

谢付莹, 王自发, 王喜全. 2010. 2008年奥运会期间北京地区PM₁₀污染天气形势和气象条件特征研究[J]. 气候与环境研究, 15(5): 584-594. Xie Fuying, Wang Zifa, Wang Xiquan. 2010. A study of the characteristics of the synoptic situations and meteorological conditions in PM₁₀ air pollution episodes of Beijing during the 2008 Olympic Games period[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15(5): 584-594.

2008年奥运会期间北京地区PM₁₀污染天气形势和气象条件特征研究

谢付莹 王自发 王喜全

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

摘要 利用2008年7~9月北京污染监测资料、气象观测资料、韩国气象厅天气图资料及NCEP再分析资料, 分析了2008年奥运会期间北京地区空气动力学当量直径小于等于10 μm 颗粒物(PM₁₀)污染特征及其成因, 统计了利于和不利于污染物扩散的天气形势, 研究了北京发生PM₁₀污染的典型天气形势和气象条件。结果表明: 1) 奥运会期间北京共有8天出现PM₁₀污染, 包括一次持续污染过程, 奥运会赛时和残奥会赛时未出现污染过程, 这主要与北京8、9月降水偏多有关; 2) 不利于污染扩散的天气形势(如风速较小、偏南风、高温高湿、近地层出现持续逆温)出现频率较高, 但并未造成特征性的PM₁₀污染, 这可能与奥运会期间的污染控制措施有关; 3) PM₁₀污染过程多与台风系统或热带低压的北上, 从而阻滞了华北地区天气系统的南下东移相关联。

关键词 PM₁₀ 污染 天气形势 气象条件 北京

文章编号 1006-9585 (2010) 05-0584-11 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

A Study of the Characteristics of the Synoptic Situations and Meteorological Conditions in PM₁₀ Air Pollution Episodes of Beijing during the 2008 Olympic Games Period

XIE Fuying, WANG Zifa, and WANG Xiquan

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

Abstract Using the air pollution and meteorological data in Beijing, weather charts from Korea Meteorological Administration (KMA) and NCEP reanalysis data, the characteristics of the air pollution of Particulate Matter with particle size below 10 μm (PM₁₀) in Beijing and its cause of formation during the 2008 Olympic Games period (from July to September) are analyzed, types of synoptic situations are classified according to being or not helpful to dispersion of pollutants, and typical synoptic situations and meteorological conditions in PM₁₀ air pollution episodes are studied. The results are that: 1) There were eight days with PM₁₀ air pollution in Beijing during the whole period, including a persistent PM₁₀ air pollution. But no PM₁₀ air pollution occurred during the Olympic Games and Para-

收稿日期 2010-04-02 收到, 2010-08-11 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金青年基金项目“考虑阵风因子的动力学起沙机制模型化及典型沙尘暴过程模拟”(40905068)

作者简介 谢付莹, 女, 1977年出生, 助理研究员, 主要从事城市空气污染预报研究。E-mail: xiefuying@mail.iap.ac.cn

lympic Games, which mainly resulted from more rainfall in August and September of 2008. 2) Synoptic situations not helpful to pollutants dispersion (e.g. south wind with low speed, high air temperature and relative humidity, and persistent vertical inversion in low layer) were frequent, but they did not cause typical PM₁₀ air pollution by a possible reason of the pollution control measures. 3) Most PM₁₀ air pollutions were related with northwestward-moving typhoon or tropical cyclone, which would block synoptic system influencing North China to move eastward.

Key words PM₁₀ air pollution, synoptic situation, meteorological condition, Beijing

1 引言

近年来,虽然污染物排放得到了一定的控制,但是由于机动车数量增加,以及外来输送的影响(杨素英等,2009),使得北京颗粒物污染水平仍居高不下,成为目前北京市大气污染的重要特征。2008年8月第29届奥运会在北京举办,空气质量问题,尤其是细颗粒物超标问题,受到国际社会的广泛关注,给成功举办北京奥运会带来很大的压力。

在污染源基本稳定的前提下,空气质量的优劣主要由天气形势和气象条件控制。关于天气形势和气象条件对污染状况的影响,国内外已有较多的研究工作。Guest et al. (1984) 指出边界层内的气溶胶浓度与边界层内的通风条件和垂直混合率有密切联系。Vukovich (1995) 也指出污染事件频率的年际变化,很大程度上依赖于天气条件,污染形势对天气尺度环流具有较强的敏感性。Schichtel and Husar (2001) 和 Hogrefe et al. (2004) 研究发现,美国东部和中西部的区域污染事件与缓慢移动的高压系统,以及边界层不利的通风条件紧密相关,而污染事件的终结则是由东移的中尺度气旋造成的 (Stohl, 2001)。Mickley et al. (2004) 研究了未来气候变化对美国区域大气污染的影响,结果表明,在全球变暖的背景下气旋频率的降低将会导致美国东北部和中西部夏季大气污染事件的增多。Bao et al. (2005) 利用天气—化学预报模式,研究了海风对美国休斯顿地区 O₃ 高浓度事件的影响,指出海风是休斯顿 O₃ 超标的基本成因,而海风的形成则受大尺度气流的影响。Huang et al. (2005, 2006) 对造成香港地区 O₃ 污染的天气形势进行了分类,并利用 PATH 模式进一步分析了不同天气形势下, O₃ 污染事件

中区域输送和局地生成的相对贡献。

孟燕军和程丛兰 (2002) 按有利于污染物扩散和不利于污染物扩散的分类,得到了影响北京空气质量的 18 种地面天气形势场,并进一步证实低压类天气形势控制时易出现重污染。任阵海等 (2005) 分析发现,大范围均压场条件下易出现近地层小尺度局地环流群体,大范围均压场持续演变和移动常形成大气污染汇聚带,从而形成局地严重污染的天气条件。王喜全等 (2006, 2007) 分析了造成北京空气动力学当量直径小于等于 10 μm 颗粒物 (PM₁₀) 重污染的必要条件和两类典型天气形势。关于重污染形成的气象条件也有较多研究 (郑庄川, 1995; 王淑英等, 2002; 张蕾等, 2002; 徐晓峰等, 2005; 隋珂珂等, 2007), 这些研究结果都表明,相对湿度、风速和风向对污染物影响较大,而静风和逆温则是造成污染物高浓度的重要条件。这些研究工作对奥运会期间的空气质量预报提供了一定的参考。

为了更好地了解天气因素对奥运会期间空气质量的影响,本文利用该时期内北京污染监测资料、气象观测资料、韩国气象厅天气图资料及 NCEP 再分析资料,分析了该时期北京地区污染的基本特征及其成因,统计了利于和不利于污染物扩散的天气形势,并分析了该时期内北京发生颗粒物污染的典型天气形势和气象条件。本文中的奥运会期间特指 2008 年 7~9 月。

