

邯郸市 PM_{2.5} 组分特征及其对散射系数的影响

魏哲¹, 岳亮², 侯立泉¹, 马思萌¹, 张城瑜¹, 王丽涛¹

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 邯郸市环保局, 河北 邯郸 056002)

摘要: 对邯郸市 2013 年和 2014 年 1、4、7、10 月份的 PM_{2.5} 进行采样及成分分析, 结果显示 2013 年和 2014 年的 PM_{2.5} 年均浓度分别为 170.4 和 144.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 2014 年较 2013 年下降了 15.5%。各季度 OC 浓度冬季 (31.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季 (24.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季 (9.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季 (5.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), SOC 的排序为秋季 (13.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 冬季 (8.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季 (2.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季 (2.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 分别占 OC 的 24.6%、34.6%、43.9% 和 27.7%。利用 IMPROVE 重构公式, 得出散射系数年均值为 524.9 Mm^{-1} , 春、夏、秋、冬季分别为 328.4、333.9、564.8 和 872.6 Mm^{-1} 。硫酸铵是散射系数的主要贡献者, 年均贡献率为 33.9%, 其次为硝酸铵 (25.3%)、有机物 (20.2%)、PM_{2.5-10} (15.4%) 和土壤尘 (5.7%)。

关键词: PM_{2.5}; 散射系数; 邯郸; 二次有机碳 (SOC)

中图分类号: X513

文献标识码: A

Characteristics of chemical composition of PM_{2.5} and its influence for lighting scattering coefficient in Handan city

WEI Zhe¹, YUE Liang², HOU Lique¹, MA Simeng¹, ZHANG Chengyu¹, WANG Litao¹

(1. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China;

2. Environmental Protection Bureau of Handan, Hebei Handan, 056002, China)

Abstract: This paper samples PM_{2.5} and analyzes its components in January, April, July, and October of 2013 and 2014. The results showed that the annual concentrations of PM_{2.5} are 170.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 144.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The annual concentration of PM_{2.5} decreases 15.5%, compared to 2013. The orders of OC are winter(31.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>autumn(24.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>spring(9.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>summer(5.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). And the orders of SOC are autumn (13.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>winter(8.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>spring(2.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>summer(2.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), which account for 24.6%、34.6%、43.9%, and 27.7% of OC, respectively. The annual scatter coefficient is 524.9 Mm^{-1} by using the IMPROVE equation. The scatter coefficient of winter is 872.6 Mm^{-1} , which is notable higher than 564.8 Mm^{-1} of autumn, 333.9 Mm^{-1} of summer and 328.4 Mm^{-1} of spring. Ammonium sulfate is the largest contributor, which contributed to 33.9% of scatter coefficient, followed by 25.3% of ammonium nitrate, 20.2% of organic matter, 15.4% of PM_{2.5-10}, and 5.7% of dust.

Key words: PM_{2.5}; scattering coefficient; Handan; secondary organic carbon (SOC)

当前我国霾天气频发, 引起社会及民众的热切关注^[1-7]。全国雾霾情况呈现南轻北重的特点^[9], 京津冀尤其严重。研究人员对 PM_{2.5} 污染特征、形成过程、成分、来源等进行了分析研究^[10-13]。细颗粒物还没有完善的方法进行监测。OC/EC 最小比值法是

估算 SOC 最常用的方法^[14-15], 另一种方法是气溶胶生成系数法, 该方法是从 VOCs 的排放清单或环境浓度直接估算 SOA 的浓度^[16]。近年来, 张芬芬等^[17]对邯郸市研究得出非采暖时期存在明显二次转化, 但由于监测时间较短, 不能代表每个季节的变化情

收稿日期: 2016-09-13

特约专稿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41475131); 河北省青年拔尖人才支持计划 (D2017402086); 河北省人才工程培养经费 (A2016002022); 河北工程大学创新团队领军人才培育基金项目

