Acta Scientiae Circum stantiae

贺克斌,贾英韬,马永亮,等. 2009.北京大气颗粒物污染的区域性本质 [J].环境科学学报, 29(3):482-487 He K B, Jia Y T, Ma Y L, *et al* 2009. Regionality of episodic aerosol pollution in Beijing[J]. Acta Scientiae Circum stantiae, 29(3):482-487

北京大气颗粒物污染的区域性本质

贺克斌^{1,*},贾英韬¹,马永亮¹,雷宇¹,赵晴¹, TANAKA Shigeru², OKUDA Tomoak²

1. 清华大学环境科学与工程系,北京 100084

2 庆应大学环境化学实验室,横滨 223-8522,日本

收稿日期: 2008-05-30 修回日期: 2008-10-08 录用日期: 2008-11-21

摘要:颗粒物是北京的首要大气污染物,2006年 PM₁₀年均浓度超标 60%以上.本研究基于颗粒物质量浓度在线监测和逐日 TSP的采样分析, 结合地面天气形势,论述了北京大气颗粒物污染的区域性特征.首先,北京大气颗粒物污染过程的形成由以冷锋过境为明显标志的周期性的天 气系统决定,天气系统的活动尺度决定了颗粒物污染的区域性.其次,从 PM₂₅/PM₁₀和 Pb/A1比值的变化判别出颗粒物污染过程中随着颗粒 物浓度的升高,细颗粒物呈现富集趋势;细颗粒物的富集由粗颗粒物的去除和超细颗粒物的生成(核化过程)、以及二次颗粒物的生成所致;污 染过程中颗粒物的老化以及化学组成(Pb/A1)的大幅度变化共同表明了北京大气颗粒物来源的区域性本质.

关键词:北京;大气颗粒物;区域性;气象

文章编号: 0253-2468 (2009) 03-482-06 中图分类号: X513 文献标识码: A

Regionality of episodic aerosol pollution in Beijing

HE Kebin^{1, *}, JA Yingtao¹, MA Yongliang¹, LEIYu¹, ZHAO Qing¹, TANAKA Shigeru², OKUDA Tomoaki² 1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

2 Laboratory of Environmental Chemistry, Yokohama 223-8522, Japan

Received 30 May 2008; received in revised form 8 October 2008; accepted 21 November 2008

Abstract: Particulate matter is the primary pollutant of the urban atmosphere in Beijing PM_{10} was 60% higher than the national second-class standard in 2006. Based on fast-response aerosol concentrations and elemental compositions in daily TSP, this study revealed the regionality of episodic aerosol pollution. First, surface weather patterns indicated that episodic aerosol pollution was affected by the passing of cold fronts caused by the synoptic cycles covering large areas, which naturally resulted in the regionality of aerosol pollution in Beijing. Second, as the episodes progressed, $PM_{2.5}/PM_{10}$ and Pb/A1 increased, which was associated with the removal of coarse particles, nucleation of nanoparticles, and formation of secondary particles. Thus aerosol became finer and aged, which implies that the aerosol in Beijing is a result of regional sources.

Keywords: Beijing; aerosol; regionality; meteorology

1 引言 (Introduction)

大气颗粒物因富集有毒有害物质及微生物而 危害人体健康 (Ravindra *et al*, 2001);通过光散射 和光吸收等消光效应降低大气能见度 (Eldering and Cass, 1996; Garcia-Neto, 2002; Watson, 2002). $SO_4^{2^-}$ 、 BC和有机气溶胶等通过直接或者间接辐射强迫影 响全球气候变化 (Charlson *et al*, 1992; Chuang *et al*, 1997). 人为源排放的颗粒物通过直接或间接 作用减少东亚地区的区域降水 (Huang *et al*, 2007);区域霾可致使中国稻米和冬小麦的产量降低至少 5% ~ 30% (Chameides *et al*, 1999).

1998年 12月以来北京市政府已经连续实施了 十二个阶段的大气污染控制措施,使得空气质量状 况有所改善;市区空气质量二级及好于二级的天数 比例从 1998年的 27.4%上升到 2006年的 66 0%. 但是,2006年 PM_{10} 浓度年日均值仍高达 161 $\mu g \cdot m^{-3}$,超过国家二级标准 (100 $\mu g \cdot m^{-3}$)60%以 上 (北京市环保局,2007),北京大气颗粒物污染形 势依然严峻.

