

郭送军, 谭吉华, 段菁春, 等. 广州市灰霾期大气 PM₁₀ 中水溶性离子特征[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 83-86. Guo Song-jun, Tan Ji-hua, Duan Jing-chun, et al. Characteristics of water soluble ions in atmospheric PM₁₀ during haze periods in Guangzhou[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(11): 83-86.

广州市灰霾期大气 PM₁₀ 中水溶性离子特征

郭送军^{1,2}, 谭吉华^{2,3*}, 段菁春⁴, 马永亮², 贺克斌³, 盛国英⁴, 傅家谟⁴

(1. 广西大学环境学院, 广西 南宁 530004; 2. 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 中国科学院研究生院地球学院, 北京 100049; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084; 4. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要 采集广州市大气 PM₁₀ 样品并分别对冬夏两季灰霾和非灰霾期 PM₁₀ 中水溶性离子进行分析。实验表明, 广州市灰霾期 PM₁₀ 中水溶性离子的质量浓度要高出非灰霾期 4~15 倍, 其中 NO₃⁻ 浓度增幅最大。非灰霾期主要水溶性无机离子的浓度顺序为 SO₄²⁻>NH₄⁺>NO₃⁻, 灰霾期为 SO₄²⁻>NO₃⁻>NH₄⁺, 严重灰霾期则为 NO₃⁻>SO₄²⁻>NH₄⁺。非灰霾期 SO₄²⁻/NO₃⁻ 质量浓度比为 1.78~3.57, 灰霾期为 1.04~1.20, 而在严重灰霾期则<1, 说明灰霾利于 NO₃⁻ 的二次转化生成。实验还表明, 灰霾期 PM₁₀ 较非灰霾天气偏酸性, 灰霾期 SO₂ 和 NO_x 的高转化率导致 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的大幅增加是加重灰霾期 PM₁₀ 污染的主要原因。

关键词 灰霾; PM₁₀; 水溶性离子; 广州市

中图分类号 X513 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2012.11.018 文章编号 1003-6504(2012)11-0083-04

Characteristics of Water Soluble Ions in Atmospheric PM₁₀ during Haze Periods in Guangzhou

GUO Song-jun^{1,2}, TAN Ji-hua^{2,3*}, DUAN Jing-chun⁴, MA Yong-liang²,
HE Ke-bin³, SHENG Guo-ying⁴, FU Jia-mo⁴

(1. School of Environment Studies, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Key Laboratory of Computational Geodynamics, College of Earth Science, Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract : Atmospheric PM₁₀ samples were collected in Guangzhou from March 2002 to June 2003. Characteristics of water soluble ions were analyzed in haze and normal days during summer and winter. Results showed that mass concentrations of water soluble ions in PM₁₀ in haze days were 4~15 times of that in normal days, especially for NO₃⁻. Major species descended in the order of SO₄²⁻, NH₄⁺, NO₃⁻ in normal days, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺ in haze days and NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺ in heavy haze days. Ratios of SO₄²⁻/NO₃⁻ were 1.78~3.57, 1.04~1.20 and <1 in normal days, haze days and heavy haze days respectively. Haze days represented more acidic than normal days, and higher contribution of SO₂ and NO_x transformations to increasing of NO₃⁻ and SO₄²⁻ mainly resulted in heavy PM₁₀ pollution of haze days.

Key words : haze; PM₁₀; water soluble ions; Guangzhou

广州市大气 PM₁₀ (指空气动力学直径在 10 μm 以下的颗粒物) 的时空监测数据显示, 其年均质量浓度呈逐年递增趋势^[1], 而且, 广州市“灰霾”天气的频频出现及能见度的下降与高浓度的 PM₁₀ 污染密切相关^[2]。水溶性无机离子是大气颗粒物的重要组分^[3], 能直接影响大气降水酸度^[4-5], 因其吸湿性而影响云凝结核

(CCN) 的浓度, 从而引起间接的辐射强迫作用。研究证实, 含量较高且与人类活动密切相关的 NO₃⁻、SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 对大气的消光系数具有高的分担率, 是许多大都市能见度降低的主要原因^[6-7]。目前对广州市 PM₁₀ 理化性质的研究还存在欠缺^[8-10], 关于灰霾期 PM₁₀ 中水溶性组分的时空分布和污染特征等方面较为系统

