

郭志明, 张向云, 刘頔, 等. 太原市 PM<sub>2.5</sub> 中碳质组分季节变化与组成特征[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(2): 65-69. Guo Zhiming, Zhang Xiangyun, Liu Di, et al. Characterization and seasonal variation of carbonaceous aerosol in urban atmosphere of Taiyuan[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(2): 65-69.

# 太原市PM<sub>2.5</sub>中碳质组分季节变化与组成特征

郭志明<sup>1</sup>, 张向云<sup>2</sup>, 刘頔<sup>2</sup>, 申铠君<sup>2</sup>, 李军<sup>2\*</sup>, 张干<sup>2</sup>

(1.中国辐射防护研究院,山西 太原 030006;

2.中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室,广东 广州 510640)

**摘要** 2013年10月至2014年7月,在太原市区,分4个月采集大气细颗粒物,共采集120个PM<sub>2.5</sub>样品,分析了颗粒物及其有机碳(OC)和元素碳(EC)浓度。结果表明,采样期间大气中PM<sub>2.5</sub>的日均浓度为(300±132) μg/m<sup>3</sup>,PM<sub>2.5</sub>超国家二级标准较严重,大致呈现春季>冬季>秋季>夏季的季节变化特征。大气PM<sub>2.5</sub>样品中OC和EC的含量变化范围分别为3.6~137和0.8~19.3 μg/m<sup>3</sup>,季节变化与颗粒物浓度不一致,呈现为冬季>秋季>春季>夏季的季节变化特征。利用核磁共振仪分析了典型样品中碳质组分的结构组成。结果显示,烷基碳、烷基取代芳香烃碳和氧取代的芳烃或者酚醛树脂类碳是气溶胶中有机质的主要组成成分,秋冬季样品中羧基碳和氧取代碳相对含量较高,主要来源于生物质燃烧,春季羟基类化合物增加显著,主要来源于地表土壤中的糖类,夏季样品中,来源于生物排放的烃类化合物和机动车排放的芳香烃相对含量较高。

**关键词** 太原市; PM<sub>2.5</sub>; 碳质气溶胶; 核磁共振; 有机碳; 元素碳

中图分类号 X513 文献标志码 A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2016.02.011 文章编号:1003-6504(2016)02-0065-05

## Characterization and Seasonal Variation of Carbonaceous Aerosol in Urban Atmosphere of Taiyuan

GUO Zhiming<sup>1</sup>, ZHANG Xiangyun<sup>2</sup>, LIU Di<sup>2</sup>, SHEN Kaijun<sup>2</sup>,

LI Jun<sup>2\*</sup>, ZHANG Gan<sup>2</sup>

(1.China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006, China; 2.State Key Laboratory of Organic Geochemistry,

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract**: Total 120 PM<sub>2.5</sub> samples were collected at urban Taiyuan from October 2013 to July 2014. Results indicated that averaged PM<sub>2.5</sub> concentrations were 300±132 μg/m<sup>3</sup>, which was much higher than the Grade of National Standard (70 μg/m<sup>3</sup>, daily). Organic carbon (OC) and element carbon (EC) were in the range of 3.6~137 μg/m<sup>3</sup> and 0.8~19.3 μg/m<sup>3</sup>, respectively. Seasonal variation data were characterized by higher concentration in winter than in summer. In addition, 4 aerosol filter samples collected in different seasons were analyzed using solid-state nuclear magnetic resonance (<sup>13</sup>C-NMR) spectroscopy to determine relative concentrations of carbon functional groups. The results indicate that organic in Taiyuan atmospheric aerosol particles is mainly composed of alkyl, alkyl-substituted aromatic and oxygen-substituted aromatic or phenolic functional groups. For the samples in fall and winter, the carboxyl and oxygen replaced functional groups are relatively higher, mainly from biomass burning. The relative abundance of hydroxyl functional groups increase significantly in spring, mainly from the source of sugars in surface soil resuspended; the increase of alkyl carbons and aromatic hydrocarbons in summer sample mainly from the source of biogenic and vehicle emissions, respectively.

