环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.9
第41卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第9期
2020年9月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第9期 2020年9月
Vol.41, No.9 Sep., 2020

鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析

林孜, 姬亚芹*, 林宇, 国纪良, 马妍, 赵静琦
(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 为研究鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中碳组分污染特征及来源,于 2014 年 10 月采集鞍山市 9 条道路的扬尘样品,通过再悬浮得到 $PM_{2.5}$ 滤膜样品,利用热光碳分析仪测定 $PM_{2.5}$ 中 OC(有机碳)和 EC(元素碳)并分析其特征. 结果表明,道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 ω(TC)为 9.78%(外环路)~14.00%(千山西路),ω(OC)为 8.15%(外环路)~10.84%(千山西路),ω(EC)为 1.63%(外环路)~2.85%(千山西路),ω(OC)明显高于 ω(EC),说明各道路扬尘中含有较多的有机碳; 采样期间 OC/EC 的值均大于 2,说明道路扬尘中均可能存在二次污染; 通过 Spearman 相关分析及线性拟合可知,鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 来源大致相同; 聚类分析表明,鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中碳组分主要来源于机动车尾气排放、生物质燃烧和煤炭燃烧.

关键词:道路扬尘; $PM_{2.5}$; 有机碳; 元素碳; 鞍山市
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)09-3918-06 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202002049

Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan

LIN Zi, JI Ya-qin*, LIN Yu, GUO Ji-liang, MA Yan, ZHAO Jing-qi
(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to study the characteristics and sources of carbon fractions in $PM_{2.5}$ in road dust in Anshan, road dust samples were collected from nine roads in Anshan in October 2014 and re-suspended on filters using a NK-ZXF sampler to obtain $PM_{2.5}$ samples. A thermal optical carbon analyzer (IMPROVE-TOR) was employed to measure the mass fraction of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in $PM_{2.5}$. The results showed that ω(TC) in $PM_{2.5}$ in road dust was 9.78% (outer loop)-14.00% (Qianshan West Road), ω(OC) was 8.15% (outer loop)-10.84% (Qianshan West Road), and ω(EC) was 1.63% (outer loop)-2.85% (Qianshan West Road). ω(OC) was much higher than ω(EC), indicating that road dust contained a large amount of organic carbon. All OC/EC values were greater than 2.0 during the sampling period, suggesting that there was secondary pollution. Spearman correlation analysis and linear fitting indicated that the sources of OC and EC were basically the same. Cluster analysis results showed that carbon components in $PM_{2.5}$ in road dust in Anshan mainly originated from vehicle exhaust, biomass burning, and coal combustion emissions.

Key words: road dust; $PM_{2.5}$; organic carbon (OC); elemental carbon (EC); Anshan

大气细颗粒物($PM_{2.5}$)被认为是影响城市环境空气质量的首要污染物[1~3],而道路扬尘对大气颗粒物的贡献率可达 20% 左右[4~6]. 研究表明,道路扬尘作为城市扬尘的重要来源之一[7,8],已成为影响空气质量[9,10]以及能见度和人体健康[11~14]的重要因素之一.

碳组分作为道路扬尘的重要组成部分之一[15]日渐受到关注. 马妍等[16]基于样方法研究了天津市春季道路扬尘碳组分的特征及来源解析; 胡月琪等[17]研究了北京市典型道路扬尘碳组分及其他化学组分的特征及年际变化; 郭森等[18]研究了石家庄市夏季道路尘有机碳和元素碳的特征和来源.

