

广州城区秋季大气PM_{2.5}中主要水溶性无机离子分析

吕文英^{1,2}, 徐海娟¹, 王新明^{1*}

(1.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;

2.广东工业大学环境科学与工程学院, 广东 广州 510006)

摘要 分别在广州市中心城区高楼顶(距地50m)和交通干线路边(距地1.2m),于2006年秋季连续一周采集了大气PM_{2.5}样品,对比分析了SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、F⁻、Na⁺、NH₄⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺等9种水溶性无机离子含量。结果表明,楼顶相对充分混合大气中PM_{2.5}的质量浓度范围59.5~129.5μg/m³,均值为83.7μg/m³;交通干线路边大气PM_{2.5}的质量浓度范围为108.4~132.2μg/m³,均值为121.1μg/m³。9种离子总浓度平均达到50.9(楼顶)和44.1(路边)μg/m³,占PM_{2.5}质量浓度的60.8%(楼顶)和36.4%(路边)。SO₄²⁻和NO₃⁻为水溶性无机离子主要组成,其占PM_{2.5}质量浓度的比例均是楼顶高于路边,显示二次气溶胶对楼顶充分混合大气中PM_{2.5}有较大贡献,而路边样品中一次来源贡献相对较大。计算表明采样期间海盐对广州大气PM_{2.5}中的水溶性组分贡献较小。NH₄⁺当量浓度远小于SO₄²⁻和NO₃⁻的当量浓度,中和度远<1,反映PM_{2.5}酸性较强,且楼顶PM_{2.5}粒子酸性高于路边样品。

关键词 细粒子(PM_{2.5}); 水溶性组份; 硫酸盐; 硝酸盐; 二次气溶胶; 粒子酸性; 广州

中图分类号: X830.2 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1003-6504.2010.01.024 文章编号: 1003-6504(2010)01-0098-04

Major Inorganic Water-soluble Ions in Fine Particles Collected in Autumn in Urban Guangzhou

LV Wen-ying^{1,2}, XU Hai-juan¹, WANG Xin-ming^{1*}

(1.State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2.School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: On a rooftop 50m above ground and at a roadside 1.2m above ground in urban Guangzhou, PM_{2.5} samples were collected consecutively for a week in autumn of 2006 for comparison of major inorganic water-soluble ions including SO₄²⁻, NO₃⁻, Cl⁻, F⁻, Na⁺, NH₄⁺, Ca²⁺, K⁺ and Mg²⁺. Results showed that PM_{2.5} mass concentrations on the rooftop ranged 59.5~129.5 μg/m³ with an average of 83.7μg/m³, while those at the roadside ranged 108.4~132.2μg/m³ with average of 121.1μg/m³. In average, 9 ions/anions had a sum of 50.9μg/m³ and 44.1μg/m³, accounting for 60.8% and 36.4% in total mass of PM_{2.5} respectively for the rooftop and roadside samples. SO₄²⁻ and NO₃⁻ were major constituents among major water soluble ions, and their shares in PM_{2.5} were both higher on the rooftop than at the roadside, indicating that contributions from secondary formation were larger on the rooftop where air was well mixed, and that roadside PM_{2.5} instead had a relatively larger contribution from primary sources. Calculated sea salt contribution to water soluble fraction of PM_{2.5} was trivial. The equivalent concentrations of NH₄⁺ were less than those of SO₄²⁻ and NO₃⁻ with neutralization ratio much lower than 1.0, indicating high particle acidity, which was higher on the rooftop than at the roadside.

Key words: fine particles (PM_{2.5}); water-soluble fraction; sulfate; nitrate; secondary aerosol; aerosol acidity; Guangzhou

大气中颗粒物危害人体健康,以细粒子(PM_{2.5})的影响更为显著^[1-2],因此,大气中PM_{2.5}的含量水平及其化学组成是大气化学与空气污染研究关注的重要内容。不同地区由于污染源、气候、地理位置等因素差异,其PM_{2.5}的质量浓度和化学组成特征也有较大区别^[3-6]。广州作为珠江三角洲城市群的中心城市,近年