《环境科学与技术》编辑部 (网址) <http://hjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjksyjs@126.com

收稿日期 2012-01-03, 修回 2012-03-28

基金项目 国家自然科学基金 (41105111, 41163008), 国家重点实验室专项基金课题 (10K13ESPCT), 广西大学科学研究项目 (XBZ111202)

作者简介 郭送军 (1975-) 男, 副教授, 博士, 研究方向为大气环境化学 (电子信箱) guosunjun163@163.com; * 通讯作者, 男, 副教授, 博士, 研究方向为大气环境化学 (电子信箱) tanjh@gucas.ac.cn。

的研究也显得不足。虽然对广州市大气颗粒物中水溶性离子已有探讨^[11-12],但由于广州的能源消费结构及经济发展变化较快,使得其大气颗粒物成分可能发生了较大变化。本实验探讨了广州灰霾期 PM_{10} 中水溶性组分的分布和污染特征,其研究结果对有效控制灰霾期高浓度大气颗粒物污染具有重要的意义。

1 实验与方法

1.1 样品采集

本实验的采样点^[13]设在广州市天河区中国科学院广州地球化学研究所情报楼顶(20 m),位于广州市中心区域,采样点周围有交通干线、居民区和学校。采样器为美国 Anderson PM_{10} (Model GUV-16HBL)大流量采样器,流速为 $1.13 \text{ m}^3/\text{min}$,石英滤膜采样(QM-Whatman $20.3 \text{ cm} \times 25.4 \text{ cm}$),采样前滤膜置于马弗炉中 450°C 焙烧 4 h,样品称重前置于 25°C 和相对湿度 50% 的恒温恒湿箱中平衡 24 h 后低温保存。采样时间为 2002 年 3 月 12 日-2003 年 6 月 31 日,采样频率为每周采集一个 PM_{10} 样品(每采集 24 h 更换 1 次滤膜),样品采集时间为上午 10:30 时至次日上午 10:30 时,同时记录温度、湿度、风速和风向等各种气象数据。

表 1 广州市采样期间的气象条件

Table 1 meteorological conditions during sampling periods in Guangzhou

采样时间(样品个数)		能见度/km	温度/℃	相对湿度/%	风速/m·s ⁻¹	SO ₂ /μg·m ⁻³	NO _x /μg·m ⁻³
灰霾天气	夏天(8)	5.7±0.7	30.1±0.8	73.6±9.4	1.4±0.2	68.1±5.3	45.4±6.3
	冬天(7)	3.3±1.4	19.2±2.3	71.8±7.4	0.9±0.3	83.6±7.8	102.2±16.8
正常天气	夏天(10)	9.7±0.4	29.6±1.2	68.7±2.2	2.6±0.6	34.5±9.5	23.6±6.4
	冬天(6)	9.5±0.2	13.2±2.2	57.3±5.2	4.5±1.2	16.8±7.2	32.1±7.9

2.2 水溶性离子分布特征

大气颗粒物中水溶性离子浓度及粒径分布状况,随当地环境特征而有所不同,其中 NH_4^+ 大部分来自有机物质的腐化及农业活动, NO_3^- 及 SO_4^{2-} 则主要为交通污染源、固定污染源和二次反应生成。表 2 为广州市采样点 4 个不同采样期间主要水溶性离子的平均浓度,结果显示大气 PM_{10} 中水溶性离子 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 是最主要的组分。不同采样期间水溶性离子的污染水平差别显著,灰霾期高于非灰霾期,冬季要高于夏季。水溶性阴阳离子的平衡率在夏季灰霾为 1.31、夏季非灰霾分别为 1.02,在冬季灰霾为 1.28、冬季非灰霾为 0.75。夏季灰霾期 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的浓度分别是非灰霾期的 14.3、4.8 和 5.1 倍;冬季灰霾期 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的浓度分别是非灰霾期的 9.9、5.4 和 4.7 倍。由此可见,广州市灰霾天气中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 含量上升的空间比较大,低风速和稳定的大气层结构有助于低层大气中污染物的积累。一次污染元素 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在灰霾期的污染水平高于非灰霾