作者简介: 魏哲 (1986-), 男, 河北邢台人, 硕士, 助理实验师, 主要从事大气污染控制研究。

况。另外，细颗粒物还是能见度下降主要贡献者，它的消光系数占总消光系数90%以上^[18]，其中以细颗粒物的贡献为主^[19-21]。本文使用OC/EC最小比值法对2013年和2014年的SOC进行计算，分析研究SOC的季节变化特征；根据PM_{2.5}成分数据计算各成分的散射系数，探讨细颗粒物的散射系数的季节变化特征，着重分析各成分对散射系数的贡献。

1 样品采样与分析

1.1 PM_{2.5} 样品采集与分析

PM_{2.5} 采样设备位于邯郸市河北工程大学城建学院综合实验室楼顶（36° 34' N, 114° 29' E），距离地面约12 m，采样地点属于文教居民混合区，无明显的排放源，采样口距离楼顶约1 m，流量设定为1.13 m³/min。经过2013年和2014年1、4、7、10月对PM_{2.5}连续采样，共得到242个样品，代表了冬、春、夏、秋四个季节的空气状况。2013年1月7~20日的采样浓度明显低于该监测站的在线浓度，经过和邯郸市环保局四个站点的数据对比，使用监测站的在线浓度代替采样浓度。

1.2 分析方法

离子检测：采样大膜上取直径为1 cm²的石英膜充分溶解在10 ml的高纯水中（18.2 MΩ·cm），过滤得到的溶液用于分析样品的水溶性无机离子。试验采用美国Dionex生产的DX-600离子色谱仪和ICS-2100分别检测样品的阳离子和阴离子，包括NH₄⁺、Na⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻、NO₂⁻和NO₃⁻，由于F⁻和NO₂⁻经常低于检出限，所以本文不使用它们分析。

OC、EC检测：OC、EC的检测使用美国沙漠研究所（Desert Research Institute）研发的Model 2001A型热/光碳分析仪。从采样膜上截一圆形面积为0.53 cm²的采样膜放入纯He气的环境中分别在140℃、280℃、480℃和580℃的高温下处理，从而相应得到OC1、OC2、OC3和OC4物质。随后，该膜将会放入由2%的O₂和98%He组成的气体中，分别在580℃、740℃和840℃高温下处理，从而得到EC1、EC2和EC3。

元素检测：采用先消解后分析的方法。从采样膜上裁一直径为2 cm的圆，消解过程采用微波消解仪（美国CEM公司，MARS型号）进行消解，800 W下高温190℃消解25 min。之后，使用ICP-MS

检测消解溶液中元素的含量。ICP-MS的进样值为连续3次进样的均值，相对标准偏差控制在小于5%的范围内，内标回收率控制在80%~120%。

2 结果与讨论

2.1 2013年—2014年邯郸市PM_{2.5}的水溶性成分特征

2013年和2014年的采样年均浓度分别为170.4和144.0 μg·m⁻³，是国家二级标准（35.0 μg·m⁻³）^[22]的4.9和4.1倍，超过WHO（10.0 μg·m⁻³）标准的十几倍。2014年的采样浓度较2013年下降了15.5%。如图1所示，相对于2013年的严重污染、重度污染和中度污染天数，在2014年分别下降了3.0%、9.0%和3.8%，同时轻度污染、良和优的天数分别增加了5.9%、8.3%和1.6%，良好天气明显增加。2013年1月、4月、7月、10月的月均浓度分别为280.8、103.2、85.6和213.3 μg·m⁻³，分别高于2014年的257.7、98.2、63.3和155.4 μg·m⁻³。冬季浓度最高，可能与该段时间内采暖有关，秋季次之，夏季最低。

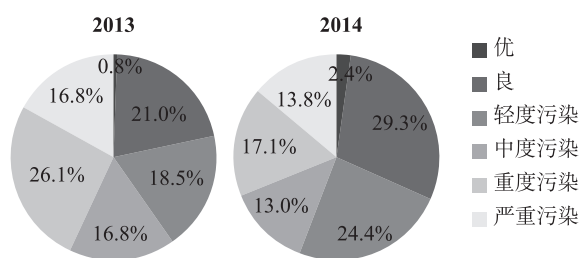


图1 2013年和2014年的不同空气质量天数所占比率
Fig.1 Ratio of number days under different air quality in 2013 and 2014