来大气细粒子污染与灰霾问题十分突出^[6-10]。前期一些研究探讨了广州市大气PM_{2.5}中有机质^[9,11]、重金属^[12],陈灿云等(2006)研究了广州市8月份不同功能区大气细粒子的化学组成特征^[8]。本研究在广州市中心城区,分别选取离地50m左右的楼顶采样点和交通干线路边采样点,以大流量采样器采集了PM_{2.5}样品,重点

收稿日期: 2009-02-09, 修回: 2009-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(40673074); 广东省科技计划资助(2007B030102001)

作者简介: 吕文英(1969-)女,副教授,博士,主要研究方向为环境化学(电话:020-39322291(电子信箱)lwylwy1988@sina.com); *通讯作者: 王新明(电子信箱)wangxm@gig.ac.cn。

对比分析了其水溶性无机离子组成特征。楼顶采样点大气混合相对充分,可较大程度反映区域污染与影响特征,路边站点反映了局地影响特征,特别是交通源影响特征。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点选择在广州市东山区,一个采样点位于广州市环市路和东风路之间的广东工业大学校内 7 号楼楼顶(距地面高度约 50m,简称楼顶),附近无高于它的建筑物,无工业企业,距离交通干线环市路和东风路的水平距离均约为 150m,该采样点可作为广州市中心城区相对充分混合大气的代表点。另一个采样点位于东风东路路边人行道上(简称路边),距人行道边缘 1.5m,采样高度 1.2m,该采样点可作为市区交通干线的代表点(高峰时车流量 84 辆/min)。两个采样点的水平距离约为 150m。

PM_{2.5} 样品同步采集于 2006 年 9 月 21~27 日,采样期间无降雨,天气为晴或多云,最低温度 21~24℃,

最高温度 30~33℃ 相对湿度介于 35%~85%之间。采样方式 24h 连续采集,采样器为美国 Andersen 公司大流量采样器,采样流量为 1.13m³/min。采样用滤膜为石英滤膜。滤膜采样前于 450℃ 灼烧 4h,并置于干燥器中平衡 24h 后称重备用。采样后,仍将滤膜同样置于干燥器中平衡 24h 后称重。

1.2 水溶性组分的提取与测定

取一定面积滤膜剪成碎片,置于烧杯中,加入 Milli-Q 高纯去离子水,超声提取 30min,提取液用孔径 0.45μm 滤膜过滤。重复上述步骤,两次滤液合并后一起进行成分分析^[3]。其中 Na⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺ 的浓度用 ICP-MS 测定,阴离子和 NH₄⁺ 浓度用离子色谱测定。同样方法对空白膜进行超声提取和测定,作为测定空白。

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.5} 中主要水溶性无机离子组成特征

测得楼顶和路边样品 PM_{2.5} 的质量浓度及主要水溶性无机离子 SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、F⁻、Na⁺、NH₄⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺ 的含量情况如表 1 所示。

表 1 PM_{2.5} 水溶性无机离子浓度范围及平均值
Table 1 Ranges and averages of water-soluble ions in PM_{2.5}

项目	浓度范围		平均浓度		占 PM _{2.5} 比例(%)	
	楼顶	路边	楼顶	路边	楼顶	路边
SO ₄ ²⁻	20.2~38.1	22.3~36.0	27.6	28.3	33.0	23.4
NO ₃ ⁻	4.6~20.5	2.4~6.0	13.8	5.0	16.5	4.1
Cl ⁻	0.8~2.1	0.1~0.4	1.6	0.2	1.9	0.2
F ⁻	ND~0.1	ND	0.03	0.02	0.04	0.02
Na ⁺	3.0~4.0	0.8~1.6	3.3	1.2	3.9	1.0
NH ₄ ⁺	0.8~7.4	3.4~10.0	2.6	6.4	3.1	5.3
Ca ²⁺	0.3~2.5	1.3~2.4	1.1	1.8	1.3	1.5
K ⁺	0.5~1.3	0.6~1.6	0.8	1.1	0.9	0.9
Mg ²⁺	0.03~0.4	0.1~0.2	0.1	0.1	0.2	0.1
Σ	44.3~59.0	34.2~55.6	50.9	44.1	60.8	36.4
PM _{2.5}	59.5~129.5	108.4~132.2	83.7	121.1	/	/

