

宝鸡市大气 PM₁₀ 中水溶性物质的组成及特征研究*

胡淑圆¹ 谢鸣捷¹ 王格慧^{2#} 韩勤有³ 赵勇⁴

(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210093;
2. 中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075;
3. 宝鸡市环境监测站, 陕西 宝鸡 721006; 4. 泰山气象站, 山东 泰安 271000)

摘要 2008年冬、春季在宝鸡市4个不同功能区采集PM₁₀样品,探讨了PM₁₀中水溶性物质的化学组成、时空分布特征以及来源。结果表明,冬、春季PM₁₀的平均质量浓度分别为(402±100)、(410±160) μg/m³,无明显季节差异,冬季以交通干道区的PM₁₀浓度为最高,而春季则以商贸区的PM₁₀浓度为最高;冬、春季PM₁₀中水溶性有机碳(WSOC)浓度最高值均出现在商贸区,最低值则分别出现在背景点和交通干道区,水溶性无机碳(WSIC)浓度最高值分别出现在交通干道区和商贸区,最低值均出现在背景点;冬、春季PM₁₀中所含大多数无机离子浓度不存在显著空间差异,但不同功能区PM₁₀中无机离子所占质量分数差异较明显;冬、春季PM₁₀中的水溶性物质质量浓度分别为207、151 μg/m³,在PM₁₀中所占质量分数分别为51%和40%,其中,冬、春季水溶性物质浓度最高的分别为居民区和商贸区;冬季PM₁₀中WSOC浓度与SO₄²⁻、NO₃⁻浓度有较好的相关性,说明冬季PM₁₀中WSOC的主要组分为二次有机气溶胶,而春季PM₁₀中WSOC浓度与SO₄²⁻、NO₃⁻浓度的相关性相对较差,这是由于一次有机气溶胶对WSOC的贡献率较冬季显著增大;宝鸡市与北京市大气PM₁₀浓度、PM₁₀中的SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺浓度最为接近;广州市大气PM₁₀中的SO₄²⁻所占质量分数(14%)要高于北方城市(宝鸡市和北京市均为9%)。

关键词 PM₁₀ 水溶性有机碳 水溶性无机碳 无机离子 时空分布 来源

Component and characteristics of water-soluble species in PM₁₀ aerosol of Baoji Hu Shuyuan¹, Xie Mingjie¹, Wang Gehui², Han Qinyou³, Zhao Yong⁴. (1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing Jiangsu 210093; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Science, Xi'an Shanxi 710075; 3. Environmental Monitoring Station of Baoji, Baoji Shanxi 721006; 4. Meteorological Station of Mt. Tai, Tai'an Shandong 271000)

Abstract: Several PM₁₀ samples were collected at four functional areas of Baoji during winter and spring of 2008 to investigate the component, distribution characteristic and origin of water-soluble species in PM₁₀. The results showed that the average PM₁₀ concentrations in winter and spring were (402±100) and (410±160) μg/m³ respectively, with no significant seasonal difference. The highest PM₁₀ concentration was found at the traffic center in winter and downtown sites in spring. The amount of water-soluble organic carbon (WSOC) was highest in PM₁₀ collected in downtown, and the lowest WSOC appeared in PM₁₀ at background site and traffic center. For water-soluble inorganic carbon (WSIC), the highest WSIC was found at traffic center and downtown, and the lowest WSIC was found at background site. The space distribution of inorganic ions was also investigated. The concentrations of water soluble matter in winter and spring PM₁₀ were 207 and 151 μg/m³, which account for 51% and 40% of total PM₁₀, and residential area and downtown owned the highest amount of water soluble matter. In PM₁₀ collected at winter, the concentration of WSOC was well correlated with SO₄²⁻ and NO₃⁻, suggested that secondary organic aerosol was the main component of WSOC. The contribution of POA for WSOC was increased in spring for the relative poor correlation between WSOC and SO₄²⁻ and NO₃⁻.