2 奥运会期间北京地区污染特征及其成因

2.1 奥运会期间北京地区的污染特征

由我国环境空气质量标准可知:当空气污染指数 (API) 值在 101~200 之间时,空气为轻度污染;当 API 值超过 200 时,即出现重污染。利

用北京市环境监测中心公布的 API 值, 分析了 2008 年 7~9 月北京地区的空气污染状况。

由图 1 可以看出, 2008 年 7~9 月, 在有资料的 87 d 中 (5 d 资料缺失), 共有 8 d API 值超过 100, 达到轻度污染的标准, 分别出现在 7 月 4 日、7 月 11 日、7 月 24~27 日、8 月 29 日以及 9 月 30 日, 其中 7 月 24~27 日为一次典型的持续污染过程, 连续 4 d API 值超过国家环境空气质量二级标准。另外值得注意的是 8 月 4~10 日的一次过程, 8 月 4 日 API 值骤然升高, 并连续几天均保持在 80 以上, 虽然没有出现 PM₁₀ 浓度超标的情况, 但仍为一次比较明显的颗粒物持续累积过程。

奥运会赛时 (8 月 8~24 日) 和残奥会赛时 (9 月 6~17 日) 的 API 值均未超过 100, 表明两个时段空气质量良好, 其中有 11 天 API 值低于 50, 空气质量为优。另外 2008 年 7~9 月, SO₂、NO₂ 的 API 值均低于 50, 未出现超标现象。

总之, 奥运会期间 (7~9 月), 大部分时间空气质量良好, 仅出现了一次 PM₁₀ 持续污染过程, 个别天 PM₁₀ 轻微超标, 但持续时间较短。奥运会赛时和残奥会赛时, 主要污染物均未出现超标现象, 实现了“绿色奥运”的承诺。

2.2 2008 年奥运会期间华北地区气候特征

2.2.1 奥运会期间华北地区降水特征

由国家气候中心每月气候影响评价可知, 2008 年 7~9 月华北地区的降水相对于 1971~2000 年的气候平均值而言, 2008 年 7 月, 华北大

部分地区降水量偏少 3~8 成; 8 月, 华北西北部降水量偏多 1~3 成; 9 月, 华北大部分地区降水量偏多 3 成至 2 倍。在此大背景下, 2008 年 7、8 和 9 月, 北京地区的降水量分别为 85.5 mm、176.6 mm 和 107.5 mm, 相应的降水量距平百分率分别为 -53.8%、6.5% 和 114.7%。以上结果表明, 2008 年 7 月, 北京地区降水量较常年偏少, 而 8 月和 9 月的降水量则均比常年偏多, 降水偏多有利于污染物的湿清除, 从而使 8 月和 9 月的空气质量保持良好。

与 2008 年相比, 2003~2007 年的多数年份, 8 月华北大部分地区降水量距平百分率为负, 即降水量较气候平均值低; 而 2008 年 8 月, 华北西北部地区, 包括山西北部、河北西北部以及北京西北部等地, 降水量距平百分率则为正, 即降水量较气候平均值偏多。这是 2008 年华北地区气候特征有别于常年之处。

2.2.2 奥运会赛时和残奥会赛时的天气形势特征

利用 NCEP 风场再分析资料 (Kalnay et al., 1996), 分析了 2008 年奥运会赛时和残奥会赛时 1000 hPa 风场相对于 2001~2005 年多年平均值的距平分布 (图 2)。从奥运会赛时的风场距平分布 (图 2a) 不难发现, 华北西北部主要为偏北风距平, 东南部则为偏南风距平, 渤海上空呈现气旋性距平中心, 华北地区受其后部的偏北气流影响。结合奥运会赛时奥体站的风向观测结果发现, 该站偏北风出现的频率高达 51%, 表明 2008 年奥运会赛时, 华北地区偏北风较常年强, 这种形势有

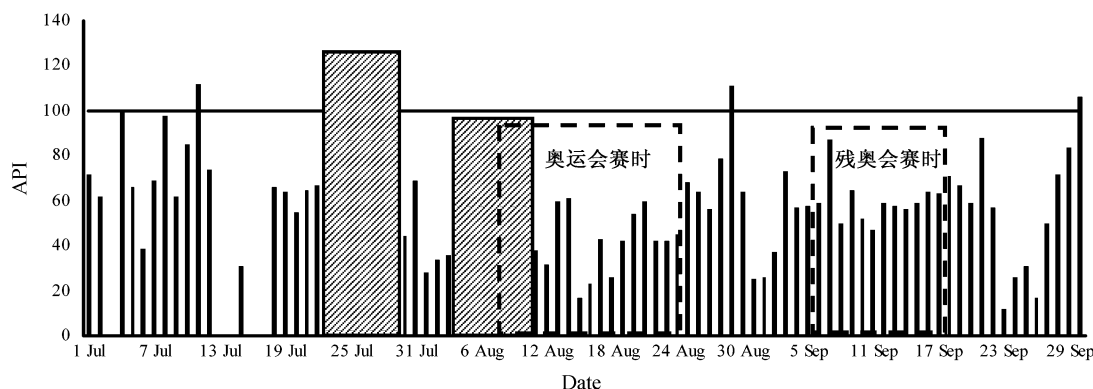


图 1 2008 年 7~9 月北京 PM₁₀ 的 API 时间序列。斜纹方框标注颗粒物持续累积过程

Fig. 1 Time series of the Air Pollution Index (API) of the Particulate Matter with particle size below 10 μm (PM₁₀) in Beijing from Jul to Sep in 2008. Frames with twill represent accumulation processes of PM₁₀

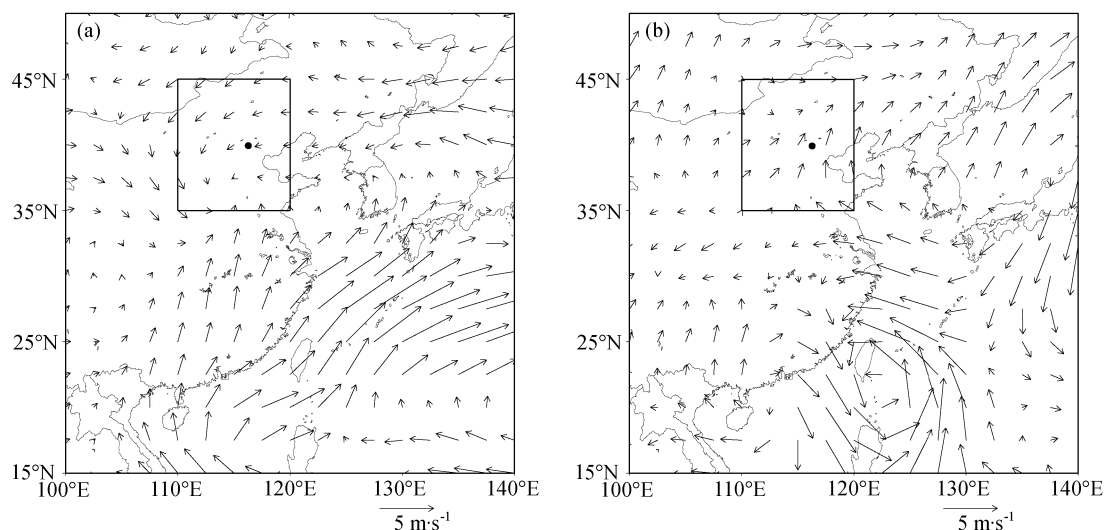


图2 2008年(a)奥运会赛时和(b)残奥会赛时1000 hPa风场距平分布。黑色框内为华北地区,黑点代表北京

Fig. 2 Distributions of the wind anomaly at the height of 1000 hPa during (a) the Olympic Games and (b) the Paralympic Games in 2008. Black frames represent North China and black dots represent Beijing

