

# 西安市秋季大气颗粒物散射特征及其影响因素

周雅清<sup>1,2</sup>, 曹军骥<sup>1,3</sup>, 王启元<sup>1</sup>, 刘随心<sup>1</sup>, 张婷<sup>1</sup>

1. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710049

**摘要** 为研究污染条件下西安市秋季大气颗粒物的散射特征及其影响因素, 于2012年11月监测大气颗粒物散射系数并采集PM<sub>2.5</sub>样品。探讨了大气颗粒物的散射日变化特征, 通过实验分析PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子(Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)和含碳物质(有机碳和元素碳)的污染水平, 并讨论它们的来源及对散射系数的影响。结果表明, 颗粒物的散射系数均值为(579±387) Mm<sup>-1</sup>, 夜间高日间低。PM<sub>2.5</sub>质量浓度与散射系数呈现出较强的线性关系(相关系数为0.85), 通过回归方程得到PM<sub>2.5</sub>散射效率为3.09 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>。在PM<sub>2.5</sub>化学组分中, 有机物对消光系数的贡献最大, 占52.3%; 其次是NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>和(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 贡献率分别为16.2%和13.7%。

**关键词** 散射系数; PM<sub>2.5</sub>化学组分; 能见度; 消光系数

**中图分类号** X513

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.06.005

## Characteristics of aerosol scattering coefficient in autumn Xi'an, China

ZHOU Yaqing<sup>1,2</sup>, CAO Junji<sup>1,3</sup>, WANG Qiyuan<sup>1</sup>, LIU Suixin<sup>1</sup>, ZHANG Ting<sup>1</sup>

1. Key Lab of Aerosol Chemistry & Physics; Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Global Environmental Change, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

**Abstract** To investigate the impact of PM<sub>2.5</sub> chemical species on light scattering in autumn Xi'an, light scattering coefficient and PM<sub>2.5</sub> samples were collected daily in November 2012 at the Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences. The PM<sub>2.5</sub> water-soluble ionic species (Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) and carbonaceous (organic carbon and elemental carbon) were analyzed to characterize their impacts on the light scattering coefficient. The average PM<sub>2.5</sub> during the sampling period was (195.4±83.5) μg·m<sup>-3</sup>. The average light scattering coefficient was (579±387) Mm<sup>-1</sup>, with high value at night and low value in the daytime. The concentration of PM<sub>2.5</sub> showed a strong correlation with light scattering coefficient, with a correlation coefficient of 0.85. The estimated light scattering efficiency of PM<sub>2.5</sub> was 3.09 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>. Among the PM<sub>2.5</sub> chemical species, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and OC had a strong correlation with light scattering coefficient, suggesting that they are the main contribution sources for light extinction coefficient. The revised IMPROVE equation was used to estimate chemical extinction (*b<sub>ext</sub>*), which was lower than measured *b<sub>sp,wet</sub>*. Among the PM<sub>2.5</sub> chemical species, organics had the largest contribution to light extinction, accounting for 52.3%, followed by NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> (16.2%) and (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (13.7%).

**Keywords** light scattering coefficient; PM<sub>2.5</sub> chemical species; visibility; light extinction coefficients

收稿日期: 2015-02-09; 2015-02-24

作者简介: 周雅清, 硕士研究生, 研究方向为PM<sub>2.5</sub>污染及其光学特征, 电子信箱: zhoyuq@ieecas.cn; 曹军骥(通信作者), 研究员, 研究方向为气溶胶与环境、PM<sub>2.5</sub>研究与控制, 电子信箱: cao@loess.llqg.ac.cn

引用格式: 周雅清, 曹军骥, 王启元, 等. 西安市秋季大气颗粒物散射特征及其影响因素[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 37-41.

