

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017042401

郑晓伍, 陈家灯, 刘子龙, 等. 石河子市 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的变化特征与来源解析[J]. 环境化学, 2018, 37(1): 115-122.

ZHENG Xiaowu, CHENG Jiadeng, LIU Zilong, et al. Characteristics and source apportionment of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Shihezi, Xinjiang, China[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(1): 115-122.

石河子市 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的变化特征与来源解析*

郑晓伍¹ 陈家灯¹ 刘子龙¹ 李姗蔓¹ 宁建英² 鲁建江^{1**}

(1. 石河子大学化学化工学院新疆兵团绿色过程重点实验室, 石河子, 832003;

2. 石河子大学医学院第一附属医院, 石河子, 832002)

摘 要 本研究采集 2015 年 9 月至 2016 年 8 月石河子市不同类型天气下大气颗粒物样品, 根据气象条件进行霾与沙尘分类, 使用热光碳分析仪 DRI 2001A 进行有机碳 (organic carbon, OC) 与元素碳 (elemental carbon, EC) 测定, 采用最小比值法估算二次有机碳 (second organic carbon, SOC) 质量浓度, 主成分分析法 (principle component analysis, PCA) 分析其可能来源. 结果表明: 中霾天气下 OC 和 EC 平均质量浓度达到 20.85±5.03、2.75±0.46 μg·m⁻³ (沙尘天气 18.9±4.4 μg·m⁻³, 2.6±0.9 μg·m⁻³). 二次有机碳 SOC 在中霾天气下质量浓度为 10.62±3.94 μg·m⁻³ (沙尘天气 9.3±3.7 μg·m⁻³), 占 OC 浓度 67% (沙尘天气 67%). 霾与沙尘天气 OC 与 EC 相关系数低于非霾非沙尘天气, 表明霾与沙尘天气较非霾非沙尘天气有着复杂的污染源. PCA 分析表明, 霾与沙尘天气下的碳气溶胶的主要排放源为机动车尾气, 固定燃煤源和道路扬尘. 本研究分析了石河子市霾和沙尘天气下的碳气溶胶分布, 有望为中国西部城市的霾和沙尘天气治理提供依据.

关键词 有机碳/元素碳 OC/EC, 霾, 二次有机碳 SOC, 主成分分析, 新疆石河子市.

Characteristics and source apportionment of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Shihezi, Xinjiang, China

ZHENG Xiaowu¹ CHENG Jiadeng¹ LIU Zilong¹ LI Shanman¹
NING Jianying² LU Jianjiang^{1**}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shihezi University, Key Laboratory for Green

Processing of Chemical Engineering of Xinjiang Bingtuan, Shihezi, 832003, China;

2. The First Affiliated Hospital, School of Medicine, Shihezi University, Shihezi, 832002, China)

Abstract: The primary and year-long PM_{2.5} samples were collected in Shihezi from September 2015 to August 2016 and the concentrations of organic carbon (OC), elemental carbon (EC) and second organic carbon (SOC) under different weather conditions were analyzed. Results show that the mean concentration of OC and EC in middle haze was 20.85±5.03 and 2.75±0.46 μg·m⁻³ (dust days was 18.9±4.4 and 2.6±0.9 μg·m⁻³). The average SOC in middle haze days was 10.62±3.94 μg·m⁻³ (dust days 9.3±3.7 μg·m⁻³), accounting for 67% of OC (dust days 67%), indicates that SOC was the major component of OC. The lower correlation coefficient of OC and EC showed that haze and dust has more complex pollution sources. PCA analysis indicates that the major sources of carbon aerosols in haze and dust days were gasoline exhaust, coal burning and road dust. This study revealed the distribution of carbon aerosols in different types of weather and may provide a scientific

2017 年 4 月 24 日收稿 (Received: April 24, 2017).

* 国家自然科学基金 (21667026) 资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (21667026).

** 通讯联系人, Tel: 0993-2055016, E-mail: lujianjiang_xj@163.com

Corresponding author, Tel: 0993-2055016, E-mail: lujianjiang_xj@163.com

reference for further research in haze and dust control in Xinjiang area.

Keywords: organic carbon/elemental carbon (OC/EC), haze, second organic carbon (SOC), principal component analysis (PCA), Shihezi-Xinjiang.

