

黄江平, 王喜全, 王自发, 等. 2010. 2008年北京奥运会期间污染控制效果数值模拟——以个例分析为例 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 11–20. Huang Jiangping, Wang Xiquan, Wang Zifa, et al. 2010. Simulation of the impact of air pollution source control measures during the 2008 Beijing Olympic Games: A case study [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (1): 11–20.

2008年北京奥运会期间污染控制效果数值模拟 ——以个例分析为例

黄江平^{1, 2} 王喜全¹ 王自发¹ 吴其重¹

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

摘要 利用2007和2008年北京地区空气质量监测资料和NCEP再分析资料, 分析了北京地区空气动力学当量直径小于等于 $10\ \mu\text{m}$ 颗粒物(PM₁₀)污染过程与天气形势及天气系统之间的关系。结果表明: 西太平洋热带气旋路径对北京地区发生PM₁₀污染具有预示作用, 即当热带气旋北上并在朝鲜半岛或日本登陆的情况下, 北京地区一般受持续均压场等弱中尺度天气系统控制, 这种中尺度天气系统不利于污染物的扩散, 因此北京地区经常发生区域性的PM₁₀空气污染事件。在2007年9次台风北上登陆朝鲜半岛或日本的过程中, 北京地区伴随发生了9次PM₁₀污染过程, 预示准确率达100%, 2008年的预示准确率也达到了80%以上。为了说明北京奥运会期间污染控制措施对改善北京空气质量有实际效果, 利用中国科学院大气物理研究所区域空气质量模式NAQPMS, 采用无控制措施源和有控制措施源, 对2008年北京残奥会期间一次西太平洋北上型热带气旋天气条件下的空气质量状况进行了数值模拟试验, 揭示了此次过程北京地区未发生PM₁₀空气污染的原因。

关键词 西太平洋热带气旋路径 空气污染 区域空气质量模式 污染控制 2008年北京奥运会

文章编号 1006-9585 (2010) 01-0011-10 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

Simulation of the Impact of Air Pollution Source Control Measures during the 2008 Beijing Olympic Games: A Case Study

HUANG Jiangping^{1, 2}, WANG Xiquan¹, WANG Zifa¹, and WU Qizhong¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The relationship between the synoptic pattern and particle matter less than $10\ \mu\text{m}$ (PM₁₀) air pollution episode in Beijing area is analyzed by utilizing air quality monitoring data and NCEP reanalysis data. It is indicated that the track of the western Pacific tropical cyclone can foretell whether a PM₁₀ air pollution episode will happen in Beijing area, namely when the tropical cyclone moves northward and finally lands on the Korean Peninsula or Japanese mainland, a PM₁₀ air pollution episode most possibly happens in one day or several days in Beijing area, e. g., there are nine and five PM₁₀ pollution episodes occurring under such synoptic conditions in 2007 and 2008, respec-

收稿日期 2008-12-06 收到, 2009-10-30 收到修定稿

资助项目 国家高技术研究发展计划项目《重点城市群大气复合污染物综合防治与技术集成示范》

作者简介 黄江平, 男, 1979年出生, 博士研究生, 主要从事城市空气污染预警和预报研究。E-mail: hjptfq@126.com

tively. In order to evaluate the actual impact of air pollution source control measures on the amelioration of air quality during the 2008 Beijing Olympic Games, one case study is performed by using NAQPMS/IAP model under both control and non-control emission scenarios, and then the impact of air pollution source control measures is revealed.

Key words western Pacific tropical cyclone track, air pollution episode, NAQPMS/IAP, pollution source control, 2008 Beijing Olympic Games

1 引言

前期的污染程度是北京发生空气动力学当量直径小于等于 $10\ \mu\text{m}$ 颗粒物 (PM₁₀) 重污染的必要条件之一, 因而持续性的不利于污染物扩散的天气形势是北京发生 PM₁₀ 重污染的最重要条件 (王喜全等, 2006, 2007)。在持续稳定的天气形势下, 经常有中尺度天气系统影响北京及华北地区, 这些中尺度系统包括河套倒槽、东北地形槽和华北地形槽以及华北低压等 (李琼等, 1999; 孟燕军和程丛兰, 2002; 苏福庆等, 2004), 但这只是北京地区发生 PM₁₀ 重污染的表面现象, 因此, 持续性天气形势 (特别是东亚地区阻塞天气形势) 的研究和预报是提高北京地区 PM₁₀ 重污染预警预报的关键。王喜全等 (2007) 和 Wang et al. (2009) 分析 2004 年西太平洋北上型台风与北京地区 PM₁₀ 污染的关系时发现: 如果热带气旋在长江以南登陆, 北京一般不会发生 PM₁₀ 空气污染; 如果热带气旋北上并在我国东北或朝鲜半岛或日本登陆, 北京就最有可能发生一次 PM₁₀ 污染过程, 就 2004 年来说, 可以达到 80% 的准确率。本文利用 2007、2008 年 NCEP 再分析资料和北京地区 PM₁₀ 监测资料, 分析了这两年西太平洋热带气旋路径对北京地区发生 PM₁₀ 污染过程的预示作用, 并通过个例数值模拟试验, 分析验证了 2008 年北京奥运会、残奥会期间, 北京及周边地区污染源控制措施的实际效果。