**Key words**: Taiyuan; PM<sub>2.5</sub>; carbonaceous aerosol; <sup>13</sup>C-nuclear magnetic resonance; organic carbon(OC); element carbon(EC)

大气颗粒物,尤其是空气动力学直径≤2.5 μm的细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)能够散射或吸收太阳辐射和改变云凝结过程,影响全球气候变化、降低大气能见度、危害生态环境质量和人类健康,因而受到广泛的关注<sup>[1]</sup>。我

国2012年2月修订的《环境空气质量标准》增加了PM<sub>2.5</sub>监测指标<sup>[2]</sup>。碳质成分是大颗粒污染物的重要组成部分,占其质量浓度的15%~80%。碳质颗粒物(亦称碳质气溶胶)一般可分为有机碳(organic carbon,

《环境科学与技术》编辑部(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期 2015-04-17,修回 2015-06-21

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项B(XDB05040503)

作者简介:郭志明(1969-)男,副研究员,学士,主要从事环境影响评价(电子信箱)GZM603@163.com,\*通讯作者(电子信箱)junli@gig.ac.cn。

OC)和元素碳(elemental carbon, EC)。元素碳主要来源于化石燃料或木材等生物质的不完全燃烧排放<sup>[3]</sup>;有机碳则包括排放源直接排放的一次有机气溶胶(primary organic aerosol, POA)和挥发性有机物通过大气光化学氧化作用形成的二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA),以及非燃烧过程(主要指生物体如细菌、病毒、花粉和孢子等、植物碎屑以及土壤扬尘和沙尘暴等)来源的有机质。

华北地区是我国甚至全球 PM<sub>2.5</sub> 污染最为严重的地区之一,近年来该地区主要城市灰霾频发。许多学者对该地区的碳质气溶胶进行了研究,但主要集中在北京。太原是华北地区的重要城市之一,该城市的碳质气溶胶污染特征在华北地区具有代表意义。本文在太原市市区进行为期 1 年的采样观测,探讨该地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中含碳污染物的浓度水平、季节变化及可能的污染来源,同时利用核磁共振技术解析不同季节典型样品中碳质组分的结构组成特征。

## 1 样品采集与研究方法

### 1.1 采样点

采样点位于太原市小店区学府街的中国辐射防护研究院主楼楼顶,楼高为 9 层,距离学府街主干道直线距离约 50 m,周边为商业区和居民区。

### 1.2 样品采集

采用撞击式空气动力学切割大流量采样仪和微孔石英纤维滤膜来捕集大气中的 PM<sub>2.5</sub>。采样器为上海新拓实验仪器科技公司制造,采样流量为 300 L/min。石英滤膜为 PALL 公司产品,孔径为 0.7 μm,石英滤膜在采样前通过 450 °C 预烧 8 h 去除可能的含碳有机物。为了避免碳组分挥发,分析前样品用铝箔纸密封于 -20 °C 冷藏。采样前后对滤膜称重,使用电子微量天平称重 3 次。采样频率为 24 h/次,采样分 4 个阶段,分别为秋末冬初 2013 年 10 月 16 日到 11 月 16 日,冬季取暖期 2013 年 12 月 21 日到 2014 年 1 月 21 日,春季 2014 年 3 月 21 日到 4 月 21 日和夏季 2014 年 6 月 23 日到 7 月 23 日,每天采集 1 个样品,共采集 120 个 PM<sub>2.5</sub> 样品。

### 1.3 OC、EC 浓度分析

用打孔取样器将滤膜切割成 1.5 cm<sup>2</sup> 大小的切片。通过 Sunset 有机碳/元素碳(OC/EC)热光碳分析仪进行样品的 OC 和 EC 分析,该仪器采用 NIOSH5040 热光透射的分析方法(TOT)。其原理是:在无氧的纯氦气环境中,逐步对样品加热至 250 °C (OC1),500 °C (OC2),650 °C (OC3)和 850 °C (OC4),把滤纸上颗粒态的有机碳转化为 CO<sub>2</sub>,然后在含 2%