基金项目:国家杰出青年科学基金(No. 20625722)

Supported by the National Science Fund for Distinguished Young Scholars (Na 20625722) 作者简介: 贺克斌 (1962—),男,教授, E-mail: hekb@tsinghua edu cn; *通讯作者 (责任作者) Biography: HE Kebin (1962—), male, professor, E-mail: hekb@tsinghua edu cn; * Corresponding author 研究表明,2005年底北京城区 SO₂、NO_x和 PM₁₀三种污染物的年排放量分别比采取十一阶段紧 急措施之前削减了 73%、16%和 50%,相应的污染 物浓度分别降低了 60%、15%和 21%(清华大学, 2006). PM₁₀浓度的降低幅度远小于本地排放削减 幅度很可能是由于北京大气颗粒物污染的区域性 所致.本文通过分析北京大气颗粒物污染过程的天 气成因以及污染过程中细颗粒物的富集,解析了北 京颗粒物污染的区域性特征.

2 观测实验 (Observation)

研究发现,清华园采样点 $M_{2,5}$ 及其化学组分质 量浓度与车公庄交通监测点相应浓度处于同一污 染水平 (He et al, 2001).因此,选择清华大学环境 系二楼平台作为城区连续观测点.2002年至 2007 年采用美国 Rupprecht & Patashnik 公司生产的 TEOM 1400a监测 $PM_{2,5}$ 和 PM_{10} 的实时质量浓度,时 间分辨率为 30m in; 2001年至 2006年开展逐日 TSP 样品采集,并分析其中的 16种无机元素.

TEOM 1400a采用锥形元件振荡微天平技术 (Tapered Element O scillating M icrobalance, TEOM)在 线测定环境中颗粒物的质量浓度. 该仪器已通过美 国环保局认证 (EQPM-1090-079),并已成为联邦等 效测试方法 (Federal Equivalent Method, FEM) (Chow, 1995).

使用 Tokyo Dylec公司制造的气溶胶自动采样器 (Aerosol automatic sampler)对总悬浮颗粒物 (TSP)进行逐日采集,型号为 GS-32PC 采用激光溶 蚀 电感耦合等离子体质谱分析法 (Laser Ablation/ Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrum, LA / ICP-MS)对金属元素进行分析. 该分析方法已在以前的 工作中详细介绍 (Narita *et al*, 1999; Okuda *et al*, 2004).

3 结果 (Results)

3.1 颗粒物污染过程的天气成因

北京大气颗粒物污染过程呈现出明显的周期 性,典型周期为 4~10d,平均周期为 5~7d,这种周 期性本质上由周期性的天气系统 (Synop tic system s) 所决定.

各类天气系统是在一定的大气环流和地理条 件中形成、发展和演变.北京地处中纬度,极地大陆 气团与热带海洋气团在此交绥,并形成对流层锋或 近地面锋. 侵袭北京的锋面以冷锋为主, 暖锋较少. 大气颗粒物浓度在污染过程结束时迅速下降就是 由冷锋过境所导致, 冷锋之后的大风降温天气带来 北方相对清洁、流动性较强的干冷空气, 将北京市 的污染物在几个小时内彻底清除. 继来自西北或北 方的干冷空气之后, 接下来的几天西北气流的影响 逐渐减弱, 进而转为南方以及东南方向, 下一污染 过程开始形成. 通常通过以下几种方式来标识冷锋 过境:地面或高空天气形势图 (气压场、风场等); 局 地气象因子在短时间内的迅速改变, 如短时间内地 表风速迅速升高, 温度、相对湿度和露点等参数的 突变.

