吉东生,王跃思,孙扬,等. 2009. 北京大气中 SO₂ 浓度变化特征 [J]. 气候与环境研究,14(1):69-76. Ji Dongsheng, Wang Yuesi, Sun Yang, et al. Characteristics of atmospheric SO₂ in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14(1):69-76.

北京大气中 SO2浓度变化特征

吉东生 王跃思 孙 扬 马志强

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

摘 要 作为酸雨和细粒子的前体物, SO_2 对空气质量和人体健康乃至气候与环境的影响十分重要,特别是在不利于扩散的气象条件下, SO_2 可造成城市短时间严重污染事件。作者以 2006 年北京 325 m 气象塔 15 m 观测平台 SO_2 观测数据为基础,结合同步气象资料分析研究发现:1) SO_2 浓度冬季高、夏季低;全年日均值为 $(22.5\pm22.1)\times10^{-9}$,最大日均值能达到 113×10^{-9} 。日变化呈现双峰型,峰值出现在北京时间 08:00 和 22:00;并且季节差异明显,冬季浓度为夏季的 4.5 倍,采暖期为非采暖期的 3.2 倍。2) 风向、风速与 SO_2 扩散和输送密切相关,高浓度 SO_2 在东北、东、西方向上出现频率分别为 25.8%、13.8%和 11.8%;而西北、北方向上的风速越大对 SO_2 清除效果越好。3) 利用平均晴空指数划分采暖期阴霾天和晴天,发现阴霾天混合层高度与平均风速仅为 (376 ± 204) m 和 1.1 m · s $^{-1}$,容易造成 SO_2 累积。4) SO_2 污染过程呈现周期性的局地累积一清除特征,地形、静风和暖低压是造成北京 2006 年 1 月一次重污染事件的成因。

关键词 SO₂ 风速 风向 阴霾天

文章编号 1006-9585 (2009) 01-0069-08 中图分类号 P402 文献标识码 A

Characteristics of Atmospheric SO₂ in Beijing

JI Dongsheng, WANG Yuesi, SUN Yang, and MA Zhiqiang

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract As the precursor of acid rain and fine particle, SO_2 not only affects air quality and human health, but also does climate and living environment. Especially in poorly diffusive meteorological conditions, there were the short-term serious pollution events of SO_2 . The concentrations of SO_2 and meteorological factors were observed and analyzed continuously from 1 January to 31 December 2006 in the 15-m platform of Beijing 325-m meteorological tower. The results showed that the high SO_2 concentrations existed in winter, conversely in summer. The average daily SO_2 concentration was $(22.5\pm22.1)\times10^{-9}$, but the maximum could reach 113×10^{-9} . The diurnal variations showed a very clear cycle with two peaks, which were 0800 LST and 2200 LST. The ratios of the SO_2 concentrations were 4.5 between winter and summer, and 3.2 between heating period and non-heating period. The dispersion of SO_2 had close relationship with wind speeds and wind directions. The frequencies of the high SO_2 concentrations were 25.8%, 13.8% and 11.8% in the northeast, east and west. But the wind in the north and the northwest took away SO_2 more clearly, when the wind speeds were higher. According to clearness index to judge haze day and clear

收稿日期 2008-01-16 收到, 2008-09-21 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划 2007CB407303、国家自然科学杰出青年基金项目 40525016 和国家高技术研究发展计划 2006AA06A301

作者简介 吉东生,男,1978年出生,博士研究生,主要从事大气环境、大气化学方面的研究。E-mail: jds@dq. cern. ac. cn

通讯作者 王跃思, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

day, it showed that the height of the mixed layer and wind speed were 376 ± 204 m and 1.1 m • s⁻¹, respectively. The mentioned meteorological conditions leaded to the accumulations of SO_2 easily. There was the periodical local accumulation-removal character in the polluted processes. Geography, static wind, quasi-static wind, warm low pressure and the advection-diffusion factor play crucial roles in the serious pollution event from January 18 to January 20 2006.