碳元素是大气颗粒物中的主要元素之一,约占大气颗粒物总质量的 10%.根据碳元素的来源不同,碳气溶胶有两种类型:有机碳(OC)和元素碳(EC)^[1].有机碳主要来自化石燃料燃烧,碳氢化合物和含氧有机物,例如多环芳烃和二噁英^[2].自然界中的 OC 很容易发生光催化反应被自由基氧化成二次有机碳(SOC)^[3],增加大气的散射系数并且减少大气能见度导致雾霾天气^[4].元素碳(EC)主要来自含碳材料的不完全燃烧,例如生物秸秆^[5].EC 较 OC 有着稳定的化学性质和巨大的比表面积,因此大气中很多污染物之间的反应在 EC 的表面进行^[6].

碳气溶胶浓度的增加对环境、人体健康及气候变化均有复杂的影响.近年来关于大气颗粒物的相关方面研究越来越多,但相对于水溶性离子和元素组分来说,有机碳元素碳的研究尚需要深入.OC 与 EC 的浓度及其比值对于表征气溶胶的一次、二次来源,追溯大气气溶胶来源及形成具有重要意义^[7].

石河子市是新疆维吾尔自治区重要交通枢纽和文化中心,现有关于新疆地区 OC 和 EC 的相关研究十分有限.因此,通过长期连续的采样和精确的检测分析可以研究碳元素的水平,并了解霾和沙尘天气下碳质气溶胶的来源,有助于了解霾和沙尘天气的主要成分和相关污染源的排放强度,从而对于霾和沙尘的预防与治理具有一定借鉴作用.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 采样地点

PM_{2.5}样品 ($n=104$,具体分布如表 1 所示)采集从 2015 年 9 月开始至 2016 年 8 月(采样器始终运行,已去除中途出现仪器故障导致样品缺失或不能用等样品).本研究中的春季(样品数 23 个):2016 年 3、4、5 月,夏季(样品数 22 个):2016 年 6、7、8 月,秋季(样品数 20 个):2015 年 9、10、11 月,冬季(样品数 39 个)2015 年 12 月、2016 年 1、2 月.采样地点为新疆维吾尔自治区石河子市石河子大学化工院楼顶 (N44°18'10", E86°3'29"),海拔 470 m.采样地位于北三路与北四路之间,周围开阔没有障碍物遮挡,2 km 之内没有明显的污染源适合采样.

1.2 采样方法

采样器型号为美国进口的 MiniVol TAS PM_{2.5}采样器,采样流量 6 L·min⁻¹,单次采样时间为持续的 23 h 即每天的早晨 11:00 到次日早晨 10:00.采样前滤膜放置于马弗炉 700 °C 下灼烧 4 h 以去除其中的碳质污染物.灼烧后滤膜置于干燥装置内 48 h 恒重后再进行采样,采集样品后的滤膜放入 -18 °C 的冰箱保存.

表 1 霾与沙尘天气划分

Table 1 Haze and dust definition

天气类型 Kinds	样品数 Counts	颗粒物 PM Particulate Matters/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	能见度 V Visibility/km
非霾非沙尘	72	PM _{2.5} < 75	
轻霾	20	75 ≤ PM _{2.5} < 150	3 ≤ V < 5 km
中霾	11	150 ≤ PM _{2.5} < 250	1 ≤ V < 3 km
重霾	1	PM _{2.5} ≥ 250	V < 1 km
沙尘	29	PM ₁₀ ≥ 150	V ≤ 3 km

1.3 霾与沙尘划分方法

根据能见度 V 与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度,霾与沙尘研究中天气将被划分为轻霾 (H-1),中霾 (H-2),重霾 (H-3) 和沙尘天气 (D).此外,还有非霾非沙尘天气 (NHD),划分具体条件及相应天气下的样品数量如

表 1 所示^[8-9].

1.4 有机碳与元素碳测定

有机碳和元素碳的分析采用美国沙漠研究所研制的热光碳分析仪,应用 IMPROVE 协议,即在无氧的纯氮气环境分别于 120 °C (OC1)、250 °C (OC2)、450 °C (OC3) 和 550 °C (OC4) 温度下,对 0.50 cm² 滤膜片进行加热,将滤纸上的颗粒碳转化为 CO₂;然后再将样品在 2% 氧气的氮气环境下,分别于 550 °C (EC1)、700 °C (EC2) 和 800 °C (EC3) 逐步加热,使得样品中的元素碳释放出来.各个温度梯度下产生的 CO₂ 经过 MnO₂ 催化,在还原气氛中通过火焰离子检测器 (FID) 检测 CH₄ 样品在加热过程中,采用 633 nm 的氦-氖激光检测滤膜反光光强,利用光强变化确定元素碳氧化的起始氧化时间,有机碳在碳化过程会形成光学检测裂解碳 (OPC),根据 IMPROVE 协议,有机碳 OC = OC1+OC2+OC3+OC4+OPC,元素碳 EC = EC1+EC2+EC3-OPC.