2 分析方法

对 2007、2008 年北京地区发生的 3 级 (含) 以上 PM₁₀ 污染的天气形势和中央气象台发布的西太平洋热带气旋路径中的未在长江以南登陆的台风或热带气旋北上型路径, 利用主观分析法, 考察了海平面气压场特征, 分析了北上型台风路

径天气形势与 PM₁₀ 污染过程的对应关系, 并利用嵌套网格区域空气质量预报系统 (NAQPMS), 模拟分析了 2008 年北京残奥会期间一次北上型台风天气形势下北京地区空气质量的演变过程。

嵌套网格区域空气质量预报系统 (NAQPMS) 由中国科学院大气物理研究所研发 (王自发等, 2006), 其中的气象模块采用中尺度气象模式 MM5V3, 污染模块采用三维欧拉型模式, 化学机制采用 CBM-Z, 实现了嵌套网格数据的双向传输, 是北京奥运会空气质量集合数值预报系统中的主要模式, 其业务化系统已应用于北京、上海、沈阳、广州等地的城市空气质量的业务预报, 并广泛应用于东亚沙尘长距离输送 (王自发等, 1998)、污染物跨界传输 (王自发等, 2006)、区域臭氧污染过程 (Wang et al., 2000, 2001, 2006)、区域酸雨 (Gao et al., 2008) 等数值模拟研究。

3 西太平洋台风活动与北京地区 PM₁₀ 污染过程概述

3.1 2007、2008 年西太平洋台风活动特征

2007 年, 西太平洋共有 25 个台风生成, 其中有 8 个在我国登陆, 北上型台风有 9 个。台风特点是: 生成个数少、登陆我国的个数多。西北太平洋和南海海域共有 25 个台风生成, 较历史同期 (平均 21.6 个) 偏少 2 个。其中有 8 个登陆我国, 较历史同期 (平均 6.4 个) 偏多 1 个; 路径复杂、强度异常, 北上型台风多 (共有 9 个); 影响时间集中、结束期晚。台风登陆时段集中在 8、9 和 10 月, 分别有 3、2 和 2 个台风登陆, 在多年平均台风高发期的 6~9 月生成的台风均较历史同期偏少, 10 月和 11 月生成的台风显著偏多, 其中 10 月的登陆台风数较历史同期显著偏多; 局部降水强、总体降水少。

2008 年, 西太平洋共有 17 个台风生成, 其中

登陆我国的有 10 个，北上型台风有 6 个。台风特点是：生成个数偏少，但登陆我国的个数偏多。西北太平洋和南海共有 17 个台风生成，较历史同期偏少，其中有 10 个登陆我国，较历史同期偏多。特别是 6 月份以来生成的 12 个台风中，有 9 个在我国登陆，登陆比例达到 75%；台风登陆强度强，北上型台风少（共 6 个）。登陆我国的 10 个台风中，除“风神”、“海高斯”登陆时强度为热带风暴，“浣熊”和“北冕”为强热带风暴外，其余 6 个均达到台风以上级别；秋季台风活跃，登陆时间集中。2008 年秋季以来（9 月 1 日至 10 月 14 日），西北太平洋和南海共有 5 个台风生成，其中有 4 个在 9 月 14 日至 10 月 4 日的 21 天内登陆我国大

陆或台湾地区，登陆的台风较常年同期明显偏多，且登陆时间相对集中，登陆强度强（<http://www.weather.com.cn/>）。

3.2 北上型台风与北京地区 PM10 污染过程概述

通过对 2007、2008 年东亚天气系统的演变过程与北京地区 PM10 污染状况的分析，印证了 Wang et al. (2009) 的结论，即在北京地区发生 PM10 污染的时候，确实经常伴随有中尺度天气系统的活动，特别是在西太平洋台风季节，与热带气旋北上相关联的均压场（或弱高压场）造成的 PM10 污染过程 2007 年有 9 次，2008 年有 5 次（见表 1）。2007 年，9 次北上型台风活动期间北京地区均发生了相关联的 PM10 空气污染。2008 年，

表 1 2007、2008 年北京地区北上台风路径与相关联的 PM10 空气污染过程
Table 1 The western Pacific tropical cyclone tracks and particle matter less than 10 μm (PM10) air pollution episodes in Beijing area during 2007 and 2008