Keywords: PM₁₀; water-soluble organic carbon; water-soluble inorganic carbon; inorganic ions; space-time distribution; origin

水溶性物质是大气气溶胶中的主要成分之一,不仅作为云凝结核(CNN)影响气候变化^{[1],[2],[37,38]},而且由于其具有表面活性剂作用,可提高有毒物质在颗粒

物水相中的溶解度,增加对人体的毒害作用^[3-5]。

目前,国内关于气溶胶水溶性物质的研究主要集中在北京^{[6]3148}、南京^{[7]2894}、广州^{[8]940}等大城市。而

第一作者:胡淑圆,女,1986年生,硕士研究生,主要从事大气环境化学研究。# 通讯作者。

* 国家自然科学基金资助项目(No. 40873083);中国科学院知识创新工程项目(No. kzcx 2-yw-148)。

关于中小城市的气溶胶水溶性物质的研究尚不多见。宝鸡市是我国中西部以煤炭为主要能源的典型中等城市,采暖燃煤排放是该市冬季大气质量恶化的主要原因之一。笔者以宝鸡市 4 个不同功能区的大气 PM₁₀ 为研究对象,探讨了其水溶性物质的化学组成、时空分布特征以及来源。

1 样品的采集与分析

1.1 样品采集

2008 年冬季(2月 15~19 日)和春季(4月 8~10、15~17 日)在宝鸡市 4 个不同功能区(居民区、交通干道区、商贸区、背景点)运用 KC120 采样器(流量为 100 L/min)同时采集 PM₁₀,冬季连续采样 5 d,春季采样 6 d,每天采集 8 h(8:30 至 16:30)。

将采集的 PM₁₀ 颗粒物收集在直径为 90 mm 的石英滤膜上;石英滤膜采样前于 450 °C 马弗炉中烘烤 6 h,并于采样前后分别放入干燥器中平衡 24 h,称得 PM₁₀ 颗粒物质量后将石英滤膜于 -18 °C 保存,待分析。

1.2 样品分析

取 1/4 石英滤膜,加入 12 mL 超纯水(电阻率 > 18 MΩ),超声萃取 15 min,测量 pH 后,经微孔滤膜过滤,用 TOC5000 分析仪(日本岛津公司)测定水溶性有机碳(WSOC)和水溶性无机碳(WSIC)含量,用 ICS-1000 离子色谱(美国戴安公司)测定无机离子浓度。

2 结果与讨论

2.1 PM₁₀ 浓度及 WSOC、WSIC 含量

宝鸡市冬、春季不同功能区大气 PM₁₀ 浓度,PM₁₀ 中的 WSOC、WSIC 浓度和 pH 变化值(ΔP, ΔP = P_s - P_b, 式中: P_s 为收集 PM₁₀ 后的石英滤膜 pH; P_b 为空白石英滤膜 pH, 均值为 7.81)见表 1。

表 1 宝鸡市冬、春季不同功能区大气 PM₁₀ 质量浓度, PM₁₀ 中的 WSOC、WSIC 质量浓度和 ΔP
Table 1 Concentrations of PM₁₀, WSOC and WSIC and ΔP in Baoji in winter and spring

季节	功能区	n ¹⁾ / 个	PM ₁₀ / (μg · m ⁻³)	WSOC / (μg · m ⁻³)	WSIC / (μg · m ⁻³)	ΔP
冬季	居民区	5	383 ± 115	30.0 ± 10.0	1.1 ± 0.3	-1.45
	交通干道区	5	461 ± 56	29.0 ± 4.0	1.6 ± 0.5	-1.61
	商贸区	5	454 ± 65	35.0 ± 5.0	1.3 ± 0.5	-1.68
	背景点	5	308 ± 84	28.0 ± 6.0	0.9 ± 0.3	-2.18
春季	居民区	6	338 ± 123	22.0 ± 11.0	1.6 ± 0.7	-1.09
	交通干道区	6	440 ± 132	16.0 ± 4.0	1.5 ± 0.6	-1.34
	商贸区	6	556 ± 125	29.0 ± 14.0	2.4 ± 0.6	-1.43
	背景点	6	296 ± 134	22.0 ± 10.0	1.0 ± 0.3	-2.07