1.5 质量保证与质量控制

有机碳、元素碳:数据质量控制采用美国沙漠所 (DRI) 质量控制标准,OC/EC 分离精度 5%—10%.每测定 10 个样品复检 1 个,样品质量浓度在 0.030—0.100 g·L⁻¹ 之间,允许的标准偏差 ±30%;质量浓度在 0.100—0.150 g·L⁻¹ 之间,允许的质量偏差 ±20%;样品质量浓度大于 0.150 g·L⁻¹ 时,允许的标准偏差 ±10%.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 碳气溶胶污染天气下变化特征

研究期间的 104 个有效 PM_{2.5} 气溶胶样品碳气溶胶浓度统计如表 2 所示,OC 的浓度范围 4.25—27.18 μg·m⁻³,平均值 12.73±5.74 μg·m⁻³,EC 浓度范围 0.13—7.92 μg·m⁻³,平均值 1.96±1.39 μg·m⁻³.本研究的碳气溶胶浓度与亚洲其他地区较为接近^[10],但要高于中国西部其它城市,例如昆明市^[11].

OC/PM_{2.5} 和 EC/PM_{2.5} 分别为 0.12±0.06 和 0.02±0.01,OC/TC 值 88% 表明 OC 是碳气溶胶主要成分.TC/PM_{2.5} 在此研究中为 0.14±0.07 (总碳 TC 由 OC 加 EC 计算得出),TCA 为 19.79±9.1 μg·m⁻³ (总碳气溶胶 TCA 由 1.4 倍 OC 加 EC 计算得出),对 PM_{2.5} 的贡献为 19%±9%,高于京津冀地区^[2],表明碳气溶胶是 PM_{2.5} 的主要成分之一.

表 2 不同种类碳气溶胶浓度水平 (n=104)
Table 2 Carbon aerosols concentration levels (n=104)

	最小值 Minimum/ (μg·m ⁻³)	平均值 Mean/ (μg·m ⁻³)	中位数 Median/ (μg·m ⁻³)	最大值 Maximum/ (μg·m ⁻³)	方差 Standard deviation
PM _{2.5}	26	127.12	93	412	87.53
OC	4.25	12.73	11.26	27.18	5.74
EC	0.13	1.96	1.79	7.92	1.39
TC	4.64	14.70	13.59	31.73	6.82
TCA	6.34	19.79	18.16	41.25	9.10

注: TCA = 1.4 × (OC + EC).

采样期间不同类型天气下 4 种碳气溶胶浓度如图 1 所示,OC 浓度范围从非霾非沙尘天气下的 10.13 μg·m⁻³ 增加至中霾天气下 20.85±5.03 μg·m⁻³ (重霾天气下 21.01 μg·m⁻³),EC 浓度从非霾非沙尘天气下 1.71 μg·m⁻³ 增加至中霾天气下 2.75±0.46 (重霾天气下的 2.75 μg·m⁻³),高于中国其它西部城市^[11].霾和沙尘污染天下的 TC 和 TCA 浓度受污染源和气象因素影响较大,可能是霾天气下固定燃煤源和机动车尾气排放有关.但即使在非霾非沙尘天气下的碳气溶胶浓度也要高于其他地区,这可能与之前地区报道低浓度的气溶胶经过雨水的冲刷和其它的气象条件影响所致^[12].

通常霾和沙尘天气下都会有低能见度和高浓度的颗粒物浓度,普遍出现在冬季,通常在污染源排放较为稳定的情况下,气象条件成为影响霾和沙尘天气的主要因素.如表 3 所示,霾和沙尘天气下温度显著低于非霾与非沙尘天气下温度,霾天气的平均温度为 -6.73 °C (沙尘天气 -7.17 °C) 且相对湿度能达到 70% (重霾天气下缺乏实验样品).地表有着较低的温度,大气的稳定性高,地表空气循环受阻会影

响大气污染物的垂直输送,导致地表大气污染物浓度较高.