氧气的氦气环境下,分别于 650 °C (EC1),750 °C (EC2) 和 850 °C (EC3) 对样品逐步加热使 EC 转化为 CO<sub>2</sub>。各温度条件下释放出来的 CO<sub>2</sub> 用非红外色散法(NDIR)定量。样品在氦气中加热时,部分有机碳可能裂解碳化形成黑碳,使滤膜变黑,导致热谱图上有有机碳和元素碳的峰不易区分。所以在分析过程中采用 633 nm 氦—氛激光监测滤膜透射率获得裂解有机碳的检测值(OPC)。最终获得 OC (OC1+OC2+OC3+OC4+OPC)、EC (EC1+EC2+EC3-OPC) 和总碳(TC)含量。每天样品测试开始和结束时均用已知量的 CO<sub>2</sub> 气体(广州西城气体有限公司)对仪器进行校准,同时每天测试 1 个标准样品,每 10 个样品任意挑选 1 个进行重复测试。标准样品和重复测试样品的 TC 偏差均在 5%以内,OC、EC 的偏差均在 10%以内。所有样品的测定结果均进行了野外空白校正。

### 1.4 <sup>13</sup>C-NMR 分析碳质组分结构

核磁共振是有机化合物结构鉴定的一个重要手段,一般根据化学位移鉴定基团,本实验的碳质组分分析化学位移参考文献[4]。选取每个季度样品中碳含量较高的一个样品进行 <sup>13</sup>C-NMR 实验,分析不同季节典型灰霾期碳组分结构变化。<sup>13</sup>C-NMR 分析在 AVANCE 400 MHz 超导核磁共振仪上完成,采用 CP/MAS 固体双共振探头,4 mm ZrO<sub>2</sub> 转子, MAS 转速为 (5±0.003) kHz, <sup>13</sup>C 的检测共振频率为 100.613/MHz。用标准物 Glycine (甘氨酸) 标定化学位移, TOSS 技术消除旋转边带。采样时间为 5 μs,谱宽 100 kHz, 氦 90 度脉宽 5.5 μs,循环延迟时间为 1 s,扫描 100 000 次,所得核磁数据用 Bruker Topspin 2.1 软件处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 浓度

采样期间 PM<sub>2.5</sub> 日均浓度变化范围为 66~770 μg/m<sup>3</sup>,均值为(300±130) μg/m<sup>3</sup>。与拟在 2016 年实施的环境空气质量标准(GB 3095-2012)相比,平均值是国家一级标准(35 μg/m<sup>3</sup>)的 8.57 倍,最大值为 22 倍,采样期间超标天数为 100%。也远远超出国家二级标准(75 μg/m<sup>3</sup>),采样期间超标天数为 99%(只在夏季中有 1 d PM<sub>2.5</sub> 浓度低于二级标准)。太原 PM<sub>2.5</sub> 的日平均浓度略高于近期的北京市区,远远高于同期的广州市。高浓度的大气细颗粒物对环境和人体健康将产生严重的影响,彰显了华北地区大气细颗粒物污染治理的迫切性。

PM<sub>2.5</sub> 中的 OC 和 EC 日平均浓度分别为 34.3 和 7.3 μg/m<sup>3</sup>(表 1),范围分别在 3.6~137 μg/m<sup>3</sup> 和 0.8~

表 1 我国主要城市 PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 浓度均值  
Table 1 PM<sub>2.5</sub>, OC and EC concentrations of main cities in China

采样点	采样时间	PM <sub>2.5</sub>	OC	EC	文献与方法
北京	2009-2010	135	16.9	5.0	[4],TOR
上海	2010-2011	55	8.6	2.4	[5],TOR
广州	2006-2007	42.4	7.1	4.0	[6],TOR
太原	2013-2014	300	34.3	7.3	本研究,TOT

19.3 μg/m<sup>3</sup> 之间。OC 和 EC 的日平均含量分别占 PM<sub>2.5</sub> 总质量的 11.4%和 2.4%。总有机质(TOM)可以通过公式 (TOM=OC×1.6+EC) 获得。太原 PM<sub>2.5</sub> 中 TOM 占总质量的 6.3%~39.4%，显示了有机气溶胶在大气细颗粒物中的重要性。OC 的日均浓度远高于我国其他几个主要城市市区<sup>[5-7]</sup>，但 EC 的日均浓度则相当，反映了城市之间能源结构的差异。与机动车尾气排放相比，燃煤和生物质燃烧所产生的碳质组分中，OC 所占比例较高。太原市 OC 与 EC 的比值(OC/EC)的均值为 4.8，是北京和广州的 2 倍，显示燃煤和生物质燃烧可能是太原市大气细颗粒物中碳质组分的主要来源。