以 2005年秋季的一次典型的颗粒物污染过程 (2005/10/27至 2005/11/08)为例,如图 1 (a)所示. 该污染过程历时接近 10d,如此长时间的颗粒物污 染过程在北京是不多见的. M_2 ₅与 PM_{10} 同样呈现较 好的同步性,且 PM_2 ₅在 PM_{10} 中的比例高达 78 9%. 在这 个过程中, PM_2 ₅石 PM_{10} 的平均浓度达到 193. 2µg·m⁻³和 220. 0µg·m⁻³. 按照污染过程的演 进方式,可以将颗粒物浓度的升高过程划分为三个 阶段:日变化为主的低浓度期、准线性增长期和波 动期.图 1 (a)中的 L II和 III所示. 这 3个阶段分别 持续了 2 5d, 4 5d和 1. 8d; PM_2 ₅ / PM_{10} 的平均值分 别为 67. 2%、80. 7%和 87. 7%, PM_2 ₅在 PM_{10} 中的比 例随着污染过程的演进不断升高. 最后在 3h, PM_2 ₅ 和 PM_{10} 从瞬时质量浓度的最大值降到初始水平 10 µg·m⁻³左右.

颗粒物浓度 $(\mathbf{PM}_{2,5}$ 和 \mathbf{PM}_{10})在 11月 5日 17:00 开始下降,到晚上 20:00时, $\mathbf{PM}_{2,5}$ 的质量浓度已不 能被 TEOM 所检测, \mathbf{PM}_{10} 的质量浓度也从 705.9 $\mu g \cdot m^{-3}$ 降为 90.0 $\mu g \cdot m^{-3}$. \mathbf{PM}_{10} 下降速度慢于 $\mathbf{PM}_{2,5}$,这可能是由于来自西北的冷空气携带的一定 量沙尘所致.

颗粒物浓度下降对应着冷锋过境,这可以从图 1(b)和图 1(c)(WSI,2005)清晰地看出来.11月 5 日 17:00(图 1(b)),地表天气形势显示,冷锋到达 北京,颗粒物浓度开始下降;3h以后(20:00),冷锋 经过北京继续向东南移动(图 1(c)),北京完全处 于锋面之后的北方干冷空气中;冷锋过境意味着气 团转换,与之伴随的强烈的垂直运动(Vertical motions)和风切变(Wind shear)污染物被彻底清除. 所谓冷锋是指锋面在移动过程中,冷气团起主导作 用,推动锋面向暖气团一侧移动,这种锋面称为冷 锋. 冷锋在中国一年四季都存在, 尤其在冬半年更 为常见.

在冷锋到达北京之前的一小段时间内,颗粒物 浓度在下降之前出现一个陡峭(短时间内出现,同 时持续时间也较短)的峰值,这可能由两个原因导 致: 锋区内温度垂直梯度特别小,常出现锋面逆 温 (等温或气温直减率很小),导致扩散条件突然恶 化: 锋面附近的风和等压线常成一交角而吹向低 压,因此地面锋线通常是气流的辐合线,区域污染 物的汇聚使得北京的颗粒物浓度短时间迅速升高. 但是很快被冷锋之后的大风天气清除.本研究以 12h内露点温度的急剧降低为冷锋过境的标志,发 现 2006年秋季、2006~2007年冬季和 2007年春季 几乎所有的颗粒物污染过程中,颗粒物浓度的快速 下降阶段都对应着露点温度的急剧下降(因篇幅所 限将图略去). Sanchez-Ccoylb (2002)对 1994年夏 季巴西 MASP的空气污染研究表明,冷锋(反气旋) 的相对位置、性质和类型,会影响空气的流动性、湿 沉降和相对湿度,从而改变空气质量.

大尺度的气压系统相互作用与天气过程相联 系,具有过程和周期性的特点. Song等 (2006)的研 究发现,冬季来自西北或者北方的冷空气侵袭北京 的周期为 4d,期间伴随较高的风速;Li等 (2007)基 于在北京东南 70km的香河为期一个月(2005年 3 月)的观测发现,观测期间为期 4至 5d的天气波动 (Synoptic fluctuation),以冷锋过境为明显标志,驱动 观测期内污染过程的形成. Choi等(2008)根据 2001 ~2005年夏季中国 31城市 PM₁₀数据(API)的谱密 度与降雨、1000hpa风速分布、海平面气压及云粒子 物理参数的谱密度之间的相关关系,推断边界层内 PM₁₀与云形成在为期一周的时间尺度上具有直接因 果关系;而 Gong等(2007)则将 2001~2005/2006年 夏季中国 29城市 PM₁₀数据(API)以周一至周日为 基本周期逐日取平均,进而得出 PM₁₀的周变化是由 气象条件和人类活动的周变化共同决定的.