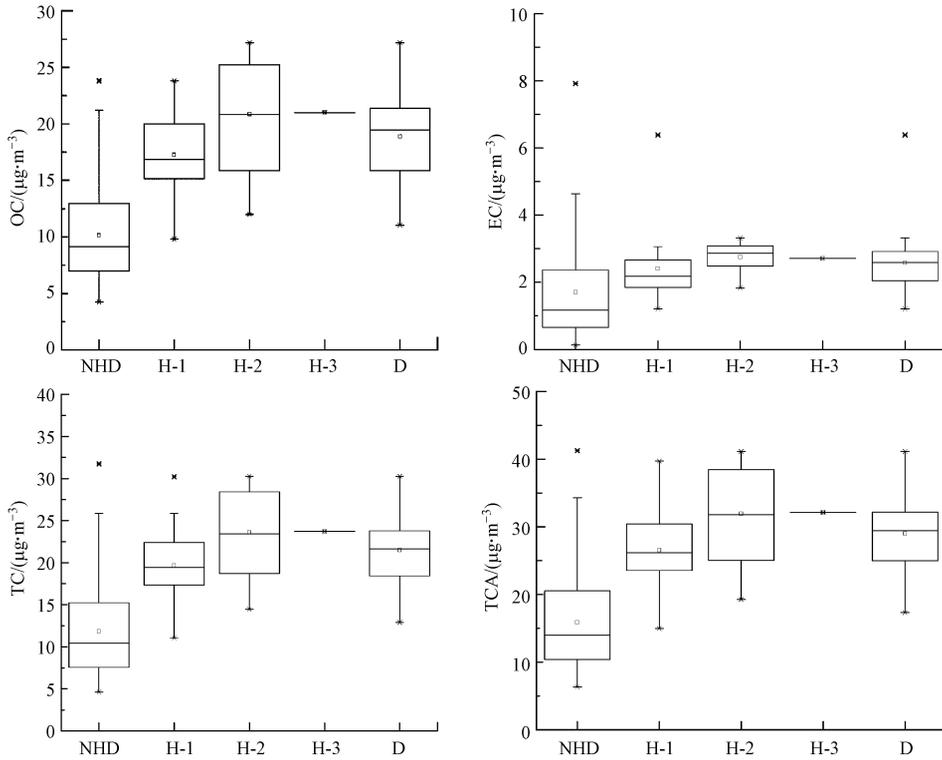


图1 污染天下4种碳气溶胶浓度水平

Fig.1 Carbon aerosols levels under haze and dust days

表3 霾与沙尘天气下的气象因素

Table 3 Meteorological factors in haze and dust weather

气象因素 Meteorological factors	非霾非沙尘 NHD	轻霾 H-1	中霾 H-2	重霾 H-3	沙尘 D
温度/℃	16	-4.98	-8.36	-6.85	-7.17
风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.41	1.41	1.10	1.48	1.36
相对湿度/%	47	71.37	75.93	62.15	73.74
风向/(drg)	257.34	258.86	243.5	277.54	250.91

为比较不同地区产业与能源结构地形与气候等因素对碳质气溶胶的影响,中国其它地区使用的不同方法测定的有机碳和元素碳浓度如表4所示.

表4 其他城市的有机碳元素碳浓度特征

Table 4 Carbon aerosols in other cities

城市 Sampling site	采样周期 Sampling period	方法 Method	有机碳 OC/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	元素碳 EC/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
圣保罗 ^[13]	2013/9—2013/11	TOT	3.01	1.5
南京 ^[14]	2013/5—2014/5	TOA	18.96	2.6
拉萨 ^[15]	2013/3—2014/2	TOR	7.92	1.00
成都 ^[16]	2012/5—2013/4	TOT	19	4.6
上海 ^[17]	2011/10—2012/8	TOR	6.6	2.6
西安 ^[18]	2012/12/1—2012/12/31	TOA	27	6.9

石河子市 OC 与 EC 浓度与南京和成都这些大城市市较为接近污染较为严重.西安市碳质气溶胶浓度高于石河子市,这是由于西安市属于内陆城市,污染物迁移较慢^[19].同为西部城市的拉萨市要低于石河子市,也低于南京、成都和西安市.这可能有两个原因,一方面这和经济发展的有关,另一方面拉萨市是

旅游业为主因此污染物浓度较低.圣保罗碳质气溶胶浓度要远低于上述我国城市,主要是因为该地区使用乙醇作为机动车燃料,有效的减少了机动车尾气的碳质气溶胶排放.上海市的有机碳元素碳浓度也很低,仅次于圣保罗,这是由于上海市是沿海城市具有较高的湿度和风速有利于污染物扩散,此外雨水冲刷作用也有效的降低了污染物浓度.

