

邹宇飞, 吴其重, 王自发, 等. 2010. 河北工业面源更新及其对奥运会期间京津冀区域空气质量模拟的影响 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 624-635. Zou Yufei, Wu Qizhong, Wang Zifa, et al. 2010. Update of industrial pollution source in Hebei Province and its effects on regional air quality modelling during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 624-635.

河北工业面源更新及其对奥运会期间京津冀 区域空气质量模拟的影响

邹宇飞^{1,2,3} 吴其重^{1,3} 王自发¹ 朱江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

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 基于北京奥运会实时空气质量预报所用排放清单基础上, 利用卫星影像资料提高京津冀大气污染排放清单空间分辨率, 并考虑加强污染控制措施对排放源的影响, 生成新的污染排放清单。更新排放清单的基础上, 利用嵌套网格空气质量预报模式系统 (NAQPMS) 对奥运会期间北京及周边地区进行大气化学模拟, 以评估奥运会期间北京及周边地区污染排放对空气质量状况的影响。模式结果表明, 更新后的排放清单能够较好地体现奥运会期间的污染排放状况。另外, 情景控制试验结果表明, 脱硫脱硝等一系列减排措施以及紧急污染控制措施, 是奥运会期间北京城区空气质量良好的重要原因。

关键词 污染排放清单 大气化学模式 区域污染 污染减排措施 北京奥运会

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0624-12 **中图分类号** X823 **文献标识码** A

Update of Industrial Pollution Source in Hebei Province and Its Effects on Regional Air Quality Modelling during the 2008 Beijing Olympic Games

ZOU Yufei^{1, 2, 3}, WU Qizhong^{1, 3}, WANG Zifa¹, and ZHU Jiang²

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

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

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract A new air pollution emission inventory of Hebei Province during the 2008 Beijing Olympic Games is generated on the basis of previous Beijing real-time forecast emission inventory from Wang et al. (2006), considering updated emission data and pollution control measures. Then with the help of Nested Air Quality Prediction Model System (NAQPMS), regional air quality simulation is processed to evaluate the updated pollution intensity and its effect. After comprehensive comparison between model outputs and measurements such as ground observation

收稿日期 2010-01-21 收到, 2010-08-04 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”

作者简介 邹宇飞, 男, 1985 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为空气质量数值模拟与资料同化。E-mail: yufeizou@gmail.com

通讯作者 王自发, E-mail: zifawang@mail.iap.ac.cn

and satellite data from space, it is confirmed that the update efforts are resultful to some extent, especially on some primary species such as SO_2 . And a series of pollution control policies are believed to make a crucial contribution, shown by scenario analysis, to the air quality improvement during the Beijing Olympics.

Key words emission inventory, chemical transport model, regional air pollution, pollution control, Beijing Olympic Games

1 引言

为兑现申办承诺，确保奥运会顺利进行，2008年北京及周边地区采取了大量污染削减控制措施，使得该区域污染排放状况较往年发生较大程度改变。如果不能及时在区域污染排放清单中反映此真实排放状况变化，势必影响到上述时段大气化学模拟效果，也不利于相关控制措施的后续评估。根据郝吉明等（2005）的预测研究，2008年污染控制情景下北京地区 SO_2 、 NO_x 和一次可吸入颗粒物（ PM_{10} ）的排放及浓度均有大幅下降，清洁能源推广、产业结构改善、出行结构调整和机动车排放控制等措施都将显著改善空气质量。来自北京市环境监测中心的2008年实际监测结果也对上述预测加以印证，如 SO_2 物种在奥运会期间的月均值较同为非采暖季的2008年5月下降了约61%，即使考虑到气象条件的差异，该降幅也凸显出污染源排放削减的重大影响。而孙雪丽等（2006）、孟伟等（2006）和康娜等（2006）的研究均表明区域输送对北京空气质量也存在一定影响，在大气环境数值模拟过程中需对北京周边地区污染源加以重视。因此，王自发等（2009）以及北京市环境保护局和北京市环境保护监测中心（2009）引进美国 SMOKE 排放模型，在东亚排放清单（Streets et al., 2003）基础上，结合 INTEX-B 电厂清单、华北电厂清单及京津冀本地排放清单建立了北京空气质量多模式系统实时预报清单。本文在此基础上进一步更新河北地区工业面源清单，并采用中国科学院大气物理研究所自主研发的嵌套网格空气质量预报模式系统（Nested Air Quality Prediction Modeling System, NAQPMS）（王自发等，2006）对2008年8月华北地区空气质量进行模拟，以检验更新后的排放清单，对北京奥运会期间的区域污染状况形成初步认识，并为后续污染控制措施评估工作打下良好研究基础。

本文第二节详细介绍了所使用的数值模式系统，第三节对更新前后的污染源排放清单进行比较，第四节为具体的大气环境及情景模拟方案，第五节为模拟结果分析讨论，第六节为文章结论。

2 模式系统介绍

用于北京奥运会时期空气质量模拟的大气化学模式系统由气象模型、排放源处理模型和大气化学模型3部分组成。其中 NAQPMS 大气化学模式是中国科学院大气物理研究所自主研发的区域—城市空气质量模式，包括平流扩散模块、气溶胶模块、干湿沉降模块、大气化学反应模块，其气相化学反应机制采用较新的 CBM-Z（Zaveri and Peters, 1999）机制。同时，采用美国国家大气科学研究中心（NCAR）与宾夕法尼亚州立大学（PSU）合作发展的第五代中尺度静力/非静力模式 MM5 为空气质量模型提供气象驱动，并采用美国 MCNC 环境模式中心开发的 SMOKE 排放源处理模型处理原始排放信息并生成模式所需网格化排放清单，其中 MM5 模式结果也提供给 SMOKE 模型以考虑气象因子对污染排放空间分布的影响。最终通过气象—化学及排放源—化学交互模块实现 MM5 气象模式及 SMOKE 排放源模型与 NAQPMS 大气化学模式的系统整合。模式系统框架如图1所示。

该系统中 MM5 模式的初始和边界条件取自 NOAA 全球预报气象场 GFS（Global Forecasting System）数据集。该数据集空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ，时间步长为 24 h。此外，模式系统采用多重网格嵌套，如图2所示。最大模拟区域覆盖东亚地区，模式网格距 81 km；第二嵌套层覆盖中国华北、东北及蒙古部分地区，模式网格距 27 km；第三层覆盖北京、天津及河北大部分地区，以考虑北京周边地市对北京空气质量的影响，模式网格距 9 km；第四层覆盖北京全市，包括北京市区及郊区县，利于给出更为精确的模式模拟结