1.2 分析测试

样品分析测试时间为 2003 年 7 月 5 日,分取一定面积的样品滤膜,用去离子水超声提取(样品每个超声提取 3 次每次 15 min),提取液经 $0.22 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤后转入 20 mL 容量瓶中定容,于 4°C 保存。使用 DX-120 离子色谱仪分析水溶性无机阴离子(NO_3^- 、 SO_4^{2-})和阳离子(Na^+ 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})。水体中各离子的检出限介于 $0.02 \sim 0.25 \mu\text{g/L}$ 之间,相对标准偏差均小于 3.6%。

2 结果与讨论

2.1 气象条件

广州属亚热带典型的海洋季风气候,全年平均气温为 $20^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$,日平均气温在 20°C 以上。夏季平均气温 $28.0^\circ\text{C} \sim 28.7^\circ\text{C}$,最高气温 38.7°C ;冬季平均气温 $12.4^\circ\text{C} \sim 13.5^\circ\text{C}$,最低气温为 -2.6°C 。表 1 为采样期间的气象条件,可见灰霾期的平均温度和相对湿度要高于非灰霾期,风速要小于非灰霾期;且灰霾期 SO_2 和 NO_x 污染严重,浓度远高于非灰霾期,特别是在冬季更为明显。本实验中灰霾天定义为日均能见度小于 8 km 的天气现象。

期,但浓度的增长要远小于二次组分 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的增长。

表 2 采样期间 PM_{10} 和主要水溶性离子的浓度水平

Table 2 Levels of PM_{10} and major water-soluble inorganic ions during sampling periods ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	夏季非灰霾	夏季灰霾	冬季非灰霾	冬季灰霾
PM_{10}	62.30 ± 6.38	170.20 ± 23.64	66.70 ± 5.42	259.00 ± 27.19
SO_4^{2-}	7.46 ± 2.88	35.60 ± 7.24	9.80 ± 2.25	52.60 ± 8.48
NO_3^-	2.31 ± 0.89	33.00 ± 6.54	4.64 ± 2.18	46.00 ± 6.66
NH_4^+	3.71 ± 2.27	18.80 ± 4.28	5.37 ± 1.83	25.00 ± 4.98
Na^+	2.61 ± 0.45	4.00 ± 1.14	2.45 ± 1.50	6.92 ± 2.14
K^+	1.36 ± 0.69	1.82 ± 1.48	1.58 ± 0.20	3.46 ± 2.02
Ca^{2+}	1.86 ± 0.98	5.80 ± 4.16	8.49 ± 5.21	6.74 ± 2.32
Mg^{2+}	0.32 ± 0.18	0.70 ± 0.38	0.30 ± 0.17	0.76 ± 0.52

注:平均值±标准偏差。

灰霾期不仅 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 的绝对浓度升高而且百分含量也升高, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 在 PM_{10} 中所占比重($54.2\% \pm 14.2\%$)要远高于非灰霾天气($29.6\% \pm 7.2\%$),这暗示着 NO_2 向硝酸盐及 SO_2 向硫酸盐转化强度增加。图 1 为不同采样期间 $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}/$

NH₄⁺比值,其中非灰霾天气 SO₄²⁻/NO₃⁻的质量浓度比为 1.78~3.57,略高于 Hueber 等^[14]的观测结果(2.0~3.4),而在灰霾期 SO₄²⁻/NO₃⁻为 1.04~1.20,在严重灰霾期比值小于 1。研究表明^[15],当 NO_x 排放率高于产生自由基离子来源的排放, HNO₃ 的形成导致自由基离子的减少。灰霾期在较高 NO_x 浓度条件下, OH 和 H₂O₂ 浓度减少,进一步导致 SO₄²⁻的生成,结果使得灰霾期硝酸盐质量浓度接近硫酸盐,甚至在严重灰霾期超过了硫酸盐。灰霾期硝酸盐质量浓度的大幅度上升并在严重灰霾期超过硫酸盐是广州市区别于其他城市灰霾的明显标志,西安^[16]灰霾期 SO₄²⁻/NO₃⁻(2.3)要大于非灰霾期值(1.9),北京^[17]灰霾期 SO₄²⁻/NO₃⁻(1.5)要大于非灰霾期的值(1.2),说明硝酸盐是广州灰霾污染的关键组分。