注: 1) n 为采集样品数, 下同。

由表 1 可知,冬、春季 PM₁₀ 的平均质量浓度分别为 (402 ± 100)、(410 ± 160) μg/m³, 无明显季节差异。但从空间分布来看,冬季以交通干道区的 PM₁₀ 浓度为最高,居民区、交通干道区、商贸区的 PM₁₀ 质量浓度分别为背景点的 1.24、1.50、1.47 倍;而春季则以商贸区 PM₁₀ 浓度为最高,居民区、交通干道区、商贸区的 PM₁₀ 质量浓度分别为背景点的 1.14、1.49、1.88 倍。根据所有采集样品的实测数据,冬、春季 PM₁₀ 中 WSOC、WSIC 质量浓度分别为 4.8~56.0、0.5~3.1 μg/m³, 均值分别为 26.0、1.5 μg/m³, 该结果与 WANG 等^{[7] 2896, 2897} 的研究结果一致。冬、春季 WSOC 质量浓度最高值均出现在商贸区,分别为 (35.0 ± 5.0)、(29.0 ± 14.0) μg/m³, 最低值则分别出现在背景点和交通干道区,分别为 (28.0 ± 6.0)、(16.0 ± 4.0) μg/m³; WSIC 质量浓度最高值分别出现在交通干道区和商贸区,分别为 (1.6 ± 0.5)、(2.4 ± 0.6) μg/m³, 而最低值均出现在背景点,分别为 (0.9 ± 0.3)、(1.0 ± 0.3) μg/m³。WSOC 是气溶胶的重要组成部分^[9, 10], 其一次来源主要为生物和化石燃料的燃烧、生物代谢活动和烹调挥发;二次来源为大气中有机物的光化学氧化。烹调挥发和燃煤污染是造成餐饮密集的商贸区 WSOC 浓度较高的主要原因之一。交通干道区由于大气传输畅通,且受燃煤污染的影响较小,因而 WSOC 浓度较低。由表 1 还可知,PM₁₀ 中 ΔP 均为负值,说明宝鸡市 PM₁₀ 的 pH 小于空白石英滤膜,其水溶性物质偏酸性;冬季 ΔP 较低,这是由于冬季燃煤多,排放的 SO₂ 也更多,而春季扬尘带来的碱性物质较多。

PM₁₀ 中 WSOC 和 WSIC 所占质量分数见图 1。由图 1 可知,冬、春季 PM₁₀ 中 WSOC 所占质量分数 (WSOC/PM₁₀) 由高到低排序依次均为背景点(分别为 9.33%、8.10%)、居民区(分别为 7.93%、7.00%)、商贸区(分别为 7.77%、5.21%)、交通干