2.2 霾和沙尘天气下 OC/EC 相关性

Turpin 等认为 OC 和 EC 之间的相关性可以一定程度上去估算污染源^[20],OC 与 EC 之间的相关性越好,越能说明 OC 与 EC 有着相近的污染源^[21].本研究中 OC/EC 比值为 8.53 ± 5.75 ,表明研究期间 OC 与 EC 的污染源可能有机动车尾气,生物质燃烧,固定燃煤源和道路扬尘.

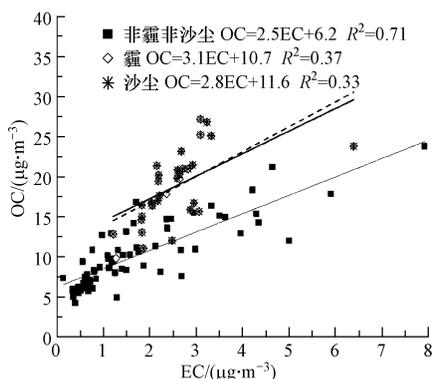


图 2 OC/EC 在不同污染天气下的相关性

Fig.2 OC/EC Correlation in haze and dust days

图 2 为石河子市 OC 与 EC 之间的相关性,在非霾非沙尘天气下 OC 与 EC 有着较强的相关性 ($R^2 = 0.71$),这表示在此天气下 OC 与 EC 的来源高度一致,可能是由于当时的交通或者道路扬尘等.霾和沙尘天气下相关性较差 R^2 分别为 0.37 和 0.33,和非霾非沙尘天气相比,霾和沙尘污染源较为复杂,可能包含固定燃煤源、机动车尾气、道路扬尘、生物质燃烧、柴油车尾气.有研究表明,新疆地区土壤中以碳酸盐形式存在的碳和有机质形式存在的碳含量较高^[22],可能使得沙尘天气下 OC 的来源更为广泛,进一步降低沙尘天气下 OC 与 EC 的相关性.

一般地,OC/EC 值超过 2 就不能忽视二次有机碳气溶胶 SOC 的生成^[23].SOC 目前没有比较发展成熟的仪器和方法去进行测量,一般使用经验公式去计算^[24]:

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min}$$

$$\text{PM}_{2.5} = (m_2 - m_1) \times 10^6 / (u \times 60 \times 23 \times 10^{-3})$$

其中, u 代表采样流量, m_1 与 m_2 代表滤膜采样前后的质量, $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 代表研究期间 OC/EC 最小值,本研究采用季节最小值计算 SOC.

(OC/EC) 季节最小值如表 5 所示, SOC 为对应季节最小值下的计算值.冬季 SOC 污染较为严重是霾和沙尘的高发期,因此有着充足的反应底物生成 SOC,相反,夏季 SOC 浓度最低,主要是缺乏相关反应物.

表 5 $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ 与 SOC 季节分布

Table 5 Seasonal distribution between $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$ and SOC

	$(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$	$\text{SOC}/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	SOC/OC	$\text{SOC}/\text{PM}_{2.5}$
春季	3.8	4.84 ± 1.88	0.55 ± 0.15	0.07 ± 0.03
夏季	4.7	3.57 ± 1.66	0.52 ± 0.22	0.08 ± 0.05
秋季	2.4	5.3 ± 2.49	0.42 ± 0.22	0.05 ± 0.03
冬季	3.7	8.59 ± 3.64	0.48 ± 0.15	0.05 ± 0.04
全年	2.4	6.06 ± 0.04	0.49 ± 0.18	0.06 ± 0.04

如表 6 所示,霾和沙尘天气下 SOC 浓度高于非霾非沙尘天气,且表现出污染加重 SOC 浓度逐渐升高趋势,中霾天气达到 $10.62 \pm 3.94 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (沙尘天气 $9.3 \pm 3.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$).这可能有二个原因:一方面,非霾非沙尘天气下 OC 与 EC 的排放量较少,SOC 的生成受限;另一方面,根据上述霾与沙尘天气下的气象因素可知,霾与沙尘天气多为低温与高湿度天气,这会导致大气混合层高度比较低风速也较小不利于 OC 与 SOC 的扩散,增加了反应物之间的有效碰撞,有利于 SOC 生成反应进行。

表 6 污染天气下 OC/EC 和二次有机碳污染程度

Table 6 SOC, SOC/OC, OC/EC and SOC/PM_{2.5} in different degree of pollution days