水溶性离子（TWSII）是PM_{2.5}的重要组成部分，总水溶性无机离子（TWSII）浓度表现为冬季（93.3 μg·m⁻³）>秋季（69.2 μg·m⁻³）>春季（44.0 μg·m⁻³）>夏季（39.7 μg·m⁻³）。SO₄²⁻/NO₃⁻比值常用于移动源和固定源对PM_{2.5}的贡献，当比值小于1时，移动源对PM_{2.5}的影响强于固定源。冬、春和夏季的比值分别为1.35、1.05和2.35，高于秋季的0.81，即冬、春和夏季易受固定源影响，而在秋季移动源对PM_{2.5}的影响更明显。SO₄²⁻和NO₃⁻来源于SO₂和NO_x的氧化生成，SOR和NOR分别代表了SO₄²⁻和NO₃⁻的转化率。对于SOR，夏季的SOR最高，为48.5%，这是因为夏季的温度高、湿度大，有利于SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺的形成^[23]，其次为秋季的26.3%、春季的19.2%和冬季的15.2%。对于NOR，秋季的32.7%最大，其次

表 1 2013 年和 2014 年 PM_{2.5} 的浓度及其水溶性离子、OC 和 EC 所占比率
Tab.1 Concentration of PM_{2.5} and ratios of water-soluble, OC and EC in 2013 and 2014

	PM _{2.5} μg·m ⁻³	SO ₄ ²⁻ /%	NO ₃ ⁻ /%	Cl ⁻ /%	NH ₄ ⁺ /%	K ⁺ /%	Na ⁺ /%	Ca ²⁺ /%	Mg ²⁺ /%	OC /%	EC /%	Sum /%
春季	100.7	14.3	15.0	2.9	9.2	1.3	0.5	1.5	0.1	9.6	4.5	58.4
夏季	74.5	24.4	11.6	1.4	11.7	1.3	0.5	0.6	0.1	8.0	4.6	69.6
秋季	184.4	10.0	12.6	2.7	8.1	1.4	0.5	0.7	0.1	13.7	4.1	52.5
冬季	269.3	12.7	10.1	4.0	9.5	1.4	0.5	0.7	0.1	14.4	6.2	59.9
年均	157.2	15.3	12.3	2.8	9.6	1.3	0.5	0.9	0.1	11.4	4.9	59.0

为春季（24.4%）、夏季（20.9%）和冬季（20.5%）。

2.2 2013 年—2014 年邯郸市 PM_{2.5} 的 OC 与 EC 特征

OC、EC是 PM_{2.5}的重要组成，2013年和 2014年 OC的年均浓度分别为 19.4 μg·m⁻³和 16.1 μg·m⁻³，均占 PM_{2.5}的 11.4%。从表 2上看，冬季的 OC浓度最高，达到 31.7 μg·m⁻³，大于秋季（24.4 μg·m⁻³）、春季（9.1 μg·m⁻³）和夏季（5.6 μg·m⁻³）。一方面，冬季天气条件相对稳定，加上燃煤取暖，所以冬季 OC 的浓度较高；另一方面，考虑到 OC 中有一部分是由 VOCs 转化而来的，所以 OC 与 VOCs 的排放量、种类及其转化的条件都有关系。OC 与 EC 的相关性可以判定 OC 和 EC 是否具有相似的来源^[24]。冬季 OC、EC 的相关性最好，R² 达到 0.84，EC 是一次污染物，主要来自燃烧过程的直接排放，比如燃煤、燃油、生物质燃烧等，所以 OC 也可能来自这些燃烧过程的直接排放，因为冬季 SOC 在 OC 中的比率要低于其他季节，夏季次之为 0.74，秋季为 0.70，春季最低，为 0.63，因为春季风速较大，风向多变，地区之间颗粒物传输对其成分产生了一定的影响。