日期	等级	空气污染指数	控制北京地区的天气系统描述
2007-04-05	3	111	台风“康妮（0701）”北上，4 月 4~5 日北京地区一直位于高空槽前，地面为冷锋前部，弱气压场系统控制，地面风以南风为主，风速较小
2007-05-22	3	116	台风“玉兔（0702）”北上，北京地区天气形势为高压转高压系统后部控制，地面以南风为主
2007-07-09	3	112	台风“万宜（0704）”北上，北京地区受弱气压系统控制，过程基本同台风“康妮”
2007-07-30	3	139	台风“天兔（0705）”北上，7 月 28~30 日北京地区一直受高压系统后部控制，地面以南风为主
2007-09-01	3	108	台风“菲特（0710）”北上，9 月 1~6 日为均压场控制，地面风为南风，风速较小
2007-09-06	3	100	
2007-09-10	3	142	台风“丹娜丝（0711）”北上，9 月 10~11 日北京地区一直受弱气压场控制。过程基本同台风
2007-09-11	3	171	“康妮”。后期冷锋过境，污染结束
2007-09-17	3	138	台风“百合（0712）”北上，北京地区受均压场控制
2007-10-22	3	100	台风“剑鱼（0720）”北上，北京地区受弱气压场控制，过程基本同台风“康妮”
2007-10-26	3	184	台风“法茜（0721）”北上，北京地区受均压场控制
2007-10-27	3	179	
2008-05-15	3	107	台风“麦德姆（0803）”北上，5 月 15~16 日北京地区一直位于高空槽前，地面为冷锋前部，弱气压场系统控制，地面风以南风为主，风速较小
2008-05-16	3	118	
2008-05-19	3	112	台风“夏浪（0804）”北上，北京地区一直受均压场控制，过程基本同台风“麦德姆”
2008-05-20	3	112	
2008-05-27	5	463	台风“娜基莉（0805）”北上，受北方强空气影响，北京地区地面风向为北风，风速很大。北风带来大量沙尘，能见度低。28 日风速逐渐减小，污染程度有所减轻。29 日，冷空气继续侵袭北京，并带来大量沙尘，污染程度加重。30~31 日，北京地区受高压系统后部控制，弱气压场影响
2008-05-28	4	253	
2008-05-29	5	396	
2008-05-31	3	115	
2008-09-17	2	56	台风“森拉克（0813）”北上，受台风影响，北方冷高压的南下和东移受到阻滞，北京及周边地区持续处在变性弱高压的控制之下。高空槽持续发展形成阻塞形势，北京地区持续处在弱高压脊的控制当中。北京地区地面持续小风或静风，温度层结整层稳定，但期间并未出现污染超标的现象
2008-09-18	2	59	
2008-09-19	2	64	
2008-09-19	2	63	
2008-10-01	3	106	台风“南修（0815）”北上，北京地区受均压场控制



图1 2008年9月9~20日北上型台风“森拉克”中心轨迹示意图

Fig. 1 The centre of northward-based typhoon Sinlaku track during 9 Sep - 20 Sep 2008

除登陆日本的热带风暴“森拉克 (0813)”以外，在北上型台风或热带气旋生命周期内，北京地区均发生 PM₁₀ 污染过程。

4 北京奥运会期间污染控制个例分析

4.1 台风“森拉克”概述

2008年9月9日05时(北京时间,下同),热带风暴“森拉克(0813)”在(16.8°N, 125.7°E)处生成。初期,“森拉克”缓慢向西北方向移动,10日17时,“森拉克”加强为强台风。9月11日下午,“森拉克”升级为一个超强台风。12日“森拉克”减弱为强台风。14日01时50分,台风“森拉克”在台湾省宜兰县北部沿海登陆,登陆时近中心最大风速15级(48 m·s⁻¹)。15日“森拉克”离开台湾后,强度持续减弱,上午“森拉克”减弱为强热带风暴,在东海南部与台湾海峡北部交接处转向,朝日本方向移动。16日上午“森拉克”减弱为热带风暴,16日下午继续减弱为热带低压。17日上午,“森拉克”再次加强为热带风暴,17日下午“森拉克”继续加强为强热带风暴。18日,“森拉克”影响日本九州岛,19日“森拉克”先后影响四国岛和本州岛。20日,“森拉克”在日本东部洋面上减弱为热带风暴并转化

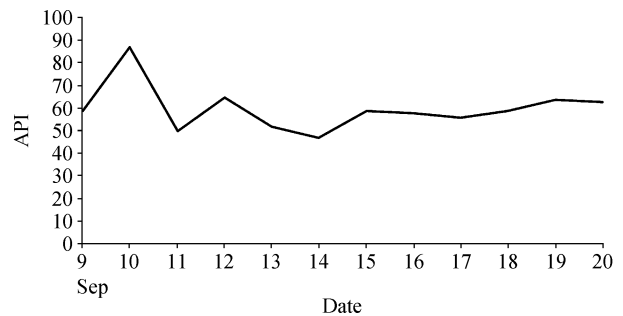


图2 2008年9月9~20日北京地区API值逐日变化

Fig. 2 Daily variations of Air Pollution Index (API) from 9 Sep to 20 Sep 2008 in Beijing area

为温带气旋,结束了这次台风的整个过程。图1给出了台风“森拉克”中心的运动轨迹示意图,从图中可以看出这是一次典型的北上型路径,台风持续时间长且强度强。在台风离开台湾转向日本的期间,北京持续受均压场控制,但是连续几天并没有发生 PM₁₀ 污染的现象(如图2所示),这里的空气污染指数(API)值资料来源为北京市环境保护局公布的每日国控站点平均API值(<http://www.bjepb.gov.cn/air2008/>)。