	非霾非沙尘 NHD	轻霾 H-1	中霾 H-2	重霾 H-3	沙尘 D
PM _{2.5} /($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	86.22±41.85	174.35±67.56	283±80.33	412	226.5±95
OC/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	10.13±4.08	17.24±3.8	20.85±5.03	21.01	18.9±4.4
EC/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	1.71±1.5	3.09±3.31	2.75±0.46	2.71	2.6±0.9
OC/EC	9.01±6.82	7.64±1.6	7.58±1.29	7.75	7.6±1.5
SOC/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	4.68±2.22	8.28±3.27	10.62±3.94	10.93	9.3±3.7
SOC/OC	0.64±0.2	0.67±0.09	0.67±0.07	0.69	0.67±0.09
SOC/PM _{2.5}	0.08±0.04	0.08±0.06	0.05±0.01	0.04	0.07±0.05

从 SOC 所占 OC 的百分比来看,在 PM_{2.5} 中 SOC/OC 分别为 64%、67%、67% 和 69%,沙尘天气下 67%.SOC 占有 OC 较高比例表明 SOC 是 OC 的主要成分,污染越严重 SOC 的生成率越大.本研究中 SOC/PM_{2.5} 仅为 6% 左右,且霾和沙尘天气下的 SOC/PM_{2.5} 随着污染加重而减小,这可以用霾和沙尘天气下的温度和相对湿度来解释,即当环境温度低于 15 °C 时,SOC 的生成反应就变得困难^[12],但霾和沙尘天气下低温和较高的相对湿度影响 PM_{2.5} 颗粒物的扩散,这导致 SOC/PM_{2.5} 随着污染天加重而减小。

2.3 碳组分的主成分分析

不同的排放源排放的碳组分浓度都有一定的差异,热光反射法根据不同的温度测得的 8 个碳组分浓度分别代表不同的污染源:OC1 代表生物质燃烧排放的碳组分,OC2 代表固定燃煤源排放,OC3 和 OC4 代表道路扬尘,OPC 和 EC1 代表汽油车尾气,EC2 和 EC3 代表柴油机尾气^[25-27]。

图 3 是不同污染天气下 8 种碳组分含量图(主成分分析见表 7) 碳组分的浓度与有机碳和元素碳的浓度趋势都是重污染天高浓度,轻污染天低浓度.OC1 在碳组分中占的比例较高,分别为非霾非沙尘天气 20%、轻霾 27%、中霾 28%、重霾 30%、沙尘天气 27%,表明石河子市汽油车尾气排放量要大于其它污染源.OC2 在碳质气溶胶中占得比重仅次于 OC1、OC3 和 OC4 代表道路扬尘^[28],通常研究中道路扬尘可以忽略不计,但是新疆地区多为裸露地表,道路扬尘在新疆地区不可忽略,且新疆地区冬季严寒,道路几乎一直处于冻土状态,因此 OC3 和 OC4 的主要来源很大程度上受到主要排放源影响,如固定燃煤源与机动车尾气^[12,29].因此通过碳质气溶胶的分析,石河子市主要的污染源为汽油车尾气、固定燃煤源和道路扬尘.OC3 和 EC4 浓度较低,检出率也较低,因此柴油机尾气可能是石河子市霾和沙尘天气的主要污染源。

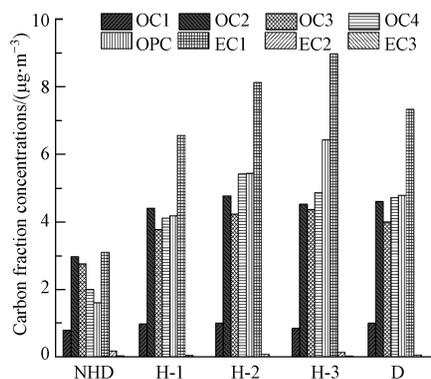


图 3 污染天气不同碳组分浓度分布图

Fig.3 Distribution of carbon aerosol fractions distribution in haze and dust days

表 7 碳气溶胶主成分分析

Table 7 Principal component analysis of carbon aerosol

	沙尘 D		霾 H		非霾非沙尘 NHD		
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F3
OC1	-0.31	-0.89	-0.10	0.92	0.93	-0.02	-0.02
OC2	0.92	-0.10	0.90	-0.21	0.39	0.84	-0.04
OC3	0.93	-0.12	0.91	-0.26	0.08	0.95	0.17
OC4	0.90	0.15	0.92	-0.01	0.66	0.70	0.10
OPC	0.91	0.75	0.92	-0.10	0.83	0.43	-0.11
EC1	0.86	0.07	0.93	0.20	0.81	0.55	0.03
EC2	0.14	0.40	0.30	0.78	-0.07	0.35	0.87
EC3	0.13	0.79	0.26	0.76	0.01	-0.14	0.93
SD	54.2%	28.4%	53.64%	28.02%	54.79%	22.41%	12.62%