OC 可分为一次有机碳（POC）和二次有机碳（SOC），OC/EC 可作为二次有机气溶胶是否存在的标识，当该比值超过 2 时，认为存在二次反应生成有机气溶胶。秋季的 OC/EC 比值为 4.3，明显高于冬季的 2.3、春季的 2.2 和夏季的 1.9，说明秋季二次有机碳生成更明显。（OC/EC）min 方法也常用于定量计算 SOC，春、夏、秋、冬季的 SOC 的均值分别为 2.4、2.0、13.1 和 8.8 μg·m⁻³，分别占了 OC 的 24.6%、34.6%、43.9% 和 27.7%，可见秋季的 SOC 浓度最高，在 OC 中所占比例也最大，可以判断秋季 SOC 是 OC 的主要组成部分，SOC 主要来源于天然源排放的 VOC 的转化，一方面考虑秋季可能存在秸秆燃烧，排放了较高的 VOC；另一方面秋季的 PM_{2.5} 呈酸性^[25]，液态酸性粒子可以促使 SOC 的形成，提高 SOC 的产率^[17]，加上秋季昼夜温差较

大，较高的温度有利于 SOC 的形成，夜间的温度有利于 SOC 气/固相之间分配，所以秋季的 SOC 较高。在夏季，SOC/OC 为 34.6%，较高的温度有利于 SOC 的形成，但是高温造成一部分易挥发的 SOC 分配到大气中，降低了 SOC 的产率。

表 2 不同季度 OC 与 EC 统计表
Tab.2 Statistics of OC and EC in different season

	OC	EC	SOC	OC/EC	SOC/OC
	/(μg·m ⁻³)				
春季	9.1	4.3	2.4	2.2	24.6%
夏季	5.6	3.1	2.0	1.9	34.6%
秋季	24.4	6.2	13.1	4.3	43.9%
冬季	31.7	13.9	8.8	2.3	27.7%
平均	17.7	6.9	6.6	2.7	32.7%

另外，2013 年春、夏、秋、冬各季度的 SOC 分别为 2.9、1.9、18.4 和 11.0 μg·m⁻³，高于 2014 年四季度的 SOC（1.8、2.0、7.8 和 6.6 μg·m⁻³），2014 年秋季的 OC 浓度明显降低，应该与 2014 年 11 月北京举办 APEC 会议有关。与 OC 变化一致，冬季 EC 的浓度最高，为 13.9 μg·m⁻³，在冬季 PM_{2.5} 中占了 6.2%，虽然在 PM_{2.5} 中比例较低，但是由于它对可见光到红外的波长范围内的太阳辐射都有强烈的吸收效应，导致正的辐射强波，所以也应关注 EC 对大气环境的危害。

2.3 2013 年—2014 年邯郸市 PM_{2.5} 的元素特征

富集因子法是判定 PM_{2.5} 元素来源的常用手段，本文选择稳定的地壳元素 Ti 做参考元素，背景值取自河北省的 A 层土壤的背景值^[26]，将 PM_{2.5} 样品中待判断元素 i 和 R 的相对浓度 (C_i/C_R)_{样品}，与地壳中对应的元素 i 和 R 的相对风度 (C_i/C_R)_{参考} 进行比较得出元素 i 的富集因子 EF，其计算公式如下：

EF_{样品}=(C_i/C_R)_{样品}/(C_i/C_R)_{参考} (1)

EF 值小于 2 一般认为元素在大气中的富集主要受自然输入作用，介于 2~5 之间时说明元素在大气

表 3 不同元素的 EF 值
Tab.3 Value of EF in different elements

元素	V	Rb	Ba	Mn	Co	Cr	Cu	As	Sb	Zn	Pb	Br	Fe	Ca	K
丰度 (mg · kg ⁻¹)	73.2	99	497	608	12.4	22.35	21.8	13.6	1.22	78.4	21.5	2.78	2.82	2.18	1.85
EF	0.3	0.3	0.6	0.7	1.9	2.2	7.3	16.1	28.6	29.9	71.1	85	2 348.1	3 771.2	4 357.1