Key words SO₂, wind speed, wind direction, haze day

1 引言

SO₂是大气对流层中重要的污染物之一(王明 星, 1999)。高浓度的 SO₂会导致空气质量恶化, 并且通过气粒转化过程形成气溶胶,降低大气能 见度。当前 SO₂ 在大气中氧化形成的硫酸盐气溶 胶,是城市大气细粒子的重要组成部分(戴树桂, 1996)。同时 SO₂ 也会导致酸雨,降低农作物产 量、破坏生态系统以及水环境(Wang et al., 2008; Islas et al., 2008)。SO2主要来源是化石燃 料(煤、石油和天然气)的燃烧,研究结果表明 煤燃烧产生的 SO2要远高于其他燃料(北京市环 保局,2006)。近年来随着经济的快速发展,北京 对化石燃料的需求与日俱增,由 SO2引发的一系 列污染事件已得到充分的重视, 并且对空气中 SO₂的控制已取得一定的成效,如图 1 所示(北京 市环保局, 2006)。但 2006 年全年仍有 10 d 首要 污染物为SO2;SO2空气污染指数(API)在3级 (轻微污染)以及3级以上天数为25d。因此对北 京大气中SO₂监测与控制仍然是一个重要的课题, 但当前对 SO。研究主要集中在 SO。源汇方面(王 金南等, 2004; 刘红年等, 2001; 刘炳江等, 1998; 郝吉明等, 1996), 而对 SO₂和气象因素相互关系 的探讨相对较少,并且对此方面的研究主要集中

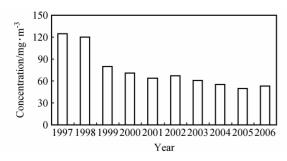


图 1 1997~2006 年 SO2浓度变化趋势

Fig. 1 Trend of the SO₂ concentrations from 1997 to 2006

在对污染事件或特定时段 SO_2 变化规律的探讨 (孙扬等,2006; Meng et al.,2007; 蔡旭晖等,2004; 张睿等,2004)。但随着奥运会的临近,北京的能源结构及大气环境均发生较大的变化(北京市发展与改革委员会,2005),以前的研究结果可能与现状不符,或是研究时间序列较短。本文通过对2006 年北京空气中 SO_2 的连续观测,讨论了 SO_2 时间分布特征及风速、风向对 SO_2 的影响,重点分析了采暖期温度露点差、能见度、阴霾天与 SO_2 的相互关系,以及 SO_2 重污染事件的成因,为 SO_2 控制策略提供理论基础。

2 观测实验

北京观测地点在中国科学院大气物理研究所铁塔分部内(39°9′N,116°4′E),位于北京市北三环路与北四环路之间,距三环路约1 km,东面200 m处为南北走向的八达岭高速公路,北边50 m处为东西走向的北土城西路,采样点设在大气化学实验楼楼顶(相对地面高度15 m)。2006年1月1日~12月31日对SO₂浓度进行了连续观测。

SO₂分析仪为美国 TE-43C 型分析仪。仪器的标定系统由 111 型零空气发生器(TEI 111)和 146 型多点校准仪(TEI, 146C)组成。标准气体由国家标准物质中心提供。原始数据记录为 1 min 平均值,文中使用数据为质控后 1 h 平均值。气象资料采用北京 325 m 气象塔自动气象站资料,该自动站为芬兰 Vaisala 公司生产的 Milos-520型,可对大气压、温度、湿度、露点、风速和风向进行观测;气象设备的架设以及数据质量控制均符合世界气象组织(WMO)指导规范。

3 结果与讨论

3.1 SO₂浓度与 API 指数转化浓度关系

如图 2 所示, 2006 年全年观测的 SO₂ 目平均

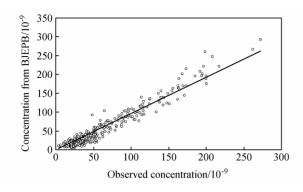


图 2 2006 年北京市环境保护局公布的 SO₂浓度与铁塔测点 SO₂浓度的相关性

Fig. 2 Relation of the SO₂ concentrations from Beijing Municipal Environmental Protection Bureau and the tower

