发展，区域性污染问题日益严峻，有必要量化周边地区对北京空气质量的影响。Streets et al. (2007) 为期 1 个月的模拟显示，北京周边地区夏季对北京 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响达到 34%。其研究主要针对包含郊区县县的“大北京”，未细化周边污染源对北京各区县影响，尤其是对北京城八区空气质量影响。

为保障奥运会期间北京空气质量，北京市环境保护局组织北京大学、清华大学和中国科学院大气物理研究所 (IAP/CAS) 等多家科研单位联

合开展《北京与周边地区大气污染物输送、转化及北京市空气质量目标研究》项目研究，并于 2006 年夏季成功进行针对北京大气环境的大型综合观测试验 CAREBeijing-2006 (Campaign of Air Quality Research in Beijing)。本文在此试验的基础上校验数值模式模拟结果，研究减排情境下区域污染物消减方案对北京空气质量改善的作用，量化评估周边地区大气污染控制治理措施及其对北京空气质量影响，为提交国务院审批的奥运会北京空气质量保障方案的制定提供模式评估数据 (唐孝炎等，2007)。

相对于前人研究，本文主要针对可操作的消减方案下北京空气质量响应，削减方案以北京及周边地区的工业、机动车等各类大气污染研究作为基础，在成本以及技术改造可行的前提下，系统评估不同物种排放消减量。同时本文使用的源追踪法 (Li et al., 2008) 可实时在线追踪、解析多个地区对北京的影响，重点分析天津及河北各地市对北京空气质量的影响。本文结合 GIS 技术，区分对待不同目标区，细化北京及周边污染源对北京各区县污染浓度贡献，尤其是对北京城八区污染贡献，对比分析减排措施对城八区空气质量影响。

2 模式及方案介绍

美国大气研究中心和宾夕法尼亚州立大学 (NCAR/PSU) 共同开发的第五代中尺度气象模式 (MM5) (Grell et al., 1994) 被用来为嵌套网格空气质量模式 (NAQPMS) 提供气象驱动。

MM5 模式被广泛应用于空气质量数值模拟中,可为空气质量数值模式提供气象驱动,如美国环境保护局(EPA)推荐使用的 CMAQ 模式、Environ 公司的 CAMx、法国 Polyphemus 模式。气象模式初始和边界条件取自 NCEP 提供的 FNL 全球分析资料数据集,空间分辨率 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度),时间频率 6 h 一次;采用分段方式模拟,每日模拟以 20 时(北京时间,下同)起始,每次模拟 36 h 取后 24 h,前 12 小时作为模式“磨合时间”(Colle et al., 1999; Lo et al., 2007);依据吴其重(2005)、高媛媛等(2007)、王自发等(2009)敏感性测试结果,最终物理参数化方案选用 Grell 积云参数化方案、简单冰相显式微物理方案、云辐射方案、MRF 行星边界层物理参数方案、5 层土壤温度模式方案。

大气污染模式采用中国科学院大气物理研究所自主研发的 NAQPMS,该模式基于三维欧拉硫化物输送模式(王自发等,1997),实现双向嵌套、并行、在线源追踪技术(Li et al., 2008),在我国区域及城市尺度空气质量数值模式研究中广泛应用(王自发等,2006, 2008),并已投入空气质量业务预报。本文在研究中选用 CBM-Z 气相化学机制(Chang et al., 1987; Zaveri and Peters, 1999)、液相化学机制及一维诊断云模式(Terada et al., 2002; 王自发等, 2006),并采用 Padro et al. (1991) 气体干沉降方案结合经验参数法考虑干沉降速率及雨水冲刷过程下的湿清除(王自发等, 1997; Wang et al., 2006)、Zhang

et al. (2001) 颗粒分谱方案考虑颗粒物沉降。研究时段针对奥运会赛事的 8 月,模拟时段为 7 月 20 日至 9 月 1 日,其中 7 月 20~31 日作为空气质量模式的“磨合时间”。

区域设置采用 81 km、27 km、9 km 三重网格嵌套区域,研究基准、减排情景下京津冀各地区对北京空气质量的影响。其中,最外层区域覆盖整个东亚,考虑东亚污染物背景浓度影响,第二层嵌套区域考虑华北地区,最小区域覆盖京津冀地区(图 1)。垂直方向上,气象模式 MM5 垂直分层采用 23 层的 $\sigma-p$ 坐标,污染模式 NAQPMS 垂直分层采用 20 层 $\sigma-z$ 坐标,10 层以下气象、污染模式垂直高度接近,取模式第一层作为近地面层分析污染贡献来源。