中的富集一定程度上与人为因素有关，属于中度污染；大于 5 时已构成显著污染^[27]。表 3 给出不同元素的 A 层土壤的丰度值和对应的 EF 值，V、Rb、Ba、Mn 和 Co 小于 2，推断它们可能受自然输入影响，属于自然源输入。Cr、Cu、As、Sb、Zn、Pb、Br、Fe、Ca 和 K 可能与人为输入有关。Cr、Cu、Fe 和 Ca 等金属元素，这与金属冶炼、工业工程有关，所以它们更多与人为因素有关。燃煤源是大气中 As 的主要来源，它也常作为燃煤的标识物，As 的 EF 为 16.1，可见它的来源主要是人为作用。K 常作为生物质燃烧的标识物，K 的 EF 值高达 4 357.1，与人为作用直接相关。

2.4 PM_{2.5} 组分对散射系数的贡献

IMPROVE 方程可以定量分析 PM_{2.5} 各成分对散射系数的影响，使用（Pitchford et al., 2007）^[28] 建议的 IMPROVE 方程重建各个化学组分与散射系数的关系，简化后的方程如下：

$$b_{sp}=3f_L(RH)[(NH_4)_2SO_4]+3f_L(RH)NH_4NO_3+4[OM]+1.0[FS]+0.6[CM]$$

(2)

式中 [(NH₄)₂SO₄] = 1.375[SO₄²⁻]; [NH₄NO₃] = 1.29[NO₃⁻]; [OM] = 1.4[OC]; [CM] = [PM₁₀] - [PM_{2.5}]; [FS] = 2.2[Al] + 2.49[Si] + 1.63[Ca] + 2.42[Fe] + 1.94[Ti]。

由于缺少 Al 和 Si 等地壳元素的检测，本文中使用 [FS]=20[Ca²⁺]。另外，本文由于缺少 PM₁₀ 的采样浓度，使用监测站的在线监测的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度求出 2013 年和 2014 年 1、4、7 和 10 月的 PM_{2.5-10} 与 PM_{2.5} 的比值，从而利用 PM_{2.5} 的采样浓度得出 PM_{2.5-10} 的采样浓度。

消光系数与能见度的关系为 Bext=3.19/visibility，Bext=Bsp+Bap，图 2 显示能见度与散射系数相关性明显，也说明通过以上公式计算的 Bsp 是可靠有效的。2013 年的年均散射系数为 611.7 Mm⁻¹，明显高于 2014 年的 438.2 Mm⁻¹，这与 2014 年 PM_{2.5} 浓度的下降有关。两年的均值为 524.9 Mm⁻¹，冬季的散射系数最高，为 872.6 Mm⁻¹，显著高于秋季的 564.8 Mm⁻¹，秋、冬两季又明显高于夏季的 333.9 Mm⁻¹ 和春季的 328.4 Mm⁻¹，这与 PM_{2.5} 的浓度变化一致。颗粒物的