PM<sub>2.5</sub> 与 OC 和 EC 浓度之间为显著相关，相关系数(*r*<sup>2</sup>)分别为 0.55 和 0.57，但与其他城市相比，相关系数略低。此外，OC 与 EC 之间的相关系数(*r*<sup>2</sup>)为 0.72，也低于其他城市，进一步说明太原大气细颗粒物中碳质组分来源的复杂性，以及大气细颗粒物本身来源的多样性。

## 2.2 季节变化与影响因素

PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 浓度的季节变化如图 1 所示。采样期间 PM<sub>2.5</sub> 与 OC 和 EC 的浓度变化趋势略有不同，PM<sub>2.5</sub> 的最高出现在冬季，但月平均浓度春季略高于冬季，再次为秋季，最低值为夏季(表 2)。OC 和 EC 则在冬季最高，月平均值约是次高值秋季的 2 倍，再次为春季，最低值为夏季。总有机质占 PM<sub>2.5</sub> 总质量的比重的季节变化也略有不同，如图 1 和表 2 所示，当秋冬季节 PM<sub>2.5</sub> 的浓度较高时，TOM/PM<sub>2.5</sub> 比值也高。太原地处华北，取暖期间，除大量煤炭燃烧外，在广大农村地区，大量农作物秸秆等生物质燃料用于烹饪和取暖，这些燃料都释放大量的含碳物质，可能是形成秋

冬季高浓度的 PM<sub>2.5</sub> 和碳质气溶胶的主要原因。在春季，PM<sub>2.5</sub> 的日均值最高，但有机质相对含量反而最低。春季是我国北方地区沙尘暴的频发的季节，因此，地表扬尘应该是春季形成高浓度 PM<sub>2.5</sub> 的主要原因。夏季 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低，且有机质所占比重也远远低于秋冬季。一般来说，夏季植物生长旺盛，各种植物碎屑在气溶胶中含量相对较高；另一方面，夏季高温和强日照更容易生成二次有机气溶胶，会导致 OC 相对含量的增加。然而，太原夏季有机质占 PM<sub>2.5</sub> 的比重反而远远低于秋冬季，说明二次有机污染所产生的影响远远低于一次有机污染。

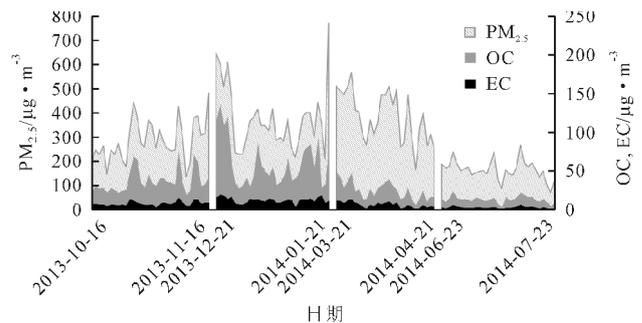


图 1 采样点 OC、EC 和 PM<sub>2.5</sub> 浓度的季节变化  
Fig. 1 Seasonal variation of OC, EC and PM<sub>2.5</sub>

大气中细颗粒物和碳质组分浓度的季节变化受到不同季节排放源强度的影响，而同一季节时期，气象条件的变化是引起 PM<sub>2.5</sub> 和 OC/EC 变化的主要原因。对不同季节污染物浓度与相应的气象参数对比分析，结果显示，风速是引起大气 PM<sub>2.5</sub> 和有机质浓度发生变化的最主要因素。随着风速的降低，污染物浓度增高。而其他气象参数，如温度、风向、湿度、气压等都没有发现有显著相关性。大气的稀释作用对太原空气污染程度有决定性作用。

表 2 不同季节 PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 的平均浓度

季节	PM <sub>2.5</sub>	OC	EC	<i>r</i> <sup>2</sup>	TOM/PM
秋季	285±85	37.3±15.5	7.8±2.8	0.72	23.5%
冬季	378±135	60.4±30.2	12.1±3.7	0.40	28.4%
春季	385±106	25.0±6.4	6.4±3.6	0.88	11.5%
夏季	163±42	13.3±4.4	2.9±1.2	0.84	14.6%