与局地气象所导致的局地环流 (<200 km)相 对应,天气尺度 (200 ~ 2000 km)所引起的天气变 化、高压与低压的交替,自然会引起大范围的污染 物的输送,从而形成重污染天气 (李爱贞, 2001;苏 福庆, 2004). 另外, Nilsson等 (2001)的研究表明大 陆边界层中超细颗粒物的核化 (Nucleation)和增长 (Growth)与中尺度及天气尺度的天气形势有着密切 关系.也就是说,北京颗粒物污染过程的形成由天 气系统导致,而稳定的天气系统可以覆盖较大的区 域,它所驱动的空气运动必然造成区域性的大气颗 粒物污染.



图 1 颗粒物污染过程与地面天气形势((a)颗粒物污染过程中的 PM_{2.5}和 PM₁₀; (b)和 (c)为地面天气形势(图审字 [2008]第 1005号)) Fig 1 PM pollution episode vs surface weather patterns((a) PM_{2.5} and PM₁₀ in the episode; (b) and (c) Weather patterns on 5th November 2005)

总的来说,北京大气颗粒物污染过程的周期性 是由天气系统的周期性决定的:颗粒物浓度的突降 与冷锋过境相符合;中纬度地区(如华北地区)以冷 锋过境为明显标志的天气形势的变化具有明显的 周期性,并与颗粒物污染过程的周期相符合.天气 系统的活动尺度决定了北京市大气颗粒物污染过 程的区域性本质.

3.2 细颗粒物的富集

3. 1中对颗粒物污染过程三阶段的分析可以初 步发现, $M_{2.5}$ / M_{10} 平均值随着颗粒物污染过程的 演进 (颗粒物浓度的升高)不断升高. 本小节将围绕 颗粒物污染过程中细颗粒物的富集深入展开讨论: 细颗粒物在 PM_{10} 和 TSP中呈现过程性的富集,意味 着颗粒物的老化 (Aged),而老化颗粒物的来源是区 域性的.

细颗粒物的富集可以通过两种方式来表征:物理(**PM**_{2.5}/**PM**₁₀)方式和化学方式(Pb/Al).

图 2显示了 PM_2 ,和 PM_{10} 连续 3个污染过程中 PM_2 ,瞬时质量浓度、 PM_{10} 瞬时质量浓度、以及 PM_2 , PM_{10} 的变化特征.对于图 2中每一个颗粒物 污染过程,随着 PM_2 ,和 PM_{10} 的同步演进, PM_2 , PM_{10} 的可步演进, PM_2 , PM_{10} 不断升高,颗粒物瞬时质量浓度的变化幅度超过两 个数量级, PM_2 , PM_{10} 的变化幅度则接近一个数量 级;颗粒物质量浓度过了某一数值 (100µg·m⁻³左 右)以后, PM_2 , PM_{10} 保持稳定,维持在 70%左右; 颗粒物瞬时浓度剧烈下降时, PM_2 , PM_{10} 也同步迅 速下降.也就是说,污染过程中 PM_2 , PM_{10} 与颗粒物 浓度累积呈现出良好的同步关系.随着颗粒物污染



图 2 颗粒物污染过程中的 PM 2 5 / PM 10 (2003 / 12 / 07 ~ 2003 / 12 / 15)

Fig 2 Variation of $PM_{2.5}/PM_{10}$ during PM pollution episodes from 7th to 15th December, 2003

(注:DOY代表 "Day of Year";DOY为 N,代表该年的第 N天; 下同) 过程的演进, \mathbf{M}_{2} , 在 \mathbf{PM}_{10} 中的比例持续升高, 呈现 明显的富集特征.

接下来研究将通过无机元素的变化特征来表 征颗粒物污染过程中 PM_2 ,在 TSP中的富集特征. 无机元素 Pb是典型的人为排放的污染元素,而 A1 则是典型的地壳元素.关于北京地区的研究表明, 大多数元素呈现双峰分布,Ca,Ti和 A1等地壳元素 主要富集在粗颗粒物中;Zn,Cu和 Pb等人为源元素 主要赋存于细粒子模态(<2m)之中,其中 90%的 Pb在细粒子模态中(Winchester,1984).理论上可以 粗略地使用 Pb/(A1+Pb)来间接反映 PM_2 ,在 TSP 的所占的比例,由于 Pb/(A1+Pb)是 Pb/A1的函数, 因此本研究采用简化的 Pb/A1来反映颗粒物污染过 程中 PM_2 ,TSP的变化情况.