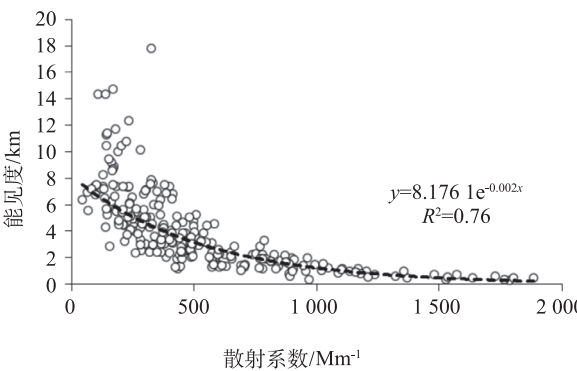


图 2 散射系数与能见度的关系
Fig.2 Relationship between scatter coefficient and visibility

散射系数与 PM_{2.5} 质量浓度的回归方程，可以定性的判断散射系数与 PM_{2.5} 的关系。拟合得到春、夏、秋和冬季的相关系数 R² 分别为 0.50、0.77、0.73 和 0.25，夏、秋季的相关性较好，也就是说 PM_{2.5} 是夏、秋两季造成大气散射的主要物质。用来代表散射效率的斜率分别为 2.8、5.3、2.6 和 1.4 m²·g⁻¹，年均值为 2.2 m²·g⁻¹，稍低于北京的 5.55 m²·g⁻¹^[29]、广州的 4.2 m²·g⁻¹^[30] 和西安秋季的 3.09 m²·g⁻¹^[31]。

由图 3 可知，夏季硫酸铵对 Bsp 的贡献为 50.4%，明显高于其在其他季节对散射系数的贡献，因为夏季温度高，有利于 SO₂ 向硫酸铵转化，转化系数最大^[26]，夏季湿度大，硫酸铵易吸湿，湿度越大对 Bsp 的影响越大。冬季次之，硫酸铵对 Bsp 的贡献为 33.4%，受到冬季采暖的影响，为硫酸铵的形成提供了更多的反应物，使硫酸铵对散射系数贡献较大，并显著高于其他污染物对 Bsp 的贡献。硝酸铵对 Bsp 的贡献季节变化较小，贡献范围在 22.9% ~ 27.9%，硝酸盐的形成主要是来自 NO_x 的转化，市区的 NO_x 主要来自机动车尾气的排放，季度变化较小，这可能是造成硝酸铵贡献波动较小的原因。另外，湿度对硝酸铵也产生影响，但受其他组分贡献的影响，使其变化不明显，比如夏季，硫酸铵对 Bsp 较大，使硝酸铵对 Bsp 的贡献较低，仅有 22.9%。对于有机物，它在秋、冬两季对 Bsp 的影响明显，分别为 26.3% 和 26.0%，显著高于春、夏季的 17.4% 和 11.1%。在广州、西安 OC 均是消

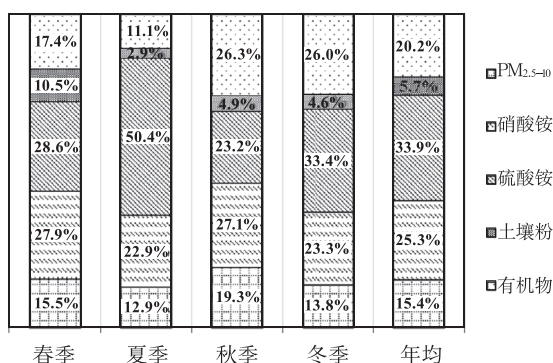


图3 不同季度各组分对散射系数的贡献

Fig.3 Contributions of these compositions to scatter coefficient in different season

光系数的最主要的贡献者^[31]，这与邯郸不同，应该与PM_{2.5}的组成和粒径的分布有关。值得注意的是，春季土壤尘贡献明显，贡献率为10.5%，显著高于它在其他季度的贡献，这与春季风速较大，容易形成扬尘天气有关。

总得来看，硫酸铵是B_{sp}的主要贡献者，年均贡献率为33.9%，其次为硝酸铵（25.3%）、有机物（20.2%）、PM_{2.5-10}（15.4%）和土壤尘（5.7%）。

如图4所示，在空气质量为良和轻度污染时，硫酸盐是散射系数最主要的贡献者，贡献率接近40%，明显高于其他污染物对散射系数的贡献。随着空气质量的恶化，硝酸盐明显上升，到中度污染和重度污染时，硫酸盐和硝酸盐贡献率均在30%上下。在重度污染和严重污染，PM_{2.5-10}和OC对散射系数的贡献有了显著的提高，它们对散射系数的贡献分别接近和超过20%，OC的贡献率与硝酸盐、硫酸盐的基本持平。另外，土壤尘对散射系数的贡献率总体呈下降趋势，在严重污染时贡献率最低，仅为3.0%。总体来看，随着严重污染天气的发生，硫酸盐、硝酸盐、PM_{2.5-10}和SOC成为散射系数的主要贡献者，它们其中有一大部分为二次成分，也就是说随着气溶胶的老化，影响散射系数的可能主要为二次成分，不过进一步研究是必需的。

