

西安冬季大气亚微米颗粒物的化学特征及来源解析

沈振兴^{1,2}, 韩月梅¹, 周娟¹, 曹军骥^{2,1}, 李旭祥¹, 刘随心²

(1. 西安交通大学环境科学与工程系, 710049, 西安; 2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪国家重点实验室, 710075, 西安)

摘要: 为了探讨西安市冬季大气亚微米颗粒物的污染水平及化学组成, 2006年12月每天收集西安大气亚微米颗粒物($PM_{1.0}$)样品, 并对 $PM_{1.0}$ 的质量浓度及其其中的11种水溶性离子、元素碳(EC)和有机碳(OC)及8个碳组分进行了分析. 结果显示: 西安市冬季大气 $PM_{1.0}$ 的平均质量浓度为 $149.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 分析的11种阴、阳离子(Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 Br^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})的质量浓度占到 $PM_{1.0}$ 的46%, 表明水溶性组分是大气亚微米颗粒物的主要组成之一; OC的质量浓度($\rho(\text{OC}) = (23.7 \pm 10.27) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)明显高于EC的($\rho(\text{EC}) = (4.6 \pm 1.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 碳气溶胶的平均质量浓度为 $42.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占到 $PM_{1.0}$ 质量浓度的28.4%; 对8个碳组分的因子分析结果显示, 燃煤及汽油车排放、柴油车排放和生物质燃烧对碳颗粒的贡献分别为45.3%、24.2%和23.5%.

关键词: 亚微米颗粒物; 水溶性离子; 碳气溶胶

中图分类号: X131.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)11-1418-06

Chemical Composition and Source Identification of Submicron Particles over Xi'an During Winter

SHEN Zhenxing^{1,2}, HAN Yuemei¹, ZHOU Juan¹, CAO Junji¹, LI Xuxiang¹, LIU Suixin²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. SKLLQG, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: The objectives of this research were to characterize the chemical composition of submicron particles ($PM_{1.0}$) over Xi'an during winter and to identify their sources. Daily aerosol samples ($PM_{1.0}$) were collected continuously from Dec. 1st to Jan. 1st, 2006, and the concentrations of 11 water-soluble ions (Na^+ , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , F^- , Cl^- , Br^- , NO_2^- , NO_3^- , and SO_4^{2-}), and elemental carbon (EC) and organic carbon (OC) were determined in the filter samples. The mean $PM_{1.0}$ mass concentration was $149.7 \mu\text{g m}^{-3}$. The total concentrations of 11 ions were 46% of $PM_{1.0}$ mass concentration, indicating that water-soluble ions were the major components of submicron particles. The average OC and EC concentrations were $23.7 \pm 10.27 \mu\text{g m}^{-3}$ and $4.6 \pm 1.8 \mu\text{g m}^{-3}$, respectively. an important contributor to the regional carbonaceous aerosol. Factor analysis on the eight carbon fractions shows that 45.3% of total carbon in winter was attributed to coal combustion and gasoline automobile exhaust, 24.2% to diesel automobile exhaust, and 23.5% to biomass burning.

Keywords: submicron particle; water-soluble ion; carbonaceous aerosol

大气颗粒物是影响中国北方城市空气质量的首要污染物, 由于对居民健康、大气能见度和气候等方

面有着重要的影响,近年来受到国内外学者的广泛关注.研究表明:大气可吸入颗粒物可以通过呼吸作用进入人体,对呼吸系统和心血管系统有较大危害^[1];大气颗粒物能通过消光作用降低大气的能见度,影响城市交通和城市景观等.此外,悬浮在大气中的颗粒物影响区域大气辐射平衡^[2].近年来,城市大气环境研究对细颗粒物(PM_{2.5})的关注较多,而国内外对于大气亚微米颗粒物(PM_{1.0})的研究相对较少.以前的研究表明,PM_{1.0}的化学组成较PM_{2.5}和PM₁₀能更好地指示人为污染物的特征^[3-5].西安是典型的北方城市,颗粒物污染严重,现有的研究主要集中在总悬浮颗粒物(TSP)、PM₁₀和PM_{2.5}的污染水平及化学组成方面^[6-8],而对于西安大气PM_{1.0}的污染水平及其化学组分的研究相对较少.冬季是西安的高污染季节,因此,分析西安市冬季大气PM_{1.0}的污染水平及化学组分对于有效控制西安大气细粒子污染具有重要意义.