图3给出了此次北上型台风过程2008年9月17~20日08时地面气压场和流场的演变情况。在此次冷高压过境、南下东移的过程中,由于受到

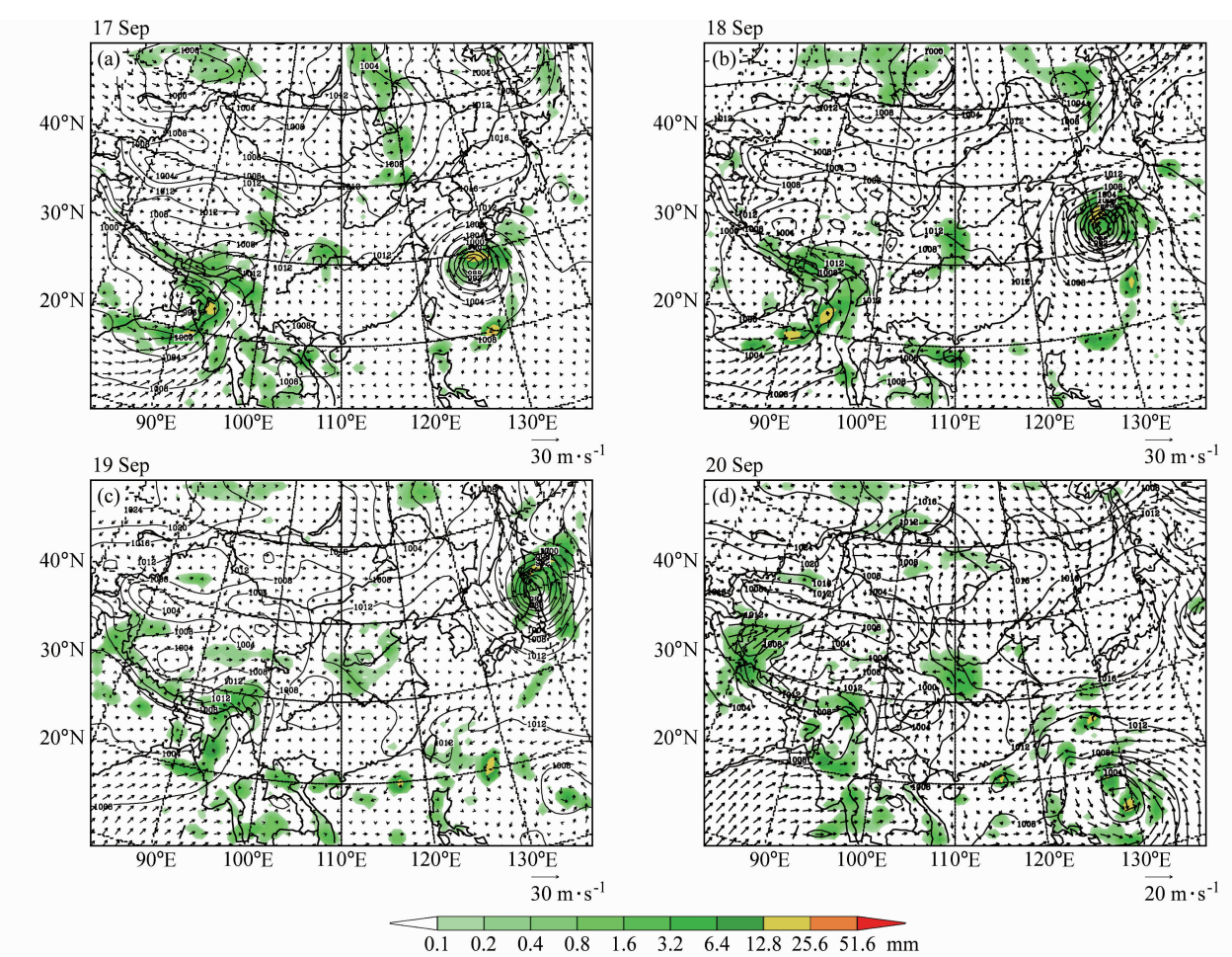


图 3 2008 年 9 月 17~20 日地面天气形势演变 (阴影区为 24 h 降水)

Fig. 3 Evolvement of surface synoptic patterns during 17 Sep–20 Sep 2008 (shaded area is 24-h precipitation amount)

台风“森拉克”影响，阻滞了高压的南下和东移，造成北京及周边地区持续处在变性弱高压的控制下。从图 4 的 500 hPa 高空图流场的演变情况可以看出，在此次过程中高空槽持续发展形成阻塞形势，北京地区持续处在弱高压脊的控制当中。在此期间，北京及周边地区不断受东移的东北地形槽和华北地形槽以及汇聚性的中尺度均压场系统的影响，在这种天气形势控制下，北京地区地面持续小风或静风，温度层结整层稳定，容易造成北京地区严重的 PM₁₀ 空气污染。

4.2 数值模拟试验

4.2.1 目的

为保障北京奥运会、残奥会期间的良好空气质量，国家环境保护部与北京、天津、河北、山西、内蒙古和山东 6 省区市联合制定了《第 29 届奥运会北京空气质量保障措施》，将整治区域大气

污染输送作为一项重点工作。措施主要包括：北京周边地区燃煤污染治理，火电厂脱硫和脱硝，建材企业、水泥、化工、钢铁等企业进行治理。奥运会期间，天津和河北的部分地区，对一些企业实行停、限的措施。山西、内蒙古和山东也根据北京市的空气质量状况对燃煤污染进行适当限制。此外根据《北京市实施〈中华人民共和国大气污染防治法〉办法》和《北京市人民代表大会常务委员会关于为顺利筹备和成功举办奥运会进一步加强法治环境建设的决议》，北京市决定，在实施第十四阶段控制大气污染措施的基础上，借鉴奥运会举办城市在奥运会期间保障空气质量的 做法，在 2008 年北京奥运会、残奥会期间（7 月 20 日至 9 月 20 日）实施加强机动车管理、严格控制施工重点工序、重点污染企业减排等措施（表 2、表 3）来确保空气质量良好。