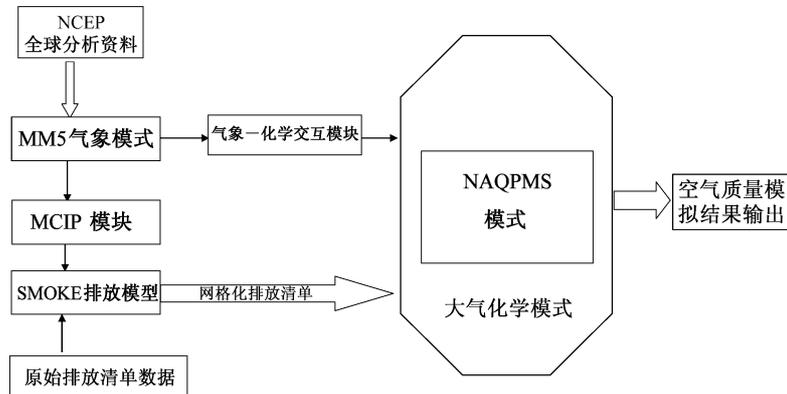


图1 嵌套网格空气质量预报模式系统 (NAQPMS) 模式系统框架结构

Fig. 1 NAQPMS (Nested Air Quality Prediction Model System) model system frame

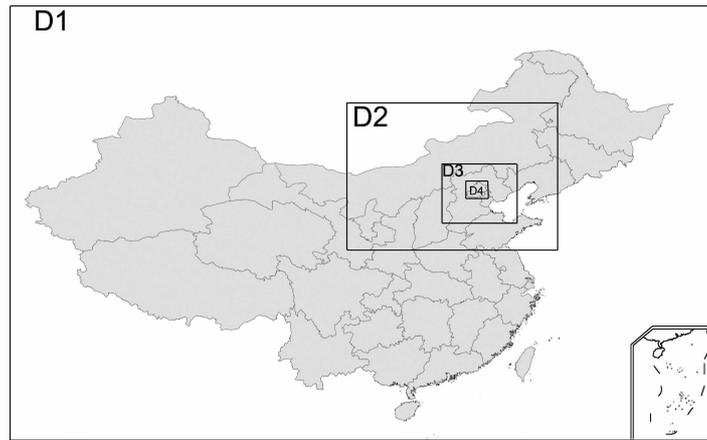


图2 模拟区域嵌套网格设置

Fig. 2 Nested grid setting for simulation domain

果，模式网格距 3 km。此外 NAQPMS 空气质量模式与 MM5 气象模式中的 4 层网格均采用了双向嵌套模拟技术，能够在线反映细网格区域对粗网格区域的反馈作用。SMOKE 排放模型则按同样的区域设置提供四层网格化排放源。

3 排放清单更新比较

在北京奥运会多模式实时预报排放清单中，其“河北工业面源”清单调查达到区县级水平，以面源形式采用“自上而下”的方式进行空间分配到模式网格（北京市环境保护局和北京市环境监测中心，2009；王自发等，2009）。近年来，随着 Google Earth 等 GIS (Geographic Information System) 地图搜索技术的发展，可较为方便的搜

索获取大量工矿企业地理位置信息，因而本文采用 Google Earth 软件，结合其他地图搜索工具，根据最新调查得到的河北工业面源清单中工矿企业名称查询获得其地理坐标信息，使得更新后清单空间精度达到乡镇级分辨率以上，并以点源形式放入 SMOKE 模型中进行后处理。调整后生成的 2008 年 8 月 D3 区域网格化排放清单（以 SO_2 物种为例）如图 3 所示；清单各物种年排放与 INTEX-B2006 年东亚排放清单 (Zhang et al., 2009) 的比较结果见表 1。