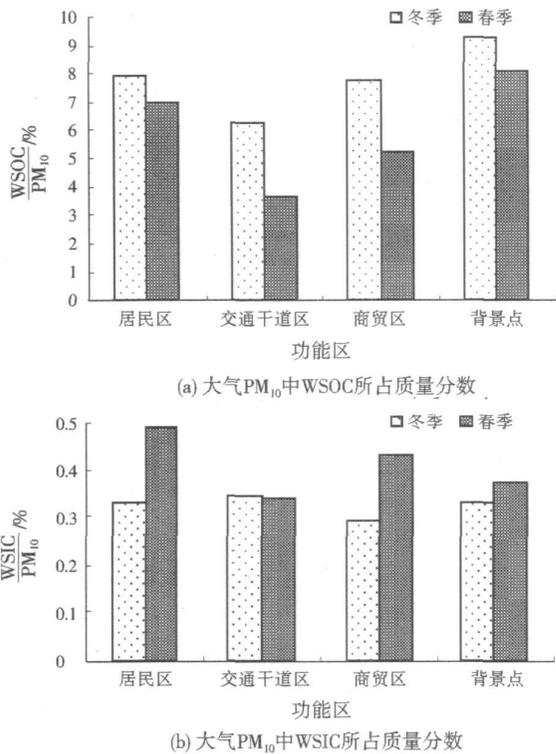


图1 冬、春季不同功能区大气PM₁₀中WSOC、WSIC所占质量分数

Fig 1 Mass ratio of WSOC and WSIC in PM₁₀ of Baoji in winter and spring

道区(分别为6.26%、3.67%)。由于交通干道区受交通扬尘影响较多,PM₁₀中含有较多的非水溶性物质,因此该点WSOC/PM₁₀较低;而背景点地处郊

区,植被覆盖率高,受扬尘影响较少,因而该点WSOC/PM₁₀相对较高。冬、春季交通干道区PM₁₀中WSIC所占质量分数(WSIC/PM₁₀)无明显季节差异,而居民区、商贸区、背景点的WSIC/PM₁₀均是春季高于冬季。

2.2 PM₁₀中无机离子浓度

宝鸡市冬、春季大气PM₁₀中无机离子浓度见表2。根据所有采集样品的实测数据,冬、春季PM₁₀中的SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺平均质量浓度分别为38、36、23 g/m³。由表2可知,冬季不同功能区PM₁₀中的SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺的浓度均高于春季,这主要与冬季采暖设备等的燃煤污染有关,且冬季温度低,NH₄NO₃更易以颗粒态形式存在;春季土壤扬尘较多,导致春季不同功能区PM₁₀中的Ca²⁺、K⁺浓度高于冬季;而冬、春季不同功能区的Na⁺、Mg²⁺浓度无明显季节差异。此外,由于冬季采暖设备等的燃煤污染较重,导致不同功能区PM₁₀中的Cl⁻和F⁻浓度基本较春季高。

总体来说,冬、春季PM₁₀中所含的大多数无机离子浓度没有显著的空间差异,但不同功能区PM₁₀中无机离子所占质量分数差异较明显,不同功能区PM₁₀中SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺所占质量分数见表3。由表3可知,冬、春季PM₁₀中SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺所占质量分数最高值均出现在背景点,而冬、春季PM₁₀中Ca²⁺所占质量分数最低值均出现在背景点。

表2 宝鸡市PM₁₀中无机离子质量浓度
Table 2 Concentrations of ions in PM₁₀ of Baoji

季节	功能区	n/个	F ⁻ /(g·m ⁻³)	Cl ⁻ /(g·m ⁻³)	NO ₃ ⁻ /(g·m ⁻³)	SO ₄ ²⁻ /(g·m ⁻³)	Na ⁺ /(g·m ⁻³)	NH ₄ ⁺ /(g·m ⁻³)	K ⁺ /(g·m ⁻³)	Mg ²⁺ /(g·m ⁻³)	Ca ²⁺ /(g·m ⁻³)
冬季	居民区	5	1.9±0.5	5.0±2.8	42±22	52±37	3.4±1.4	31±15	1.4±0.6	0.8±0.4	5.1±1.2
	交通干道区	5	2.3±0.6	4.4±2.7	40±19	44±19	1.3±0.9	27±10	2.6±1.3	0.9±0.2	7.8±1.3
	商贸区	5	2.1±0.7	5.9±2.9	42±20	48±21	1.3±0.8	29±11	1.3±0.8	0.9±0.2	6.2±1.2
	背景点	5	1.9±1.0	3.9±2.4	41±22	43±17	1.0±0.4	28±10	1.9±1.0	0.5±0.1	2.3±0.9
春季	居民区	6	1.7±1.0	2.5±1.5	29±6	28±9	2.3±0.5	17±4	2.1±2.4	0.6±0.3	9.0±5.0
	交通干道区	6	1.4±1.0	3.3±2.8	30±7	29±9	3.0±0.8	16±4	3.1±2.6	0.8±0.3	9.6±3.0
	商贸区	6	2.1±1.3	4.3±1.7	32±7	32±11	1.4±0.4	16±5	3.3±2.0	1.0±0.4	11.6±3.9
	背景点	6	1.2±0.6	4.3±3.2	29±8	28±7	1.0±1.0	18±4	5.1±4.2	0.6±0.4	5.2±2.7