利于北京地区的污染物扩散;同时偏北气流也带来了冷空气,有利于形成降水。另一方面,王喜全等(2007)指出北上台风或热带气旋对北京地区PM₁₀污染有重要影响。2008年奥运会赛时,西北太平洋上空为明显的反气旋距平,这种形势不利于台风或热带气旋的形成。国家气候中心的统计结果显示,8月在西北太平洋和南海,共有4个热带风暴生成,较常年同期(5.6个)偏少,这种形势不利于北京地区PM₁₀高污染事件的出现。

从残奥会赛时风场距平(图2b)可以看出,在西北太平洋有气旋性距平出现,利于台风或热带气旋的生成。虽然这种情况易于造成北京PM₁₀污染,但由于华北北部出现了较为明显的西北风距平,而南部为东南风距平,冷暖气流在华北地区交汇,易于形成降水。统计结果也表明,9月华北地区的降水较常年明显偏多,增强了颗粒物的湿清除作用,降低了高污染事件出现的几率。总而言之,奥运会赛时和残奥会赛时的天气形势不利于高污染事件发生。

3 2008年7~9月天气形势分类

天气形势决定了气象要素的分布和变化,也

决定了大气的扩散能力和稳定程度。对地面天气形势和高、低空气象要素特征进行综合分析,有利于了解大气污染形成的外部条件。

利用韩国气象厅天气图资料,对2008年7~9月(5 d资料缺失),华北地区(35°N~45°N, 110°E~120°E)逐日天气形势进行了分类。根据孟燕军和程以兰(2002)的分类标准,将地面天气形势分成有利于污染扩散和不利于污染扩散两种类型。结果表明,这期间共有25 d出现有利于污染扩散的地面天气形势,占全部统计时间的28%;共有62 d出现不利于污染扩散的地面天气形势,占全部时间的72%,其中出现高压类32 d、低压类22 d、均压类8 d。这表明,奥运会期间不利于污染扩散的地面天气形势出现频率较高,这与已有的统计结果相似^①。

必须注意到,虽然大气污染通常发生在近地层,但地面天气形势并不是其形成的唯一决定因素,还必须要有适当的高、低空系统配置。在对逐日地面天气形势进行分类的同时,还分析了逐日850 hPa和500 hPa天气图。结果表明,当华北地区地面天气形势不利于污染扩散时,若850 hPa有偏南气流,且出现暖平流,或受暖舌影响;同时500 hPa受槽前脊后的西南气流控制时,则更

① 北京市空气质量与气象条件的关系研究,内部交流

易导致污染物的累积, API 值往往会升高; 反之, 若 850 hPa 为西北气流, 或有冷平流出现, 同时 500 hPa 也配合以西北气流, 则不易于污染物的累积。

另外还发现, 当华北地区处于高、低压系统交界带, 即位于高压系统后部、低压系统前部时, 该区域盛行偏南风, 这种形势稳定维持, 非常易于发生空气污染。

4 奥运会期间污染天气形势分类

2008 年奥运会期间 (7~9 月), 北京地区共出现 8 d PM10 轻微污染。PM10 污染出现在必要的气象条件下, 而局地气象条件则主要由天气系统和天气形势决定。笔者对 2008 年 7~9 月 PM10 污染发生时, 华北地区的天气形势进行了详细分析, 以期找到污染出现时的一些共同特征。天气形势分析采用 NCEP 再分析资料, 主要包括海平面气压场 (可表征地面天气形势)、1000 hPa 风场 (可反映近地层的流场)、850 hPa 风场和温度场 (会影响空气中污染物的垂直扩散) 以及 500 hPa 位势高度场 (可以很好地反映天气系统的演变趋势), 分析结果列于表 1 中。

表 1 显示, PM10 污染过程对应的地面天气类型以低压类居多, 共 4 d; 高压类次之, 共 3 d; 而均压类仅 1 d。1000 hPa 风场分析结果显示, 在 PM10 超标的 8 d 里, 华北地区共有 7 d 盛行偏南

表 1 2008 年 7~9 月北京 3 级空气质量的时间、API 值及对应的天气形势

Table 1 Occurrence time, API values, and related synoptic situations in class 3 air quality days from Jul to Sep in 2008

时间	API 值	天气形势			
		海平面气压场	1000 hPa	850 hPa	500 hPa
7 月 4 日	100	低压带	偏南风	暖舌控制	高压脊过境
7 月 11 日	112	低压带	偏南风	暖舌影响	槽前脊后
7 月 24 日	113	鞍型场	偏南风	暖舌影响	横槽后部
7 月 25 日	110	弱高压系统	偏南风	暖舌影响, 有暖平流	弱槽前部
7 月 26 日	118	弱高压系统后部	偏南风	暖舌影响	高压脊过境
7 月 27 日	113	低压系统前部	偏南风	暖舌影响	槽前脊后
8 月 29 日	113	低压系统前部	偏南风	暖平流	槽前脊后
9 月 30 日	106	弱高压	西南风	较弱暖舌控制	浅槽后部

风, 1 d 受弱偏西风影响; 850 hPa 该地区多受暖舌影响, 或有明显的暖平流; 500 hPa 则大多受槽前脊后的西南气流影响。

另外, 天气形势分析还发现, 在发生 PM10 污染的 8 d 里, 除 7 月 4 日和 11 日是低压带控制引起污染外, 其余 6 d 均与北上台风或热带低压有关。7 月 24~27 日的 PM10 持续污染过程就是由于西太平洋台风北上, 阻滞中高纬度天气系统向东南方向移动, 使华北地区长期受南风气流影响, 导致污染物累积, 从而形成污染的。