1 样品的采集与分析

1.1 大气PM_{1.0}样品的采集

2006年12月1日至12月31日,使用美国BGI公司的PM_{1.0}颗粒物采样器每天采集西安大气PM_{1.0}样品,采样器流量为5 L·min⁻¹,使用的滤膜为47 mm的Quartz滤膜.观测点设置在西安市南二环的西安交通大学化工楼顶,采样点南面为南二环路,相距约200 m,西面为兴庆路和友谊东路交汇处,相距约100 m,北面和东面为文教区和城中村居民区,所以该采样点为交通和居民区混杂点,能够较好地代表西安大气污染的平均状况.采样口距离地面15 m.采样时间为每日10:00到次日10:00,共获得样品31个.采集前、后的滤膜分别称量3次,以获得大气PM_{1.0}的质量浓度.每次称量之前,滤膜首先在恒温恒湿箱放置24 h(温度为20~23℃,湿度为35%~45%)进行平衡,然后使用精度为1 μg的天平(Mettler M3,瑞士产)称量,且每2次称量误差分别小于15 μg(空白滤膜)和20 μg(采样后的滤膜).

1.2 水溶性离子的分析

剪取1/4的Teflon滤膜放入10 mL去离子水($R>18.2\text{ M}\Omega$)和100 μL的光谱纯乙醇的混合溶液中,采用0.45 μm的过滤器过滤定容,超声萃取1 h,用Dionex-500型离子色谱仪对水溶性离子进行分析. Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺和Ca²⁺五种阳离子使用CS12A柱进行分析,淋洗液使用浓度为20 mol·L⁻¹的甲烷磺酸(MSA),流速为1 mL·min⁻¹.最

低检测线的阳离子为Na⁺($\rho(\text{Na}^+)=4.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、NH₄⁺($\rho(\text{NH}_4^+)=4.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、K⁺($\rho(\text{K}^+)=10.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、Mg²⁺($\rho(\text{Mg}^{2+})=9.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)和Ca²⁺($\rho(\text{Ca}^{2+})=9.8\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).6种阴离子F⁻、Cl⁻、Br⁻、NO₂⁻、NO₃⁻和SO₄²⁻使用的分析柱为AS11-HC和AG11-HC保护柱及ASRS抑制器,淋洗液是浓度为20 mol·L⁻¹的KOH,流速为1 mL·min⁻¹. F⁻、Cl⁻、NO₂⁻和Br⁻的最低检测线质量浓度均为0.5 μg·L⁻¹,而SO₄²⁻的最低检测线质量浓度为20 μg·L⁻¹.数据质量控制采用美国沙漠所(DRI)质量控制标准,每测定10个样品复检1个,样品的质量浓度在0.030~0.100 mg·mL⁻¹范围时,允许的标准偏差为±30%,当质量浓度在0.100~0.150 mg·mL⁻¹之间时,要求标准偏差小于20%,当样品的质量浓度大于0.150 mg·mL⁻¹时,允许的标准偏差为10%.

1.3 碳气溶胶浓度的测定

所有样品的有机碳/元素碳(OC/EC)分析均采用DRI Model 2001热光碳分析仪,该仪器采用IM-PROVE(interagency monitoring of protected visual environments)热光反射的实验方法.该方法把OC分为4个组分,分别在120℃(OC1)、250℃(OC2)、450℃(OC3)和550℃(OC4)温度下进行监测;EC分为4个组分,分别于550℃(EC1)、700℃(EC2)和800℃(EC3)下检测.该仪器对OC和EC的检测线质量浓度低于1 μg·m⁻³,实验质量控制采取每10个样品进行复检1次,重复实验的偏差应小于10%.详细的分析原理和质量控制见文献^[7].