使用 SPSS22.0 对石河子市碳质气溶胶的进行主成分分析如表 7 所示,非霾非沙尘天气下有 3 个主成分,F1 解释总方差的 54.79%,并且和 OC1、OPC 和 EC1 高度相关,这表明 F1 指示非霾和非沙尘天气下排放源有生物质燃烧和汽油车尾气;F2 解释总方差的 22.41%,并且和 OC2、OC3 高度相关,这表明 F2 指示非霾和非沙尘天气下排放源有固定燃煤源和道路扬尘;F3 解释总方差的 12.62%,并且和 EC2 和 EC3 高度相关,这表明 F3 指示的非霾非沙尘天气下排放源有柴油机尾气。

霾天气下给出两个主成分,F1 解释 53.64% 的总方差,给出的霾天气下的污染源主要是固定燃煤源、道路扬尘和汽油车尾气;F2 解释 28.02% 的方差,给出的污染源是生物质燃烧。

沙尘天气下给出两个主成分,F1 解释 54.2% 的总方差,给出的沙尘天气下主要污染源是固定燃煤源、道路扬尘和汽油车尾气;F2 解释 28.4% 的总方差,给出的主要污染源是柴油机尾气。

3 结论 (Conclusion)

石河子市 OC/EC 浓度和其它亚洲地区接近,霾和沙尘天气的加重能显著影响 OC/EC 浓度.不同地区产业与能源结构,气象条件等因素对碳质气溶胶的影响很大。

SOC/OC 在非霾非沙尘天气下约为 64%,霾和沙尘天气下达到 67%,表明石河子市碳质气溶胶主要属于二次有机气溶胶污染,并且霾和沙尘天气具有较为复杂的污染源。

在非霾非沙尘天气下石河子市的碳气溶胶常见稳定排放源是生物质燃烧、汽油车尾气、固定燃煤源、道路扬尘和柴油机尾气;霾天气下的碳气溶胶主要污染源是固定燃煤源、道路扬尘、汽油车尾气和生物质燃烧;沙尘天气下的碳气溶胶主要污染源是固定燃煤源、道路扬尘、汽油车尾气和柴油机尾气,因此霾与沙尘天气下的碳气溶胶浓度是不同的污染源综合排放导致。

参考文献 (References)

- [1] HAN Y M, CHEN L W A, HUANG R J, et al. Carbonaceous aerosols in megacity Xi'an, China: Implications of thermal/optical protocols comparison[J]. Atmospheric Environment, 2016, 132:58-68.
- [2] AM D L C, PIO C, JD D L R, et al. Characterization and origin of EC and OC particulate matter near the Doñana National Park (SW Spain)[J]. Environmental Research, 2009, 109(6):671-681.
- [3] CHENG Y, HE K B, DUAN F K, et al. Ambient organic carbon to elemental carbon ratios: Influences of the measurement methods and implications[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(12):2060-2066.
- [4] 刘雨思, 李杏茹, 张怡萌, 等. 济南市秋冬季大气细粒子污染特征及来源[J]. 环境化学, 2017, 36(4):787-798.
LIU S Y, LI X R, ZHANG Y M, et al. Characteristics and sources of fine atmospheric particles pollution in Ji'nan autumn and winter[J]. Environment Chemistry, 2017, 36(4):787-798 (in Chinese).
- [5] 安欣欣, 张大伟, 冯鹏, 等. 北京城区夏季 PM_{2.5} 中碳组分和二次水溶性无机离子浓度特征[J]. 环境化学, 2016, 35(4):713-720.
AN X X, ZHANG D W, FENG P, et al. Characteristics of carbon component and second water soluble ions of PM_{2.5} in Beijing summer [J]. Environment Chemistry, 2016, 35(4):713-720 (in Chinese).
- [6] ZHANG Q, QUAN J, TIE X, et al. Effects of meteorology and secondary particle formation on visibility during heavy haze events in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 502:578-584.