5 典型持续污染个例天气形势、气象条件分析

静稳型 PM10 污染是北京市一种较为复杂的污染过程, 与影响北京的天气形势和北京的局地气象条件有着密切的联系。选取 2008 年 7~9 月间的污染物持续累积个例进行深入分析, 以期了解污染发生、发展过程的特征和规律。两个个例分别发生在 2008 年 7 月 22~30 日和 8 月 3~11 日。

5.1 2008 年 7 月 22~30 日持续污染

5.1.1 空气质量演变过程

图 1 中可以看出, 2008 年 7 月 22~30 日, 北京发生了一次 PM10 持续污染。7 月 22 日 PM10 出现累积的趋势, 23 日 API 值上升至 89, 24~27 日 PM10 浓度超标, 连续 4 d API 值超过 100, 出现了持续污染过程; 28 日 PM10 浓度回落, API 值降至 96, 随后两天 PM10 浓度快速降低, 至 30 日 API 值降至 44, 污染过程结束。

5.1.2 天气形势分析

此次持续污染个例中, 源于蒙古的低压系统在南下东移过程中, 受到西太平洋台风北上的影响而阻滞不前, 导致北京及周边地区长期处于低压系统前部和弱高压系统后部的偏南气流影响下。7 月 22 日, 蒙古国境内有低压系统生成发展, 与此同时, 西太平洋海域有热带低压生成; 23 日, 蒙古低压前沿东移影响我国华北地区, 而热带低压则发展为台风, 向西北方向移动; 24 日, 台风继续北上西进, 蒙古低压则由于北上台风的阻滞而减弱, 其前缘脱离系统主体, 形成一个弱低压系统, 影响山东半岛一带, 此时华北地区处于该

系统与主体低压系统之间, 而其东北方向和西南方向均有弱高压系统存在, 使得华北地区处于鞍型场控制之下; 25~27 日, 蒙古境内的低压系统不断发展加强, 向东南移动, 西太平洋台风系统也继续加强, 向西北方向移动, 并于 27 日在台湾登陆, 蒙古低压由于台风系统的阻挡作用, 难以快速南下, 华北地区位于该低压系统的前部, 受系统性偏南风影响, 从而造成污染物的持续累积; 28 日, 台风在我国广东、福建一带登陆减弱, 蒙古低压东移, 影响我国东北地区, 同时蒙古境内有高压系统生成并向东南方向移动; 29 日台风主体登陆, 蒙古高压前沿影响我国华北地区, 其前

沿的偏北气流使污染开始缓解; 30 日台风系统减弱为热带气旋, 高压系统南下影响华北地区, 污染过程随之结束。

由图 3 可以看出, 持续污染期间, 西太平洋台风系统不断发展加强, 向西北方向移动, 而华北地区则持续处于系统性偏南风的影响下, 这是造成 PM₁₀ 累积的主要原因。在持续污染期间, 低空 850 hPa, 华北地区一直处于暖舌的影响下, 并伴有弱暖平流 (图 4), 这使得北京地区中低空温度升高, 而影响空气中污染物的垂直扩散。500 hPa, 由于受到台风系统的阻挡作用, 高压脊稳定维持在华北地区上空, 该地区主要受脊后槽前的

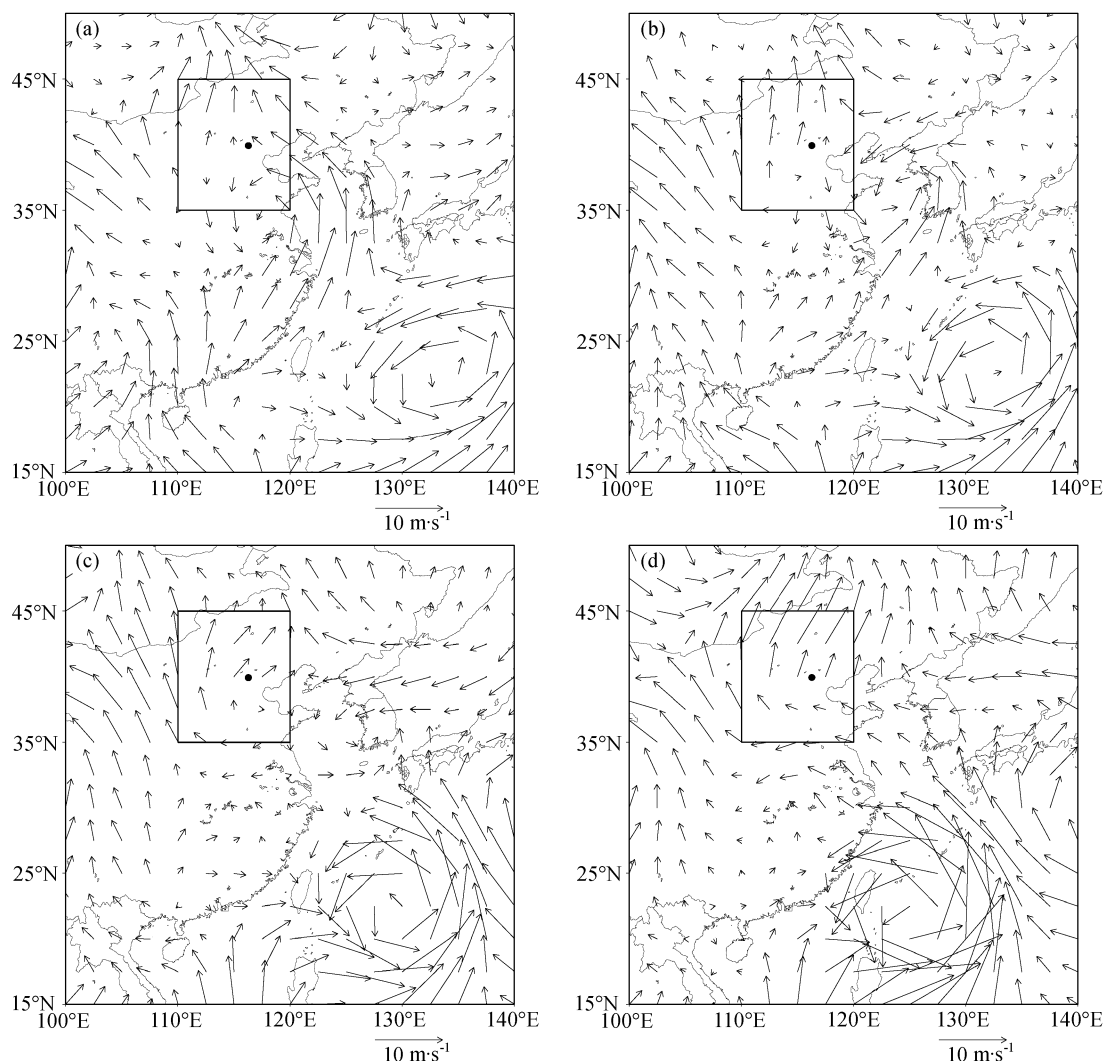


图 3 2008 年 7 月 (a) 24 日、(b) 25 日、(c) 26 日、(d) 27 日东亚地区地面天气形势 (黑色框内为华北地区, 黑点代表北京)