2 结果与讨论

2.1 冬季PM_{1.0}的污染水平

2006年冬季西安大气PM_{1.0}的质量浓度平均值为149.7 μg·m⁻³,最高质量浓度值达到301.6 μg·m⁻³,最低质量浓度值为51.1 μg·m⁻³.PM_{1.0}质量浓度的日变化如图1所示,31个观测日的质量浓度值均超过了美国空气质量标准中PM_{2.5}的24 h平均质量浓度值(35 μg·m⁻³)^[9],高于香港冬季大气PM_{1.0}的质量浓度值(40.9 μg·m⁻³)^[4],也高于台北2个观测站点Chung-Shan($\rho(\text{PM}_{1.0})=14.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和Da-Tung($\rho(\text{PM}_{1.0})=37.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的PM_{1.0}质量浓度值^[5],表明西安冬季大气PM_{1.0}污染较为严重.

2.2 水溶性组分的化学特征

分析结果显示,2006年冬季大气 $\text{PM}_{1.0}$ 中总的水溶性组分质量浓度为 $68.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占到 $\text{PM}_{1.0}$ 质量浓度的 46%, 表明水溶性组分是西安大气 $\text{PM}_{1.0}$ 的主要组分之一。测定的 5 种阳离子中, 质量浓度大小的依次排序为 $\rho(\text{NH}_4^+) > \rho(\text{Na}^+) > \rho(\text{Ca}^{2+}) > \rho(\text{K}^+) > \rho(\text{Mg}^{2+})$ 。其中 NH_4^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 K^+ 的平均质量浓度超过了 $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别为 6.0 、 6.8 、 5.2 和 $1.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其在总的水溶性组分中的比例分别为 9.8%、9.2%、8.1% 和 2.4%。在 6 种阴离子中, 测定的 NO_2^- 和 Br^- 质量浓度低于检测线, 这里不作讨论。另 4 种阴离子质量浓度大小的依次排序为 $\rho(\text{SO}_4^{2-}) > \rho(\text{NO}_3^-) > \rho(\text{Cl}^-) > \rho(\text{F}^-)$, 其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- 的质量

浓度相对较高, 分别为 27.2 、 12.7 和 $7.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 在总离子浓度中的份额分别为 40.0%、17.9% 和 10.1%。综上所述, Na^+ 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 为水溶性离子的主要组分, 其质量浓度占到水溶性组分的 95.3%。主要水溶性组分的质量浓度序列如图 1 所示。

分析了不同离子间的相关性, 结果如表 1 所示, 阳离子中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的相关性较高, 达到 0.9, 表明其可能为相同来源, Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的摩尔比可以用来指示其来源。西安处于西北干旱区, 春季常受到来自西北沙漠和邻近地区粉尘的影响。研究表明, 北方沙漠和黄土表土中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的摩尔比为 0.15^[10], 分析西安 2006 年冬季大气中的摩尔比 $x(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+})$, 均值为 0.2, 明显高于中国沙漠和