随着PM<sub>2.5</sub>的关注度越来越高,对于公众来说,能见度是能够用肉眼直接辨别大气污染的显著标识<sup>[1]</sup>。能见度降低主要由大气消光作用的增强造成。消光系数是由颗粒物的散射和吸收及气体的散射和吸收组成,而颗粒物的散射作用占总消光作用的绝大部分<sup>[2]</sup>。

大气气溶胶的浓度、粒径分布和化学组成均会影响大气消光作用,从而影响能见度的变化<sup>[3]</sup>。研究发现,PM<sub>2.5</sub>中的硫酸盐、硝酸盐、有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC)等组分对能见度的影响最为显著<sup>[4]</sup>。此外,气象条件尤其是相对湿度(RH)也是影响能见度的一个重要因素<sup>[5]</sup>,空气中的水汽使大气气溶胶粒子吸湿增长,改变其光学特性进而影响能见度的高低<sup>[6]</sup>。

西安是中国西北地区最大的城市之一,地处关中盆地,空气质量较差。由于气候的差异使西安冬夏季的大气污染状况有显著差别,在秋冬季污染尤为严重。本研究以中国科学院地球环境研究所作为观测点,获取PM<sub>2.5</sub>水溶性离子质量浓度、OC和EC质量浓度、颗粒物散射系数等数据,了解西安市2012年秋季大气细颗粒物的化学组分特征及其对散射系数的影响,并使用IMPROVE公式解析PM<sub>2.5</sub>主要成分对消光作用的贡献。

## 1 样品采集与分析

### 1.1 PM<sub>2.5</sub>样品采集与分析

此次实验使用配有2.5 μm切割头的MiniVol便携式微量流量采样器(美国Airmetrics公司),于2012年11月1—31日采集西安市大气中PM<sub>2.5</sub>样品。采样使用直径47 mm的石英滤膜进行24 h采集,时间为每日上午10:00至次日上午10:00,采样后滤膜保存于-4℃冰箱中,以防止颗粒物中化学挥发。采样点设置在中国科学院地球环境研究所办公楼楼顶,距地面约15 m,周围无明显工业及其他大气污染排放源,无建筑物遮挡,视野较为开阔,是较为理想的大气采样点<sup>[7]</sup>。

将空白石英滤膜在800℃的马弗炉中持续灼烧3 h,去除滤膜上的含碳物质。使用电子微量天平(瑞士Mettler仪器公司,M3)对采样前后滤膜进行称重,获取PM<sub>2.5</sub>质量浓度,称重前滤膜均于恒温恒湿箱中放置24 h。

使用热-光碳分析仪(美国Atmoslytic公司,DRI 2001)分析PM<sub>2.5</sub>样品中的OC和EC,详见文献[8]。水溶性无机离子则采用Dionex-600型离子色谱仪分析(美国Dionex公司)<sup>[9]</sup>。

### 1.2 散射系数观测

使用积分浊度仪(Aurora-1000 single wavelength integrating nephelometer)对大气中颗粒物的散射系数进行实时监测,时间分辨率为5 min。该仪器波长为525 nm,进气流量5 L·min<sup>-1</sup>,测量范围为<0.3~20000 Mm<sup>-1</sup>,每6 h进行一次零点检查,定期使用R134a气体进行跨度标定。其工作原理是空气通过进气管进入测量室,在测量室内样品空气对光源入射光产生散射,使光电倍增管检测到正比于入射光强的散射光的电信号。测量室内安装隔板,仅可容纳一狭小锥体内

的散射光到达光电倍增管(散射角在10°~171°),可有效减小多次散射杂散光的影响。研究表明<sup>[10,11]</sup>,当湿度较大时,散射系数将会呈现明显的增长趋势,因此通过内部温湿度传感器控制内部加热系统使仪器内腔室中相对湿度保持在60%以下,避免测量过程中湿度过大对结果产生影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒物的散射系数特征

经统计,采样期间西安市颗粒物散射系数平均值为(579±387) Mm<sup>-1</sup>,变化范围大,最高值出现在11月22日,为1899 Mm<sup>-1</sup>,最低值出现在11月25日,为55 Mm<sup>-1</sup>。与国内其他城市研究结果相比,西安市颗粒物散射系数高于北京<sup>[12]</sup>(451.7 Mm<sup>-1</sup>)、广州<sup>[13]</sup>(473 Mm<sup>-1</sup>)、杭州<sup>[14]</sup>(432.7 Mm<sup>-1</sup>)和成都<sup>[15]</sup>(488 Mm<sup>-1</sup>),表明西安市秋季大气污染较为严重。