4 模拟方案设定

经 SMOKE 排放模型处理生成 2008 年 8 月网格化排放清单后输入 NAQPMS 模式系统进行北京

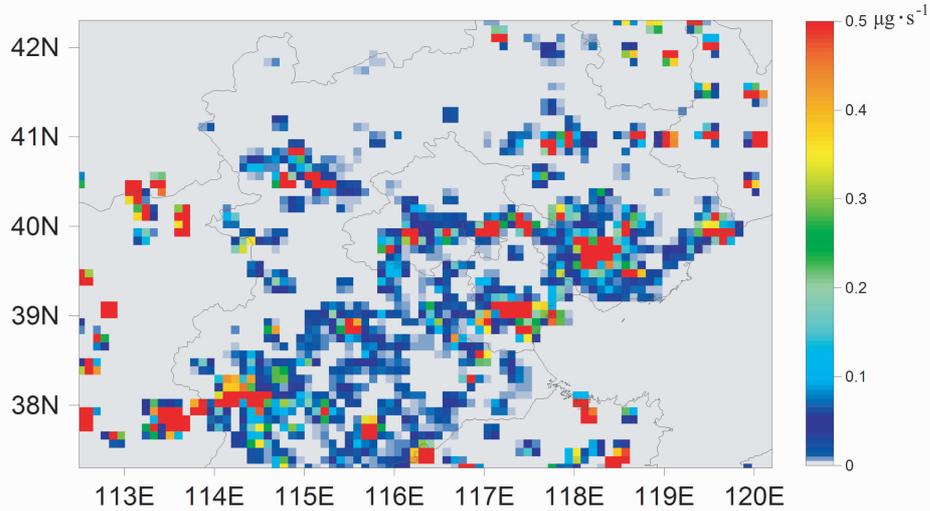


图3 2008年8月D3区域SO₂网格化排放清单

Fig. 3 SO₂ gridded emission inventory for D3 domain during Aug 2008

表1 调整后京津冀地区排放清单与INTEX-B 2006清单比较

Table 1 Comparison between adjusted emission inventory and INTEX-B 2006

t · a⁻¹

地区	项目	VOC	SO ₂	PM2.5	PM10	NO _x	CO
更新后北京	面源	92471.9	14888.7	32854.5	120435.7	29833.0	313206.0
	点源	30107.5	23349.6	13366.4	16021.9	45185.5	469190.0
	流动源	76285.0	—	1058.5	2117.0	59130.0	639845.0
	合计	198864.4	38238.3	47279.4	138574.6	134148.5	1422241.0
INTEX-B北京	面源	81937.5	62717.9	30183.4	36129.7	30428.7	363802.9
	点源	212194.0	179979.5	52450.6	79039.4	166001.5	891963.0
	流动源	202390.5	4854.9	6910.9	7538.2	130249.3	1334797.3
	合计	496522.0	247552.2	89545.0	122707.2	326679.5	2590563.2
更新后天津	面源	167663.3	9846.0	29850.8	65998.8	82670.1	128115.2
	点源	28513.6	93135.4	216129.0	260371.5	145838.2	537067.0
	流动源	—	—	—	—	—	—
	合计	196176.9	102981.4	245979.8	326370.3	228508.3	1817182.2
INTEX-B天津	面源	39631.2	32414.9	19532.6	22225.1	15597.4	250743.3
	点源	261547.1	301842.8	85324.9	134177.2	227948.0	1133191.9
	流动源	79355.7	1849.6	4114.6	4436.3	121211.1	475828.8
	合计	380534.0	336107.3	108972.1	160838.6	364756.5	1859764.0
更新后河北	面源	781206.0	72223.7	1022748.3	1459794.0	431249.0	6284429.0
	点源	307849.0	604614.0	1118472.4	3669615.0	688361.0	12025710.0
	流动源	—	—	—	—	—	—
	合计	1089055.0	676837.7	2141220.7	5129409.0	1119610.0	18310139.0
INTEX-B河北	面源	426773.7	224383.5	274631.7	315704.1	70751.4	3397136.7
	点源	628582.9	2047921.3	676408.4	1022763.9	1026242.0	9539043.7
	流动源	465894.0	8922.5	30297.6	32448.4	211212.6	2568536.6
	合计	1521250.6	2281227.3	981337.6	1370916.4	1308206.0	15504717.0

注：更新后天津、河北两地无单独流动源排放数据，在面源清单中合并计算。

奥运会期间的空气质量模拟,并结合卫星反演及地面站点观测资料对模拟结果进行检验。模拟区域按前述 4 层嵌套网格设置,模拟时间从 2008 年 7 月 31 日 20 时(北京时间,下同)至 8 月 30 日 20 时,时间步长为 1 h。模式检验过程中用到了以下统计参数:平均偏差(MB),根均方差(RMSE),正态均偏差(NMB),正态均方差(NMSE),偏差系数(FB)以及相关系数(R)。参数完整计算公式参见 Chang and Hanna (2004) 和 Shi et al. (2008) 的研究。

用于检验模式结果的站点浓度观测资料来自奥运会期间北京市环境监测中心国控站以及北京大学、中国科学院大气物理研究所等单位提供的站点观测数据;气象观测数据来自北京市气象科学数据共享服务网(<http://cdc.bjmb.gov.cn> [2008-08-30]) 上公布的北京市自动气象站观测资料。用于检验模拟结果空间分布的卫星反演资料来自荷兰皇家气象研究所(KNMI) Boersma et al. (2007) 制作的 V1.0.2 版 OMI 卫星对流层 NO₂ 柱浓度数据产品。

对完全更新清单生成的模式输出加以验证后,还采用情景模拟的方式测试了气象条件及奥运会期间紧急污染控制措施对空气质量的影响。模拟对象选取经检验模拟效果良好、受区域排放影响较大的 SO₂ 物种,地区污染状况以北京国控站点日均浓度平均值表示,详细情景设置如表 2 所示:

表 2 情景模拟方案

Table 2 Simulation scenarios

名称	内容	目的
基准情景 (S1)	采用未考虑紧急污染控制措施的排放源和 2008 年 5 月气象场模拟当月北京地区污染状况	检验非奥运会时段(不考虑紧急污染控制)排放清单对相应时期区域污染排放状况的反映能力
对照情景 (S2)	采用与 S1 相同的排放源和 2008 年 8 月气象场模拟当月北京地区污染状况	对比 S1 情景,考察气象因素对北京空气质量影响;对比清单完全更新后 8 月同期模拟结果(图 6a),考察不同排放状况对北京空气质量影响

5 模拟结果分析

由于排放清单的更新部分主要集中于包含京

津在内的华北地区,因此对模拟的分析检验也是基于覆盖河北地区的 D3 及覆盖北京地区的 D4 这两层模式输出网格结果。华北地区不同站点各主要污染物的模拟观测对比统计如表 3 至表 7 所示。

表 3 SO₂ 站点模拟与观测资料对比Table 3 Statistical comparison between SO₂ simulation and observation
ppb (10⁻⁹)

站点	模拟月 均浓度	观测月 均浓度	MB	RMSE	NMB	FB
奥体	3.78	4.60	-0.81	1.72	-0.11	-0.16
天坛	4.42	3.14	1.28	1.91	0.62	0.39
北医	4.36	4.64	-0.35	4.49	0.62	0.23
北大	3.86	6.03	-2.23	3.27	-0.25	-0.40
阳坊	2.48	2.75	-0.27	1.39	0.05	-0.10
唐山	16.23	14.08	2.14	8.68	0.39	0.16
廊坊	2.77	6.62	-3.85	6.2	-0.29	-0.51
天津	7.98	—	—	—	—	—
沧州	5.92	5.61	0.3	4.39	0.68	0.23
保定	12.95	7.45	6.07	8.2	1.14	0.59
石家庄	23.70	3.75	19.9	21.2	6.98	1.44

注:北京大学医学部简称为北医,北京大学简称为北大,下同。

表 4 NO₂ 站点模拟与观测资料对比Table 4 Statistical comparison between NO₂ simulation and observation
ppb

站点	模拟月 均浓度	观测月 均浓度	MB	RMSE	NMB	FB
奥体	12.38	15.78	-3.40	6.59	-0.16	-0.24
天坛	15.92	15.29	0.63	5.3	0.16	0.06
北医	18.33	14.35	3.98	7.52	40.00	0.28
北大	9.86	19.49	-9.63	10.71	-0.47	-0.65
阳坊	5.4	6.99	-1.59	2.45	-0.23	0.31
唐山	25.59	21.08	4.58	10.55	0.43	0.18
廊坊	2.83	13.66	-10.83	11.44	-0.78	-1.28
天津	11.24	17.34	-6.11	8.02	-0.31	-0.42
沧州	3.17	11.10	-7.94	8.69	-0.69	-1.07
保定	19.05	14.68	4.38	7.34	0.35	0.23
石家庄	20.27	22.34	-2.03	9.01	-0.02	-0.10

表 3 至表 7 数据表明对清单进行更新调整后大部分地区污染模拟效果良好,能够取得与站点观测较为一致的模拟结果,尤其是 SO₂ 等受工业点源排放影响较大的一次污染物种,除石家庄等个别站点外,其他站点模拟观测对比结果均较为合理,在各物种模拟效果比较中表现突出。