表3 宝鸡市不同功能区PM₁₀中SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺所占质量分数
Table 3 The mass ratio of SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺ in PM₁₀ of four functional areas

季节	功能区	n/个	SO ₄ ²⁻ / %	NO ₃ ⁻ / %	NH ₄ ⁺ / %	Ca ²⁺ / %
冬季	居民区	5	12.52	10.34	7.74	1.40
	交通干道区	5	9.25	8.53	5.79	1.70
	商贸区	5	10.28	8.99	6.33	1.40
	背景点	5	13.59	12.51	8.91	0.75
春季	居民区	6	8.56	9.16	5.29	2.54
	交通干道区	6	6.75	7.30	3.87	2.18
	商贸区	6	5.54	5.65	2.86	2.00
	背景点	6	10.08	10.92	6.68	1.74

2.3 PM₁₀ 中水溶性物质含量

PM₁₀ 中水溶性物质主要包括水溶性有机物和无机离子, 其中, 水溶性有机物浓度一般为 WSOC 质量浓度 (c_{wsoc}) 的 2.1 倍^{[2]3741} ($2.1c_{wsoc}$), 而无机离子除表 2 中所测离子种类外, 主要还包括碳酸盐类, 其浓度一般为 WSIC 质量浓度 (c_{wsic}) 的 5 倍^{[7]2900} ($5c_{wsic}$)。将 $2.1c_{wsoc}$ 、表 2 中所测无机离子浓度和 $5c_{wsic}$ 3 者相加, 得到宝鸡市冬、春季 PM₁₀ 中的水溶性物质平均质量浓度分别为 207、151 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (见图 2), 在 PM₁₀ 中所占平均质量分数分别为 51%、40%。

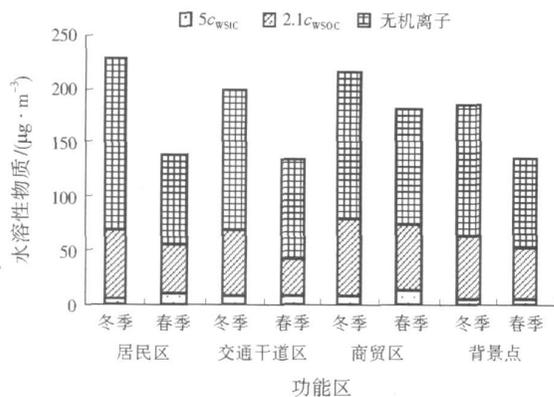


图 2 PM₁₀ 中的水溶性物质质量浓度
Fig 2 Concentration of water-soluble matters in PM₁₀ of Baoji

由图 2 和图 3 可知, 冬季不同功能区的水溶性物质浓度以及水溶性物质浓度在 PM₁₀ 中所占质量分数均相应高于春季; 从空间分布来看, 冬、春季水溶性物质浓度最高的分别为居民区 ($232 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和商贸区 ($184 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 而水溶性物质在 PM₁₀ 所占质量分数最高的均为背景点 (冬、春季分别为 60%、56%), 其后均依次为居民区 (冬、春季分别为 55%、45%)、商贸区 (冬、春季分别为 47%、32%)、交通干道区 (冬、春季分别为 43%、32%)。这是由于居民区和商贸区的烹调和燃煤污染较为严重, 在水溶性物质中占重要成分的 WSOC、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度均较高; 而背景点受扬尘污染相对较小, PM₁₀ 中的非水溶性物质含量较少, 导致水溶性物质所占质量分数相对较高。

表 4 各城市大气 PM₁₀ 中水溶性物质组成比较

Table 4 The component of water-soluble matters in PM₁₀ of different cities

城市	PM ₁₀ / ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	SO_4^{2-} / ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	NO_3^- / ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	NH_4^+ / ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	采样时间
宝鸡	406	37	35	22	冬、春季
北京 ^{[6]3151}	417	39	24	14	冬季
南京 ^{[7]2895, 2898}	316	18	9	11	全年
广州 ^{[8]941}	143	20	9	5	冬、夏季