同时,采用 GIS 技术划分模式源区(图 1),标记模式网格地理属性,结合 NAQPMS 源追踪技术实现主要污染物地理源区追踪。源区划分以行政区划为基础:北京(BJ);天津(TJ);唐山+秦皇岛(TQ);承德(CD);张家口(ZJK);保定(BD);廊坊(LF);石家庄+衡水(SH);沧州(CZ);邢台+邯郸(XH),与排放措施管理区域相对应,有针对性地对源区排放进行削减,研究 2006 年 8 月天气条件下奥运会减排措施效果,分析京津冀各地区减排措施对北京空气质量影响,评估减排情景下各源区对城八区 SO_2 、 PM_{10} 贡献浓度。

为周边地区空气质量保障方案的制定提供模式评估数据,定量分析北京本地及周边地区单位

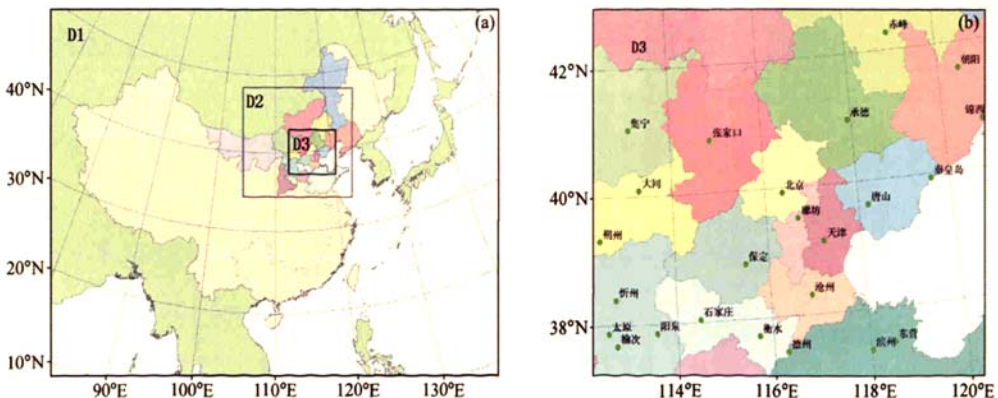


图 1 3 层嵌套模式 (a) 模拟区域设置及 (b) 地理源区定义

Fig. 1 The three nested (a) domains setup and (b) source regions definition

污染物排放对北京空气质量影响，评估减排措施效率，本文定义源区（北京本地及周边地区）对目标区（北京各区县）空气质量贡献浓度效率 c 为

$$c = C/E, \tag{1}$$

其中， C 为源区对目标区空气质量贡献浓度， E 为源区对应污染物种排放速率。本文以 c 评估京津冀各地区减排措施对北京 SO_2 、 PM_{10} 浓度贡献及其效率变化特征。

3 奥运会北京空气质量保障方案介绍

本文以 2006 年 8 月为基准情景，京津冀各地区排放量如表 1 所示，该排放清单由北京市环境保护局、清华大学、中国环境科学研究院和北京工业大学联合提供，包含北京、天津及河北重点工业点源、各类无组织面源及华北六省市（北京、天津、河北、山西、山东、内蒙古）电厂排放清单；东亚其他区域则采用 TRACE-P 排放清单 (Streets et al., 2003)，空间分辨率为 $6'$ (纬度) $\times 6'$ (经度)，更新至 2002 年。奥运会北京空气质量保障方案中北京地区控制方案由清华大学提供，周边省市控制方案由北京大学提供，考虑各种措施策略下污染物减排量。

奥运会前常规控制措施通过对北京经济发展引起的排放增长率及北京大气污染治理工作成效预

估，考虑 6 大电厂脱硫、高效除尘 (Hao et al., 2007)、新机动车排放标准的施行等措施 (Hao et al., 2006) 减排削减量；周边地区奥运会前常规控制情景则是在不考虑排放增长量的背景下，考虑重点区域产业结构调整，包括淘汰小火电、淘汰小燃油锅炉、落后钢铁生产工艺、小钢厂、落后陶瓷水泥生产工艺及其他产业结构调整措施，以及华北地区部分大型火电企业脱硫工程实施执行情况，预估减排量。