表 5 PM2.5 站点模拟与观测资料对比

Table 5 Statistical comparison between PM2.5 simulation and observation ppb

站点	模拟月 均浓度	观测月 均浓度	MB	RMSE	NMB	FB
奥体	62.2	73.00	-10.80	35.66	0.06	-0.03
天坛	71.91	72.77	-0.85	38.47	0.34	0.13
北医	77.87	57.32	20.54	38.21	0.92	0.45
北大	51.48	54.67	-3.19	30.67	0.24	0.08
阳坊	30.93	52.16	-3.40	32.84	0.20	0.07
唐山	54.21	87.74	-33.53	55.83	-0.20	-0.36
廊坊	30.45	65.53	-35.08	51.35	-0.35	-0.53
天津	38.18	68.09	-29.91	50.67	-0.10	-0.38
沧州	28.11	71.19	-43.07	53.45	-0.51	-0.75
保定	54.11	68.99	-14.89	34.49	-0.06	-0.14
石家庄	62.20	73.00	-10.8	35.66	0.06	-0.03

表 6 CO 站点模拟与观测资料对比

Table 6 Statistical comparison between CO simulation and observation mg · m⁻³

站点	模拟月 均浓度	观测月 均浓度	MB	RMSE	NMB	FB
奥体	0.45	0.52	-0.06	0.22	-0.03	-0.09
天坛	0.51	0.72	-0.21	0.27	-0.26	-0.32
北医	0.58	0.62	-0.04	0.19	0.01	-0.03
北大	0.40	0.87	-0.46	0.50	-0.52	-0.72
阳坊	0.19	2.75	-2.60	2.90	-0.92	-1.69
唐山	0.21	—	—	—	—	—
廊坊	0.18	—	—	—	—	—
天津	0.28	—	—	—	—	—
沧州	0.16	—	—	—	—	—
保定	0.29	0.72	-0.42	0.63	-0.44	-0.65
石家庄	0.29	—	—	—	—	—

表 7 O₃ 峰值站点模拟与观测资料对比

Table 7 Statistical comparison between O₃ (peak) simulation and observation ppb

站点	模拟月 均浓度	观测月 均浓度	MB	RMSE	NMB	FB
奥体	96.24	—	—	—	—	—
天坛	97.39	—	—	—	—	—
北医	106.70	82.74	23.45	36.05	0.41	0.27
北大	101.10	74.88	25.42	36.73	0.49	0.32
阳坊	76.89	75.5	9.89	26.96	0.25	0.16
唐山	55.54	73.99	-18.45	35.48	-0.05	-0.18
廊坊	76.44	74.12	2.32	24.02	0.2	0.09
天津	86.11	73.41	12.31	29.87	0.33	0.19
沧州	80.98	75.11	5.87	19.17	0.13	0.09
保定	70.06	79.22	-9.16	24.12	-0.04	-0.08
石家庄	74.62	77.84	-3.73	25.53	0.08	0.01

由于站点观测的空间代表性仍显不足, 故选择和模式输出结果具有相似网格结构的 OMI 卫星反演对流层 NO₂ 柱浓度产品 (NO₂ VCDs) 对模拟值进一步验证。其中 NO₂ 模拟浓度从地表到模式顶层进行积分, 并将卫星观测与模式输出转换到同一经纬度坐标系统中以便比较 (Shi et al., 2008)。由模拟观测散点对比结果 (表 8 和图 4) 可看出, 总体而言对流层 NO₂ 柱浓度模拟值较卫星反演值偏低约 21.1%, 且这种偏差在 NO₂ 柱浓度小于 1.0 × 10¹⁶ mol · cm⁻² 的低值地区表现的更为明显; 而在大于 1.5 × 10¹⁶ mol · cm⁻² 的高值地区, 模拟与观测偏差趋势出现逆转, 主要表现为模拟值远高于卫星反演数据。上述现象一方面是由于卫星反演数据本身具有不确定性及分辨率不足导致的偏差, 有研究表明 OMI 卫星反演误差绝对值可以达到 1.0 × 10¹⁵ mol · cm⁻² (Boersma et al., 2007), 在中国华北平原地区更是存在 +1.6 × 10¹⁵ mol · cm⁻² 的正偏差 (Irie et al., 2008), 这种正偏差在柱浓度量级较低的广大农村地区表现得尤为明显。城市地区下垫面复杂, 地表反射率较高, 城市上空较高浓度气溶胶导致的强吸收性也会对卫星观测造成不良影响使其反演值偏低, 与模拟结果产生偏差; 另一方面, 当前模式对 NO₂ 柱浓度的模拟过程中也存在一系列问题, 除由不准确的地面排放清单以及模式参数等不确定性来源导致的模拟误差外, 三维大气化学模式中 NO₂ 垂直廓线分布与实际观测也存在较大偏差, 这种偏差可能来自未量化考虑闪电 NO 排放 (Cooper et al., 2006; Hudman et al., 2007) 以及对高空 NO₂ 化学生命周期的错误估计。在 Napelenok et al. (2008) 利用卫星观测 NO₂ 柱浓度资料反演地表排放的研究中, 研究者将 CMAQ 模拟的 NO₂ 垂直廓线与美国 NASA 组织的 INTEX 航空观测数据对比后得出按柱浓度的形式其模拟值较观测低估了约 1.07 × 10¹⁵ mol · cm⁻²。综合上述两方面因素考虑, 本研究中 NAQPMS 模拟与 OMI 观测中国华北地区 NO₂ 柱浓度间存在 -1.31 × 10¹⁵ mol · cm⁻² 的平均偏差尚处于相对合理的水平。

为检验模式模拟与卫星反演对比结果的有效性, 还引入地面观测资料与模式模拟对比结果作为参照。通过将模式输出与站点观测间的评估结果

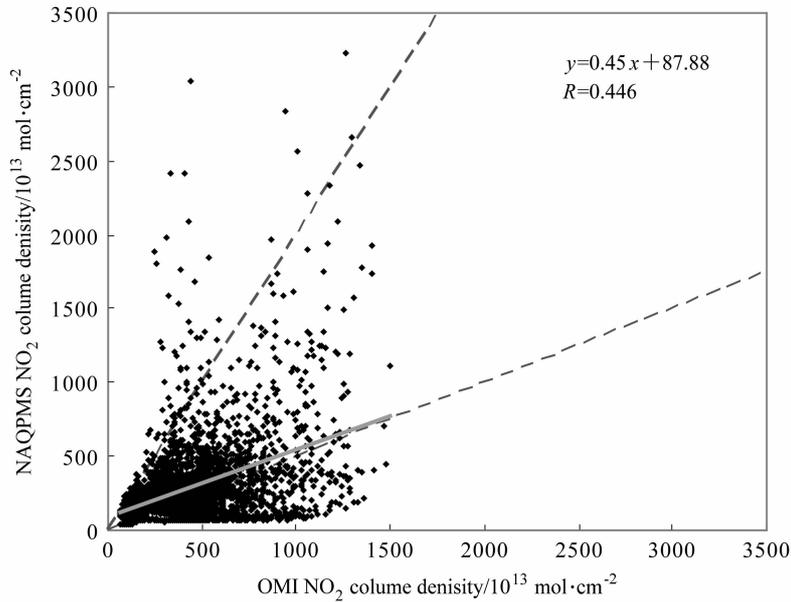


图4 NAQPMS模式输出与OMI卫星反演观测对比散点图(实线为线性拟合曲线)