## 2.3 OC 与 EC 之间的相关分析

OC 与 EC 之间的比值常常被用来指示碳质气溶

胶的主要污染源。如 Turpin 等<sup>[8]</sup>认为，OC 和 EC 之间的相关关系，可以区分碳质气溶胶粒子的来源。若 OC

与 EC 含量变化的相关性好,则说明二者倾向于来自相同污染源。表 2 列出了不同季节 PM<sub>2.5</sub> 中 OC 和 EC 的相关系数。可以看出,秋冬季 OC 和 EC 质量浓度相关度较小,春夏季相关性较高,说明秋冬季 OC 和 EC 的来源相对复杂,这一结果与以往其他地区的研究结果相反<sup>[5-7]</sup>。图 2 显示了总有机质与 OC/EC 比值的不同季节变化图。在秋冬季,随着有机质总量的增加,OC/EC 的比值也增加,其比值一般在 6 到 8 之间,该值处在燃煤和生物质燃烧所排放 OC 和 EC 的比值范

围。同时,叠加城市大量的机动车排放,使得碳质组分来源复杂,OC 与 EC 之间的相关性较低(表 2)。在春夏季,随着总有机质的增加,OC/EC 的比值呈现降低的趋势,其比值在 3.5~4.5 之间。在城市的主要污染源中,机动车尾气排放的碳质气溶胶中 OC 与 EC 的比值最低,其比值可以达到 1 左右。因此,大气细颗粒物增加时,OC/EC 比值的降低,说明了机动车尾气排放对城市气溶胶的影响。

#### 2.4 不同季节典型灰霾期碳组分结构变化

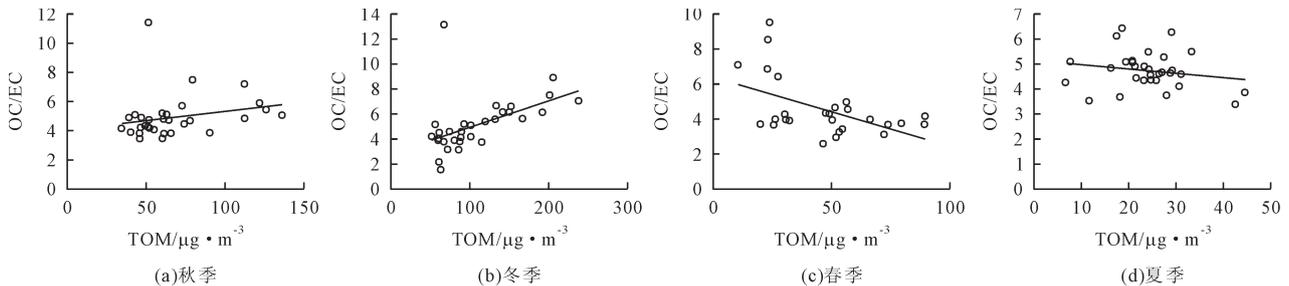


图2 PM<sub>2.5</sub>中TOM与OC/EC的相关性  
Fig.2 Correlations between TOM and OC/EC in PM<sub>2.5</sub>

4 个季节各选取了一个 PM<sub>2.5</sub> 和总有机质(TOM)浓度值较高的样品,分别为 2013 年 11 月 8 日(TOM=136 μg/m<sup>3</sup>)、2013 年 12 月 22 日(TOM=238 μg/m<sup>3</sup>)、2014 年 3 月 26 日(TOM=88.9 μg/m<sup>3</sup>)和 2014 年 7 月 14 日(TOM=42.5 μg/m<sup>3</sup>)进行了<sup>13</sup>C-NMR 分析。各个样品的<sup>13</sup>C-NMR 分析谱图如图 3 所示。根据化学位移解析各个样品中有机质的基团组成,结果如图 4 所示。总体来看,烷基碳、烷基取代芳香烃碳和氧取代的芳烃或者酚醛树脂类碳是太原市大气气溶胶中有机质的主要组成成分。这几类化合物是各种燃烧源排放的共有产物<sup>[9]</sup>,说明太原市大气有机质污染来源的多样性。从不同种类碳的相对组成来看,不同季节样品中碳组分表现出较明显的季节差异。秋季与冬季样品的碳质组分比较相近,其中羧基碳和氧取代碳相对含量较高。研究表明,生物质燃烧排放最多的组分是羧酸类化合物和甲氧基酚类化合物<sup>[10]</sup>,因此,秋冬季,除了燃煤外,生物质燃烧是太原大气气溶胶有机质的主要来源之一。春季羟基类化合物增加显著,可归结于地表土壤中的各种糖类在大气气溶胶中相对比例的增加。夏季样品中,总烷烃类化合物增加显著,夏季植物生长旺盛,生物排放烃类也多,各种植物碎屑在气溶胶也增加致使烷烃类碳的比例增高,而芳香烃化合物比例的增加说明了随着生物质燃烧和燃煤的相对贡献下降,此消彼长,凸显了机动车尾气排放对夏季城市气溶胶的贡献。此外,夏季高温是产生二次有机气溶胶的有利条件,一般来说,二次有机气溶胶以