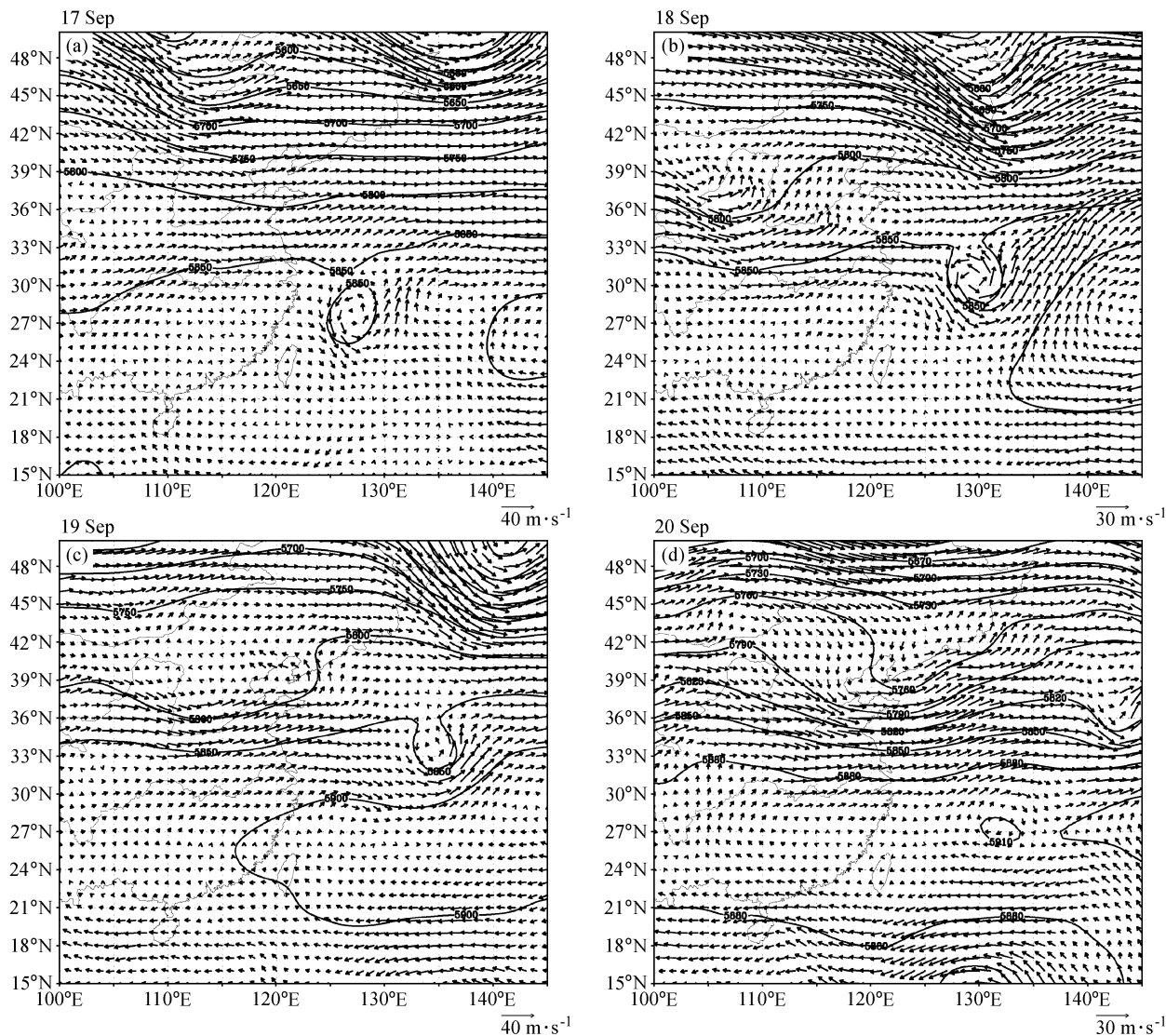


图4 2008年9月17~20日高空500 hPa天气形势演变
Fig. 4 Evolution of 500 hPa upper-air synoptic patterns during 17 Sep - 20 Sep 2008

表2 2008年奥运会期间北京及周边地区电厂总减排量
Table 2 The total decreasing quantities of power stations in Beijing and its surrounding areas during the 2008 Olympic Games
10³t

地点	SO ₂	NO _x	PM10	PM2.5
北京	169.9	107.7	58.6	49.2
天津	166.9	83.9	65.6	55.1
唐山	4.6	0.0	4.5	3.8
承德	20.6	7.5	7.2	6.0
张家口	137.4	50.6	80.6	67.7
保定	19.3	4.1	6.6	5.6
廊坊	252.9	74.0	56.9	47.8

表3 2008年奥运会期间北京及周边地区其他行业总减排量
Table 3 The total decreasing quantities other industry in Beijing and its surrounding areas during the 2008 Olympic Games
10³t

地点	SO ₂	NO _x	PM10	PM2.5
北京	2.6	1.9	4.0	3.0
天津	61.9	1.7	0.0	22.1
唐山	0.0	0.0	0.0	0.0
承德	0.3	0.2	0.0	0.2
张家口	0.03	0.01	0.0	0.03
保定	0.09	0.03	0.0	0.04
廊坊	0.5	0.2	0.0	3.9