同时针对奥运会期间（7 月 20 日至 9 月 20 日）制定临时保障措施，以保障奥运会空气质量的达标。北京地区临时措施包括重点污染企业减产停产、机动车限行、施工工地停工降尘、加大道路清扫频率等措施；周边临时措施则主要针对火电厂，采用低硫低灰质优质煤，减少 SO_2 和烟尘颗粒物排放。

4 结果与讨论

本文在研究基准情景下周边源区对北京空气质量贡献的基础上，对比研究减排情景对北京空气质量影响及贡献浓度变化，主要针对 SO_2 和 PM_{10} 浓度。 SO_2 是北京及周边大气污染物排放量削减最为明显的物种，主要通过大型电厂脱硫工程实施来实现；而 PM_{10} 是近年来北京空气质量最主要污染物种，也是北京及周边大气环境质量治理、奥运会空气质量保障的重点。

4.1 基准情景模式效果评估

以 2006 年 8 月 CAREBeijing-2006 期间中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔（大塔）120 m、280 m 高度处 SO_2 和 PM_{10} 小时浓度观测结果与 NAQPMS 模拟结果进行对比验证。其中，NAQPMS 结果取第 2 层（为 120 m，中间层高度 125 m）、第 3 层（为 280 m，中间层高度 262.5 m）进行对比验证。结果表明（表 2 和图 2），不同垂直层 SO_2 和 PM_{10} 模拟值与观测值都有很好的相关性，相关系数都在 0.7 以上，模拟相对于观测整体偏高。模拟值整体偏高的可能原因：模式系统误差，由于模式基本参数选取引起的系统误差；二是排放源本身的不确定性引起的系统误差，尤其是排放源空间分布不确定性、排放时间变化不确定性引起的系统误差；模式垂直层与观

表 1 基准和减排情景排放总量
Table 1 The emission under base and measure scenarios
 $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$

省份（市）地区		基准情景		减排情景	
		SO_2	PM_{10}	SO_2	PM_{10}
北京	BJ	19.98	19.82	6.98	9.18
天津	TJ	41.37	28.07	32.37	24.21
河北	TQ	35.70	31.79	25.59	25.07
	CD	9.05	7.99	7.37	6.88
	ZJK	6.99	13.61	6.88	13.56
	BD	13.61	11.61	10.93	9.04
	LF	2.17	5.22	2.16	5.20
	SH	51.55	29.90	39.01	24.15
	CZ	3.13	6.95	2.73	6.74
	XH	48.29	38.72	36.86	33.54
合计		170.49	145.79	131.53	124.18

表 2 中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔模拟与实测对比统计参数
Table 2 Statistical parameters between simulations and observations from 325-m meteorological tower in the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (IAP/CAS)

高度/m	参数							
	观测平均 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	模拟平均 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	平均偏差 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	平均绝对误差 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	误差均方根 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	标准平均 偏差	标准平均 误差	相关 系数
SO ₂	120	51.34	64.14	12.77	18.11	26.89	0.35	0.78
	280	34.89	43.34	8.43	14.00	21.94	0.42	0.73
PM10	120	68.49	97.61	29.12	30.35	35.89	0.57	0.85
	280	34.39	68.48	34.10	34.41	39.36	1.70	0.78