Fig. 3 Weather situations on surface in East Asia on (a) 24 Jul, (b) 25 Jul, (c) 26 Jul, and (d) 27 Jul 2008 (black frames represent North China and black dots represent Beijing)

系统性西南气流控制。

5.1.3 气象要素分析

研究表明,北京地区空气动力学当量直径小于等于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物 (PM_{2.5}) 在 PM₁₀ 中所占比例很高,两者具有较为一致的变化趋势(杨复沫等, 2002; 于建华等, 2004)。由于缺少

PM₁₀ 监测资料,因此可利用 PM_{2.5} 代替 PM₁₀; 选取北医和昌平两站点分别代表市区和郊区,分析了 PM_{2.5} 浓度与气象要素的逐时变化,来研究污染过程发生时气象条件的变化规律。

由北医站 PM_{2.5} 浓度与风速的逐时变化(图 5a) 可以看出,由于白天风速高于夜间, PM_{2.5}

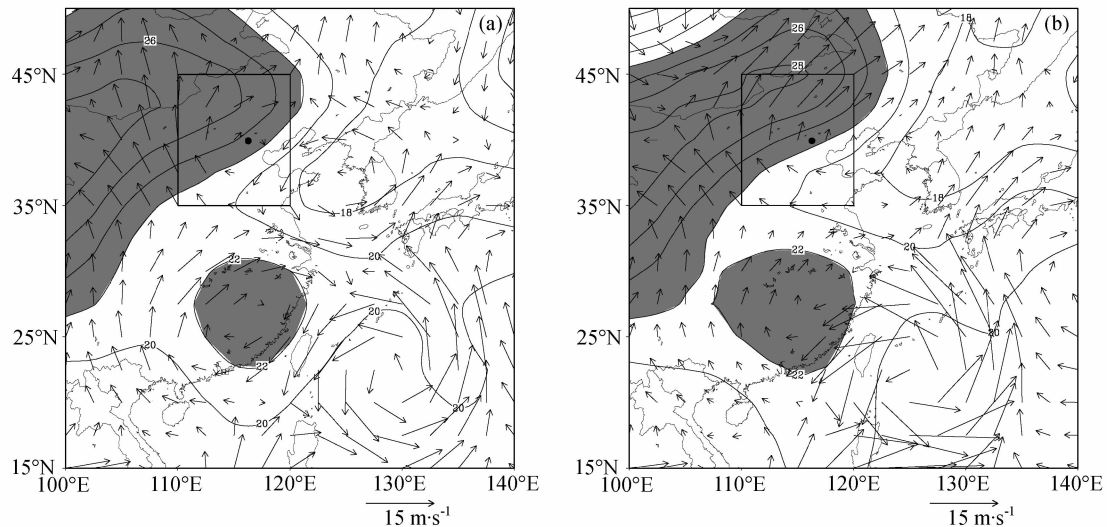


图 4 2008 年 7 月 (a) 26 日和 (b) 27 日东亚地区 850 hPa 风场(矢量)和温度场(等值线,单位:°C)分布(黑框内为华北地区,黑点代表北京,阴影代表温度大于 22 °C)

Fig. 4 Distributions of the wind (vector) and the temperature (contour, units:°C) at the height of 850 hPa in East Asia on (a) 24 Jul and (b) 27 Jul 2008 (black frames represent North China, black dots represent Beijing, and shaded areas represent the temperature higher than 22 °C)

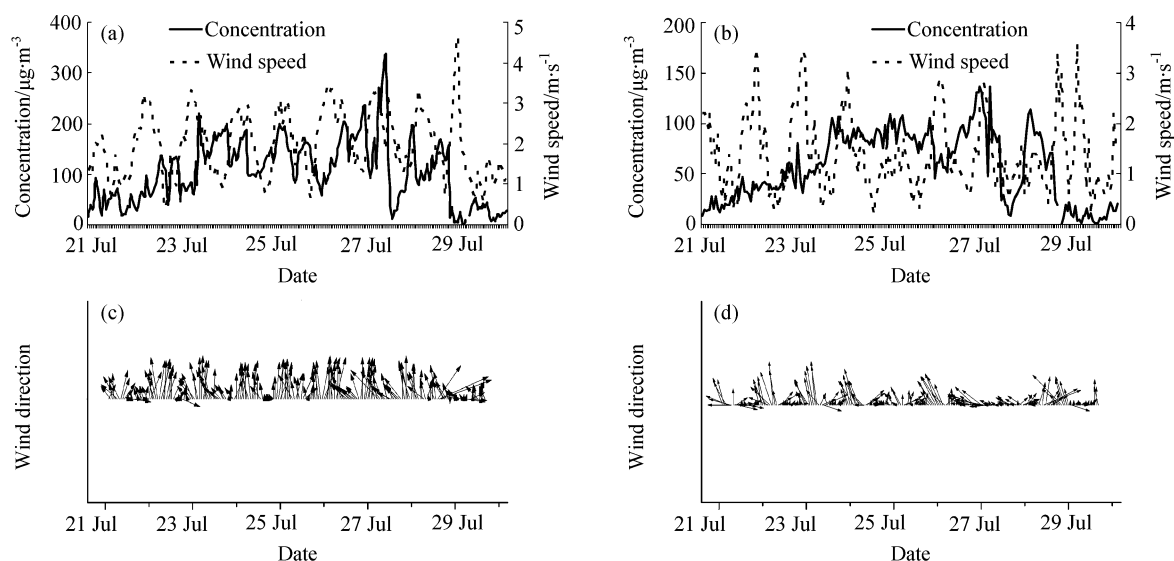


图 5 2008 年 7 月 21~30 日 (a、c) 北医和 (b、d) 昌平两站 (a、b) PM_{2.5} 浓度与风速、(c、d) 风向的逐时变化

Fig. 5 Hourly variations of (a, b) the PM_{2.5} concentration and wind speed, and (c, d) the wind direction at (a, c) Beiyi and (b, d) Changping stations from 21 Jul to 30 Jul in 2008

高浓度主要出现在夜间, 呈现白天低、夜间高的变化特征。从图 5a 可以看出, PM_{2.5} 从 7 月 23 日开始累积, 夜间浓度超过了 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 24 日有明显的升高, 浓度达到 $150 \sim 200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 此后几天浓度维持在这一水平, 至 27 日 21 时 (北京时间, 下同) 浓度达到最高值 $335.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 29 日浓度开始降低, 30 日降至 $50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 污染过程结束。22~28 日, 该站风速白天一直保持在 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 夜间则通常低于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 甚至低于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 29 日 09 时风速骤然增加到