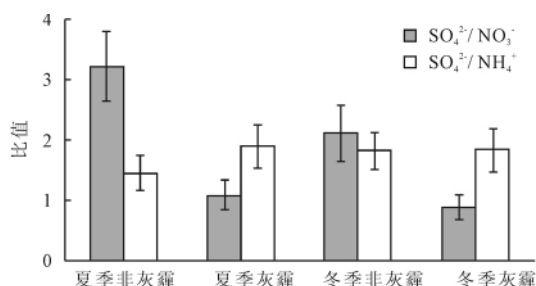


图1 不同采样时段 SO₄²⁻/NO₃⁻和 SO₄²⁻/NH₄⁺ 比值
Fig.1 Ratio values of SO₄²⁻/NO₃⁻ and SO₄²⁻/NH₄⁺ during different sampling durations

2.3 硫酸(硝酸)盐转化率

研究表明硫酸盐中硫的含量(硝酸盐中氮的含量)与总硫(总氮)的比值往往能够评价大气当中 SO₂ 向 SO₄²⁻ 的转化率(SOR)(NO₂ 向 NO₃⁻ 的转化率(NOR))^[18-19]。SOR 和 NOR 的大小可以用来作为生成二次污染物的指示器,值越高说明大气中 SO₂ 和 NO₂ 转化生成二次污染物越多。

$$\text{SO}_2 \text{ 转化率(SOR)} = [\text{SO}_4^{2-}] / ([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{SO}_2]) \quad (1)$$

$$\text{NO}_2 \text{ 转化率(NOR)} = [\text{NO}_3^-] / ([\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2]) \quad (2)$$

以上单位均为 μg/m³。SOR 和 NOR 值变化明显,夏季灰霾、夏季非灰霾、冬季灰霾和冬季非灰霾期大气 PM₁₀ 计算的 SOR 平均值分别为 0.15±0.09、0.08±0.04、0.21±0.08 和 0.17±0.6;NOR 的平均值分别为 0.22±0.11、0.05±0.03、0.14±0.06 和 0.07±0.3。灰霾天气中 SO₂ 和 NO₂ 的二次转化率远高于非灰霾天气的二次转化率。

2.4 PM₁₀ 酸碱性

Nss-SO₄(非海盐 SO₄²⁻, non sea-salt sulfate)含量由大气颗粒物里 SO₄²⁻总含量扣除海盐贡献量计算(海盐颗粒物中 SO₄²⁻/Na⁺=0.251)。大气颗粒物中 Na⁺假定全部来自海盐,Nss-SO₄ 和中和比率(Neutralization

ratio, NR)^[20-21]的计算公式分别为:

$$\text{SO}_4^{2-} \text{ nss} = [\text{SO}_4^{2-}] - 0.251 \times [\text{Na}^+] \quad (\text{单位 } \mu\text{g}/\text{m}^3) \quad (3)$$

$$\text{NR} = [\text{NH}_4^+] / ([\text{SO}_4^{2-} \text{ nss}] + [\text{NO}_3^-]) \quad (\text{单位 } \text{neq}/\text{m}^3) \quad (4)$$

NR 被用来解释气溶胶的酸性中和程度,当中和比率 NR 大于或接近 1,说明 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 形成铵盐,较小值意味着气溶胶偏酸性。本实验中夏季灰霾、夏季非灰霾、冬季灰霾和冬季非灰霾期 NR 平均值分别为 0.81±0.29、1.07±0.37、0.78±0.23 和 1.14±0.32。表明非灰霾广州市大气 PM₁₀ 基本上呈现中性状态,而灰霾期大气 PM₁₀ 呈酸性。灰霾期大气中的酸性物质(硫酸和硝酸)不能完全被氨中和,一方面可能氨挥发而损失掉,另一方面可能是在灰霾期大气中生成的硫酸盐和硝酸盐远高于铵盐的生成量,导致大气呈现出酸性。从非灰霾到灰霾天气, NH₄⁺ 增长率远小于 NO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 的增长率,大气 PM₁₀ 呈酸性就归结为 SO₂ 和 NO₂ 转化导致硫酸盐和硝酸盐浓度大幅度的上升。