为了解颗粒物的光学变化特征,详细分析了采样期间颗粒物散射系数的日内变化(图1)。由图1可知,晚22:00—01:00颗粒物散射系数较高(718 Mm<sup>-1</sup>),此时夜晚大气边界层低,晚高峰期机动车排放及炊烟等人为活动排放的污染物得到积累,造成散射系数的持续增加。随后颗粒物散射系数开始下降,直至早07:00左右达到低谷值(574 Mm<sup>-1</sup>),这是由深夜人为活动较少、污染物排放减少及颗粒物干沉降造成。随后,受到08:00—09:00早高峰机动车排放的影响,颗粒物散射系数上升到小峰值(600 Mm<sup>-1</sup>)。从09:00开始,颗粒物散射系数逐渐下降,于15:00—17:00达到全天最低值419 Mm<sup>-1</sup>。这主要是由于午后大气边界层升高,大气交换增强使颗粒物扩散速度加强,使散射系数迅速降低。傍晚17:00以后,颗粒物散射系数逐渐回升。颗粒物散射系数的这种变化趋势具有典型的城市日内变化特征,与大气边界层高度及人为活动密切相关。

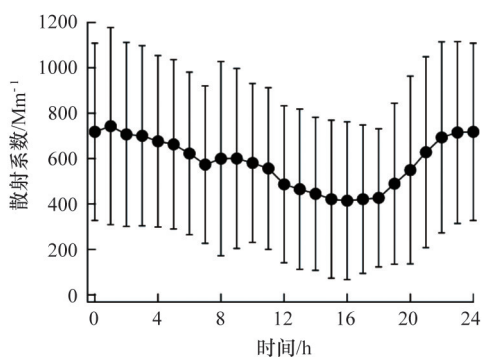


图1 采样期间散射系数日内变化  
Fig. 1 Diurnal variations of hourly averaged light scattering during the sampling period

### 2.2 PM<sub>2.5</sub>的化学组分特征

观测期间PM<sub>2.5</sub>质量浓度变化范围为(52.0~378.0) μg·m<sup>-3</sup>,平均质量浓度为(195.4 ± 83.5) μg·m<sup>-3</sup>,是中国《GB 3095—2012 环境空气质量标准》中PM<sub>2.5</sub>日均二级标准(75 μg·m<sup>-3</sup>)

的2.6倍左右,采样期间西安市大气细颗粒物污染较严重。表1中统计了采样期间PM<sub>2.5</sub>的日均质量浓度的变化情况,可以看到,西安市水溶性离子是PM<sub>2.5</sub>中的重要组成成分,总水溶性离子的质量浓度为55.0 μg·m<sup>-3</sup>,占PM<sub>2.5</sub>质量浓度的28%,其中阴离子质量浓度为41.9 μg·m<sup>-3</sup>,阳离子质量浓度为13.2 μg·m<sup>-3</sup>。所测4种阴离子中,质量浓度由大到小依次为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup>及F<sup>-</sup>,其中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>含量最高,浓度为15.4 μg·m<sup>-3</sup>,占总水溶性离子浓度的28%。研究表明,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要通过NO<sub>x</sub>光化学作用转化而来,机动车排放则为城市地区NO<sub>x</sub>的主要来源<sup>[6]</sup>。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>主要来源于化石燃料燃烧产生的SO<sub>2</sub>氧化反应、一些生物排放气体转化及海盐,其质量浓度为13.5 μg·m<sup>-3</sup>,占总水溶性离子浓度的25%。在所测5种阳离子中,质量浓度由大到小依次为NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup>和Mg<sup>2+</sup>,其中含量最高的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>质量浓度为7.5 μg·m<sup>-3</sup>,占总水溶性离子浓度的14%,它主要来源于NH<sub>3</sub>的转化。通过计算NH<sub>4</sub><sup>+</sup>与NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>与SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>相关性可知,它们之间均具有非常强的相关性(R<sup>2</sup>=0.93、0.94),由此推断这3种离子的主要存在的方式为(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>及NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>。

表1 西安市PM<sub>2.5</sub>、碳气溶胶及水溶性离子的质量浓度  
Table 1 Concentrations of PM<sub>2.5</sub>, water-soluble ions, and carbonaceous aerosol in Xi'an