Fig. 4 Scatter plots of NO_2 column densities between OMI and NAQPMS for grid-to-grid comparison with $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ resolution

表8 模拟与观测 NO_2 柱浓度对比统计

Table 8 Statistical comparison between simulation and observed NO_2 VCDs

区域	斜率 A	截距 B		MB		NMB	样本数
		$/\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$	R	$/\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2}$			
$0.1^\circ \times 0.1^\circ$	0.45	$+0.88 \times 10^{15}$	0.45	-1.31×10^{15}		-21.1%	3978

插入模拟与卫星反演对比结果空间分布图中, 3套数据两两成对比较来综合评估3套数据之间的一致性及其差异。图5分别为模式模拟与卫星观测对比得到的FB和NMSE统计偏差空间分布, 城市括号中为站点模拟与站点观测对比后得到相应统计量2008年8月均值结果。

图5显示除个别站点如廊坊的2套对比统计结果差异较大外, 大部分站点NMSE值与FB值均与卫星观测对比取得了较为一致的结果, 表明模拟与卫星观测对比的分析结果较为可靠; 同时大部分地区NMSE值均处于小于1的蓝色区间, FB值处于正负0.3范围的绿色区间, 结合Chang and Hanna (2004) 建议的模式评估标准, 表明大部分地区, 尤其是重点城市的模式模拟值均取得了与站点观测和卫星反演数据较为一致的结果, 污染物空间分布模拟效果良好。而模式结果与卫星观测差异最大的地区集中在渤海湾一带, 主要是由于卫星反演资料空间分辨率不足, 导致卫星

观测结果中海洋地区污染物浓度远高于模拟值及正常水平而造成的。

下面对北京地区站点数据作空间平均以进一步考察采用更新清单的NAQPMS模式系统对2008年8月奥运会期间各污染物种时间变化趋势的模拟能力, 其中模拟与观测浓度均取自北京城区站点(奥体、天坛、北医、北大)日均浓度平均值, FB偏差系数散点落在 ± 0.3 区间(图中红色虚线)内表明模拟效果良好。各物种月变化趋势如图6所示。

上述各物种模拟观测比较结果普遍显示, 奥运会赛事期间(2008年8月8~24日)模拟效果相对较好, 而奥运会赛事前后(2008年8月初及8月末)模拟效果较差, 且这种差异主要是由于观测值的大幅波动引起的; 此外奥运会赛事期间模拟结果较站点观测存在偏高趋势, 而赛事前后模拟值比观测结果普遍偏低, 这反映出2008年8月奥运会赛事前后不同时段的排放状况也存在较大改变, 而更新后的排放清单较接近奥运会期间的真实排放, 但仍无法及时反映出8月初及8月末的排放变化。在不同物种间的对比中, SO_2 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的模拟效果相对较好, NO_2 、CO模拟效果较差, O_3 峰值模拟效果居中。这主要是由于排放清单更新主要针对点源区域排放, 而工业点源

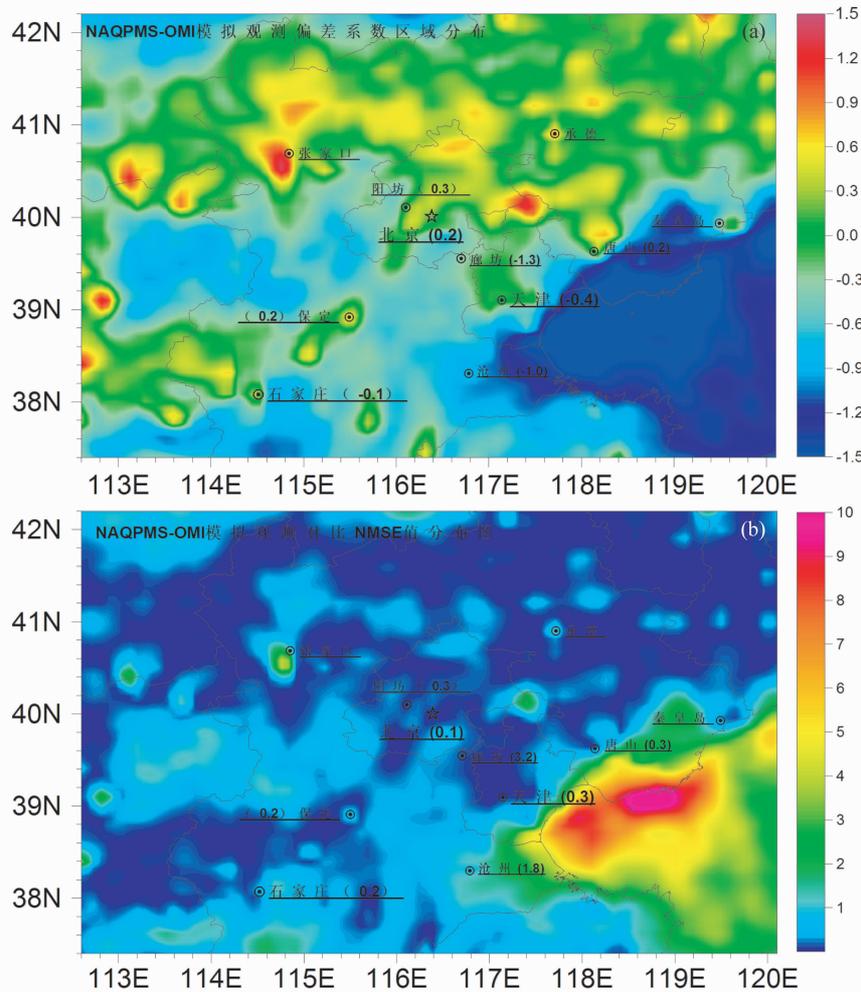


图5 北京及周边地区对流层 NO₂柱浓度模拟与观测对比统计结果空间分布：(a) FB；(b) NMSE。图中括号内数字为站点模拟与观测浓度对比统计

Fig. 5 Spatial distribution of comparison results between OMI and NAQPMS output; (a) FB (Fraction Bias); (b) NMSE (Normalized Mean Square Error). Numbers in brackets denote results between simulation and observation