注:Σ为所列 9 种主要水溶性离子浓度之和。

广州市中心城区 50m 高的楼顶 PM_{2.5} 的质量浓度范围为 59.5~129.5μg/m³,平均浓度为 83.7μg/m³,与陈灿云等^[6]报道的广州市各功能区 2004 年的测定结果相比,此次所测得的广州市中心城区 PM_{2.5} 的质量浓度略低。文献报道天津城区秋季 40m 高 PM_{2.5} 质量浓度为 98.4μg/m³^[14],北京秋季 8m 和 80m 高 PM_{2.5} 质量浓度为 92μg/m³ 和 90μg/m³^[15],广州中心城区 50m 楼顶 PM_{2.5} 的水平与这两个城市相当。本研究测得的交通干线路边大气中 PM_{2.5} 的质量浓度范围为 108.4~132.2μg/m³,平均浓度为 121.1μg/m³,也与李龙凤等^[7]2003 年 9 月所测得的广州市交通干线大气中 PM_{2.5} 的质量浓度相近。

我国大气环境质量标准中尚无 PM_{2.5} 的标准,与美国空气质量标准中 PM_{2.5} 旧的日均值限值 65μg/m³ 相比,采样期间楼顶 PM_{2.5} 样品超标率为 83.3%,而路边 PM_{2.5} 样品超标率为 100%。如果参照美国空气质量

标准 PM_{2.5} 新的日均值限值 65μg/m³,则全部样品超标,说明广州市细粒子污染比较严重;测得的路边大气中 PM_{2.5} 的质量浓度远远大于楼顶所测得的 PM_{2.5} 的质量浓度,说明地面源特别是交通源对 PM_{2.5} 的贡献,路边较高 PM_{2.5} 对行人和居民健康危害更应引起关注。

楼顶大气中 PM_{2.5} 样品中 SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻、F⁻、Na⁺、NH₄⁺、Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺ 9 种离子总浓度平均达到 50.9 μg/m³,占 PM_{2.5} 质量的 60.8%;路边 PM_{2.5} 样品中 9 种离子总浓度平均 44.1μg/m³,占 PM_{2.5} 质量的 36.4%。楼顶相对充分混合大气中 PM_{2.5} 样品中水溶性无机离子成分所占比例明显高于路边。SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 为水溶性无机离子主要组成,其中 SO₄²⁻ 含量楼顶(27.6μg/m³)与路边(28.3μg/m³)相当,但硝酸根离子浓度则是楼顶远高于路边。从 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 占 PM_{2.5} 质量浓度的比例来

看 均是楼顶高于路边 其中 NO_3^- 尤其显著。

本次研究所测得的楼顶 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 平均质量浓度分别为 $27.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $13.8\mu\text{g}/\text{m}^3$,高于宋燕等^[6]测得的北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 平均浓度 ($16.98\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $2.38\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

2.2 海盐对 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性组分的贡献

假设海盐是大气中 Na 的唯一来源^[7] ,可根据 Na^+ 的质量浓度计算 $\text{PM}_{2.5}$ 中非海盐硫酸盐 (nss-SO_4^{2-}) ,以及非海盐钙 (nss-Ca^{2+})、非海盐钾 (nss-K^+) 的质量浓度。

$$[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - [\text{Na}^+] \times 0.2455$$

$$[\text{nss-Ca}^{2+}] = [\text{Ca}^{2+}] - [\text{Na}^+] \times 0.0373$$

$$[\text{nss-K}^+] = [\text{K}^+] - [\text{Na}^+] \times 0.0355$$

计算所得结果如表 2 所示。

表 2 $\text{PM}_{2.5}$ 中非海盐离子
Table 2 Non sea salt contribution to the ions in $\text{PM}_{2.5}$

	平均浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		nss/total (%)	
	楼顶	路边	楼顶	路边
nss-SO_4^{2-}	26.84	28.04	97.11	98.98
nss-Ca^{2+}	0.95	1.75	88.79	97.77
nss-K^+	0.66	1.06	84.18	96.36