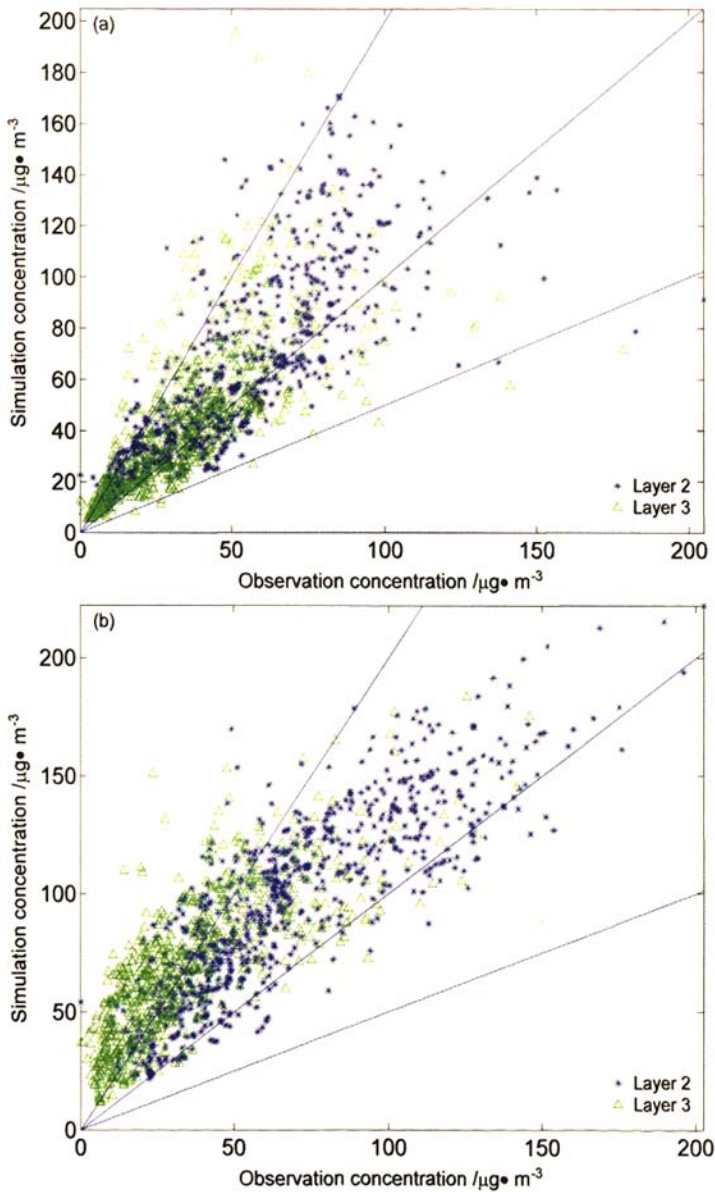


图 2 中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔模拟与实测散点图：(a) SO₂；(b) PM10
Fig. 2 The scatter diagram between simulations and observations from 325-m meteorological tower in the IAP/CAS: (a) SO₂; (b) PM10

测垂直层高度对应不一致，模拟结果较好地反映出 SO₂、PM10 浓度随高度增加而减少的特征。总体而言，模式系统对 SO₂ 和 PM10 的模拟结果基本能反映污染物种浓度变化特征，可作进一步分析使用。

4.2 基准情景下北京各区县 SO₂、PM10 浓度来源

在 NAQPMS 较好地反映北京污染物特征的基础上，本文进一步研究基准情景下源区对北京空气质量贡献。相对于前人的研究，本研究区分源区对北京各区县的贡献，从而分析源区对奥运会场馆密集的城八区污染物浓度贡献。

北京全市范围内，城八区 SO₂ 浓度最高（图 3a），北部山区县 SO₂ 浓度较低，西南部区县（房山、门头沟）SO₂ 月均浓度较高。除平谷县外，其余各区县北京污染源贡献的 SO₂ 浓度均占主导地位，贡献百分比均超过 50%；平谷县靠近天津东北部蓟县，该地区有两个大型燃煤电厂，SO₂ 排放量较大，因而对平谷县 SO₂ 浓度贡献大。

由图 3b 可知，平谷县 SO₂ 浓度受周边影响最大，主要受前述的天津电厂输送影响；同时天津输送的 SO₂ 污染物在北京东部区县（密云、顺义、通州）的外来贡献浓度中占主导地位；来自保定

表 3 不同情景下京津冀源区对北京城八区 SO₂ 贡献
Table 3 The contributions of the SO₂ concentration from Beijing - Tianjin - Hebei source regions to urban Beijing under the different scenarios

源区	基准情景				减排情景			
	贡献浓度 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	贡献效率 / $10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{a}$	最大日均 贡献浓度 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	最大日均贡献 效率/ $10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{a}$	贡献浓度 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	贡献效率 / $10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{a}$	最大日均 贡献浓度 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	最大日均贡献 效率/ $10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{a}$
BJ	26.06	1.31	33.68	1.69	10.35	1.48	13.22	1.99
TJ	0.28	0.01	1.29	0.03	0.23	0.01	1.01	0.03
TQ	0.02	0	0.13	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01
CD	0.02	0.01	0.15	0.02	0.02	0.01	0.16	0.02
ZJK	0.08	0.01	0.55	0.08	0.09	0.01	0.64	0.09
BD	0.30	0.02	1.37	0.10	0.24	0.02	0.99	0.09
LF	0.15	0.07	0.39	0.18	0.14	0.07	0.38	0.18
SH	0.01	0	0.06	0.01	0.01	0	0.06	0.01
CZ	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
XH	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0