羧基类化合物为特色,但图 4 结果说明,在太原市来说,二次有机污染要远远小于一次有机污染,控制一次污染物的排放是保证空气质量的关键。

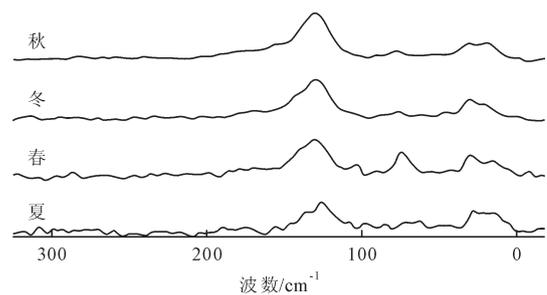


图3 不同季节灰霾期PM<sub>2.5</sub>的<sup>13</sup>C-NMR图谱  
Fig.3 <sup>13</sup>C-NMR spectrum of PM<sub>2.5</sub> during different seasons' haze period

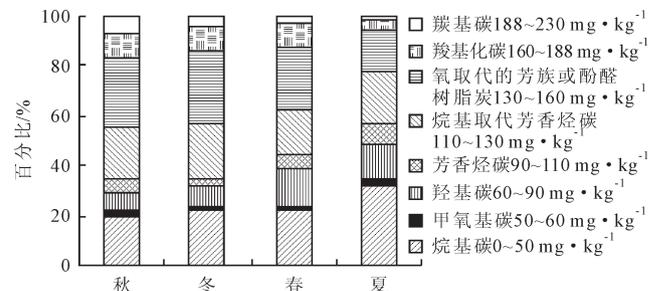


图4 不同季节灰霾期PM<sub>2.5</sub>中碳质组分变化  
Fig.4 Variations of carbonaceous component in PM<sub>2.5</sub> during different seasons' haze period

### 3 结论

(1) 采样期间,太原市区大气 PM<sub>2.5</sub>、OC 和 EC 的浓度变化范围为分别为 66~770、3.6~137 和 0.8~19.3

μg/m<sup>3</sup>。碳质气溶胶 OC、EC 是太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 的关键组分。PM<sub>2.5</sub> 的浓度呈现春季>冬季>秋季>夏季的季节特征,OC 和 EC 呈现为冬季>秋季>春季>夏季的季节特征。

(2)OC/EC 比值和 OC、EC 相关性研究表明,太原市大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC 主要以一次有机碳为主,秋冬季生物质燃烧贡献较大,夏季大气中有机质主要来源于机动车尾气排放;风速是影响大气中 PM<sub>2.5</sub> 和有机质浓度的主要气象因素。

(3)<sup>13</sup>C-NMR 分析结果显示,烷基碳、烷基取代芳香烃碳和氧取代的芳烃或者酚醛树脂类碳是太原市大气气溶胶中有机质的主要组成成分,秋季与冬季样品的碳质组分以羧基碳和氧取代碳相对含量较高,主要来源于生物质燃烧;春季羟基类化合物增加显著,主要来源于地表土壤中的各种糖类;夏季样品中,来源于生物排放的烃类化合物和机动车排放的芳烃类化合物增加显著。