值与由北京市环保局(BJEPB)公布的 SO_2 API 指数转化浓度值(北京市环境保护局,2006)具有一致的变化趋势,相关系数 R=0.97 (P<0.0001, 359 个样本)。BJEPB 公布的数据为多个观测点的平均值,代表了北京市的整体情况。实验数据与 BJEPB 的观测数据有明显的相关性,反映了该测点观测结果的变化趋势与北京整体的变化趋势具有较好的一致性。

3.2 SO2时间分布特征

3.2.1 SO₂季变化特征

如图 3 所示, SO₂年季变化呈现两头高中间低 的"U"字型分布,即全年中冬季月份(12月与次 年1月左右) SO₂浓度高,而夏季月份(7、8月 前后) SO₂浓度低,全年 SO₂平均值为(22.5± 22.1)×10⁻⁹。尽管全市对采暖小煤炉及8个城区 20 t 以下燃煤供暖锅炉进行了阶段性改造(北京 奥组委, 2008), 但采暖期 (11月15日~次年3 月15日)SO₂浓度依然很高,最大日均值达到 113×10⁻⁹,约为国家二级标准值(SO₂日平均值 56×10⁻⁹)的2倍,并且也远远超出国家三级标 准值(93×10⁻⁹)。而在非采暖期,由于没有用煤 采暖,并且当前市区居民普遍使用天然气、电等 清洁能源,因此除了附近地区工业点源的输送, 只有机动车尾气等是 SO2 主要的源,而当前机动 车用油均进行过脱硫处理(罗国华等,2002),所 以在非采暖期 SO₂浓度相对较低。此外,采暖期 大气扩散能力差和大气光化学反应速率降低(温

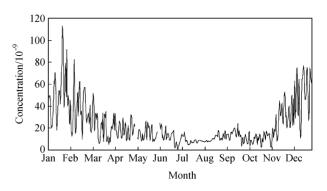


图 3 SO₂浓度月变化

Fig. 3 Monthly variations of the SO₂ concentrations

天雪等,2007)也进一步促成了采暖期与非采暖期大气中 SO_2 浓度的显著不同,并且北京地区逆温出现频率与 SO_2 年季变化趋势相似:7月最低,依次向两端月份增加(夏恒霞,2004)。根据 SO_2 监测结果发现: SO_2 在采暖期浓度为非采暖期的 3.2 倍,与《1996~2000 年北京市环境质量报告书》[©]中的监测结果:采暖期(1、2、3、11、12月) SO_2 浓度为非采暖期的 $3\sim5$ 倍(段欲晓等,2001)相一致,表明采暖期污染源排放增加的效果与前几年相似。综上所述,当前北京空气中 SO_2 在非采暖期已得到控制,但仍然高出世界卫生组织(WHO)(世界卫生组织,2005) SO_2 日平均准则值 7.5×10^{-9} ,而在采暖期 SO_2 污染依然严重,应根据天气状况采取相应的应急减排措施。

3.2.2 SO2日变化特征

如图 4a 所示, SO_2 存在明显日变化形式,其浓度从 5 时(北京时间,下同)以后逐渐上升,8时左右出现第一次高峰。随后又逐渐降低,直到 17 时以后又开始上升,到 22 时达到第二次高峰。并且冬春季节的日变化幅度高于夏秋季节,其中夏季 SO_2 日变化幅度最小。春、夏、秋、冬季平均日较差分别为(22.0 ± 16.4)× 10^{-9} 、(8.7 ± 8.1)× 10^{-9} 、(19.9 ± 10.8)× 10^{-9} 、(56.2 ± 19.0)× 10^{-9} 。冬季 SO_2 平均浓度为夏季的 4.5倍,分别为(45.5 ± 26.8)× 10^{-9} 与(10.1 ± 5.3)× 10^{-9} 。 SO_2 双峰型日变化形式的成因,为交通早晚高峰以及由 24 h中边界层结构变化引起的大气扩散能力的差异,一般在 $10\sim16$ 时大气湍流旺盛,水平输送和垂直扩散能力强,大气处于不稳