测量量	质量浓度/ (μg·m <sup>-3</sup> )	标准偏差/ (μg·m <sup>-3</sup> )	占PM <sub>2.5</sub> /%
PM <sub>2.5</sub>	195.4	83.5	100
OC	41.8	16.9	21.4
EC	9.6	4.3	4.9
总水溶性离子	54.1	32.7	27.7
阳离子	12.2	7.9	6.3
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	7.5	5.4	3.8
Na <sup>+</sup>	2.2	1.3	1.1
K <sup>+</sup>	1.8	1.3	0.9
Ca <sup>2+</sup>	1.4	1.0	0.7
Mg <sup>2+</sup>	0.2	0.2	0.1
阴离子	41.9	25.1	21.4
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	15.4	10.7	7.9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	13.5	9.2	6.9
Cl <sup>-</sup>	12.2	7.1	6.3
F <sup>-</sup>	0.7	0.3	0.4

EC是一种黑色、高聚合、在400℃以下(或者340℃纯氧环境下)很难被氧化的物质<sup>[7]</sup>,主要来源于含碳物质的不完全燃烧,在大气中化学性质相对较为稳定,而OC既有一次排放源(primary OC, POC)也有通过气-粒转化而来的二次有机碳(secondary OC, SOC)<sup>[18,19]</sup>。OC和EC是PM<sub>2.5</sub>中的重要组成部

分,采样期间OC和EC的质量浓度分别为41.8、9.6 μg·m<sup>-3</sup>(表1),分别占PM<sub>2.5</sub>质量浓度的21%和5%。为研究OC与EC的来源,常用OC/EC是否大于2来判断二次气溶胶的产生<sup>[20]</sup>。此外,不同来源的污染物也会导致OC/EC比值的不同,例如煤燃烧(2.7)、机动车排放(1.1)、生物质燃烧(9.0)<sup>[21]</sup>。本研究中,OC/EC比值的范围变化为2.7~7.9,平均值为4.6,说明OC、EC主要来源于煤燃烧和生物质燃烧,并且除一次排放外,还存在二次有机碳气溶胶的产生。使用最小比值法<sup>[22]</sup>计算得到二次有机碳气溶胶质量浓度为16.3 μg·m<sup>-3</sup>,占OC质量浓度的39%,表明二次有机气溶胶对西安市秋季大气有重要贡献。

### 2.3 PM<sub>2.5</sub>与散射系数的关系

PM<sub>2.5</sub>的散射效率(单位:m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>)是PM<sub>2.5</sub>光学性质的一个重要参数,关系到散射性质与PM<sub>2.5</sub>质量浓度之间的转化,与PM<sub>2.5</sub>的化学组分、粒径分布、形态等密切相关<sup>[23]</sup>。本研究中,颗粒物的散射效率通过颗粒物的散射系数与PM<sub>2.5</sub>的质量浓度计算得来。图2为颗粒物散射系数与PM<sub>2.5</sub>的关系,其中散射系数与PM<sub>2.5</sub>质量浓度的相关系数达到0.85,表明PM<sub>2.5</sub>是造成大气颗粒物散光的主要物质。在该回归方程中,其斜率3.09 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>为PM<sub>2.5</sub>散射效率的平均值,低于北京<sup>[12]</sup>(5.55 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>)和广州<sup>[24]</sup>(4.2 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>)。较低的PM<sub>2.5</sub>散射效率可能是受到气溶胶化学组分与粒径等因素影响,仍需要进一步的研究。

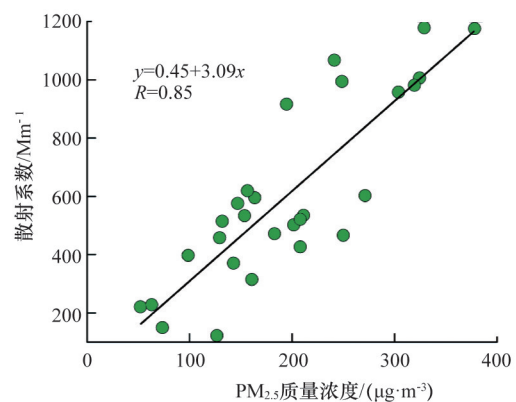


图2 散射系数与PM<sub>2.5</sub>的关系

Fig. 2 Relationship between light scattering coefficient and PM<sub>2.5</sub>

PM<sub>2.5</sub>的散射系数与其化学组分密切相关。如表2所示,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、OC与散射系数相关性较强,相关系数分别为0.90、0.92、0.85,说明有机物及二次气溶胶对散射系数的贡献较大。K<sup>+</sup>(R=0.92)和Cl<sup>-</sup>(R=0.72)与散射系数亦呈现出良好的相关性,由于K<sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>常用来指示生物质燃烧,表明生物质燃烧对散射系数也具有一定的贡献。