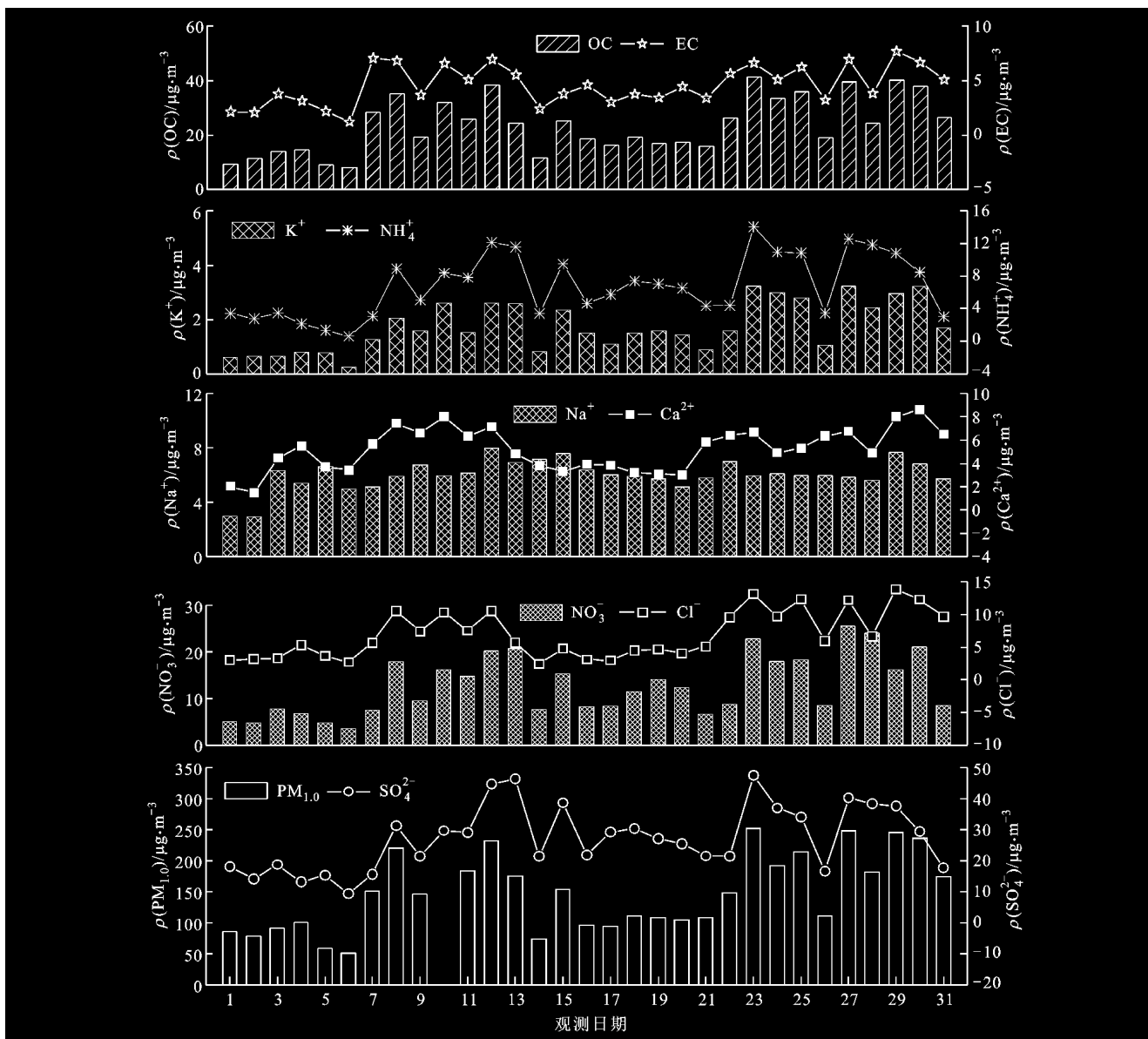


图1 西安冬季(12月份)大气 $\text{PM}_{1.0}$ 及其化学组分的质量浓度序列

黄土的特征值,表明西安冬季大气亚微米颗粒物 Mg^{2+} 相对富集,推测可能的原因与冬季采暖的燃烧过程有关。以前的研究表明,水溶性的 K 主要来源于生物质燃烧^[11],故西安 $\text{PM}_{1.0}$ 中水溶性 K 主要来源于郊区居民生活中使用秸秆作为燃料的燃烧(如做饭)过程。内陆城市大气颗粒物中的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是典型的二次气溶胶,主要来源于化石燃料(煤和石油等)燃烧产生的 SO_2 和 NO_x 在大气中的转化过程。 NH_4^+ 主要来源于牲畜喂养、农业施肥和垃圾不及时清运导致的有机质降解等过程产生的 NH_3 在大气中的转化。 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 与 NO_3^- 均有较高的相关性(0.98, 0.93),通过假定这 3 种离子以硫酸氨和硝酸氨或硫酸氢氨和硝酸氨的形式存在,根据硝酸和硫酸根浓度分别计算出 2 种不同存在形式下所需氨的浓度,然后与实际观测的氨浓度进行对比,推断这 3 种离子在亚微米颗粒物中以硫酸氢氨及硝酸氨的形式存在。