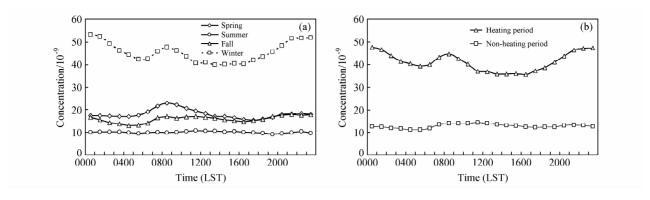


图 4 北京 SO₂ 日变化

Fig. 4 Diurnal variation of mean values of the SO₂ concentrations

定状态,这时扩散条件非常有利于 SO_2 稀释、输送;而 10 时前与 17 时后大气相对稳定,扩散能力较弱,不利于 SO_2 扩散。而季节差异是由于排放源、大气扩散能力以及大气光化学反应的差异造成的。

与非采暖期相比,采暖期日变化幅度更大(图 4b),SO₂平均浓度为非采暖期的 3.2 倍,日较差分别为 (51.1 ± 21.8) × 10⁻⁹ 和 (14.0 ± 10.6)×10⁻⁹。在采暖期,由于午后气温高,SO₂源排放也相对降低,在气象条件的综合作用下SO₂日变化曲线于 16 时前后达到最低值;16 时以后大气扩散能力减弱,加之取暖源排放开始增大以及进入交通晚高峰时段,在 22 时左右达到峰值;随后,源的排放量逐渐减少,于次日 4 时左右达到谷值;5 时以后由于城市活动已经开始(取暖,交通早高峰),而大气扩散条件还未发展充分或存在逆温,导致了 SO₂积累,于 8 时左右达到另一个峰值。而非采暖期 SO₂浓度很低且日

变化不明显,尽管气象条件有明显日变化,但是 SO₂源的排放量相对较小,一天中基本维持在较稳 定的低浓度,最终造成非采暖期大气中的 SO₂浓度没有显著的日变化。

3.3 SO₂与风速、风向的关系

如图 5 所示,结合风向与 SO_2 浓度发现:高浓度 SO_2 在东北、东和西方向出现频率较高,分别为 25.8%、13.8%和 11.8%。这是因为化石燃料燃烧是大气中 SO_2 主要的来源,而对北京地区 SO_2 污染有重要影响的主要工业污染源分布在东北、东和西方向。颜鹏等(2002)研究结果显示:周边地区对北京 SO_2 贡献率很高,其中 9 和 10 月的贡献率甚至达到了 46% (天津、唐山和山西地区分别占区域贡献量的 3%、1.5%和 36%)。这说明风向与 SO_2 的关系主要表现为对 SO_2 的水平输送,即高浓度 SO_2 常出现在污染源的下风向。风速的大小和大气稀释能力的大小存在着直接的对应关系,2006 年西北方向上风速最大,平均风

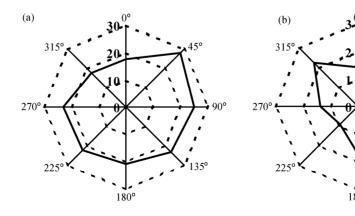


图 5 (a) SO_2 浓度 (单位: 10^{-9}) 和 (b) 风速 (单位: $m \cdot s^{-1}$) 随风向的变化

Fig. 5 (a) SO_2 concentration (10^{-9}) and (b) wind speed (m • s⁻¹) variations based on wind direction

速为 $2.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,南风次之,平均风速为 $1.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。结合各方向 SO_2 浓度值发现:当风速相近风向为西北时 SO_2 浓度最低,平均浓度为 17.7×10^{-9} ;而尽管风向为北时,风速仅为 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,但 SO_2 平均浓度却同为 17.7×10^{-9} ;风向为南时, SO_2 平均值却为 20.8×10^{-9} 。说明西北风与北风对北京 SO_2 起到明显的清除作用,且风速越大清除效果越好。但不管哪个风向上,小风和静风条件下都会造成 SO_2 累积。因而,风速越小越不利于 SO_2 的输送和扩散,越容易造成严重的 SO_2 次度变化(赵德山等,1983)。

3.4 阴霾天与 SO2浓度变化

利用平均晴空指数 $K_s = R_s/H_0$ 和相对湿度定义雾、霾天气。晴空指数方程与大气层顶的总辐射量 H_0 计算方案(Katsoulis,1991)为

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{\text{sc}} (1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365}) \times$$

$$(\cos\phi\cos\delta\sin W_{\rm s} + \frac{2\pi W_{\rm s}}{360}\sin\phi\sin\delta)$$
,