图 3为北京市清华采样点 2001年 3月至 2006 年 3月 TSP中 Pb/A1与 Pb的散点图,采样期内 Pb 和 A l的平均浓度分别为 571. 8 ng·m⁻³和 3967.0 ng·m⁻³, Pb/Al平均为 0. 16. 总体上 Pb/Al随着 Pb 的升高而升高, Pb的浓度升高一个数量级, Pb/A1 升高 4倍左右; Pb的趋势可以代表颗粒物质量浓度 的演变趋势,也就是说,随着颗粒物浓度升高, PM25 在 TSP中的比例不断增长. 由于图 3是基于五年观 测数据的统计规律,所以上述规律可能是由于季节 差异或者年际差异所导致.因此,需要进一步探索 PM25在 TSP中的富集是否具有过程性.图 4则显示 了颗粒物污染过程中 Pb/A1与 Pb的相对变化趋势. 可以看出, Pb/A1与 Pb依然呈现出良好的同步性, Pb/A1的变化幅度可达 15倍以上.这进一步表明, PM25在 TSP中的富集具有过程性. 也就是说,随着 大气颗粒物污染过程的演进,细颗粒物在 PM_和



图 3 TSP中 Pb/Al与 Pb的散点图 (2001年 3月 ~ 2006年 3 月)





- 图 4 颗粒物污染过程中的 Pb/Al与 Pb (2003/11/26 ~ 2003/12/16)
- Fig 4 Variation of Pb/A1 and Pb during PM pollution episodes from 26th Nov. to 16th Dec. in 2003

细颗粒物的富集意味着颗粒物的老化,也就是 说携带污染物到达北京的气团是老化的,从而推断 出北京的颗粒物的成因是区域性的.

首先,颗粒物质量浓度和化学组分 (如 Pb)在每 一污染过程中具有较大的变化幅度,这主要受周期 性天气形势演变的影响;而 TSP中化学元素的比值 Pb/A1,则反应了颗粒物的化学组成,通过比值可以 消除气象上的共变,从而反映颗粒物来源的差异. 无论是 5年的统计规律还是特定污染过程中,Pb/A1 变化幅度都超过一个数量级(图 3 和图 4), PM₂₅/PM₁₀的变化幅度接近一个数量级,这充分反 应了北京市大气颗粒物化学组成的高度可变性.北 京的颗粒物排放短时间内不会出现剧烈无规则变 化,因此 Pb/A1与 PM₂₅/PM₁₀比值(或化学组成)明 显的过程性差异有力的证明了北京市颗粒物来源 的可变性、多样性和区域性.

其次,细颗粒物的富集对应着粗颗粒物的去除 和超细颗粒物的生成 (这里主要指核化过程). 空气 动力学直径在 0.1~10 µm的颗粒物主要靠降水冲 刷和重力沉降作用清除,直径大于 10 µm的颗粒物 主要靠重力沉降机制去除,直径在 1 µm左右的粒 子寿命最长 (王明星,1999). 几个纳米的粒子通过 H_2 SO₄、NH₃和 H_2 O等参与核化 (Nucleation)生成 ~ 100nm的超细颗粒物需要 1~2d的时间,核化的过 程可在气团 (1000 km以上)范围内发生 (Kumala *et al*,2004; Nilsson *et al*,2001);在稳定的天气条 件下 (如高压系统控制、云量少、太阳辐射强等),核 化过程在水平方向是均一的,超细颗粒物在整个边 界层是混合均匀的 (Wehner *et al*,2007). 也就是 说,细颗粒物的富集是通过超细颗粒物的生成和之 后的凝并以及粗颗粒物的沉降来完成的,这一过程 使得污染过程中的颗粒物成为老化颗粒物,在大气 中滞留时间较长的老化颗粒物是区域性的.