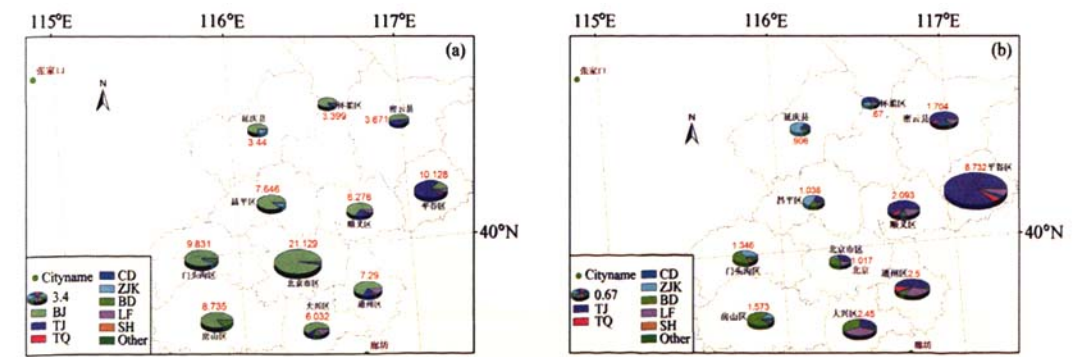


图 3 基准情景下周边对北京各区县模式底层 SO₂ 月平均浓度贡献：(a) 包括北京污染源贡献；(b) 不计北京污染源贡献
Fig. 3 Contributions of the surrounding areas to monthly mean SO₂ concentration over the suburbs of Beijing: (a) Including Beijing local contribution; (b) without Beijing local contribution under base scenario

的 SO₂ 污染物则在西南部区县（房山、门头沟）占外来贡献主导地位；张家口的 SO₂ 污染物则主要影响西北部区县（延庆、昌平、门头沟、怀柔），并在延庆、昌平 SO₂ 浓度外来源中占主导地位；东南部的大兴 SO₂ 外来源则受来自天津、保定、廊坊三方影响。各区县受周边源区影响程度与其地理位置密切相关，从另一侧面证明 NAQPMS 源追踪法评估北京各区县污染来源的合理性。

处于北京中心位置的城八区 SO₂ 外来贡献则主要来自保定、天津和廊坊，周边各源区对城八区 SO₂ 贡献效率见表 3。值得一提的是，该贡献效率结果为北京及周边尤其是京津冀 SO₂ 控制方案的制定提供模式评估数据。

由图 4 可知，除平谷县外各区县北京污染源贡献的 PM₁₀ 污染物在当地 PM₁₀ 浓度占主导，贡献百分比均超过 50%，控制北京各区县近地面 PM₁₀ 浓度关键还是控制北京本地颗粒物排放。北京各区县中，平谷受周边影响最大，周边源区对平谷县一次 PM₁₀ 浓度贡献达 12.8 μg · m⁻³，这一特征与平谷县 SO₂ 浓度周边贡献占主导相对应，都是受天津东北部大电厂颗粒物排放影响；平谷县 PM₁₀ 浓度来源中，北京、天津颗粒物贡献大致相当，各占 1/3，其他源区贡献占 1/3。受外来 PM₁₀ 浓度影响其次是邻近廊坊的东部区县（大兴、通州、顺义），周边贡献一次 PM₁₀ 浓度分别达 8.7 μg · m⁻³、7.3 μg · m⁻³、5 μg · m⁻³，主要 PM₁₀ 污染都是来自廊坊，其 PM₁₀ 浓度贡献占东部区县外来源贡献的 50% 以上；承德、天

津、廊坊是密云县的周边一次 PM₁₀ 浓度主要贡献来源；张家口在西部区县（延庆、昌平、门头沟）周边一次 PM₁₀ 贡献占据主导地位；保定在房山周边一次 PM₁₀ 贡献占主导地位。总体上，PM₁₀ 区域贡献特征与 SO₂ 略有差别。