其中, H_0 为大气层顶的总辐射量(单位: MJ·m⁻²), G_{sc} 为太阳常数 (单位: W·m⁻²), δ 为太阳倾斜 \mathfrak{h} , ϕ 为观测点纬度, W_s 为日落时角, n 为平均 时数 (单位: h), R。为观测的总辐射量 (单位: $MJ \cdot m^{-2}$)。将 $K_s \ge 0.8$ 的天空状况定义为晴天, 而当 K_s≤0.4 则定义为霾天。在霾天中按照相对 湿度进一步分类,当相对湿度大于80%,且没有 降雨时定义为雾天;相对湿度小于80%时定义为 阴霾天气。利用以上方法,获得了采暖期符合阴 霾天标准的日期「计算得到的阴霾天时间与实际 观测的阴霾天时间十分一致(Http://www.wunderground.com)], 共有 20 d。如表 1 所示, 阴霾天 SO₂ API 指数平均值与实测平均日均值分别为 108 ×10⁻⁹与 72×10⁻⁹, 其中有 18 d 超出国家二级标 准 SO₂ 日均值标准,说明阴霾天与高浓度 SO₂之 间存在着十分密切的关系。通过罗氏 II 法:

$$L = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left[\frac{121}{6} (6 - P)_{j} (T - T_{d})_{j} + \frac{0.169 P_{j} (U_{zj} + 0.257)}{12 f \ln(Z/Z_{0})} \right] \times f(i, j),$$

其中,L 为计算的平均混合层高度(单位: m),($T-T_d$) 为温度露点差(单位: $^{\circ}$ C),P 为帕斯奎

表 1 采暖期阴霾天 SO₂ API 指数与浓度 Table 1 API indexes and the SO₂ concentrations in haze days during heating period

阴霾天	API 指数	观测值	阴霾天	API 指数	观测值
1月8日	100	62.8	2月5日	107	82.3
1月9日	103	60.5	2月13日	103	62.1
1月10日	115	69.9	12月11日	109	74.5
1月15日	100	54.1	12月18日	100	64.4
1月16日	102	53.8	12月19日	108	64.9
1月19日	111	84.4	12月20日	117	76.9
1月20日	118	113.0	12月21日	110	67.9
1月21日	122	93.1	12月26日	104	62.3
1月24日	108	79.0	12月30日	107	66.5
1月26日	106	91.7	12月31日	102	61.5

尔稳定度级别的取值, U_z 为 Z 高度处所观测的平均风速(单位: $m \cdot s^{-1}$), Z_0 为地面的粗糙度,f(i,j)为各种风速段不同大气稳定度条件下出现的频率(%)。求出阴霾天白天的混合层高度的平均值为 376 ± 204 m,远低于冬季混合层高度的平均值 730 m(程水源等,1997);并且阴霾天平均风速仅为 1.1 $m \cdot s^{-1}$,不利于大气污染物扩散与传输,容易造成 SO_2 积累,相反累积造成的高浓度 SO_2 也会通过气一粒转化过程,产生细粒子,进一步降低大气能见度(王京丽等,2006),加剧大气污染程度。此结果与 Xie et al. (2005) 研究结果相似,均为阴霾天不利于污染物扩散的气象条件导致了 SO_2 累积,但此研究结果的气象条件更不利于污染物的扩散,混合层高度与风速均小于 Xie et al. (2005) 的观测结果。

3.5 典型个例分析

如图 6 所示,2006 年 1 月北京多次发生严重的大气污染事件,SO₂ 共有 8 d 超出国家二级日均值标准 (CEPBII) 56 ×10⁻⁹,2 d 超出国家三级日均值标准 93×10⁻⁹。虽然决定大气污染水平的因素很多,但严重大气污染情况的出现往往与不利气象条件下污染物的局地滞留和累积效应有关。在采暖期影响污染物浓度变化的天气过程,则以近乎周期性的冷空气爆发以及间歇性相对平静的冷空气活动为主,并由此产生了污染物周期性的局地累积—清除变化特征。因此下面主要针对 1 月 11~20 日的污染过程进行分析,尤其是结合气