由表 2 可知,楼顶和路边 $\text{PM}_{2.5}$ 中 nss-SO_4^{2-} 占 SO_4^{2-} 的比例分别为 97.11% 和 98.98%; 楼顶 $\text{PM}_{2.5}$ 中 nss-Ca 和 nss-K 占 Ca 和 K 的比例分别为 88.79% 和 84.18%, 而路边则更高, nss-Ca 和 nss-K 所占的比例分别为 97.77% 和 96.36%, 说明海盐对广州大气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响比较小。

采样期间,除 24 日风速 2~3 级外,其它均为微风,风向为东北风到东风。广州位于南海北面,采样期间海盐的贡献很小,可能与主导风向有关。

2.3 二次来源对 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子的贡献

从表 1 可以看出,虽然受交通尾气排放的大量一次颗粒物影响, $\text{PM}_{2.5}$ 水平路边采样点较高,但水溶性无机离子总量无论是从绝对浓度还是所占 $\text{PM}_{2.5}$ 比例,均是楼顶样品中较高,显示了一次和二次气溶胶对不同高度大气的影响差异。 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 主要是 SO_2 、 NO_x 和 NH_3 这些气相前体物大气转化而来,是典型的二次成因无机气溶胶成份。对楼顶采样点, SO_4^{2-} 和 NO_3^- 之和占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的比例达到 49.5%, 加上 NH_4^+ 则更超过 50%, 说明二次来源的重要贡献。路边样品 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 之和仅占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的 27.5%, 主要是交通尾气来源的一次颗粒物中非水溶性成分比例相对较大。值得注意的是,楼顶和路边样品中 SO_4^{2-} 的含量水平相当,但 NO_3^- 的水平相差很大。汽车尾气排放的 NO_x 须经过大气氧化转化为硝酸盐,楼顶较高的浓度不难解释。而楼顶和路边样品中

SO_4^{2-} 的含量相当,可能受地面扬尘的影响。

路边 $\text{PM}_{2.5}$ 样品 NH_4^+ 的含量高于楼顶 $\text{PM}_{2.5}$, 这是由于近地面挥发 NH_3 很快被呈酸性的细粒子吸收的结果。此外,楼顶和路边 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 具有比较高的相关性 ($R=0.75$) ,说明在 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 主要可能以硫酸盐的形式存在^[18]。

楼顶 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的质量浓度均值比为 2.0, 路边 $\text{PM}_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 的质量浓度均值比为 5.7, 都说明硫酸盐气溶胶的贡献比硝酸盐大。与陈灿云^[8] 报道的广州市各功能区 2004 年的测定结果 (SO_4^{2-} : $26.52\sim 42.69\mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_3^- : $1.50\sim 3.35\mu\text{g}/\text{m}^3$) 相比,本次所测得的楼顶大气 $\text{PM}_{2.5}$ 样品中 SO_4^{2-} 含量有所下降,而 NO_3^- 含量显著提高,这可能是近年来对工业锅炉采取了一系列脱硫措施,使得大气中 SO_2 污染有所缓解,而与此同时,由于广州市汽车数量急剧增加,导致大气中 NO_x 污染明显加剧所致。

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 的中和度与离子酸性

楼顶和路边样品 $\text{PM}_{2.5}$ 中 $[\text{NH}_4^+]$ 与 $[\text{nss-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]$ 当量浓度均呈正相关关系,楼顶 $\text{PM}_{2.5}$ 中两者相关系数为 0.73, 路边 $\text{PM}_{2.5}$ 中两者相关系数为 0.91。 $\text{PM}_{2.5}$ 的酸碱性可以用 $[\text{NH}_4^+]$ 与 $[\text{nss-SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]$ 当量浓度的比值来表示,这一比值被定义为中和度 (Neutralization Ratio, NR)^[19]。 $\text{NR} < 1$, $\text{PM}_{2.5}$ 为酸性; $\text{NR} = 1$, $\text{PM}_{2.5}$ 为中性; $\text{NR} > 1$, $\text{PM}_{2.5}$ 为碱性。经计算,楼顶 NR 的变化范围为 0.06~0.47, 均值为 0.18, 路边 NR 的变化范围为 0.34~0.66, 均值为 0.52, 说明广州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 具有明显酸性,且距地面越高, $\text{PM}_{2.5}$ 的酸性越强。因楼顶样品更反映区域性特征,说明区域性细粒子的强酸性。