3 结论

1) 2013年和2014年PM_{2.5}的年均浓度分别为170.4、144.0 μg·m⁻³，2014年PM_{2.5}的浓度较2013年下降了15.5%，2014年PM_{2.5}的严重污染、重度污染和轻度污染天数较2013年分别下降了3.0%、9.0%和3.8%，而轻度污染、良和优的天数分别增加了5.9%、8.3%和1.6%。

2) 冬季OC、EC的相关性最好，R²达到0.84，

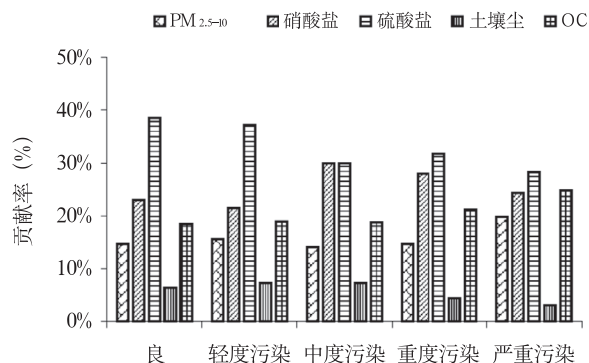


图4 不同空气质量下各污染物对散射系数的贡献

Fig.4 Contributions of these compositions to scatter coefficient in different air quality

说明它们来源大体一致。秋季的OC/EC比值为4.3，高于其他季节，二次有机碳生成在秋季更明显，其SOC均值为13.1 μg·m⁻³，高于春、夏、冬季的2.4、2.0和8.8 μg·m⁻³。

3) V、Rb、Ba、Mn和Co小于2，推断它们可能受到自然源的影响，可能更多的来源于土壤尘，Cr和Cu受到自然源和人为源的共同影响，而As、Sb、Zn、Pb、Br、Fe、Ca和K更可能与人为有关。

4) 散射系数年均值为524.9 Mm⁻¹，冬季最高，达到872.6 Mm⁻¹，显著高于秋季的564.8 Mm⁻¹，秋、冬两季又明显高于夏季的333.9 Mm⁻¹和春季的328.4 Mm⁻¹，这与PM_{2.5}的浓度变化一致。硫酸铵是散射系数的主要贡献者，年均贡献率为33.9%，其次为硝酸铵（25.3%）、有机物（20.2%）、PM_{2.5-10}（15.4%）和土壤尘（5.7%）。

参考文献：

- [1] DONALDSON K, LI X Y, MACNEE W. Ultrafine (nanometer) particle mediated lung injury[J]. Journal of Aerosol Science, 1998, 29(5-6): 553-560.
- [2] POPE C A, THUN M J, NAMBOODIRI M M, et al. Particulate air-pollution as a predictor of mortality in a prospective-study of US adults[J]. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 1995, 151(3): 669-674.
- [3] 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.
- [4] TAO J, HO K F, CHEN L G, et al. Effect of chemical composition of PM_{2.5} on visibility in Guangzhou, China, 2007 spring[J]. Particuology, 2009, 7(1): 68-75.