图 5 中可以看出在 8 月 8 日至 9 月 17 日, 2007 年的 API 日均值基本要比 2008 年的 API 日均值要高。但是 2007 年和 2008 年夏季的气象条件有所不同, 空气质量的良好到底是受天气影响还是受以上所述控制措施的影响? 根据本文前半部分的分析, 2008 年夏季也有容易造成空气污染的气象条件, 但是为什么没有造成空气污染? 针对这些问题, 利用嵌套网格区域空气质量预报系统 (NAQPMS) 进行了数值模拟试验。

4.2.2 模式设置

模拟时间为 2008 年 9 月 15~20 日, 模拟区域设置如图 6 所示。MM5 和 NAQPMS 模式均采用四重网格嵌套方法, 水平分辨率从 3~81 km,

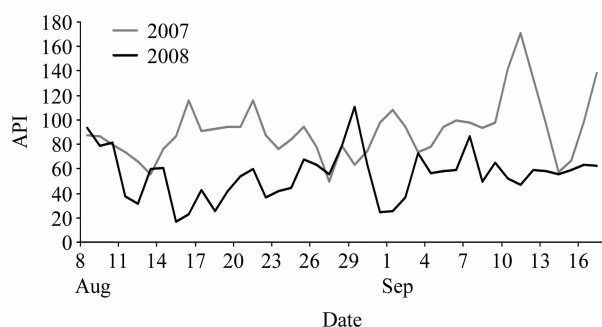


图 5 北京 2007 年和 2008 年 8 月 8 日~9 月 17 日 API 日均值对比

Fig. 5 The comparison of API during 8 Aug - 17 Sep 2007 and 2008 in Beijing

中心位置设为 (35°N , 110°E)。MM5 采用地形跟随坐标, 垂直分为 23 层, NAQPMS 采用 p 垂直坐标, 垂直分为 20 层等压面。分别从 1000 hPa 到 100 hPa。

源的来源有三种: 第一、二区域主要采用 Streets et al. (2003) 为 TRACE - P 估算的东亚 2002 年排放源。源的分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$; 北京及周边地区的电厂数据来源于清华大学和中国环境科学研究院; 北京及周边地区的详细局地污染源由北京市环境保护局提供。在源的处理过程中考虑时间分配方案, 主要考虑面源的月分配, 本文采用的源是经过月分配方案处理后的源, 其资料来源主要来自前人经验 (Su, 2005; Wang et al., 2005) 及长年污染浓度统计。经过各种处理后, D4 区域源的主要分布如图 7 所示。使用这种源数据的空气质量数值模式, 能够很好地模拟出北京及周边地区的大气污染输送特征和大气污染过程。

本试验采用的源为两种: 一种是没有采取控制措施的源, 气象场为 MM5 结果, 试验编号为 M1; 一种是根据各种控制措施对源进行了削减处理后的源, 气象场仍然为同一结果, 试验编号为 M2。