作为对楼顶和路边 $\text{PM}_{2.5}$ 酸性的间接验证,实验中对采集样品的滤膜和野外现场空白膜,均测定了其在同样处理条件下得到的提取液的 pH 值。对楼顶样品,相对于空白样品提取液的 pH 值降低 0.6~2.4, 平均降低 1.4; 对路边样品,相对于空白样品提取液的 pH 值降低 0.1~0.7, 平均降低 0.24, 一方面验证了 $\text{PM}_{2.5}$ 具有酸性,同时也说明楼顶样品的酸性比路边强。

3 结论

(1) 2006 年秋季在广州市中心城区距地面 50m 高度楼顶和其邻近距地 1.2m 的交通干线路边连续一周的观测表明,楼顶 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度范围为 $59.5\sim 129.5\mu\text{g}/\text{m}^3$,平均 $83.7\mu\text{g}/\text{m}^3$,路边 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度范围为 $108.4\sim 132.2\mu\text{g}/\text{m}^3$,平均值 $121.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(2) 采样期间海盐对广州市中心城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中的水溶性组分贡献较小。

(3) 硫酸盐和硝酸盐二次气溶胶对 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶

性组分贡献较大,硫酸盐气溶胶的贡献大于硝酸盐气溶胶。二次气溶胶对楼顶 PM_{2.5} 中水溶性组分贡献比对路边贡献大。

(4)距地面 50m 高度楼顶大气中 PM_{2.5} 的 NR 的范围为 0.06~0.47,均值为 0.18;路边大气中 PM_{2.5} 的 NR 的范围为 0.34~0.66,均值为 0.52,说明广州市大气 PM_{2.5} 具有明显酸性,且楼顶采集 PM_{2.5} 的酸性更强。

[参考文献]