- [7] WANG Z, WANG T, GUO J, et al. Formation of secondary organic carbon and cloud impact on carbonaceous aerosols at Mount Tai, North China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 46(1):516-527.
- [8] 吴兑, 陈慧忠, 吴蒙, 等. 三种霾日统计方法的比较分析-以环首都圈京津冀晋为例[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(3):545-554.
WU D, CHEN H Z, WU M, et al. Comparative analysis of three statistical methods of haze days: a case study of Beijing, Tianjin, Hebei and Shanxi[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(3):545-554 (in Chinese).
- [9] 鞠洪波. 沙尘暴监测技术[M]. 中国林业出版社, 2008, 1-4.
JU H B. Dust storm monitoring technology[M]. China Forestry Press, 2008, 1-4 (in Chinese).
- [10] SHIMADA K, TAKAMI A, KATO S, et al. Characteristics of carbonaceous aerosols in large-scale Asian wintertime outflows at Cape Hedo, Okinawa, Japan[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2016, 100:97-107.
- [11] SHI J, DING X, ZHOU Y, et al. Characteristics of chemical components in PM_{2.5} at a plateau city, South-west China[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2016, 10(5):97-105.
- [12] WANG G, CHENG S, LI J, et al. Source apportionment and seasonal variation of PM_{2.5}, carbonaceous aerosol in the Beijing-Tianjin-Hebei Region of China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(3):143-155.
- [13] SANTOS D A M D, BRITO J F, GODOY J M, et al. Ambient concentrations and insights on organic and elemental carbon dynamics in São Paulo, Brazil[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 144:226-233.
- [14] YU X, MA J, AN J, et al. Impacts of meteorological condition and aerosol chemical compositions on visibility impairment in Nanjing, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 131:112-120.
- [15] WAN X, KANG S, XIN J, et al. Chemical composition of size-segregated aerosols in Lhasa City, Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Research*, 2016, s(174-175):142-150.
- [16] CHEN Y, XIE S, LUO B, et al. Characteristics and origins of carbonaceous aerosol in the Sichuan Basin, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 94(94):215-223.
- [17] WANG F, GUO Z, TIAN L, et al. Seasonal variation of carbonaceous pollutants in PM_{2.5}, at an urban 'supersite' in Shanghai, China [J]. *Chemosphere*, 2016, 146:238-244.
- [18] ZHANG Q, SHEN Z, CAO J, et al. Variations in PM_{2.5}, TSP, BC, and trace gases (NO₂, SO₂, and O₃) between haze and non-haze episodes in winter over Xi'an, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 112:64-71.
- [19] 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, 15(12):1460-1466.
CAO J J, LI S C, LI Y, et al. Physical and chemical characteristics and source apportionment of organic carbon and elemental carbon in the atmosphere of Xi'an during the autumn and winter in 2003[J]. *Advances in Natural Science*, 2005, 15(12):1460-1466 (in Chinese).
- [20] TURPIN B J, CARY R A, HUNTZICKER J J. An in situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1990, 12(1):161-171.
- [21] 杨超起, 曾立民, 唐静玥, 等. 无锡冬季和春季大气中细粒子化学组分及其特性分析[J]. *环境化学*, 2014, 33(9):1501-1513.
YANG Q C, ZENG L M, TANG J Y, et al. Analysis of the chemical components and characteristics of fine atmosphere particles in winter and spring in Wuxi[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(9):1501-1513 (in Chinese).
- [22] 贾宏涛, 赵成义, 王益权, 等. 新疆三江河流域土壤碳库的估算[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3):337-340.
JIA H T, ZHAO C Y, WANG Y Q, et al. Estimation of soil carbon pool in Sangong river in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3):337-340 (in Chinese).
- [23] CHOW J C, WATSON J G, LU Z, et al. Descriptive analysis of PM_{2.5}, and PM₁₀, at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(12):2079-2112.
- [24] 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.
- [25] CHOW J C, WATSON J G, KUHNS H, et al. Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the big bend regional aerosol visibility and observational study[J]. *Chemosphere*, 2004, 54(2):185-208.
- [26] CAO J J, WU F, CHOW J C, et al. Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, 5(11):3127-3137.
- [27] 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.
- [28] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(9):3263-3270.
ZHANG Y H, WANG D F, ZHAO Q B, et al. Characteristics and source analysis of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2014(9):3263-3270 (in Chinese).
- [29] 胡冬梅, 张鹏九, 彭林, 等. 晋城市区空气中 PM₁₀ 的化学组成特征[J]. *环境化学*, 2012, 31(3):390-391.
HU D M, ZHANG P J, PENG L, et al. Chemical composition characteristics of PM₁₀ in Jincheng city[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(3):390-391 (in Chinese).