2.5 气团后向轨迹

为探讨采样期外来污染源对广州市大气污染的影响,本研究利用 NOAA Air Resources Laboratory 的 HYSPLIT 模式来进行后向气流轨迹分析(图 2),以位于广州市采样点经纬度坐标(N22.26, E112.56)为起点,后推气流时间为 72 h,对冬季灰霾、冬季非灰霾、夏季灰霾和夏季非灰霾 4 个采样期分别进行后向轨迹推算。模式反演表明,广州市 PM₁₀ 污染与大气气团的传输路径有很好的相关性,能见度较好的冬季非灰霾期气团一般是经过长距离的传输从西伯利亚吹过来,风速较大,温度和湿度较小,带来的气团较干净,对广州市的大气有较强的稀释作用;从中国南海传输过来的气团,一方面比较干净,另一方面带来了较丰富的降雨,夏季非灰霾天气能见度也较好。而灰霾期所到达广州的气团,往往产生于长三角经济较发达的地区,一种是通过内陆的方式到达广州,而另一种方式则是通过沿着中国东南沿海,沿珠江到达广州,其路径通过许多较发达的城市,这些城市所产生的污染物较容易通过气团带到广州地区。

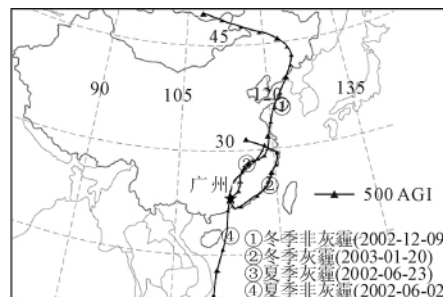


图2 广州市采样期大气气团后向轨迹图
Fig.2 Air backward trajectories during sampling periods in Guangzhou

3 结论

广州市灰霾期大气 PM_{10} 中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 是主要的水溶性离子, 灰霾天气 PM_{10} 中水溶性无机盐浓度高出非灰霾天气 4~15 倍, 其中 NO_3^- 浓度升幅最大。非灰霾期水溶性无机离子的浓度顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{NO}_3^-$, 灰霾期为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+$, 严重灰霾期则为 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+$ 。灰霾期大气 PM_{10} 一般呈酸性而非灰霾期则基本上呈现中性, 且灰霾天气 SOR 和 NOR 均高于非灰霾天气, 表明灰霾有利于 SO_2 和 NO_x 转化而加重灰霾期 PM_{10} 污染。

[参考文献]