为进一步定量分析PM<sub>2.5</sub>中主要化学组分对颗粒物散射系数的贡献,使用IMPROVE方程<sup>[25]</sup>重建各个化学组分与散射系数的关系<sup>[26]</sup>。重建大气消光系数( $b_{ext}$ )为

表2 西安市散射系数与PM<sub>2.5</sub>化学组分的相关性分析

Table 2 Correlation matrix of light scattering coefficient vs. PM<sub>2.5</sub> chemical species in Xi'an

	散射系数	PM <sub>2.5</sub>	Na <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	OC	EC
散射系数	1.00												
PM <sub>2.5</sub>	0.81	1.00											
Na <sup>+</sup>	0.28	0.54	1.00										
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.92	0.78	0.35	1.00									
K <sup>+</sup>	0.92	0.79	0.31	0.91	1.00								
Mg <sup>2+</sup>	0.46	0.61	0.75	0.42	0.44	1.00							
Ca <sup>2+</sup>	0.58	0.47	0.31	0.49	0.56	0.76	1.00						
F <sup>-</sup>	0.64	0.63	0.51	0.57	0.61	0.68	0.70	1.00					
Cl <sup>-</sup>	0.72	0.80	0.56	0.67	0.82	0.52	0.36	0.56	1.00				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.89	0.68	0.21	0.97	0.86	0.25	0.38	0.45	0.59	1.00			
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.90	0.80	0.44	0.97	0.94	0.51	0.56	0.62	0.73	0.92	1.00		
OC	0.85	0.85	0.54	0.75	0.80	0.66	0.64	0.78	0.80	0.64	0.78	1.00	
EC	0.76	0.65	0.12	0.55	0.61	0.36	0.54	0.57	0.56	0.51	0.51	0.80	1.00

$$\begin{aligned}
 b_{\text{ext}} \approx & 2.2f_s(\text{RH}) \cdot [(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]_{\text{Small}} + 4.8f_l(\text{RH}) \cdot [(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]_{\text{Large}} \\
 & + 2.4f_s(\text{RH}) \cdot [\text{NH}_4\text{NO}_3]_{\text{Small}} + 5.1f_l(\text{RH}) \cdot [\text{NH}_4\text{NO}_3]_{\text{Large}} \\
 & + 2.8[\text{OM}]_{\text{Small}} + 6.1[\text{OM}]_{\text{Large}} + 10[\text{EC}] + [\text{FS}] \quad (1) \\
 [X]_{\text{Large}} = & [X]_{\text{Total}} / (20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}), \quad [X]_{\text{Total}} < 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \\
 [X]_{\text{Large}} = & [X]_{\text{Total}}, \quad [X]_{\text{Total}} \geq 20 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3} \\
 [X]_{\text{Small}} = & [X]_{\text{Total}} - [X]_{\text{Large}}
 \end{aligned}$$

式中,  $X$  可为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$  或  $\text{OM}$ ;  $f_s(\text{RH})$  及  $f_l(\text{RH})$  分别为大颗粒、小颗粒<sup>[27]</sup>  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{NO}_3$  及  $\text{OM}$  的相对湿度增长因子, 使用日均相对湿度 ( $\text{RH}$ ) 计算  $f(\text{RH})$ , 该增长因子参见文献 [21];  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4] = 1.375[\text{SO}_4^{2-}]$ ;  $[\text{NH}_4\text{NO}_3] = 1.29[\text{NO}_3^-]$ ;  $\text{OM}$  为有机物 (organic matter),  $[\text{OM}] = 1.8[\text{OC}]$ ;  $\text{FS}$  为细粒子 (fine soil),  $[\text{FS}] = [\text{Fe}] / 0.035$ 。

通过 IMPROVE 公式获得的大气消光系数为  $923 \text{ Mm}^{-1}$ 。将 IMPROVE 公式计算的散射系数与湿度修正后<sup>[28]</sup> 的测量散射系数进行对比 (图3) 发现, 两者相关性很好, IMPROVE 公式适用于本次研究。