$4.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, PM_{2.5} 浓度也迅速降低。从北医站风向变化 (图 5c) 可以看出, 这段时间内以偏南风为主, 29 日则出现了较强的偏西风, 使颗粒物得以扩散, 污染减轻。

在颗粒物持续累积的几天内, 北医站夜间温度均在 25°C 以上, 白天气温则达到了 35°C 左右, 日均气温维持在 30°C 以上 (图 6a), 这表明北京出现了持续高温天气。7 月 29~30 日, 由于受到冷空气的影响, 气温开始迅速降低。在污染物累积期间, 由于受到低层偏南气流的影响,

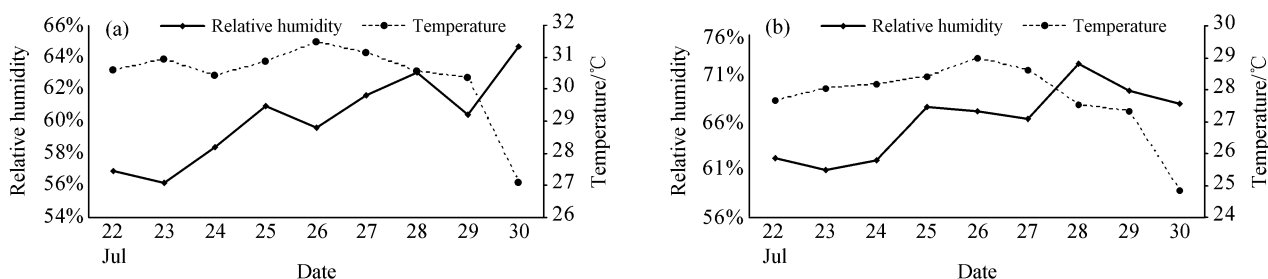


图 6 2008 年 7 月 22~30 日 (a) 北医和 (b) 昌平两站相对湿度和气温日均值变化

Fig. 6 Daily variations of the relative humidity and air temperature at (a) Beiyi and (b) Changping stations from 22 Jul to 30 Jul 2008

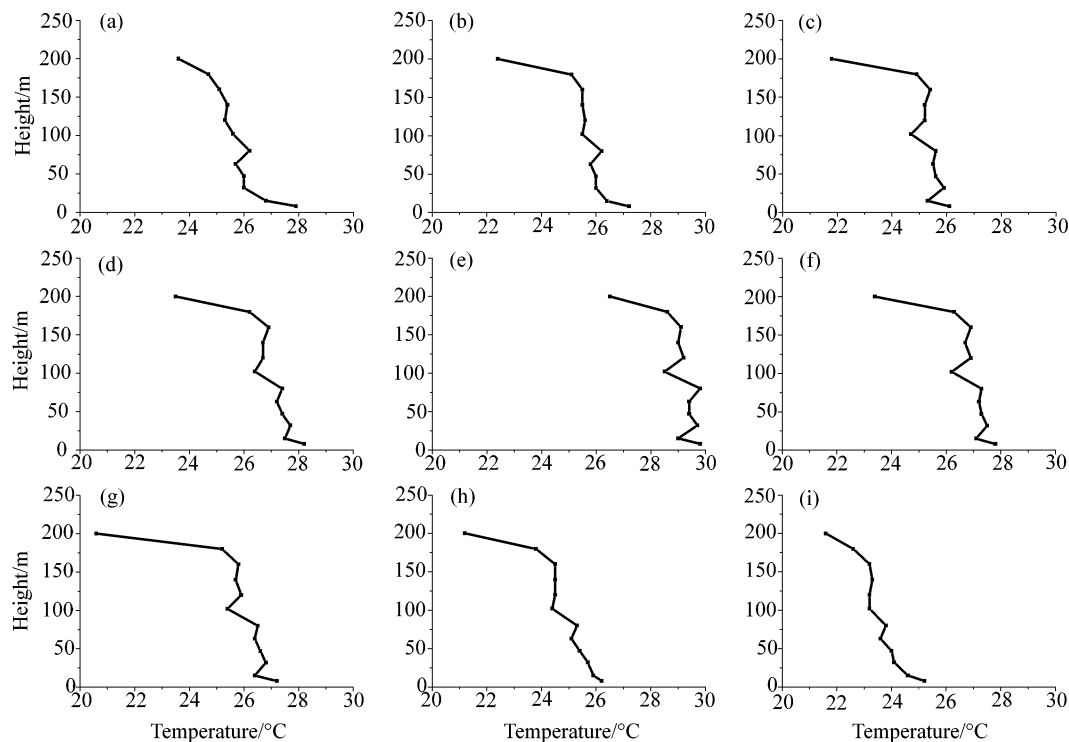


图 7 2008 年 7 月 (a) 22 日、(b) 23 日、(c) 24 日、(d) 25 日、(e) 26 日、(f) 27 日、(g) 28 日、(h) 29 日、(i) 30 日 08 时近地层温度廓线

Fig. 7 Temperature profiles in the near surface layer at 0800 LST on (a) 22 Jul, (b) 23 Jul, (c) 24 Jul, (d) 25 Jul, (e) 26 Jul, (f) 27 Jul, (g) 28 Jul, (h) 29 Jul, and (i) 30 Jul 2008

相对湿度逐渐增大, 日均值均达到了 56% 以上。29 日由于受到干冷空气的影响, 相对湿度降低, 而随后出现的降水过程, 使得相对湿度再次增大。

昌平站气象要素的变化情况与北医站相似 (图 5b 和 5d)。在颗粒物累积阶段, 该站白天风速均在 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 而夜间风速则通常低于 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且盛行偏南风; 气温维持在 28°C 左右; 相对湿度明显升高, 并一直保持在 64% 以上 (图 6b)。

近地层逆温的形成, 不利于空气中污染物的扩散。在有逆温的条件下, 大气层结稳定, 抑制

了大气中的垂直运动和湍流交换, 阻止了空气中水汽、烟尘和其他污染物的垂直输送和水平扩散。图 7 给出了中国科学院大气物理研究所 325 m 气象塔监测的 2008 年 7 月 22~30 日 08 时近地层温度的垂直变化。由该图可以看出, 7 月 24~28 日的温度廓线与其他时间温度廓线有一定差异, 近地层均出现比较深厚的逆温层, 且逆温层高度接近地面, 这使得低层的污染物无法向上扩散, 而在近地面堆积; 而 7 月 22~23 日、7 月 29~30 日的逆温层则比较浅薄, 且逆温层高度较高。