最后,二次颗粒物(硫酸盐、铵盐、二次有机气 溶胶以及部分硝酸盐)主要富集在细颗粒物中.而 上述提到的物种以及有机低聚物等二次颗粒物正 是颗粒物老化本质的重要指示物质 (Denkenberger et al, 2007). SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 主要存在于细颗粒物模 态,而 NO, 在粗、细颗粒物模态中均有存在 (Yao et al, 2003), 细颗粒物中的 NO3 通过 HNO3、NH3 直接吸附在 SO_4^2 上形成,而粗颗粒物中的 NO_3 则 通过气态 HNO₃ 与矿物颗粒 (如 CaCO₃)或海盐颗粒 物的反应生成;徐宏辉 (2007)对北京颗粒物离子尺 寸分布特征研究表明, SO_4^2 、 NH_4^+ 和 NO₃ 的浓度在 0.43~1.1 µm 出现峰值.因此,细颗粒物的富集代 表二次污染物的富集 ,二次污染物的气 粒转化过程 (包括物理过程和化学过程)及之后增长、凝并是颗 粒物老化的重要体现,也是污染过程中颗粒物区域 性来源的有力证据.

4 结论 (Conclusions)

北京大气颗粒物污染过程的形成是由覆盖较 大区域的天气系统所导致,颗粒物浓度的突降由冷 锋过境所导致,天气系统的活动尺度决定了北京市 大气颗粒物污染的区域性本质;颗粒物污染过程 中,随着 PM2,5与 PM10质量浓度的同步升高,细颗粒 物 PM2,5在 PM10、TSP中均呈现出富集趋势,这本质 上对应粗颗粒物去除、超细颗粒物生成以及二次颗 粒物富集等颗粒物的老化过程,是北京大气颗粒物 污染区域性本质的重要证据.

致谢:感谢美国罗得岛大学的 Kenneth Rahn教授的指点与帮助.

责任作者简介:贺克斌 (1962—),工学博士,教育部长江学 者奖励计划特聘教授,国家杰出青年科学基金获得者.主要 从事城市与区域大气污染与控制研究;近 5年来主持和承担 "863"、"973"、自然科学基金、北京市政府专项及国际合作 等课题 10余项.近年来发表学术论文 130多篇,有 40余篇 被 SCI收录;获得省部级科技奖励 6项. Email: hekb@ tsinghua edu cn

参考文献 (References):

Chameides W L, Yu H, Liu S C, et al 1999. Case study of the effects

of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls? [J] // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 96 (24): 13626-13633

- 北京市环保局. 2007. 2006年北京市环境状况公报 [OL]. 2008-3-16. http://www.zhb.gov.cn/quality/air php3
- Beijing Municipal Environmental Protection Bureau 2007. Beijing Environmental Statement [OL]. 2008-3-16. http://www.zhb. gov. cn/quality/air php3 (in Chinese)
- Charlson R J, Schwartz S E, Hales J M, et al 1992. Climate forcing by anthropogenic aerosols [J]. Science, 255 (5043): 423-430
- Choi Y S, Ho C H, Chen D, et al 2008. Spectral analysis of weekly variation in PM10 mass concentration and meteorological conditions over China [J]. Atmospheric Environment, 42: 655-666
- Chuang C C, Penner J E, Taylor K E, et al 1997. An assessment of the radiative effects of anthropogenic sulfate [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 102 (D3): 3761-3778
- Denkenberger KA, Moffet R C, Holecek J C, et al 2007. Real-time, single-particle measurements of oligomers in aged ambient aerosol particles [J]. Environmental Science & Technology, 41 (15): 5439-5446
- Eldering A, Cass G R. 1996. Source-oriented model for air pollutant effects on visibility [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 101 (D14): 19343-19369
- Garcia-Neto P J. 2002. Study of visibility degradation due to coagulation, condensation, and gravitational settling of the atmospheric aerosol [J]. Aerosol Science and Technology, 36(7): 814-827
- Gong D Y, Ho C H, Chen D L, et al 2007. Weekly cycle of aerosolmeteorology interaction over China [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 112: D22202
- He K, Yang F, Ma Y, et al 2001. The characteristics of PM2 5 in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 35 (29): 4959-4970
- Huang Y, Chameides W L, Dickinson R E 2007. Direct and indirect effects of anthropogenic aerosols on regional precipitation over east Asia [J]. Journal of Geophysical Research-Atmosphere, 112 (D3): D03212
- Kuhnala M, Vehkamaki H, Petaja T, et al 2004. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations [J]. Journal of Aerosol Science, 35(2): 143-176
- 李爱贞, 刘厚凤. 2001. 气象学与气候学基础 [M]. 北京: 气象出版 社,161-171
- Li A Z, Liu H F. 2001. Principles of Meteorology and Climatology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 161-171 (in Chinese)
- LiC, Marufu L T, Dickerson R R, et al 2007. In situ measurements of trace gases and aerosol optical properties at a rural site in northem China during East Asian study of tropospheric Aerosols: An international regional experiment 2005 [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 112 (D22): D22S04
- Narita Y, Tanaka S, Santosa S J. 1999. A study on the concentration, distribution, and behavior of metals in atmospheric particulate matter over the North Pacific Ocean by using inductively coupled plasma mass spectrometry equipped with laser ablation [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 104 (D21): 26859-26866 Nilsson ED, Paatero J, Boy M. 2001. Effects of air masses and synoptic