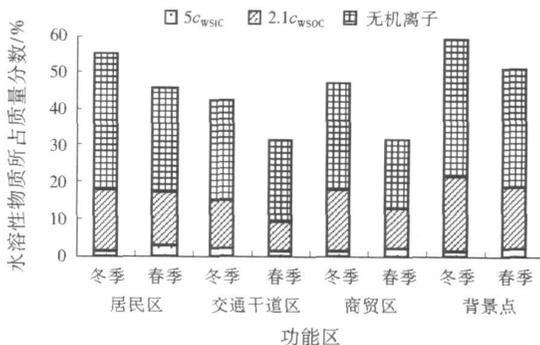


图 3 PM₁₀ 中的水溶性物质所占质量分数
Fig 3 The mass ratio of water-soluble matters in PM₁₀ of Baoji

本研究还发现, 宝鸡市冬季 PM₁₀ 中 WSOC 浓度与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度有较好的相关性 (相关系数分别为 0.67、0.75), 说明冬季 PM₁₀ 中 WSOC 的主要组分为二次有机气溶胶 (SOA), 并且 SOA 与 H_2SO_4 和 HNO_3 有着类似的形成过程^{[2]3741}。而春季 PM₁₀ 中 WSOC 浓度与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度的相关性相对较差 (相关系数分别为 0.54、0.20), 这是由于春季气温相对较高, 而风速也较大, 来自植物、微生物以及土壤直接排放的水溶性有机物增多, 导致一次有机气溶胶 (POA) 对 WSOC 的贡献较冬季显著增大, 故春季 WSOC 与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 的相关性降低。

宝鸡市 PM₁₀ 中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 浓度均与 NH_4^+ 浓度呈强线性相关 (相关系数大于 0.9), 冬季 NH_4^+ 当量浓度 (当量浓度 = 质量浓度 × 电荷数 ÷ 摩尔数) 与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 当量浓度之和的比值为 1.0, 表明冬季 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 基本被 NH_4^+ 中和, 形成 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4NO_3 , 这与 KOCAK 等^[11] 和 DUAN 等^[12] 的研究结果一致; 而春季 NH_4^+ 当量浓度与 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 当量浓度之和的比值为 0.8, 表明春季 PM₁₀ 中存在非铵类的硫酸盐和硝酸盐。

2.4 各城市大气 PM₁₀ 中水溶性物质组成比较

将宝鸡市大气 PM₁₀ 浓度以及 PM₁₀ 中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度与其他城市进行了比较 (见表 4)。由表 4 可见, 宝鸡市与北京市的 PM₁₀ 浓度、PM₁₀ 中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度最为接近。这 2 个城市都位于北方, 气候干燥, 扬尘和燃煤污染相对其他 2 个

南方城市更为严重,但冬季由于我国南北温差大,大气光氧化作用自北至南逐步增强^[13],使得南方城市如广州大气 PM₁₀ 中的 SO₄²⁻ 所占质量分数(14%)要高于北方城市(宝鸡市和北京市均为 9%)。

需要说明的是由于采样周期较短,本研究所反映的规律和现象还需进一步研究。

3 结 论

(1) 冬、春季 PM₁₀ 的平均质量浓度分别为(402 ± 100)、(410 ± 160) μg/m³,无明显季节差异,但从空间分布来看,冬季以交通干道区的 PM₁₀ 浓度为最高,而春季则以商贸区的 PM₁₀ 浓度为最高;冬、春季 WSOC 浓度最高值均出现在商贸区,最低值则分别出现在背景点和交通干道区,WSIC 浓度最高值分别出现在交通干道区和商贸区,最低值均出现在背景点。