总的来说, 颗粒物持续累积期间, 北京地区风速一直较小, 以偏南风为主, 且持续高温高湿

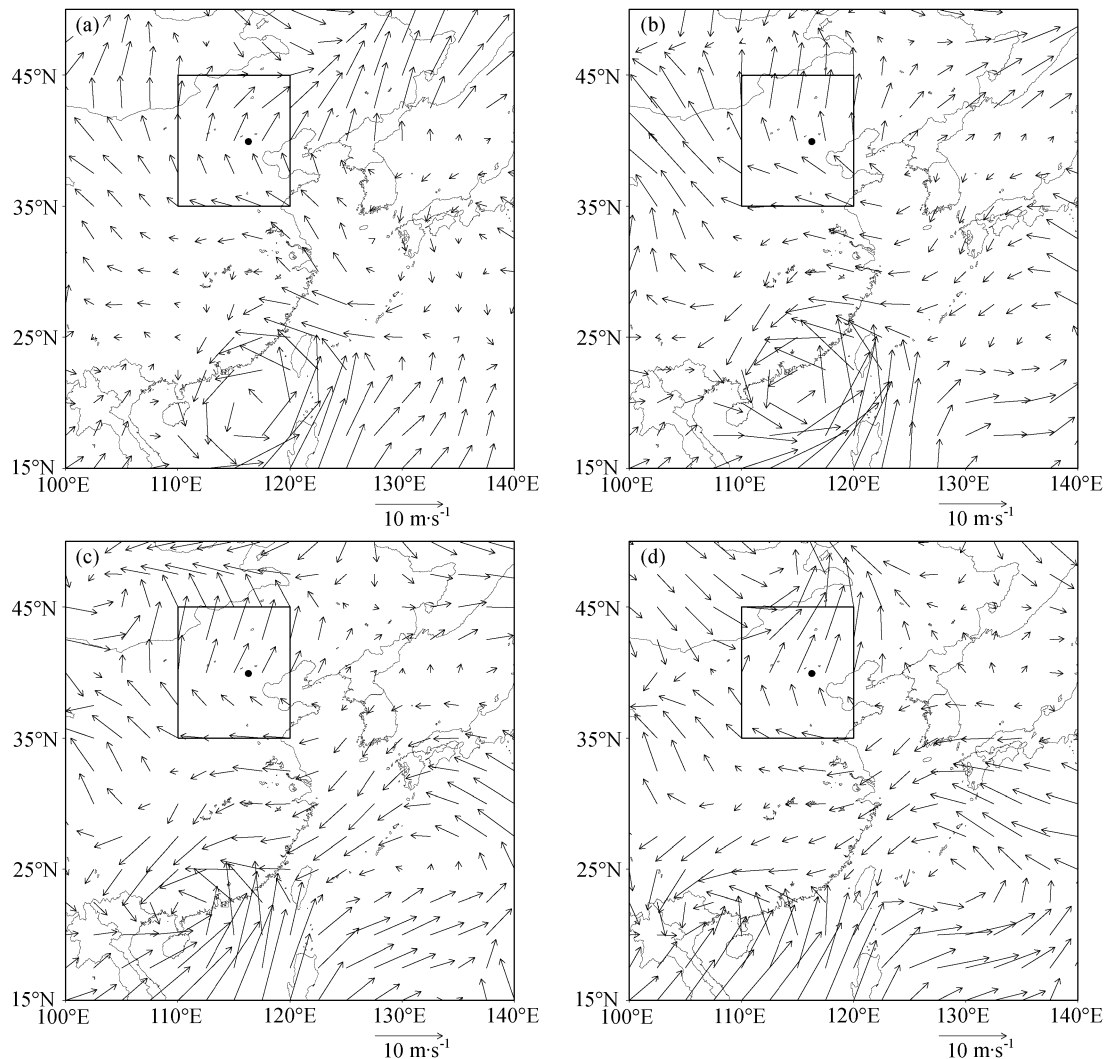


图 8 2008 年 8 月 (a) 5 日、(b) 6 日、(c) 7 日、(d) 8 日东亚地区地面天气形势 (黑色框内为华北地区, 黑点代表北京)

Fig. 8 Weather situations on surface in East Asia on (a) 5 Aug, (b) 6 Aug, (c) 7 Aug, and (d) 8 Aug 2008 (black frames represent North China, black dots represent Beijing)

天气, 近地层逆温也是造成持续污染的一个重要原因。

5.2 2008 年 8 月 3~11 日颗粒物累积过程

5.2.1 空气质量演变过程

由图 1 可以看出, 2008 年 8 月 3~11 日北京出现了一次较为明显的 PM₁₀ 累积过程。8 月 3 日 API 值为 36, 空气质量为优; 而在 4 日 API 值骤增至 83, 随后两天 API 值维持在这一水平, 7 日再次上升, API 值达到 96, 在 8 日奥运会开幕当天 API 值也高达 94; 由于 9 日北京发生了降水, API 值降至 79, 10 日略有回升, 但污染形势已有所缓解, 11 日 API 值降至 32, 此次颗粒物累积过程结束。在此次过程中, 由于奥运会前期北京及周边地区实施了严格的控制措施, API 值并未超过 100, 但仍不失为一次典型的颗粒物累积过程。

5.2.2 天气形势分析

这次 PM₁₀ 累积过程的天气形势, 与 7 月 22~30 日持续污染个例的天气形势类似, 也属于台风系统阻滞中高纬度天气系统南下的类型, 所不同的是这一过程中出现了类似双台风的天气形势。8 月 4~5 日, 西太平洋台风系统向西北方向移动, 华北地区处于高压后部、低压前部, 盛行南风气流; 6 日, 台风系统开始在广东沿海登陆, 而此时西太平洋有热带低压系统生成; 8 月 7~8 日, 台风登陆的同时, 热带低压也发展加强, 并向西移动, 由于该系统的阻碍, 使得影响华北的高压系统难以东移, 从而使华北持续受偏南气流的影响; 8 月 9~10 日, 热带低压系统减弱, 冷空气南下, 华北地区出现了降水过程, 污染得以缓解; 8 月 11 日, 华北地区受高压系统控制, 污染过程结束。从 1000 hPa 平均流场可以看出天气形势的演变过程 (图 8)。此外 850 hPa 华北地区风场与 1000 hPa 相似, 受偏南气流影响, 850 hPa 华北地区从 4~7 日均受暖舌影响。500 hPa 多受槽前脊后的西南气流影响。

5.2.3 气象要素分析

与上一个例相同, 分析了北医和昌平两站颗粒物累积过程中气象要素的变化情况 (图略), 分析结果与前一个例基本相同, 即在颗粒物累积过程中, 北京地区风速较小, 以南风为主, 近地层存在逆温, 气温和相对湿度均比较高。

6 总结

通过对 2008 年 7~9 月北京污染特征和天气形势、气象要素分析, 得出了以下几个结论:

(1) 2008 年 7~9 月, 共出现 8 d PM₁₀ 轻度污染, 包括一次 PM₁₀ 持续污染; 奥运会赛时和残奥会赛时, 空气质量良好, 未出现污染。出现良好空气质量的原因主要是北京地区 8、9 月降水较多, 污染物得以清除。