- [1] Michael L, Tadeusz E Kleindienst, John H Offenberg. composition of PM_{2.5} during the summer of 2003 in research Triangle Park, North Carolina[J]. Atmospheric Environment 2007, 41 : 4073-4083.
- [2] 张蕴晖,丁佳玮,曹慎,等.大气细颗粒物(PM_{2.5})对心血管内皮细胞 NOS 的影响[J].环境科学学报 2006 26(1) :142-145. Zhang Yun-hui, Ding Jia-wei, Cao Shen, et al. Study on oxidation stress effects of PM_{2.5} on cardiovascular endothelium cells[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2006 26(1) :142-145.(in Chinese)
- [3] Ariola V. Elemental characterization of PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ in the town of Genoa (Italy)[J]. Chemosphere, 2006, 62 : 226-232.
- [4] Kim Ki-Hyun. The ionic compositions of fine and coarse particle fractions in the two urban areas of Korea[J]. Journal of Environmental Management 2006, 78 :170-182.
- [5] Hueglin C. Chemical characterisation of PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse particles at urban, near-city and rural sites in Switzerland[J]. Atmospheric Environment 2005, 39 :637-651.
- [6] 吴国平,胡伟,滕恩江,等.我国四城市空气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的污染水平[J].中国环境科学,1999,19(2) :133-137. Wu Guo-ping, Hu Wei, Teng En-jiang, et al. PM_{2.5} and PM₁₀ pollution level in the four cities in China [J]. China Environmental Science, 1999, 19(2) :133-137.(in Chinese)
- [7] 李龙凤,王新明,赵利容,等.广州市街道环境 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 质量浓度的变化特征[J].地球与环境 2005, 33(2) :57-60. Li Long-feng, Wang Xin-ming, Zhao Li-rong, et al. Variations of PM₁₀ and PM_{2.5} levels in street microenvironment in Guangzhou[J]. Earth and Environment 2005, 33(2) :57-60.(in Chinese)
- [8] 陈灿云,梁高亮,王欲华.广州市大气细粒子的化学组成与来源[J].中国环境监测 2006 22(5) :61-64. Chen Can-yun, Liang Gao-liang, Wang Qin-hua. Chemical composition and sources of aerosol fine particles in Guangzhou[J]. Environmental Monitoring in China 2006 22 (5) :61-64.(in Chinese)
- [9] 段菁春,毕新慧,谭吉华,等.广州灰霾期大气颗粒物中多环芳烃粒径的分布[J].中国环境科学 2006 26(1) :6-10. Duan Jing-chun, Bi Xin-hui, Tan Ji-hua, et al. The size 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)
- [10] 吴兑,邓雪娇,毕雪岩,等.细粒子污染形成灰霾天气导致广州地区能见度下降[J].热带气象学报 2007 23(1) :1-6. Wu Dui, Deng Xue-jiao, Bi Xue-yan, et al. Study on the visibility reduction caused by atmospheric haze in Guangzhou area[J]. Journal of Tropical Meteorology 2007 23 (1) :1-6.(in Chinese)
- [11] 李军,张干,祁士华,等.广州市大气中颗粒态多环芳烃(PAHs)的主要污染源[J].环境科学学报 2004 24(4) :661-667. Li Jun, Zhang Gan, Qi Shi-hua, et al. Source analysis and apportionment of particulate phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Guangzhou City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 2004 24(4) :661-667.(in Chinese)
- [12] 冯茜丹,党志,黄伟林.广州市秋季 PM_{2.5} 中重金属的污染水平与化学形态分析[J].环境科学 2008 29(3) :569-575. Feng Xi-dan, Dang Zhi, Huang Wei-lin. Pollution level and chemical speciation of heavy metals in PM_{2.5} during autumn in Guangzhou City[J]. Environmental Science 2008, 29(3) :569-575.(in Chinese)
- [13] 余学春,贺克斌,马永亮,等.气溶胶水溶性无机物及有机物的离子色谱测定[J].环境化学 2004 23(2) :218-222. Yu Xue-chun, He Ke-bin, Ma Yong-liang, et al. Determination of water-soluble inorganic and organic species of aerosols[J]. Environmental Chemistry, 2004, 23(2) :218-222.(in Chinese)
- [14] 孙玫玲,穆怀斌,吴丹朱,等.天津城区秋季 PM_{2.5} 质量浓度垂直分布特征研究[J].气象 2008 34(10) :60-66. Sun Mei-ling, Mu Huai-bin, Wu Dan-zhu, et al. Vertical distribution characteristics of PM_{2.5} mass concentration in the atmosphere over Tianjin [J]. Meteorological Monthly, 2008, 34(10) :60-66.(in Chinese)
- [15] 徐宏辉,王跃思,温天雪,等.北京秋季大气气溶胶质量浓度的垂直分布[J].中国环境科学 2008 28(1) :2-6. Xu Hong-hui, Wang Yue-si, Wen Tian-xue, et al. Vertical distributions of atmospheric aerosol mass concentrations in autumn Beijing City [J]. China Environmental Science, 2008, 28(1) :2-6.(in Chinese)
- [16] 宋燕,徐殿斗,柴之芳.北京大气颗粒物 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中水溶性阴离子的组成及特征[J].分析实验室 2006 25(2) :80-85. Song Yan, Xu Dian-dou, Cai Zhi-fang. Determination and characterization of anionic species of PM₁₀ and PM_{2.5} in Beijing [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory 2006, 25 (2) :80-85.(in Chinese)
- [17] Morales J A, Pirela D, de Borrego B S et al. Inorganic water soluble ions in atmospheric particles over Maracalibo Lake Basin in the western region of Venezuela [J]. Atmos Res, 1998, 46(3/4) :307-320.
- [18] Mamane Y, Mehler M. On the nature of nitrate particles in a coastal urban area [J]. Atmospheric Environment, 1987, 21 :1989-1994.
- [19] Rauda L Mariani, William Z de Mello. PM_{2.5-10}, PM_{2.5} and associated water-soluble inorganic species at a coastal urban site in the metropolitan region of Rio de Janeiro [J]. Atmospheric Environment 2007, 41 :2887-2892.