大气颗粒物的酸碱性对降水的 pH 值有很重要的影响,它可能引起降水的酸化,也可能对降水的酸性起到中和作用。本文通过阴阳离子平衡计算来分析西安冬季亚微米颗粒物的酸碱性。阳离子当量(C_E)和阴离子当量(A_E)的离子平衡式分别如下

$$C_E = \frac{\rho(\text{Na}^+)}{23} + \frac{\rho(\text{NH}_4^+)}{18} + \frac{\rho(\text{K}^+)}{39} + \frac{\rho(\text{Mg}^{2+})}{12} + \frac{\rho(\text{Ca}^{2+})}{20} \quad (1)$$

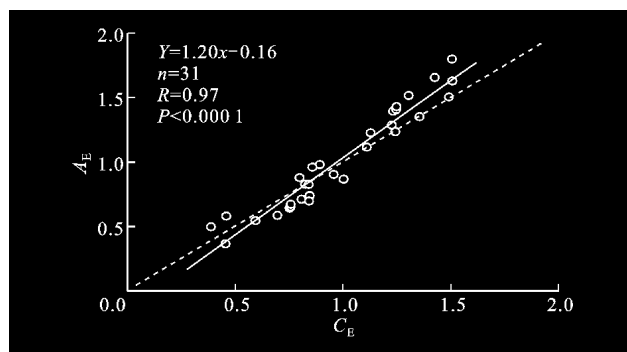
$$A_E = \frac{\rho(\text{SO}_4^{2-})}{48} + \frac{\rho(\text{NO}_3^-)}{62} + \frac{\rho(\text{Cl}^-)}{35.5} +$$

表 1 不同化学组分之间的相关性分析结果

	R											
	$\text{PM}_{1.0}$	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	OC	EC
$\text{PM}_{1.0}$	1.00	0.40	0.85	0.93	0.78	0.82	0.83	0.94	0.84	0.79	0.96	0.88
Na^+		1.00	0.40	0.44	0.62	0.49	0.39	0.37	0.31	0.46	0.42	0.41
NH_4^+			1.00	0.92	0.45	0.49	0.67	0.71	0.93	0.98	0.79	0.66
K^+				1.00	0.62	0.63	0.74	0.85	0.88	0.88	0.89	0.78
Mg^{2+}					1.00	0.90	0.75	0.77	0.50	0.43	0.73	0.74
Ca^{2+}						1.00	0.77	0.83	0.58	0.42	0.77	0.77
F^-							1.00	0.85	0.63	0.64	0.78	0.69
Cl^-								1.00	0.70	0.63	0.93	0.85
NO_3^-									1.00	0.87	0.72	0.62
SO_4^{2-}										1.00	0.67	0.62
OC											1.00	0.94
EC												1.00

$$\frac{\rho(\text{Br}^-)}{80} + \frac{\rho(\text{F}^-)}{19} \quad (2)$$

阴阳离子平衡分析如图 2 所示,阴阳离子的当量有较高的相关性($R=0.97$),表明本文所分析的离子是 $\text{PM}_{1.0}$ 中水溶性组分的主要组成物,没有重要的离子遗漏。相关性方程的斜率 K 为 1.20,表明大气 $\text{PM}_{1.0}$ 中阳离子相对亏损。同时计算了样品的 A_E/C_E 值,其均值为 1.05,结合阴阳离子相关性分析,进一步说明西安市冬季大气亚微米颗粒物略微偏酸性。