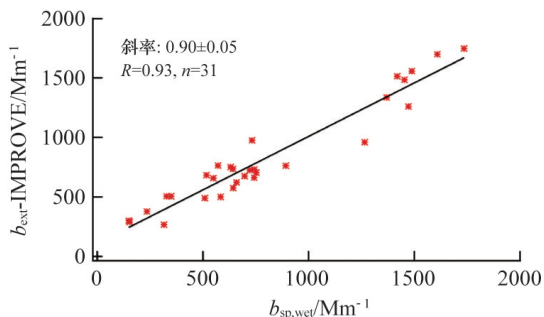


图3 IMPROVE公式计算的散射系数与湿度修正后的测量散射系数对比

Fig. 3 The relationship of chemical  $b_{\text{ext}}$  based on the revised IMPROVE equation with measured  $b_{\text{sp,wet}}$

由于浊度仪只能测量颗粒物的散射系数, 因此仅将 IMPROVE 公式中能产生散射的硫酸盐、硝酸盐、有机物及土壤尘的总和与浊度仪测量结果进行对比。另外, 从相关性曲线 (斜率为 0.90) 来看, 测量的散射系数高于 IMPROVE 估算的散射系数, 这可能是由于不同条件下湿度修正系数有差异, 导致  $b_{\text{sp,wet}}$  计算结果偏高。依据 IMPROVE 计算结果, 计算  $\text{PM}_{2.5}$  中各个化学成分对消光系数的贡献 (图4)。其中有机物的贡献率最大, 占总消光系数的 52.3%; 其次是  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 贡献率分别为 16.2% 和 13.7%。EC 和土壤尘的贡献相对较小, 分别为 11.0% 和 6.8%。

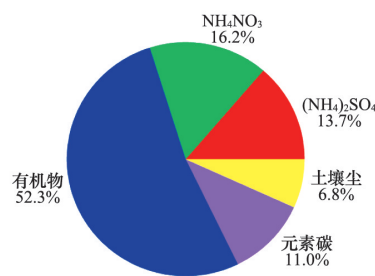


图4  $\text{PM}_{2.5}$  中各化学组分对消光系数的贡献

Fig. 4 Relative contributions to light extinction of chemical components in  $\text{PM}_{2.5}$

### 3 结论

1) 西安市秋季大气中颗粒物的散射系数平均值为  $(579 \pm 387) \text{ Mm}^{-1}$ , 具有典型的日内变化特征, 呈现出夜晚高白天低的变化趋势。

2) 采样期间  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度为  $(195.4 \pm 83.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 超过国家  $\text{PM}_{2.5}$  日均标准 ( $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 的 2.6 倍。  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与散射系数呈现出较强的相关性, 计算得到的  $\text{PM}_{2.5}$  散射效率为  $3.09 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ 。

3) 利用IMPROVE公式重建大气消光系数,其计算值与实测值斜率为0.90,相关系数为0.93,可见IMPROVE公式有效反演了西安市秋季大气消光系数。 $PM_{2.5}$ 中有机物对消光系数的贡献最大,占52.3%;其次为 $NH_4NO_3$ 和 $(NH_4)_2SO_4$ ,贡献率分别是16.2%和13.7%。