4.2.3 模式结果分析

图 8 中表示北京市环境保护局公布的每日国

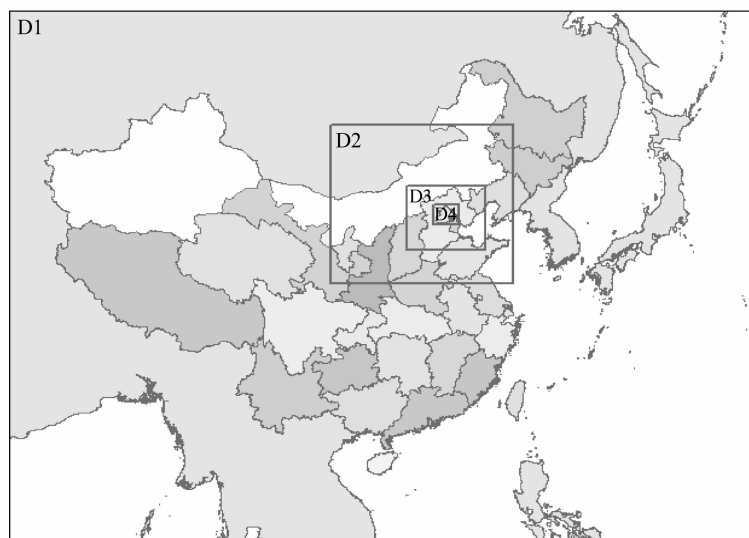


图 6 NAQPMS 中的四重嵌套区域

Fig. 6 Four nested domains used for NAQPMS simulation

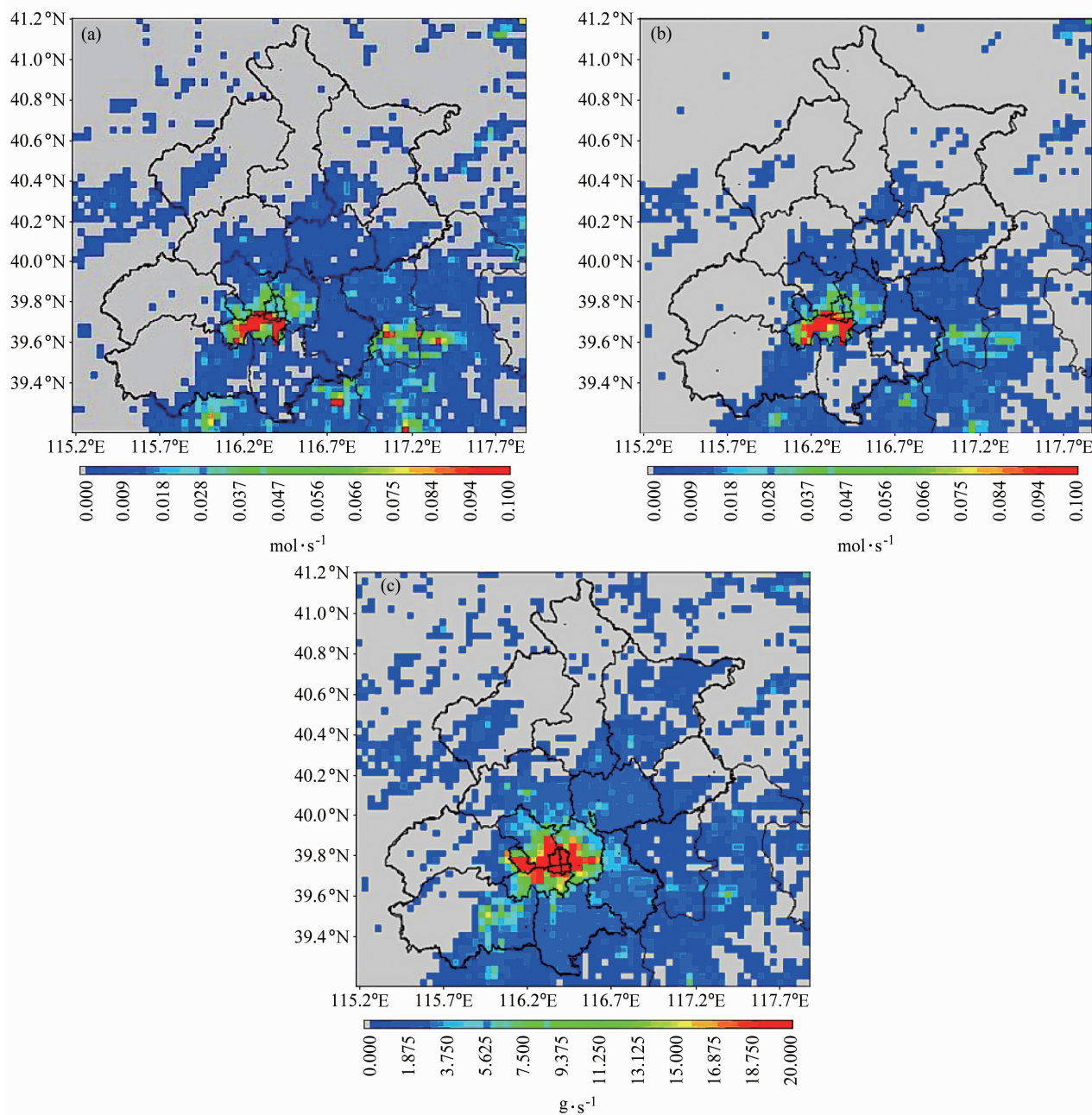


图7 北京及周边地区面源效果图: (a) SO_2 ; (b) NO_x ; (c) PM_{10}

Fig. 7 The area source in Beijing and its surrounding areas: (a) SO_2 ; (b) NO_x ; (c) PM_{10}

控站点平均 API 值和试验 M1、试验 M2 模拟的国控站点日均 API 值之间的对比。结果表明: 在与北上型台风相关连的弱气压场控制的条件下, 控制前和控制后的 API 值之间有着很好的相关性, 说明天气系统变化跟污染息息相关。采取控制措施后模拟出的 API 值同公布的 API 资料比较一致, 都处于相对比较低的水平, 并没有 PM_{10} 超标的问题, 但是未采取控制措施模拟出的 API 值,

9 月 15 日为 105, 超过国家三级标准。9 月 18 和 19 日分别为 98 和 99, 虽然没有超标, 但仍保持在一个较高的水平。

5 结论

本文通过对 2007、2008 年北上型热带气旋与北京地区发生 PM_{10} 污染的分析验证, 发现北上

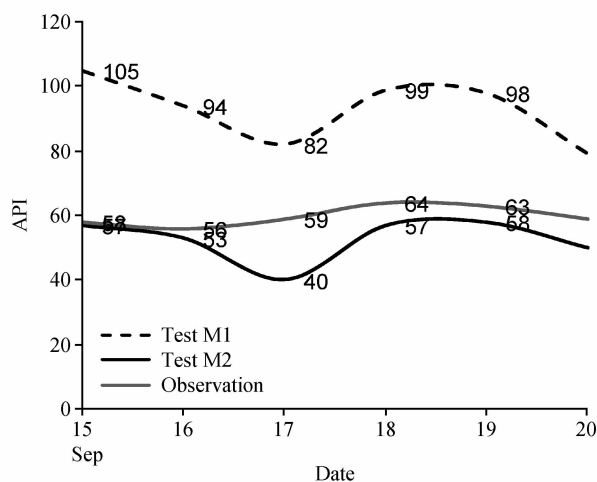


图8 试验 M1 和试验 M2 模拟北京地区的 API 值和实况 API 值的对比

Fig. 8 The comparison of API among tests M1 and M2 and observation in Beijing

热带气旋位于黄海以东时，在 500 hPa 天气图上，东亚地区经常出现阻塞天气形势，使华北地区的天气系统维持一种比较稳定的状况，这种天气系统容易造成污染物的累积。由此得出北上型热带气旋和北京 PM₁₀ 污染之间的确存在着预示的关系。这个结果为北京城市空气质量预警预报和空气污染源控制，提供了一个有效的预报方法和手段。