- [1] 沈家芬, 冯建军, 谢春玲, 等. 广州市 PM_{10} 的时空变化特征分析[J]. 生态环境 2008, 17(2): 553-559.
Shen Jia-fen, Feng Jian-jun, Xie Chun-ling, et al. Analysis of temporal and spatial variation of PM_{10} in Guangzhou[J]. Ecology and Environment 2008, 17(2): 553-559.(in Chinese)
- [2] 沈家芬, 冯建军, 谢利, 等. 广州市大气能见度的特征及其影响因子分析[J]. 生态环境 2007, 16(4): 1672-2175.
- [3] He KB, Yang FM, Ma YL, et al. The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment 2001, 35(29): 4959-4970.
- [4] Kerminen VM, Hillamo R, Teinil K, et al. Ion balances of size-resolved tropospheric aerosol samples: implications for the acidity and atmospheric processing of aerosols [J]. Atmospheric Environment 2001, 35(31): 5255-5265.
- [5] Yao XH, Lau APS, Fang M, et al. Size distribution and formation of ionic species in atmospheric particulate pollutants in Beijing, China: 1-inorganic ions[J]. Atmospheric Environment 2003, 37: 2991-3000.
- [6] Lin JJ. Characterization of water-soluble ion species in urban ambient particles[J]. Environment International 2002, 28(2): 55-61.
- [7] Wang HB, Shooter D. Water soluble ions of atmospheric aerosols in three New Zealand cities: seasonal changes and sources[J]. Atmospheric Environment 2001, 35(34): 6031-6040.
- [8] 段菁春, 毕新慧, 谭吉华, 等. 广州灰霾期大气颗粒物中 PAHs 粒径分布研究[J]. 中国环境科学 2006, 26(1): 6-10.
Duan Jing-chun, Bi Xin-hui, Tan Ji-hua, et al. The particle diameter distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in atmospheric particle during haze period in Guangzhou[J]. China Environmental Science, 2006, 26(1): 6-10.(in Chinese)
- [9] 赵金平, 谭吉华, 毕新慧, 等. 广州市灰霾期大气颗粒物中无机元素的质量浓度[J]. 环境化学 2008, 27(3): 322-326.
Zhao Jin-ping, Tan Ji-hua, Bi Xin-hui, et al. The mass concentrations of inorganic elements in atmospheric particles during haze period in Guangzhou[J]. Environmental Chemistry 2008, 27(3): 322-326.(in Chinese)
- [10] 张涛, 陶俊, 王伯光, 等. 广州市春季大气颗粒物的粒径分布及能见度研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, 27(3): 331-337.
- [11] 吴兑, 关越坚, 毛伟康, 等. 广州盛夏期海盐核巨粒子的分布特征[J]. 大气科学, 1991, 15(5): 124-128.
Wu Dui, Guan Yue-jian, Mao Wei-kang, et al. Distribution of giant particles of sea-salt nuclei in Guangzhou during summer[J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 1992, 15(5): 124-128.(in Chinese)
- [12] 夏东, 杨少杰, 吴兑, 等. 广州市气溶胶质量谱与水溶性成分谱分析[J]. 热带气象学报 2009, 25(6): 675-680.
Xia Dong, Yang Shao-jie, Wu Dui, et al. Analysis of the mass spectrum and water dissoluble compounds of atmospheric aerosols over Guangzhou[J]. Journal of Tropical Meteorology 2009, 25(6): 675-680.(in Chinese)
- [13] 谭吉华, 毕新慧, 段菁春, 等. 广州市大气可吸入颗粒物(PM_{10})中多环芳烃的季节变化[J]. 环境科学学报, 2005, 25(7): 855-862.
Tan Ji-hua, Bi Xin-hui, Duan Jing-chun, et al. Seasonal variation of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons associated with PM_{10} in Guangzhou[J]. China. Acta Scientiae Circumstantiae 2005, 25(7): 855-862.(in Chinese)
- [14] Hueber BJ, Wang MX, Lu WX. Atmospheric nitrate, sulfate, ammonium and calcium concentrations in China[J]. Tellus, 1988, 40(B): 260-269.
- [15] Stein AF, Dennis L. Empirical evidence for the low-and high- NO_x photochemical regimes of sulfate and nitrate formation[J]. Atmospheric Environment 2003, 37: 3615-3625.
- [16] 李丽珍, 沈振兴, 杜娜, 等. 霾和正常天气下西安大气颗粒物中水溶性离子特征[J]. 中国科学院研究生院学报 2007, 24(5): 674-679.
- [17] Wang Y, Zhuang GS, Sun YL, et al. The variation of characteristics and formation mechanisms of aerosols in dust, haze and clear days in Beijing[J]. Atmospheric Environment 2006, 40(34): 6579-6591.
- [18] Ohta S, Masahiro H, Sadamu Y, et al. Chemical characterization of atmospheric fine particles in Sapporo with determination of water content[J]. Atmospheric Environment, 1998, 32(6): 1021-1025.
- [19] Chen LW, Chow JC, Doddridge BG, et al. Analysis of a summer time $\text{PM}_{2.5}$ and haze episode in the mid-Atlantic region[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53: 946-956.
- [20] 吕文英, 徐海娟, 王新明. 广州城区秋季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中主要水溶性无机离子分析[J]. 环境科学与技术 2010, 33(1): 98-101.
- [21] Cheng Man-ting, Horng Chuen-liang, Lin Yu-chi. Characteristics of atmospheric aerosol and acidic gases from urban and forest sites in central Taiwan [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2007, 79(6): 674-677.