#### 参考文献(References)

- [1] Li X H, He K B, Li C C, et al.  $PM_{2.5}$  mass, chemical composition, and light extinction before and during the 2008 Beijing Olympics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2013, 118(21): 12158–12167.
- [2] 刘爱霞, 韩素芹, 姚青, 等. 2011年秋冬季天津 $PM_{2.5}$ 组分特征及其对能见度的影响[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(2): 42–47.  
Liu Aixia, Han Suqin, Yao Qing, et al. Characteristics of chemical composition of  $PM_{2.5}$  and its effect on visibility in autumn and winter of 2011 in Tianjin[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(2): 42–47.
- [3] Tang I N, Wong W T, Munkelwitz H R. The relative importance of atmospheric sulfate and nitrates in visibility reduction[J]. *Atmospheric Environment*, 1981, 15(12): 2463–2471.
- [4] Watson J G. Visibility: Science and regulation[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2002, 52(6): 628–713.
- [5] Tao J, Cao J J, Zhang R J, et al. Reconstructed light extinction coefficients using chemical compositions of  $PM_{2.5}$  in winter in urban Guangzhou, China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2012, 29(2): 359–368.
- [6] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 $PM_{10}$ 及 $PM_{2.5}$ 的关系[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(2): 34–41.  
Song Ming, Han Suqin, Zhang Min, et al. Relationship between visibility and relative humidity,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  in Tianjin[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, 29(2): 34–41.
- [7] Cao J J, Zhu C C, Chow J C, et al. Black carbon relationships with emissions and meteorology in Xi'an, China[J]. *Atmospheric Research*, 2009, 94(2): 194–202.
- [8] Wang Q Y, Cao J J, Shen Z X, et al. Chemical characteristics of  $PM_{2.5}$  during dust storms and air pollution events in Chengdu, China[J]. *Particology*, 2013, 11(1): 70–77.
- [9] Zhang T, Cao J J, Tie X X, et al. Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in Xi'an, China: Seasonal variations and sources[J]. *Atmospheric Research*, 2011, 102(1/2): 110–119.
- [10] Malm W C, Day D E, Carrico C, et al. Intercomparison and closure calculations using measurements of aerosol species and optical properties during the Yosemite aerosol characterization study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(D14).
- [11] Massling A, Stock M, Wiedensohler A. Diurnal, weekly, and seasonal variation of hygroscopic properties of submicrometer urban aerosol particles[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(21): 3911–3922.
- [12] Jing J S, Wu Y F, Tao J, et al. Observation and analysis of near-surface atmospheric aerosol optical properties in urban Beijing[J]. *Particology*, 2015, 18: 144–154.
- [13] Tao J, Zhang L M, Ho K F, et al. Impact of  $PM_{2.5}$  chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou—the largest megacity in south China[J]. *Atmospheric Research*, 2014, 135/136: 48–58.
- [14] 齐冰, 杜荣光, 徐宏辉, 等. 杭州市区大气气溶胶散射特性观测分析[J]. *高原气象*, 2014, 33(1): 277–284.
- Qi Bing, Du Rongguang, Xu Honghui, et al. An observational study on aerosol scattering properties in urban site of Hangzhou[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(1): 277–284.
- [15] Tao J, Zhang L M, Cao J J, et al. Characterization and source apportionment of aerosol light extinction in Chengdu, southwest China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 95: 552–562.
- [16] Wang H B, 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.
- [17] Penner J E, Novakov T. Carbonaceous particles in the atmosphere: A historical perspective to the fifth international conference on carbonaceous particles in the atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(D14): 19373–19378.
- [18] Pandis S N, Harley R A, Cass G R, et al. Secondary organic aerosol formation and transport[J]. *Atmospheric Environment*, 1992, 26(13): 2269–2282.
- [19] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29(23): 3527–3544.
- [20] Cao J J, Lee S C, Ho K F, et al. Characteristics of carbonaceous aerosol in Pearl River Delta Region, China during 2001 winter period[J]. *Atmospheric Environment*, 2003, 37(11): 1451–1460.
- [21] 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.
- [22] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, et al. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: Estimation of secondary organic carbon concentrations[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(17): 2771–2781.
- [23] Xu, J, Bergin M H, Greenwald R, et al. Aerosol chemical, physical, and radiative characteristics near a desert source region of northwest China during ACE-Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D19.
- [24] Andreae M O, Schmid O, Yang H, et al. Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(25): 6335–6350.
- [25] Pitchford M, Malm W, Schichtel B, et al. Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, 57(11): 1326–1336.
- [26] 王启元, 陶俊, 任鹏奎, 等. 成都市冬季大气 $PM_{2.5}$ 的化学组成及对能见度的影响[J]. *地球环境学报*, 2012, 3(5): 1104–1108.  
Wang Qiyuan, Tao Jun, Ren Pengkui, et al. Chemical composition of  $PM_{2.5}$  and its impact on visibility at Chengdu in 2010 winter[J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, 3(5): 1104–1108.
- [27] John W, Wall S M, Ondo J L, et al. Modes in the size distributions of atmospheric inorganic aerosol[J]. *Atmospheric Environment*, 1990, 24(9): 2349–2359.
- [28] Malm W C, Day D E, Kreidenweis S M, et al. Humidity-dependent optical properties of fine particles during the big bend regional aerosol and visibility observational study[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108: D9.

(编辑 田恬)