廊坊、保定是周边对城八区一次 PM₁₀ 污染的主要输送源区，约占城八区周边贡献的 2/3（表 4），廊坊对城八区最大日均浓度贡献效率达到 0.32 × 10⁻⁴ μg · m⁻³ · t⁻¹ · a；同时也可以看出，周边地区对城八区贡献 1.6 μg · m⁻³，远小于北京污染源贡献，提升城八区颗粒物空气质量主要还要看北京自身对颗粒物控制状况，尤其是对 PM₁₀ 排放的控制。

4.3 基准和减排情景贡献浓度及贡献效率变化

本文重点针对奥运会场馆密集的城八区，研究保障方案对城八区空气质量影响，京津冀地区是奥运会空气质量保障的重点地区，本文着重分析京津冀减排措施对城八区 SO₂、PM₁₀ 浓度影响，分析减排情景下的 SO₂、PM₁₀ 浓度来源变化。

由表 3 可知，除张家口源区外，各源区对北京城八区 SO₂ 月平均贡献浓度都有下降，各源区有力的 SO₂ 削减方案有助于降低城八区 SO₂ 浓度，保定、天津对城八区 SO₂ 贡献浓度下降最为明显；同时，北京本地 SO₂ 排放对城八区贡献浓度效率略有上升，引起这一现象的可能原因，一方面是排放量减少引起的分母减小效率，另一方面由于北京本地 SO₂ 排放削减力度大于周边地区，本地排放贡献的每万吨 SO₂ 向外输出量减少，本地排

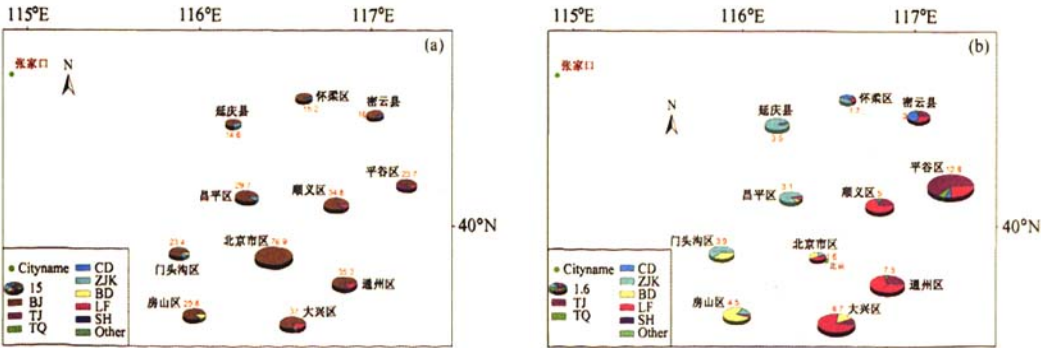


图 4 同图 3，但为 PM₁₀
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for PM₁₀

表 4 不同情景下京津冀各源区对北京城八区一次 PM10 贡献
Table 4 The contribution of primary PM10 concentration from Beijing - Tianjin - Hebei source regions to urban Beijing under the different scenarios

源区	基准情景				减排情景			
	贡献浓度 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	贡献效率 / $10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{a}$	最大日均 贡献浓度 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	最大日均贡献 效率/ $10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{a}$	贡献浓度 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	贡献效率 / $10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{a}$	最大日均 贡献浓度 / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	最大日均贡献 效率/ $10^{-4} \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{a}$
BJ	26.06	1.31	33.68	1.69	10.35	1.48	13.22	1.99
TJ	0.28	0.01	1.29	0.03	0.23	0.01	1.01	0.03
TQ	0.02	0	0.13	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01
CD	0.02	0.01	0.15	0.02	0.02	0.01	0.16	0.02
ZJK	0.08	0.01	0.55	0.08	0.09	0.01	0.64	0.09
BD	0.30	0.02	1.37	0.10	0.24	0.02	0.99	0.09
LF	0.15	0.07	0.39	0.18	0.14	0.07	0.38	0.18
SH	0.01	0	0.06	0.01	0.01	0	0.06	0.01
CZ	0.01	0.01	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01
XH	0.01	0	0.01	0	0.01	0	0.01	0

放贡献效率增加；周边源区对城八区 SO₂ 月平均贡献效率变化不大。除承德、张家口源区对城八区最大日均贡献浓度略增加外，周边其余源区对城八区最大贡献浓度都略有减小，与月平均贡献浓度相似，正说明了周边措施对北京 SO₂ 浓度改善的作用。