weather on aerosol formation in the continental boundary layer [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 53 (4): 462-478

- Okuda T, Kato J, Mori J, et al 2004. Daily concentrations of trace metals in aerosols in Beijing, China, determined by using inductively coupled plasma mass spectrometry equipped with laser ablation analysis, and source identification of aerosols [J]. Science of the Total Environment, 33(1-3): 145-158
- Ravindra K, Mittal A K, Grieken R V. 2001. Health risk assessment of urban suspended particulate matter with special reference to polycyclic aromatic hydrocarbons: A review [J]. Reviews on Environmental Health, 16 (3): 169-189
- Sanchez-Ccoylb O R, Andrade M D. 2002. The influence of meteorological conditions on the behavior of pollutants concentrations in Sao Paulo, Brazil [J]. Environmental Pollution, 116(2): 257-263
- Song Y, Zhang M N, Cai X H. 2006. PM₁₀ modeling of Beijing in the winter [J]. Atmospheric Environment, 40: 4126-4136
- 苏福庆,任阵海,高庆先,等. 2004. 北京及华北平原边界层大气中 污染物的汇聚系统——边界层输送汇 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 21-25
- Su F Q, Ren Z H, Gao Q X, et al 2004. Convergence system of air contamination in boundary layer above Beijing and North China: transportation convergence in boundary layer [J]. Research of Environmental Sciences, 17(1): 21-25 (in Chinese)
- 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]. H030630210590. 北京:北京市环境保护局, 14-22
- Tsinghua University. 2006. Study on controlling strategy and measures of PM₁₀ and O₃ in Beijing [R]. H030630210590. Beijing: Beijing Municipal Environmental Protection Bureau, 14-22 (in Chinese)
- 王明星. 1999. 大气化学 [M]. 北京: 气象出版, 180-183
- Wang M X. 1999. Atmospheric Chemistry [M]. Beijing: China Meteorological Press, 180-183 (in Chinese)
- Watson J G, Zhu T, Chow J C, et al 2002. Receptor modeling application framework for particle source apportionment [J]. Chemosphere, 49: 1093-1136
- Wehner B, Siebert H, Stratmann F, et al 2007. Horizontal homogeneity and vertical extent of new particle formation events [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 59(3): 362-371
- Winchester J W, B i M. 1984. Fine and coarse aerosol composition in an urban setting: a case study in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 1399-1409
- WSI Cooperation 2005. Current Surface Analysis [OL]. 2005-11-8. http://www. intellicast com/Global/Surface aspx? location = CHXX0008.
- 徐宏辉. 2007. 北京及周边地区大气气溶胶的质量浓度和无机组分 的特征及其来源研究 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究 所. 67—69
- Xu H H. 2007. Study on the Characteristics of Mass concentration and inorganic components and the Sources of Aerosol in Beijing and its Surrounding Area [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 67-69 (in Chinese)
- Yao X, Lau A P S, Fang M, et al 2003. Size distributions and formation of ionic species in atmospheric particulate pollutants in Beijing, China: 1-inorganic ions [J]. Atmospheric Environment, 37(21): 2991-3000

487