- [5]PUI DAVID Y H, CHEN ShengChieh, ZUO Zhili.PM_{2.5} in China: Measurements, Sources, visibility and health effects, and mitigation[J].Particuology, 2014 (13) : 1–26.
- [6]KLEEMAN M J, ELDERING A, HALL J R.Effect of emission control programs on visibility in southern California[J].Environmental Science & Technology, 2001 (35) : 4668–4674.
- [7]MARIA S F, RUSSELL L M, GILLES M K, et al.Organic aerosol growth mechanism and their climate–forcing implications[J].Science, 2004 (306) : 1921–1924.
- [8]ZHANG X Y, WANG Y Q, NIU T, et al.Atmospheric aerosol compositions in China:Spatial/temporal variability, chemical signature,regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J].Atmos Chem Phys, 2012 (12) : 779–799.
- [9]ZHANG YanLin, CAO Fang.Fine particulate matter (PM_{2.5}) in China at a city level[J].Scientific Reports, 2015 (5) : 14884.
- [10]ZHENG B, ZHANG Q, ZHANG Y, et al. Heterogeneous chemistry: a mechanism missing in current models to explain secondary inorganic aerosol formation during the January 2013 haze episode in North China[J].Atmospheric Chemistry and Physics, 2015 (15) : 2031–2049.
- [11]WANG H, XU J Y, ZHANG M, et al.A study of the meteorological causes of a prolonged and severe haze episode in January 2013 over central–eastern China[J]. Atmospheric Environment, 2014 (98) : 146–157.
- [12]WANG Y S, LI Y, WANG L L, et al.Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J].Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 14–25.
- [13]Wang L T, Wei Z, Yang J, et al.The 2013 severe haze over southern Hebei, China: model evaluation, source apportionment, and policy implications[J].Atmospheric Chemistry and Physics, 2014 (14) : 3151–3173.
- [14]张 灿,周志恩,翟崇治,等.基于重庆本地碳成分谱的PM_{2.5}碳组分来源分析[J].环境科学, 2014, 35 (3) : 810–819.
- [15]周 敏,陈长虹,王红丽,等.上海秋季典型大气高污染过程中有机碳和元素碳的变化特征[J].环境科学学报, 2013, 33 (1) : 181–188.
- [16]郝吉明,吕子峰,楚碧武,等.大气二次有机气溶胶污染特征及模拟研究[M].北京:科学出版社, 2014.
- [17]张芬芬,王丽涛,苏捷,等.邯郸市PM_{2.5}中含碳组分的特征及来源分析[J].环境科学与技术, 2015, 38 (8) : 94–100.
- [18]刘新民,邵敏.北京市夏季大气消光系数的来源分析[J].环境科学学报, 2004, 24 (2) : 185–189.
- [19]丁 净,韩素芹,张裕芬,等.天津市冬季颗粒物化学组成及其消光特征[J].环境科学研究, 2015, 28 (9) : 1353–1361.
- [20]黄元龙,杨新.大气细颗粒物对大气能见度的影响[J].科学通报, 2013, 58 (13) : 1165–1170.
- [21]姚 青,韩素芹,蔡子颖,等.天津城区春季大气气溶胶消光特性研究[J].中国环境科学, 2012, 32 (5) : 795–802.
- [22]GB3095–2012, 环境空气质量标准[S].
- [23]World Health Organization.Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide[S].
- [24]WANG H B, TIAN M, LI X H, et al.Chemical composition and light extinction contribution of PM_{2.5} in urban Beijing for a 1–year period[J].Aerosol and Air Quality Research, 2015 (15) : 2200–2211.
- [25]孟琛琛,王丽涛,张芬芬,等.邯郸市PM_{2.5}中水溶性无机离子污染特征及来源解析[J].环境科学学报, 2015, 35 (11) : 3443–3451.
- [26]中国环境监测总站.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社, 1990.
- [27]郭海全,郝俊杰,李天刚,等.河北平原土壤重金属人为污染的富集因子分析[J].生态环境学报, 2010, 19 (4) : 786–791.
- [28]PITCHFORD M, MALM W, SCHICHTEL B, et al.Revised algorithm for estimation light extinction from improve particle speciation data[J].Journal of the Air & Waste Management Association, 2007, 57(11): 1326–1336.
- [29]JING J S, WU Y F, TAO J, et al.Observation and analysis of nearsurface atmospheric aerosol optical properties in urban Beijing[J].Particuology, 2015 (18) : 144–154.
- [30]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.
- [31]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.

(责任编辑 王利君)