在减排情景下，北京大规模削减颗粒物排放（表 1），削减幅度超 50%，同时周边也削减部分颗粒物排放，天津 PM10 排放由 28 万 t·a⁻¹ 削减到 24 万 t·a⁻¹，河北 PM10 排放由 145 万 t·a⁻¹ 减到 124 万 t·a⁻¹，但其削减力度远小于北京。由表 4 可知，减排措施下北京本地排放对城八区一次 PM10 贡献浓度显著下降，月平均贡献浓度由 78.483 μg·m⁻³ 下降到 38.902 μg·m⁻³，最大日均贡献浓度也由 97.932 μg·m⁻³ 下降到 47.140 μg·m⁻³，贡献浓度大约下降 50%，与此同时，贡献浓度效率略有上升，与北京污染源在减排情景下对 SO₂ 浓度贡献效率变化特征相似。

除 TQ 源区外，各主要周边源区对城八区一次 PM10 贡献浓度都略有上升，主要原因在于周边地区颗粒物削减力度远小于北京削减量；同时周边颗粒物削减力度也小于 SO₂ 排放削减，因此，周边对城八区 SO₂ 贡献浓度下降而对北京 PM10 贡献浓度略有上升；与此同时，PM10 贡献浓度效率增加比 SO₂ 明显。这说明在北京大规模削减排放的同时，周边地区对北京输送贡献会有所增

加，也说明了削减北京污染源的同时削减周边污染物排放的重要性。另一方面，在此减排情景下，周边对城八区一次 PM10 贡献浓度增量远小于北京污染源减排措施对城八区一次 PM10 贡献浓度减少量，北京强有力的颗粒物削减措施依然可以有效削减颗粒物浓度。

5 小结

本文采用 NAQPMS 源追踪法，分析基准情景下北京各区县 SO₂ 及 PM10 浓度主要来源，重点分析城八区 SO₂、PM10 来源。研究表明，各区县受周边地区影响程度与其地理位置密切相关。除平谷县外各区县近地面 SO₂、PM10 北京污染源贡献占主导地位，其中城八区的 SO₂、PM10 浓度中北京污染源贡献占 80%。周边地区对城八区近地面贡献 2.905 μg·m⁻³ 的 SO₂、1.6 μg·m⁻³ 的一次 PM10 浓度，周边贡献的 SO₂ 主要来自保定、天津和廊坊，一次 PM10 浓度外来源主要来自廊坊和保定；相对于 SO₂，一次 PM10 受周边影响局地性更强，各区县主要周边污染源区位置更为邻近。北京污染源在城八区 SO₂、PM10 浓度贡献占主导，控制城八区 SO₂、PM10 浓度的关键在于控制北京污染源排放。

减排情景下，北京及周边各源区通过采用大型电厂脱硫等措施大规模削减 SO₂ 排放源，北京

污染源 SO_2 贡献浓度显著减小, 周边源区除张家口外对城八区 SO_2 月平均浓度贡献都有下降, 因此在减排情景下城八区 SO_2 平均浓度显著下降, 可达到奥运会空气质量对 SO_2 浓度要求。同时由于北京 SO_2 大力度削减, 且力度大于周边地区, 北京污染源排放 SO_2 对北京城八区贡献效率有所增加。与之对应, 在减排情景下, 北京较大规模削减颗粒物排放, 北京污染源对城八区 PM_{10} 贡献浓度显著减小, 而周边主要源区对城八区 PM_{10} 浓度略有增加, 总体上, 北京强有力的颗粒物削减措施依然可有效削减颗粒物浓度。

随着奥运会顺利召开, 奥运会期间北京的空气质量达到国际标准, 表明奥运会保障方案的有效实施取得关键作用。在未来的研究中, 将评价奥运会保障措施在奥运会期间执行力度及其对北京空气质量影响, 评估奥运会期间北京及周边实际减排量, 为北京奥运会后空气质量治理提供宝贵经验。

参考文献 (References)