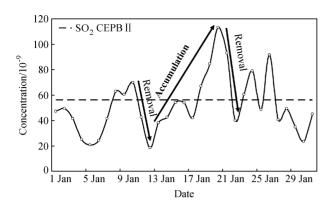


图 6 2006 年 1 月 SO₂污染过程 Fig. 6 Polluted processes of SO₂ in Jan 2006

象要素重点讨论 18~20 日重污染事件的成因。1 月11~12日出现降雪,将积累数天的SO2清除, 12 日日均值降低到 18.4×10⁻⁹; 13 日 SO₂浓度开 始上升; 14~15 日北京受低压控制, 并且风速小 大气稳定,造成SO₂持续累积;而16~17日受冷 空气影响, 地面气压场增强, 48 h 变温达到 - 5 ℃, 地面风速增大, 大气扩散能力增强, SO₂浓度 略有下降; 18~20 日 SO₂浓度迅速上升, 最高值 达到了 113.0 ×10⁻⁹。在 18~20 日 SO₂ 累积过程 中, 日平均增长 23.1 ×10⁻⁹, 平均增长率达到 39.9%。其成因为:自18日开始地面气压场逐渐 减弱,以静风与准静风为主(如图7所示),并且 主导风向为东北、东、东南以及南,4个方向上 风频的总和超过75%,受地形与风向的影响,污 染物会受到大山的阻挡, 无法扩散, 滞留在城区 的上空, 使 SO₂浓度逐渐升高; 且 SO₂在老城区 与南部拥有较多排放源(孙扬等,2006),当风来

自这些方向时,也会将污染物带入城区,导致 SO₂浓度升高。因此,大气扩散能力以及不利于污染物清除的风向是造成污染事件的决定性因素;并且 18~20 日 24 h 变温均为正值,使得地面辐合较强,污染物不但不易扩散,还造成北京周边地区大气污染物向中心聚集,加重北京市区 SO₂污染程度。

4 结论

通过对 2006 年北京大气中 SO_2 时间分布特征 及风速、风向对 SO_2 浓度的影响,阴霾天与 SO_2 的相互关系及 SO_2 重污染事件的成因分析,得出 如下结论:

- (1) 北京 SO₂浓度变化呈现冬季高、夏季低的 "U"字型分布;统计日变化呈双峰型,并且 冬春季日较差高于夏秋季节,采暖期 SO₂污染依然严重,其浓度为非采暖期 3 倍以上。
- (2) 风对 SO₂浓度有较大的影响: 东北、东、西风输送作用明显,造成该风向高浓度 SO₂出现几率较高;全年西北方向风速最大,SO₂浓度最低;而在小风或静风的情况下,不利于 SO₂扩散,容易累积。
- (3) 阴霾天相对较低的混合层高度和风速容易造成 SO₂ 累积。
- (4) 北京 SO₂ 污染过程呈现周期性的局地累积一清除特征; 地形及静风、暖低压等不利于扩散的气象条件是造成 18~20 日 SO₂ 重污染事件的成因。这些结论对研究北京大气中 SO₂浓度的变

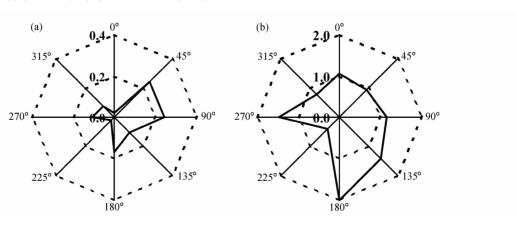


图 7 2006 年 1 月 18~20 日 (a) 风频和 (b) 风速 (单位: $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$)

Fig. 7 (a) Wind frequency and (b) wind speed (m \cdot s⁻¹) from 18 Jan to 20 Jan 2006

化规律及 SO_2 控制策略提供了理论支持,今后将继续开展阴霾天气 SO_2 变化特征、 SO_2 与气溶胶转化关系的研究。

致 谢 感谢北京 325 m 铁塔工作人员在实验中的大力帮助,以及徐宏辉博士、宋涛博士和胡波副研究员在数据讨论方面给予的帮助。

参考文献 (References)