从数值模拟的结果可以得出：虽然北京地区在奥运、残奥期间出现了一次与北上型台风相关联的天气形势，北京地区受中尺度均压场系统的影响，这种天气形势有利于污染物的堆积。但是通过对污染临时控制措施，特别是行政性的加强控制措施，能有效地降低可吸入颗粒物浓度，说明严格的污染控制措施在保障北京奥运会期间的良好空气质量中发挥了重要作用。

奥运会结束后，北京地区污染形势也不容乐观，主要原因有以下几点：1) 虽然奥运期间的加强控制措施能有效降低可吸入颗粒物浓度，但这种加强控制措施是一种代价很大的控制措施，很难将其常规化；2) 可吸入颗粒物的来源非常复杂，道路扬尘、机动车排放、工厂排放、燃煤烟尘等都是其重要来源，单独对某一类源和某一地区进行控制，难以有效地实现可吸入颗粒物浓度的控制；3) 目前对可吸入颗粒物和细粒子的形成

和输送特征，研究还不透彻，很难提供既经济又有效的污染控制措施。

为了在“后奥运时代”收获到更多的“蓝天”，需要加强对空气质量预警和预报的研究，特别是研究影响空气质量相关联的天气过程，提高预报的准确率，为有关部门制定决策提出有力的科学依据。

致谢 感谢清华大学、中国环境科学研究院、北京市环境保护局提供污染源数据。

参考文献 (References)

- Gao Chao, Wang Zifa, Gbaguidi Alex. 2008. Relationship between the spatio-temporal distribution of NH_4^+ wet deposition and the change of rain water acidity in East Asia [J]. Scientific Online Letters on the Atmosphere (in press).
- 李琼, 李福娇, 叶燕翔, 等. 1999. 珠江三角洲地区天气类型与污染潜势及污染浓度关系 [J]. 热带气象学报, 15 (4): 363-369. Li Qiong, Li Fujiao, Ye Yanxiang, et al. 1999. The relationship between synoptic patterns and potential pollution, the density of surface air pollution over Pearl River Delta [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 15 (4): 363-369.
- 孟燕军, 程丛兰. 2002. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析 [J]. 气象, 28 (4): 42-46. Meng Yanjun, Cheng Conglan. 2002. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing area [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28 (4): 42-46.
- 苏福庆, 杨明珍, 钟继红, 等. 2004. 华北地区天气型对区域大气污染的影响 [J]. 环境科学研究, 17 (3): 16-20. Su Fuqing, Yang Mingzhen, Zhong Jihong, et al. 2004. The effect of synoptic types on regional atmospheric contamination in North China [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (3): 16-20.
- Su P. 2005. Spatial-temporal characteristics of meteorological variables associated with air pollution in Beijing area [D]. M.S. thesis, North Carolina State University, 131pp.
- Streets D G, Bond T C, Camichael 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: 10.129/2002JD003093.
- Wang X P, Mauzerall D L, Hu Y T, et al. 2005. A high-resolution emission inventory for eastern China in 2000 and three scenarios for 2020 [J]. Atmos. Environ., 39: 5917-5933.
- 王喜全, 虞统, 孙峰, 等. 2006. 北京 PM₁₀ 重污染预警预报关键因子研究 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 470-476. Wang Xiquan, Yu Tong, Sun Feng, et al. 2006. The key meteorological factors resulting in PM₁₀ heavy air pollution in Beijing

- [J]. Climatic and Enviromental Research (in Chinese), 11 (4): 470-476.
- 王喜全, 齐彦斌, 王自发, 等. 2007. 造成北京 PM10 重污染的二类典型天气形势 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 92-97.
- Wang Xiquan, Qi Yanbin, Wang Zifa, et al. 2007. The influence of synoptic pattern on PM10 heavy air pollution in Beijing [J]. Climatic and Enviromental Research (in Chinese), 12 (1): 92-97.
- Wang Xiquan, Wang Zifa, Yu Tong. 2009. Foreshowing of the western Pacific tropical cyclone track to PM10 air pollution episode in the Beijing area [J]. Chinese Science Bulletin, doi: 10.1007/s11434-0562-4.
- 王自发, 安俊岭, 高会旺, 等. 1998. 未来东亚地区硫化物沉降及输送的预测 [J]. 气候与环境研究, 3 (2): 134-141.
- Wang Zifa, An Junling, Gao Huiwang, et al. 1998. Estimation of sulfur deposition and transport in China and East Asia in future [J]. Climatic and Enviromental Research (in Chinese), 3 (2): 134-141.
- Wang Zifa, Sha Weiming, Uedaet Hiromasa. 2000. Numerical modeling of pollutant transport and chemistry during a high-ozone event in northern Taiwan [J]. Tellus, 52B (5): 1189-1205.
- Wang Z, Maeda T, Hayashi M. 2001. A nested air quality prediction modeling system for urban and regional scales, application for high-ozone episode in Taiwan [J]. Water Air Soil Pollution, 130: 391-396.
- 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.
- Wang Zifa, Li Jie, Wang Xiquan, 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.