排放在 SO₂ 这类一次污染物总排放中占主导地位 (贺克斌等, 2003), 如更新后河北地区 SO₂ 点源排放占总排放的 90%, 对于受一次污染源和二次气溶胶混合影响的 PM_{2.5} 而言, 燃煤等工业排放过程也存在重大影响 (宋宇等, 2002; 朱先磊等, 2005), 因而清单更新效果较为明显; 对于 NO₂、CO 这类污染物, 机动车排放是比点源排放更为重要的污染来源 (贺克斌等, 2003)。由于原始排放信息不足, 此次更新过程对流动源关注较少, 且奥运会前后由于机动车限行等措施的实施, 北京地区存在较大程度交通状况改变, 现有清单仍无法及时反映这一变化, 故 NO₂ 等模拟效果尚不尽如人意; 至于二次污染物 O₃, 由于其前体物

NO_x、CO 以及 VOC 等一次物种排放存在较大不确定性, 其模拟效果受到不利影响。此外, 气象场的模拟效果也会对空气质量模拟产生较大影响, 图 7 展示了北京奥体站温、湿、压这三个气象要素模拟与观测对比结果, 可以看出 2008 年 8 月大部分时间 MM5 气象模式均较为准确地对真实气象场进行了模拟再现, 但在个别日期模拟偏差有所增大, 为前述空气质量模拟偏差的来源之一。

对清单完全更新后的模式输出进行系统验证后, 按照模拟方案设定进行了不同情景下的影响因子分析, 详细情景设定方案见表 2, 情景模拟结果如图 8 所示, 图中数据为北京国控站点日均浓度的站点平均值, 蓝、红虚线分别为模拟、观测

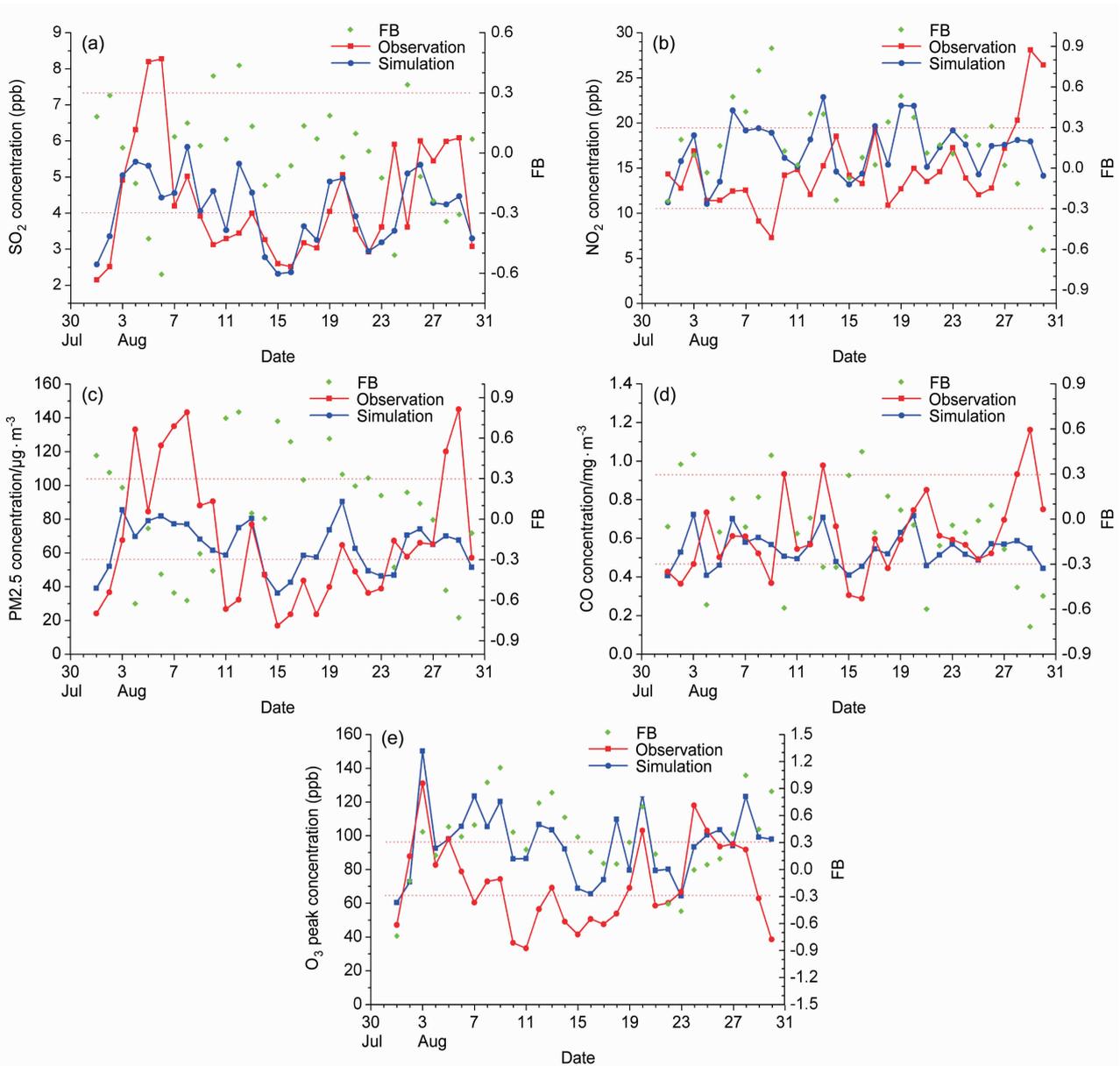


图6 2008年8月北京城区各污染物日均浓度模拟与观测对比: (a) SO_2 ; (b) NO_2 ; (c) $\text{PM}_{2.5}$; (d) CO ; (e) O_3 峰值

Fig. 6 Comparison of different pollutants' daily average concentration in Beijing city during Aug 2008: (a) SO_2 ; (b) NO_2 ; (c) $\text{PM}_{2.5}$; (d) CO ; (e) O_3 peak value

月均值。

图中 S1 情景下未考虑紧急污染控制措施的排放清单虽然其模拟输出较观测值偏高,但偏差范围并不大,偏差系数 FB 月均值约 0.51;且模拟与观测趋势吻合很好,相关系数 R 达到 0.73,表明未考虑紧急污染控制措施的排放清单能够较好的反映 2008 年 5 月份的区域排放状况;而图 8 中 S2 情景结果则清楚显示,未考虑紧急污染控制措施的排放清单已完全无法反映 2008 年 8 月真实排