图 2 $\text{PM}_{1.0}$ 中阴阳离子的平衡

2.3 OC 与 EC 的质量浓度及来源指示

$\text{PM}_{1.0}$ 中 OC 和 EC 的质量浓度变化如图 1 所示。西安冬季 $\text{PM}_{1.0}$ 中 OC 和 EC 的平均质量浓度分别为 $23.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $4.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, OC 和 EC 分别占 $\text{PM}_{1.0}$ 的 15.8% 和 3.1%。碳气溶胶的浓度水平可以与香港和台湾站点的观测结果对比。中国南方城市香港冬季 $\text{PM}_{1.0}$ 中 OC 和 EC 的质量浓度分

别为 $8.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $9.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 分别占到 $\text{PM}_{1.0}$ 质量浓度的 19.4% 和 26.4%。台北观测站点 Chung-Shan 冬季 $\text{PM}_{1.0}$ 中 OC 的质量浓度为 $3.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, EC 的质量浓度为 $1.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可以看出, 西安冬季大气 $\text{PM}_{1.0}$ 中 OC 的含量较高, 香港亚微米颗粒物中 EC 含量相对较高^[4], 而台北城市背景点 Chung-Shan 冬季的 OC 和 EC 含量相对西安和香港均较低。

分析 OC 和 EC 之间的关系, 可以区分碳气溶胶粒子的来源, 若 OC 和 EC 相关性较好, 表明其来自相关污染源, 即 OC 和 EC 的相关性分析可以在一定程度上对碳气溶胶的来源进行定性判别。西安冬季亚微米颗粒物中 OC 和 EC 的相关性分析如图 3 所示, 较高的相关系数 ($R=0.93$) 表明 OC 和 EC 为相同排放源排放。大气碳颗粒物一般有 3 个来源^[12-13], 即燃煤、机动车和生物质燃烧。Watson^[14] 研究了不同排放源的 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 比率, 发现燃煤、机动车和生物质燃烧排放的一次颗粒物中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 的比率分别为 2.7、1.1 和 9.0。西安大气 $\text{PM}_{1.0}$ 中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 的比率平均值为 5.2, 变化范围在 3.7~6.8 之间。大气中 OC 的来源包括排放源的一次排放和气态向固态颗粒物的转化, 而 EC 均为一次排放产生的^[7]。如果不考虑二次转化过程对 OC 的贡献, 较高的 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 指示生物质燃烧对西安大气碳颗粒物有较大的贡献。香港冬季大气中 $\rho(\text{OC})/\rho(\text{EC})$ 的比率为 1.1, 较好地指示了机动车的来源。同时分析了 K 离子(代表生物质燃烧源)、硫酸根离子(代表燃煤源)和硝酸根离子(代表机动车源)与 OC 的相关性(见表 1), OC 与 K 离子的相关性最高, 相关系数达到 0.89, 表明生物质燃烧对西安冬季大气亚微米颗粒物中碳气溶胶有重要的贡献。此外, OC 与硫酸根和硝酸根的相关系数分别为 0.75 和 0.73, 表明燃煤和机动车排放也是大气碳气溶胶的重要来源。

热光分析法(TOR)的优点在于其可以获得碳气溶胶中 8 个碳组分的含量, 根据这 8 个碳组分的含量可以对碳气溶胶的来源进行解析^[15]。本文使用 SPSS 软件对西安冬季大气 $\text{PM}_{1.0}$ 中碳气溶胶的来源进行解析。利用因子分析法对 8 个碳组分的分析结果见表 2, 共解析出 3 个因子, 这 3 个因子可以解释碳气溶胶组成的 93%, 其中因子 f_1 、 f_2 、 f_3 的贡献分别为 45.3%、24.2% 和 23.5%。因子 f_1 与 OC1、OC2、OC3 和 OC4 有较高的相关性, 可以认为其代表了燃煤及汽油车排放^[15-16], 因子 f_2 与 EC2