- 北京奥组委. 2008. 北京 10 年治理大气污染面面观 数字最具说 服力 [C/OL]. Http://www.c2008.org.The Bejing Organizing Committee. 2008. Situation of Curbing Air Pollution in Recent 10 Years in Beijing Data are Most Convincing [C/OL] (in Chinese). Http://www.c2008.org.
- 北京市发展与改革委员会. 2005. 北京市国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要 [R/OL] . Http://www. bjpc. gov. cn. Beijing Municipal Development and Reform Commission. 2005. Beijing National Economic and Social Development Program for the 11th Five-Year [R/OL] (in Chinese). Http://www.bjpc.gov.cn.
- 北京市环境保护局. 2006. 1997~2006 年北京市环境状况公报 [EB/OL]. Http://www.bjepb.gov.cn. Beijing Environmental Protection Agency. 2006. 1997—2006 Beijing Environmental Yearbook [EB/OL] (in Chinese). Http://www.bjepb.gov.cn.
- Katsoulis B D. 1991. A comparison of several diffuse solar radiation models for Greece [J]. Theoretical and Applied Climatology, 44 (3-4): 181-186.
- 蔡旭晖, 张睿, 宋宇, 等. 2004. 北京地区大气 PM10 和 SO₂的背景浓度分析 [J]. 气候与环境研究, 9 (3): 445 453. Cai Xuhui, Zhang Rui, Song Yu, et al. 2004 An analysis on background concentration of PM10 and SO₂ over Beijing Area [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (3): 445 453.
- 程水源, 席德立. 1997. 大气混合层高度的确定与计算方法研究 [J]. 中国环境科学, 12 (6): 512 516. Cheng Shuiyuan, Xi Deli. 1997. Study on the determination and calculating method of atmospheric mixing layer height [J]. China Environmental Science (in Chinese), 12 (6): 512 516.
- 戴树桂. 1996. 环境化学 [M]. 北京:高等教育出版社,88-89. Dai Shugui. 1997. Environmental Chemistry [M] (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 88-89.
- 段欲晓, 徐晓峰, 张小玲. 2001. 北京地区 SO₂污染特征及气象条件分析 [J]. 气象科技, 29 (4): 11-14. Duan Xiaoyu, Xu Xiaofeng, Zhang Xiaoling. 2001. Analysis of characteristics of SO₂ pollution and meteorological factors [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 29 (4): 11-14.
- 郝吉明, 贺克斌. 1996. 中国燃煤 SO₂ 污染控制战略 [J]. 中国环境科学, 16 (3): 208-212. Hao Jiming, He Kebin. 1996. Coalburning SO₂ pollution control strategy in China [J]. China Envi-