- 北京市环境保护局. 2004a. 1999 年北京市环境状况公报 [R]. 北京. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2004a. Beijing Environmental Bulletin in 1999 [R]. Beijing.
- 北京市环境保护局. 2004b. 2000 年北京市环境状况公报 [R]. 北京. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2004b. Beijing Environmental Bulletin in 2000 [R]. Beijing.
- 北京市环境保护局. 2008. 2007 年北京市环境状况公报 [R]. 北京. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau. 2008. Beijing Environmental Bulletin in 2007 [R]. Beijing.
- Chang J S, Brost R A, Isaksen I, et al. 1987. A three-dimensional eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation [J]. *J. Geophys. Res.*, 92: 14681–14700.
- Colle B A, Westrick K J, Mass C F. 1999. Evaluation of MM5 and Eta-10 precipitation forecasts over the Pacific Northwest during the cool season [J]. *Wea. Forecasting*, 14: 137–156.
- 高媛媛, 何金海, 王自发. 2007. 城市化进程对北京区域气象场的影响模拟 [J]. *气候与环境学报*, 23: 58–64. Gao Y, He J, Wang Z. 2007. Simulation for impact of urbanization on meteorological conditions in Beijing area [J]. *Journal of Meteorological and Environment (in Chinese)*, 23 (3): 58–64.
- Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. 1994. A description of the Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) [R]. Natl. Cent. for Atmos. Res. Natl. Cent. for Atmos. Res., Boulder, Colo., Tech. Note NCAR/TN-398+STR.
- Hao J, Hu J, Fu L. 2006. Control vehicular emissions in Beijing during the last decade [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 40 (8): 639–651.
- Hao J, Wang L, Shen M, et al. 2007. Air quality impact of power plant emissions in Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 147 (2): 401–408.
- Lo J C F, Lau A K H, Chen F. 2007. Urban modification in a mesoscale model and effect on the local circulation in the Pearl River Delta region [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46: 457–475.
- Li J, Wang Z, Akimoto H, et al. 2008. Regional-scale modeling of near-ground ozone in the Central East China, source attributions and an assessment of outflow to East Asia—The role of regional-scale transport during MTX2006 [J]. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, (8): 13159–13195.
- Padro J, Denhartog G, Neumann H H. 1991. An investigation of the Adom dry deposition module using summertime O_3 measurements above a deciduous forest [J]. *Atmos. Environ.*, 25 (8): 1689–1704.
- Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. 2003. An inventory of gaseous and primary aerosol emission in Asia in the year 2000 [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D21): 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.
- 唐孝炎, 郝吉明, 贺克斌, 等. 2007. 第 29 届奥运会北京空气质量保障方案华北五省市措施研究 [R]. 北京: 160–178. Tang X, Hao J, He K, et al. 2007. Studies on the air quality assurance program for Beijing 29th Olympic Games in North China [R]. Beijing: 160–178.
- Terada H, Ueda H, Wang Z. 2002. Trend of acid rain and neutralization by yellow sand in east Asia — A numerical study [J]. *Atmos. Environ.*, 36 (3): 503–509.
- 王自发, 黄美元, 何东阳, 等. 1997. 关于我国和东亚酸性物质输送的输送研究 I. 三维欧拉污染物输送实用模式 [J]. *大气科学*, 21 (3): 367–378. Wang Z, Huang M, He D, 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 (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 21 (3): 366–378.
- 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*, 55 (3): 253–272.
- 王自发, 庞成明, 朱江, 等. 2008. 大气环境数值模拟研究新进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 987–995. Wang Z, Pang C, Zhu J, et al. 2008. IAP progress in atmospheric environment modeling research [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (4): 987–995.
- 王自发, 吴其重, 谢付莹, 等. 2009. 区域空气质量模拟、预测及情景分析研究—技术报告 [R]. 北京: 28–43. Wang Z, Wu Q, Xie F, et al. 2009. Technological report: Simulation, predic-

- tion and scenarios studies on regional air quality [R]. Beijing: 28 - 43.
- 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 Z, Xie F, Wang X, 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.
- 吴其重. 2005. 我国太阳能时空分布特征的数值模拟及影响因子研究 [D]. 中国科学技术大学本科学位论文. Wu Qizhong. 2005. The distribution of the solar radiation in China and its influencing factor [D]. B. S. dissertation (in Chinese), University of Science and Technology in China.
- Zaveri R A, Peters L K. 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. J. Geophys. Res., 103 (30): 30387 - 30415.
- Zhang L, Gong S L, Padro J, et al. 2001. A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module [J]. Atmos. Environ., 35: 549 - 560.