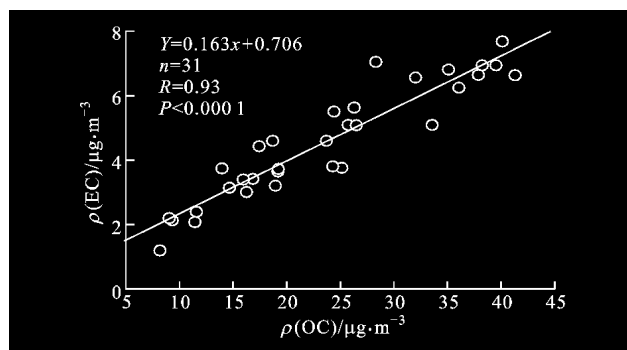


图3 OC与EC的相关性分析

和 EC3 相关性很高, 代表了柴油车的排放^[15-16], 因子 f_3 与 OP 和 EC1 的相关性较高, 代表了生物质燃烧的排放^[15]。本文对西安冬季大气 $\text{PM}_{1.0}$ 中碳气溶胶的来源解析结果与 Cao 对冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳颗粒来源的解析结果一致^[15]。

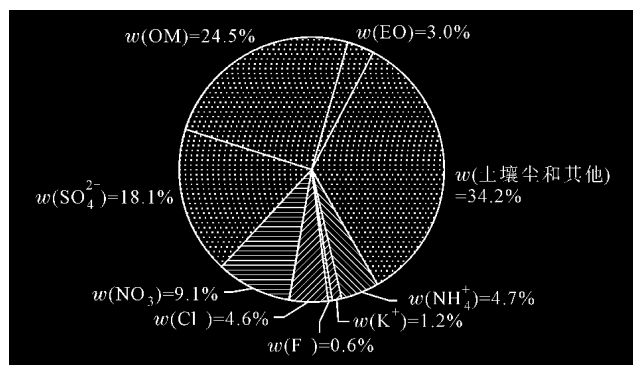
表2 8个碳组分的因子分析结果

组分	f_1	f_2	f_3
OC1	0.761	0.233	0.344
OC2	0.813	0.197	0.438
OC3	0.901	0.186	0.367
OC4	0.911	0.158	0.302
EC1	0.63	0.147	0.76
EC2	0.317	0.906	0.106
EC3	0.066	0.967	0.086
OP	0.487	0.103	0.864
因子的贡献	45.3%	24.2%	23.5%

大气气溶胶中的有机物(OM)可以用 OC 的质量浓度的 1.6 倍来进行估算^[7], 总的碳气溶胶浓度是有机物的浓度加上元素碳的浓度。计算结果显示, 冬季西安大气 $\text{PM}_{1.0}$ 中碳气溶胶的质量浓度为 $42.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 占到 $\text{PM}_{1.0}$ 质量浓度的 28.4%, 表明碳气溶胶是大气亚微米颗粒物的另一重要组分。

2.4 $\text{PM}_{1.0}$ 的物质平衡

对西安冬季大气 $\text{PM}_{1.0}$ 的物质平衡进行了计算, 结果如图 4 所示。碳气溶胶、硫酸盐和硝酸盐是大气 $\text{PM}_{1.0}$ 的 3 个主要组分, 占到 $\text{PM}_{1.0}$ 质量浓度的 27.5%、18.1% 和 9.1%。此外, 由于本次研究未分析 $\text{PM}_{1.0}$ 的元素组成, 所以对土壤尘的含量未作估计, 此外对部分微量成分未进行监测, 估算的土壤尘和其他未知组分约占到 $\text{PM}_{1.0}$ 质量浓度的 34.2%。

图4 PM_{1.0}的物质平衡

3 结 论

通过对西安冬季大气 PM_{1.0} 进行为期 1 个月的连续观测,获得的主要结论如下。

(1) 西安冬季大气亚微米颗粒物污染严重,观测期内 PM_{1.0} 的平均质量浓度为 $149.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,观测日的浓度均超过了美国 EPA 的日 PM_{2.5} 标准。