(2) 奥运会期间, 北京地区不利于污染扩散的天气形势出现频率较高, 共计 62 d, 占全部统计时间的 72%。

(3) 奥运会期间, 北京 PM₁₀ 超标时地面天气形势以低压类居多, 1000 hPa 盛行偏南气流, 850 hPa 通常受到暖舌的影响, 500 hPa 则多受槽前脊后的西南气流影响。

(4) 奥运会期间, PM₁₀ 超标过程多与台风系统或热带低压的北上, 阻滞华北地区天气系统南下东移的形势相关联, 7 月 22~30 日持续污染过程和 8 月 3~11 日颗粒物持续累积过程均受此类天气形势影响。

(5) 风速较小、偏南风、高温高湿、近地层持续逆温等是奥运会期间颗粒物累积的有利气象条件。

奥运会期间北京空气质量良好, 一方面是由于北京市采取了极为严格的污染控制措施, 另一方面则与有利的天气形势密不可分。奥运会期间虽然地面多为不利于污染扩散的天气形势, 但是高低空的天气形势则多有利于污染物的扩散。对污染过程天气形势和气象要素的分析结果, 可以为北京空气质量的预报工作提供一定的帮助。

参考文献 (References)

- Bao J W, Michelson S A, McKeen S A, et al. 2005. Meteorological evaluation of a weather-chemistry forecasting model using observations from the TEXAS AQS 2000 field experiment [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D21105, doi: 10.1029/2004JD005024.
- Guest P S, Mach W H, Winchester J W. 1984. Meteorological associations with aerosol composition in the boundary layer [J]. *J. Geophys. Res.*, 89 (D1): 1459-1467.
- Hogrefe C, Biswas J, Lynn B, et al. 2004. Simulating regional-

- scale ozone climatology over the eastern United States: Model evaluation results [J]. *Atmos. Environ.*, 38: 2627–2638.
- Huang J P, Fung J C H, Lau A K H, et al. 2005. Numerical simulation and process analysis of typhoon-related ozone episodes in Hong Kong [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D05301, doi: 10.1029/2004JD004914.
- Huang J P, Fung J C H, Lau A K H. 2006. Integrated processes analysis and systematic meteorological classification of ozone episodes in Hong Kong [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, D20309, doi: 10.1029/2005JD007012.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- 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): 43–47. Meng Yanjun, Cheng Conglan. 2002. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing area [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 28 (4): 43–47.
- Mickley L J, Jacob D J, Field B D, et al. 2004. Effects of future climate change on regional air pollution episodes in the United States [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L24103, doi: 10.1029/2004GL021216.
- 任阵海, 苏福庆, 高庆先, 等. 2005. 边界层内大气排放物形成重污染背景解析 [J]. *大气科学*, 29 (1): 57–63. Ren Zhenhai, Su Fuqing, Gao Qingxian, et al. 2005. Analysis of the serious atmospheric pollution event caused by emissions in boundary layer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 57–63.
- Schichtel B A, Husar R B. 2001. Eastern North American transport climatology during high- and low-ozone days [J]. *Atmos. Environ.*, 35: 1029–1038.
- Stohl A. 2001. A 1-year Lagrangian “climatology” of airstreams in the Northern Hemisphere troposphere and lowermost stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 7263–7279.
- 隋珂珂, 王自发, 杨军, 等. 2007. 北京 PM₁₀ 持续污染及与常规气象要素的关系 [J]. *环境科学研究*, 20 (6): 77–82. Sui Keke, Wang Zifa, Yang Jun, et al. 2007. Beijing persistent PM₁₀ pollution and its relationship with general meteorological features [J]. *Research of Environmental Science (in Chinese)*, 20 (6): 77–82.
- Vukovich F M. 1995. Regional-scale boundary-layer ozone variations in the eastern United States and their association with meteorological variations [J]. *Atmos. Environ.*, 29: 2259–2273.
- 王淑英, 张小玲, 程丛兰. 2002. 北京地区 PM₁₀ 污染日变化特征 [J]. *气象科技*, 30 (6): 344–348. Wang Shuying, Zhang Xiaoling, Cheng Conglan. 2002. A study on features of diurnal variation of PM₁₀ in Beijing area [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 30 (6): 344–348.
- 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): 81–86. Wang Xiquan, Qi Yanbin, Wang Zifa, et al. 2007. The influence of synoptic pattern on PM₁₀ heavy air pollution in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (1): 81–86.
- 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. Key meteorological factors resulting in PM₁₀ heavy air pollution in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (4): 470–476.
- 徐晓峰, 李青青, 张小玲. 2005. 北京一次局地重污染过程气象条件分析 [J]. *气象科技*, 33 (6): 543–547. Xu Xiaofeng, Li Qingqing, Zhang Xiaoling. 2005. Weather condition analysis for a serious local air pollution event [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 33 (6): 543–547.
- 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 2002. 北京 PM_{2.5} 浓度的变化特征及其与 PM₁₀、TSP 的关系 [J]. *中国环境科学*, 22 (6): 506–510. Yang Fumo, He Kebin, Ma Yongliang, et al. 2002. Variation characteristics of PM_{2.5} concentration and its relationship with PM₁₀ and TSP in Beijing [J]. *China Environmental Science (in Chinese)*, 22 (6): 506–510.
- 杨素英, 陈东升, 赵秀勇. 2009. 周边污染对北京大气 PM₁₀ 的影响研究 [J]. *环境科学与技术*, 32 (3): 13–17. Yang Suying, Chen Dongsheng, Zhao Xiuyong. 2009. Transboundary PM₁₀ contribution to Beijing [J]. *Environmental Science and Technology (in Chinese)*, 32 (3): 13–17.
- 于建华, 虞统, 魏强, 等. 2004. 北京地区 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度的变化特征 [J]. *环境科学研究*, 17 (1): 45–47. Yu Jianhua, Yu Tong, Wei Qiang, et al. 2004. Characteristics of mass concentration variations of PM₁₀ and PM_{2.5} in Beijing area [J]. *Research of Environmental Sciences (in Chinese)*, 17 (1): 45–47.
- 张蔷, 赵淑艳, 金永利. 2002. 北京地区低空风、温度层结对大气污染物垂直分布影响初探 [J]. *应用气象学报*, 13 (特刊): 153–159. Zhang Qiang, Zhao Shuyan, Jin Yongli. 2002. A preliminary study of impacts of wind in low level and temperature stratification on vertical distribution of atmospheric pollutants in Beijing area [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 13 (Suppl.): 153–159.
- 郑庄川. 1995. 北京东部地区的污染气象特征 [J]. *气象*, 21 (1): 28–31. Zheng Zhuangchuan. 1995. The features of atmospheric pollution in the eastern part of Beijing [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 21 (1): 28–31.