- ronmental Science (in Chinese), 16 (3): 208 212.
- Islas J, Grande G. 2008. Abatement costs of SO₂-control options in the Mexican electric-power sector [J]. Applied Energy, 85: 80-94.
- 刘炳江, 郝吉明, 贺克斌, 等. 1998. 中国酸雨和 SO₂污染控制区 区划及实施政策研究 [J]. 中国环境科学, 18 (1): 1 7. Liu Bingjiang, Hao Jiming, He Kebin, et al. Study on designation of acid rain and SO₂ pollution control areas and policy implementation [J]. China Environmental Science (in Chinese), 18 (1): 1 7.
- 刘红年,蒋维楣,汤剑平. 2001. 中国对流层 SO₂光化学氧化过程的数值研究 [J]. 环境科学学报,21 (3): 358-363. Liu Hongnian, Jiang Weimei, Tang Jianping. 2001. A numerical study on the troposphere photochemical oxidation process of sulfur dioxide over China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese), 21 (3): 358-363.
- 罗国华,徐新,杨春育. 2002. 车用燃料油精制脱硫的研究与发展 [J]. 现代化工,22 (5):9-12. Luo Guohua, Xu Xin, Yang Chunyu. Research and development in deep desulfurization of motor fuel [J]. Modern Chemical Industry (in Chinese), 2002, 22 (5):9-12.
- Meng Z Y, Ding G A, Xu X B. 2007. Vertical distributions of SO_2 and NO_2 in the lower atmosphere in Beijing urban areas, China [J]. Science of the Total Environment, 390: 456 465.
- 世界卫生组织. 2005. 关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和 SO₂的空气质量准则风险评估概要 2005 年全球更新版 [R/OL]. Http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_chi.pdf.WHO.Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005 [R/OL]. Http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE PHE
 - _OEH_06.02_chi.pdf.
- 孙扬, 王跃思, 刘广仁. 2006. 北京地区—次大气环境持续严重污染过程中 SO₂ 的垂直分布分析 [J]. 环境科学, 26 (3): 408 414. Sun Yang, Wang Yuesi, Liu Guangren. 2006. Analysis for vertical profile of atmospheric SO₂ during air seriously polluted days in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 26 (3): 408 414.
- 王金南,武雪芳,曹东,等. 2004. 中国"十五"期间 SO₂总量控制方案研究 [J]. 环境科学研究, 17 (2): 45 48. Wang Jinnan, Wu Xuefang, Cao Dong, et al. 2004. Proposed Scenarios for Total Emission Control of SO₂ during the Tenth Five-Year Plan Period in China [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (2): 45 48.
- 王京丽, 刘旭林. 2006. 北京市大气细粒子质量浓度与能见度定量 关系初探 [J]. 气象学报, 46 (2): 221 - 228. Wang Jingli, Liu Xulin. 2006. The discuss on relationship between visibility and mass concentration of PM_{2.5} in Beijing [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 46 (2): 221 - 228.
- 王明星. 大气化学 [M] 北京: 气象出版社, 1999. 30-35. Wang

- Mingxing. 1999. Atmospheric Chemistry [M] (in Chinese). Beijing; China Meteorological Press, 30-35.
- Wang Q X, Liu Y, Pan X C. 2008. Atmosphere pollutants and mortality rate of respiratory diseases in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 39: 143-148.
- 温天雪, 王跃思, 徐宏辉. 2007. 采暖期北京大气 PM₁₀ 中硫酸盐与硫氧化率的观测研究 [J]. 中国科学院研究生院报, 5: 584 589. Wen Tianxue, Wang Yuesi, Hu Honghui, et al. 2007. Study on sulfate and sulfur oxidation ratio in PM₁₀ during heating season in Beijing [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 5: 584 589.
- 夏恒霞. 2004. 北京城区逆温气象特征及其对大气污染的影响 [J]. 城市管理与科技, 6 (2): 63-68. Xia Henxia. 2004. The characteristics of temperature inversion of the urban area in Beijing and its influence on the atmosphere pollution [J]. Municipal Administration & Technology (in Chinese), 6 (2): 63-68.
- Xie Shaodong, Yu Tong, Zhang Yuanhang. 2005. Characteristics of PM₁₀, SO₂, NO_x and O₃ in ambient air during the dust storm period in Beijing [J]. Science of the Total Environment, 345:

- 153 164.
- 颜鹏,黄健, Draxler R. 2002. 周边地区对北京地面 SO₂影响的初步研究 [J]. 应用气象学报,13 (s1): 144-152. Yan Peng, Huang Jian, Draxler R. 2002. A preliminary study of effects of surrounding sources on surface SO₂ In Beijing [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 13 (s1): 144-152.
- 赵德山, 洪钟祥. 1983. 北京地区气溶胶及化学元素浓度和气象条件的关系 [J]. 大气科学, 7 (2): 153 161. Zhao Deshan, Hong Zhongxiang. 1983. Relationship between elemental concentration of aerosol and meteorological conditions in Beijing [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 7 (2): 153 161.
- 张睿, 蔡旭晖, 宋宇. 2004. 北京地区大气污染物时空分布及累积效应分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 40 (6): 930 938. Zhang Rui, Cai Xuhui, Song Yu. 2004. Spatial-temporal variation and accumulation effect of air pollutants over Beijing Area [J]. Acta Scicentiarum Naturalum Universitis Pekinesis (in Chinese), 40 (6): 930 938.