(2) 化学分析显示,碳气溶胶、硫酸盐和硝酸盐是 PM_{1.0} 的主要化学组成,占到了 PM_{1.0} 质量浓度的 54.7%。因子分析对 8 个碳组分的解析结果显示,燃煤及汽油车排放、柴油车排放和生物质燃烧对碳颗粒的贡献分别为 45.3%、24.2% 和 23.5%。

参考文献:

- [1] SHWARTZ J, DOCKERY D W, NEAS L M, et al. Is daily mortality associated with specially the particles? [J]. Journal of Air and Waste Management Association, 1996, 46(5): 927-939.
- [2] 王明星,张仁健.大气气溶胶研究的前沿问题 [J]. 气候与环境研究,2001,6(1):119-124.
WANG Mingxing, ZHANG Renjian. Frontier of atmospheric aerosols researches [J]. Climatic and Environmental Research, 2001,6(1):119-124.
- [3] LUNDGREN D A, HLAING D N, RICH T A, et al. PM₁₀/PM_{2.5}/PM₁ data from a trichotomous sampler [J]. Aerosol Science Technology, 1996, 25(3): 353-357.
- [4] LEE Shuncheng, CHENG Yan, HO K F, et al. PM_{1.0} and PM_{2.5} characteristics in the roadside environment of Hong Kong [J]. Aerosol Science and Technology, 2006, 40(4):157-165.
- [5] LI Chihshan, LIN Chiaho. PM₁/PM_{2.5}/PM₁₀ characteristics in the urban atmosphere of Taipei [J]. Aerosol Science and Technology, 2002, 36(2): 469-473.
- [6] ZHANG Xiaoye, CAO Junji, LI Lianmeng, et al. Characterization of atmospheric aerosol over Xi'an in the south margin of loesso plateau China [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(26): 4189-4199.

- [7] CAO Junji, LEE Shuncheng, HO K F, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River delta region, China during 2001 winter period [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(8): 1451-1460.
- [8] 沈振兴,李丽珍,杜娜,等. 西安春季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子的组成及来源 [J]. 生态环境, 2007, 16(4): 1193-1198.
SHEN Zhenxing, LI Lizhen, DU Na, et al. Mass concentration and water-soluble ions in spring aerosol (PM_{2.5}) at Xi'an [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(4): 1193-1198.
- [9] EPA. United States code of federal regulations, title 40, subchapter C air programs: national primary and secondary ambient air quality standards [S/OL]. [2006-07-06]. <http://www.epa.gov>.
- [10] OSADA K, KIDO M, NISHITA C, et al. Changes in ionic constituents of free tropospheric aerosol particles obtained at Mt. Norikura (2772 m a. s. l.), central Japan during the shurin period in 2000 [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(35): 5469-5477.
- [11] ANDREA E M O. Soot carbon and excess fine potassium: long-range transport of combustion-derived aerosols [J]. Science, 1983, 220(6): 1148-1151.
- [12] TURPIN B J, LIM H J. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revising common assumptions for estimating organic mass [J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 35(6): 602-610.
- [13] STREETS D G, SHALINI G T, STEPHANIE W Q, et al. Black carbon emissions in China [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(26): 4281-4296.
- [14] WATSON J G, CHOW J C, HOUCK J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in northwestern Colorado during 1995 [J]. Chemosphere, 2001, 43(8): 1141-1151.
- [15] 曹军骥,李顺诚,李杨,等. 2003 年秋冬季西安大气中有机碳和元素碳的理化特征及其来源解析 [J]. 自然科学进展, 2005, 12(15): 1460-1466.
CAO Junji, LI Shuncheng, LI Yang, et al. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China [J]. Progress in Natural Sciences, 2005, 12(15): 1460-1466.
- [16] WATSON J G, CHOW J C, LOWENTHAL D H, et al. Differences in the carbon composition of source profiles for diesel- and gasoline-powered vehicles [J]. Atmospheric Environment, 1994, 28(15): 2493-2505.

(编辑 王焕雪)