放状况,其模拟结果较观测值大幅偏高达 5 倍以上。对比 S1、S2 情景下的观测均值可见 2008 年 8 月观测均值比 5 月下降了 50% 以上;而比较两种情景下的模拟月均值则看出在同样排放源不同气象场条件下,8 月模拟结果反而比 5 月均值略高,表明气象要素单一控制条件下不同月份间污染模拟变化趋势无法再现观测变化,甚至两者出现完全相反的演变趋势,进而证实气象因素的差异并非导致奥运会期间北京空气质量明显好转的主要

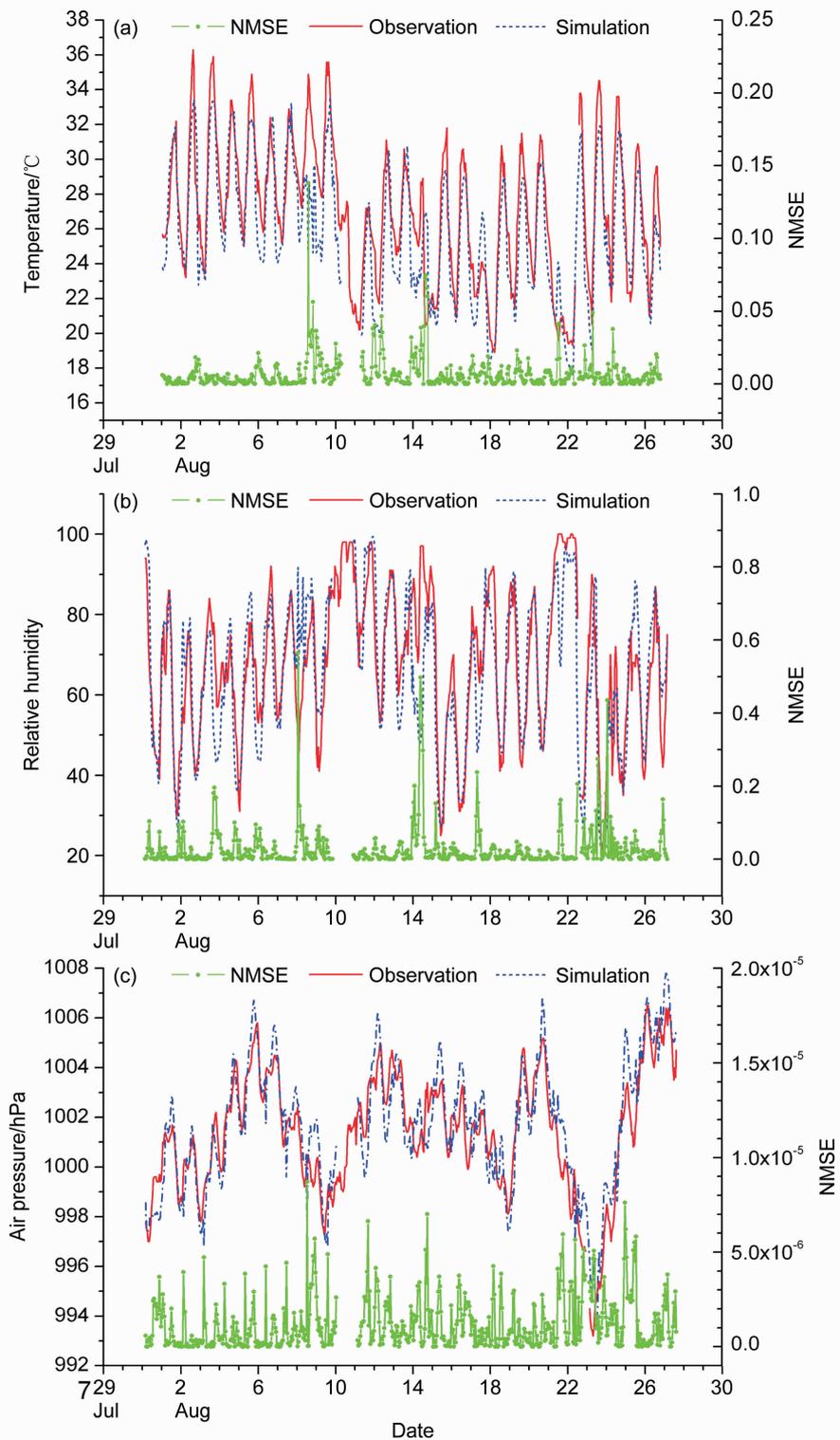
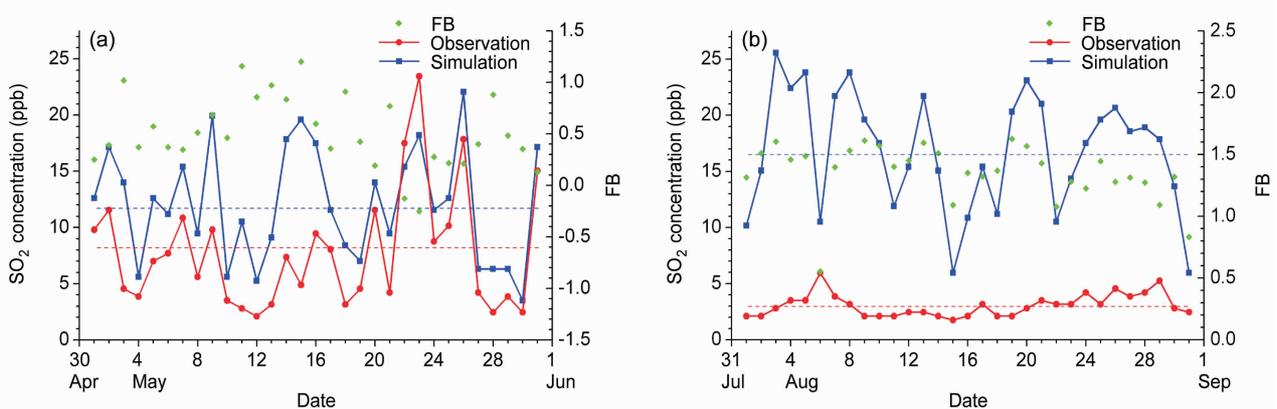


图7 2008年8月奥体站气象要素模拟与观测对比：(a)气温；(b)相对湿度；(c)气压

Fig. 7 Comparison of simulated and observed meteorological elements at Aoti station during Aug 2008: (a) Temperature; (b) relative humidity; (c) air pressure

原因；而将图6中清单完全更新后的SO₂模拟结果(图6a)与SO₂情景模拟结果比较后可以认为，

考虑了紧急污染控制等一系列区域减排措施的排放清单才能很好的反映奥运会期间北京及周边的

图 8 不同情景下北京地区 SO_2 模拟与观测对比 (a) S1; (b) S2Fig. 8 Comparison of SO_2 simulation and observation in different scenarios (a) S1; (b) S2