#### [参考文献]

- [1] Wilson W E, Suh H H. Fine particles and coarse particles: concentration relationships relevant to epidemiologic studies [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 1997,47 (12):1238-1249.
- [2] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [3] Larson S M, Cass G R. Characteristics of summer midday low-visibility events in the Los Angeles area [J]. Environmental Science & Technology, 1989,23(3):281-289.
- [4] Zhao JP, Peng PA, Song JZ, et al. Characterization of macromolecular organic matter in atmospheric dust from Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 5612-5620.
- [5] Zhang R, Jing J, Tao J, et al. Chemical characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing: seasonal perspective[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13: 7053-7074.
- [6] 张懿华,王东方,赵倩彪,等.上海城区 PM<sub>2.5</sub> 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 Yihua, Wang Dongfang, Zhao Qianbiao, et al. Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in PM<sub>2.5</sub> in Shanghai urban area[J]. Environmental Science, 2014,35(9):3263-3270. (in Chinese)
- [7] 黄虹,曹军骥,曾宝强,等.广州大气细粒子中有机碳、元素碳和水溶性有机碳的分布特征[J].分析科学学报,2010,26(3):255-260.  
Huang Hong, Cao Junji, Zeng Baoqiang, et al. Characterization of organic carbon, elemental carbon and water-soluble organic carbon in PM<sub>2.5</sub> of Guangzhou City[J]. Journal of Analytical Science, 2010,26(3):255-260. (in Chinese)
- [8] Turpin B J, Cary R A, Huntzicker J J. An in-situ, time-resolved analyzed for aerosol organic and elemental carbon[J]. Aerosol Science Technology, 1990,12(1):161-171.
- [9] 固泽平. 大气细颗粒物有机质组成的变化规律及其在源解析中的应用[D].上海:上海大学,2009.
- [10] 谢绍东,于淼,姜明.有机气溶胶的来源与形成研究现状[J].环境科学学报,2006,26(12):1933-1939.  
Xie Shaodong, Yu Miao, Jiang Ming. Research progress in source and formation of organic aerosol[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006,26(12):1933-1939. (in Chinese)
- [11] 崔冬林,王式功,尚可政,等.兰州市霾日与气象参数和空气质量的关系[J].兰州大学学报:自然科学版,2010,46(2):26-32.
- [12] 戴永立,陶俊,林泽健,等.2006~2009年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J].环境科学,2013,34(8):2925-2932.  
Dai Yongli, Tao Jun, Lin Zejian, et al. Characteristics of haze and its impact factors in megacities in China during 2006-2009[J]. Environmental Science, 2013, 34(8): 2925-2932. (in Chinese)
- [13] 许明芳,苏天星,杨再强,等.湖北省1980-2012年霾气候变化特征的研究[J].中国农学通报,2014,30(26):253-259.  
Xu Mingfang, Su Tianxing, Yang Zaiqiang, et al. Climatic characteristics of haze days in Hubei Province during 1980-2012[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(26): 253-259. (in Chinese)
- [14] 周悦,高正旭,周月华,等.湖北省电线积冰特征及其冰区划分[J].自然灾害学报,2013,22(6):169-177.  
Zhou Yue, Gao Zhengxu, Zhou Yuehua, et al. Characteristics of wire icing and icing zoning in Hubei Province[J]. Journal of Natural Disasters, 2013, 22(6): 169-177. (in Chinese)
- [15] 付晓辉,肖刚,姜玉印,等.近53年宜昌市霾的演变特征及气象因子诊断[J].长江流域资源与环境,2010,19(2):164-168.
- [16] 李菲,吴兑,谭浩波,等.广州地区旱季一次典型灰霾过程的特征及成因分析[J].热带气象学报,2012,28(1):113-122.
- [17] 钱峻屏,黄菲,杜鹃,等.广东省雾霾天气能见度的时空特征分析[J].生态环境,2006,15(6):1324-1330.
- [18] 张云海,马雁军,刘宁微,等.沈阳地区霾的环境特征研究[J].生态环境学报,2010,19(11):2636-2641.  
Zhang Yunhai, Ma Yanjun, Liu Ningwei, et al. Study on environmental characteristics of haze in Shenyang[J]. Ecology and Environmental Science, 2010, 19(11): 2636-2641. (in Chinese)

(上接第 56 页)