(2) 冬季不同功能区 PM₁₀ 中的 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Cl⁻、F⁻ 浓度均高于春季,这主要与冬季采暖设备等的燃煤污染有关,且冬季温度低,NH₄N O₃ 更易以颗粒态形式存在;春季土壤扬尘较多,导致春季不同功能区 PM₁₀ 中的 Ca²⁺、K⁺ 浓度高于冬季;而冬、春季不同功能区的 Na⁺、Mg²⁺ 浓度无明显季节差异。冬、春季 PM₁₀ 中所含大多数无机离子浓度不存在显著空间差异,但不同功能区 PM₁₀ 中无机离子所占质量分数差异较明显。

(3) 冬、春季 PM₁₀ 中的水溶性物质质量浓度分别为 207、151 μg/m³,在 PM₁₀ 中所占质量分数分别为 51%、40%,其中,冬、春季水溶性物质浓度最高的分别为居民区和商贸区,这主要是由于烹调和燃煤污染所致。

(4) 冬季 PM₁₀ 中 WSOC 浓度与 SO₄²⁻、NO₃⁻ 浓度有较好的相关性,说明冬季 PM₁₀ 中 WSOC 的主要组分为 SOA,而春季 PM₁₀ 中 WSOC 浓度与 SO₄²⁻、NO₃⁻ 浓度的相关性相对较差,这是由于 POA 对 WSOC 的贡献较冬季显著增大。

(5) 宝鸡市与北京市的 PM₁₀ 浓度、PM₁₀ 中的 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺ 浓度最为接近;广州大气 PM₁₀ 中的 SO₄²⁻ 所占质量分数(14%)要高于北方城市(宝鸡市和北京市均为 9%)。

参考文献:

[1] RASTOGI N, SARIN M M. Long-term characterization of ion-

ic species in aerosols from urban and high-altitude sites in western India: role of mineral dust and anthropogenic sources [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(30): 5541-5554.

[2] HONG Yang, JIAN Zhenyu, HO S S H, et al. The chemical composition of inorganic and carbonaceous materials in PM_{2.5} in Nanjing, China [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(20).

[3] YING Wang, ZHUANG Guoshun, TANG Aohan, et al. The ion chemistry and the source of PM_{2.5} aerosol in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(21): 3771-3784.

[4] KARAR K, GUPTA A K. Source apportionment of PM₁₀ at residential and industrial sites of an urban region of Kolkata, India [J]. Atmospheric Research, 2007, 84(1): 30-41.

[5] CHEN S J, HSIEH L T, KAO M J, et al. Characteristics of particles sampled in southern Taiwan during the Asian dust storm periods in 2000 and 2001 [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(35): 5925-5934.

[6] SUN Yele, ZHUANG Guoshun, TANG Aohan, et al. Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(10).

[7] WANG Gehui, WANG Hui, YU Yajuan, et al. Chemical characterization of water-soluble components of PM₁₀ and PM_{2.5} atmospheric aerosols in five locations of Nanjing, China [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(21).

[8] LAI Senchao, ZOU Shichun, CAO Junji, et al. Characterizing ionic species in PM_{2.5} and PM₁₀ in four Pearl River Delta cities, South China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(8).

[9] KIEFFELD S, HOFFER A, KRIVACSY Z, et al. Importance of organic and black carbon in atmospheric aerosols at Mace Head, on the West Coast of Ireland [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(28): 4479-4490.

[10] XIAO Huayun, LIU Congqiang. Chemical characteristics of water-soluble components in TSP over Guiyang, SW China, 2003 [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(37): 6297-6306.

[11] KOCAK M, KUBILAY N, MIHALOPOULOS N. Ionic composition of lower tropospheric aerosols at a Northeastern Mediterranean site: implications regarding sources and long-range transport [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(14): 2067-2077.

[12] DUAN Fengkui, HE Kebin, MA Yongliang, et al. Concentration and chemical characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China: 2001-2002 [J]. Science of the Total Environment, 2006, 355(1/2/3): 264-275.

[13] WANG Gehui, KAWAMURA K, LEE S C, et al. Molecular, seasonal and spatial distributions of organic aerosols from fourteen Chinese cities [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(15): 4619-4625.

编辑:卜岩枫 (修改稿收到日期:2009-09-25)