真实污染排放状况, 由上述措施导致的区域大规模污染减排是导致奥运会期间北京地区空气质量优良的主要原因之一。

6 结论

本文对 2008 年 8 月奥运会期间华北地区大气污染源排放清单进行了更新, 并结合站点观测和卫星反演资料对新生成的排放清单进行系统评估。评估结果表明:

(1) 更新后排放清单能够更好反映区域污染真实排放状况, 在一定程度上改善了奥运会期间空气污染模拟效果;

(2) SO_2 等受工业点源排放影响较大的物种模拟效果相对良好, 表明文中升级空间精度信息的清单更新方式合理有效;

(3) 通过情景模拟分析, 初步考察了气象因素和紧急污染控制措施对奥运会期间北京地区空气质量状况的影响, 认为由污染控制导致的区域大规模减排是导致 2008 年 8 月北京地区空气质量良好的重要原因。

致谢 感谢北京工业大学环境与能源工程学院程水源、北京市环境保护监测站赵越、北京大学环境科学与工程学院朱彤、中科院大气物理研究所王跃思以及清华大学、中国环境科学研究院等多家单位和个人为本研究提供的大力支持和帮助!

参考文献 (References)

北京市环境保护局, 北京市环境保护监测中心. 2009. “北京市空

- 气质量集成预报系统研究”报告 [R]. 北京. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, Beijing Municipal Environmental Monitoring Centre. 2009. “Beijing Air quality Ensemble Forecasting System Research” Report [R](in Chinese). Beijing.
- Boersma K F, Eskes H J, Veeffkind J P, et al. 2007. Near-real time retrieval of tropospheric NO_2 from OMI [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2013-2128.
- Chang J C, Hanna S R. 2004. Air quality model performance evaluation [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87: 167-196.
- Cooper O R, Stohl A, Trainer M, et al. 2006. Large upper tropospheric ozone enhancements above midlatitude North America during summer: In situ evidence from the IONS and MOZAIC ozone measurement network [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, D24S05, doi: 10.1029/2006JD007306.
- 郝吉明, 王丽涛, 李林, 等. 2005. 北京市能源相关大气污染源的贡献率和调控对策分析 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 35 (增刊): 115-122. Hao Jiming, Wang Litao, Li Lin, et al. 2005. Analysis of effects from energy correlated air pollution sources and their control policy in Beijing [J]. *Science in China (Ser. D) (in Chinese)*, 35 (Suppl.): 115-122.
- 贺克斌, 余学春, 陆永祺, 等. 2003. 城市大气污染物来源特征 [J]. *城市环境与城市生态*, 16 (6): 269-271. He Kebin, Yu Xuechun, Lu Yongqi, et al. 2003. Characterization of urban air pollution sources [J]. *Urban Environment and Urban Ecology (in Chinese)*, 16 (6): 269-271.
- Hudman R C, Jacob D J, Turquety S, et al. 2007. Surface and lightning sources of nitrogen oxides over the United States: Magnitudes, chemical evolution, and outflow [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, doi: 10.1029/2006JD007912.
- Irie H, Kanaya Y, Akimoto H, et al. 2008. Validation of OMI tropospheric NO_2 column data using MAX-DOAS measurements deep inside the North China Plain in June 2006: Mount Tai Experiment 2006 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 8: 6577-6586.

- 康娜, 高庆先, 周锁铨, 等. 2006. 区域大气污染数值模拟方法研究 [J]. 环境科学研究, 19 (6): 20 - 26. Kang Na, Gao Qingxian, Zhou Suoquan, et al. 2006. Study on the method of regional air quality numerical simulation [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 19 (6): 20 - 26.
- 孟伟, 高庆先, 张志刚, 等. 2006. 北京及周边地区大气污染数值模拟研究 [J]. 环境科学研究, 19 (5): 11 - 18. Meng Wei, Gao Qingxian, Zhang Zhigang, et al. 2006. The numerical study of atmospheric pollution in Beijing and its surrounding regions [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 19 (5): 11 - 18.
- Napelenok S L, Pinder R W, Gilliland A B, et al. 2008. A method for evaluating spatially-resolved NO_x emissions using Kalman filter inversion, direct sensitivities, and space-based NO_2 observations [J]. Atmos. Chem. Phys., 8: 5063 - 5614.
- 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 2002. 北京市大气细粒子的来源分析 [J], 环境科学, 23 (6): 11 - 16. Song Yu, Tang Xiaoyan, Fang Chen, et al. 2002. Source apportionment on fine particles in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 23 (6): 11 - 16.
- Shi C, Fernando H J S, Zifa Wang, et al. 2008. Tropospheric NO_2 columns over east central china: comparisons between SCIAMACHY measurements and nested CMAQ simulations [J]. Atmos. Environ., 42: 7165 - 7173.
- 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, doi: 10.1029/2002JD003093.
- 孙雪丽, 程水源, 陈东升, 等. 2006. 区域污染对北京市采暖期 SO_2 污染的影响分析 [J], 安全与环境学报, 6 (5): 83 - 87. Sun Xueli, Cheng Shuiyuan, Chen Dongsheng, et al. 2006. Effects of surrounding sources on SO_2 in Beijing in January of 2002 [J]. Journal of Safety and Environment (in Chinese), 6 (5): 83 - 87.
- 王建钧. 2005. 台湾地区空气污染物排放处理系统之建立研究——以 smoke 为基础 [D]. 云林科技大学硕士论文, 106pp. Wang Jianjun. 2005. Study on air pollution emission model system-based on smoke [D]. M. S. thesis (in Chinese), National Yunlin University of Science and Technology, 106pp.
- 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.
- 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, 第五课题《区域空气质量模拟、预测及情景分析研究》[R]. 北京及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. 北京, 中国科学院大气物理研究所. Wang Zifa, Wu Qizhong, Xie Fuying et al. 2009. Regional air quality modeling, forecasting and scenario analyzing research report [R]. Atmospheric pollution transportation, transformation and Beijing air quality research program (in Chinese), Beijing, Institute of Atmospheric Physics.
- Zaveri R A, Peters L K. 1999. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. J. Geophys. Res., 103: 30387 - 30415.
- Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. 2009. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmos. Chem. Phys., 9: 5131 - 5153.
- 朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 2005. 北京市大气细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源研究 [J], 环境科学研究, 18 (5): 1 - 5. Zhu Xianlei, Zhang Yuanhang, Zeng Limin, et al. 2005. Source identification of ambient $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 18 (5): 1 - 5.