鞍山市是我国重要的钢铁工业基地,鞍山市路网密度逐年增大,便捷交通体系建设不断加快,城市道路面积、分布范围逐步增大且人为活动日渐频繁,所以道路扬尘对空气质量和人体健康的影响日益凸显. 本研究通过采集 2014 年 10 月鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 样品,分析鞍山市道路扬尘碳组分特征及其来源,旨在为鞍山市改进环境空气质量,制定大气污染控制对策及环境管理对策提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据《城市道路工程设计规范(CJJ 37-2012)》选取鞍山市主干道、次干道、支路和外环线 4 种道路类型, 2014 年 10 月共采集鞍山市市区内 9 条铺装道路的扬尘样品,采样点位如图 1 所示. 每条道路分别设置 2~4 个采样点位,采样点之间的间隔通常大于 800 m,采样点位的位置应尽量避开路口处、公交车站等人流密集处. 用细软毛刷扫取慢车道路面积尘,采集到同一条道路不同位置的道路扬尘样品,共获得 26 个样品.

收稿日期: 2020-02-09; **修订日期**: 2020-04-02
作者简介: 林孜(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境空气污染防治技术与理论,E-mail:812754714@qq.com
* 通信作者,E-mail:jiyaqin@nankai.edu.cn

图 1　鞍山市道路扬尘采样点位示意

Fig. 1　Road dust sampling points in Anshan

1.2　样品处理

将采集的样品除去垃圾、树枝等杂物，在实验室内自然阴干，通过 150 目泰勒标准筛进行筛分；将筛分后的样品送入南开大学自主研发的 NK-ZXF 再悬浮采样器进行再悬浮，得到鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 滤膜样品，将得到的滤膜样品送入恒温恒湿天平室中平衡 72 h 后称重以备用，滤膜采用 47 mm 的石英滤膜.

使用美国沙漠研究所研制的 DRI MODEL2001 热光碳分析仪（Thermal/optical carbon A nalyzer）分析 TC（总碳）、EC（元素碳）和 OC（有机碳）. 分析方法为：利用裁膜刀在石英滤膜上切出 0.188 cm^2 的样品送入样品炉中，当样品炉内通入纯 He 时，分为 120℃（OC1）、250℃（OC2）、450℃（OC3）和 550℃（OC4）这 4 个温度段进行加热升温，同时吸收 OC 和分解产物进入二氧化锰氧化炉中，石英滤膜上的 OC 转化形成 CO_2；以上过程结束后，载气变成含有 2% 氧气的氦气，分别以 550℃（EC1）、700℃（EC2）和 800℃（EC3）逐步加热，样品中的 EC 被氧化为 CO_2. 不同温度梯度下产生的 CO_2，经过镍催化，在还原环境下转化为可经火焰离子化检测器（FID）检测出的 CH_4. OC 在碳化过程中形成的碳化物称为裂解碳（OPC）. 根据IMPROVE协议将OC定义为 OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC，将 EC 定义为 EC1 + EC2 + EC3 − OPC，TC 定义为 OC + EC.

1.3　质量控制

采样前，为降低滤膜中的杂质及残留碳对称重的影响，将空白的石英滤膜放入 550℃ 的马弗炉中烘 2 h；采样前后将石英膜送入恒温恒湿天平室中平衡 3 d，以降低湿度、温度等对称重的影响. 每次样品分析碳组分前后，都采用 CH_4/CO_2 标准气体进行仪器校正；每周测量仪器的系统空白及实验室空白；每 10 个样品随机抽取 1 个样品进行平行分析.

2　结果与讨论

2.1　OC、EC 含量分析

鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中碳组分质量分数如表 1 所示，OC、EC 和 TC 分别占鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 的（9.74 ± 1.30）%、（2.55 ± 0.59）% 和（12.30 ± 1.81）%；道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 ω（TC）为 9.78%（外环路）~ 14.00%（千山西路），ω（OC）为 8.15%（外环路）~ 10.84%（千山西路）；ω（EC）为 1.63%（外环路）~ 2.85%（千山西路）；TC、OC 和 EC 均表现为外环路最低，千山西路最高. 道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 OC 所占质量分数高于 EC，说明各道路扬尘中含有较多的有机碳，既包括直接排放的一次有机碳，也可能还存在二次污染.

鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 ω（OC）、ω（EC）与天津、石家庄、盘锦、上海和晋城市道路扬尘[19~22]的对比如图 2 所示. 从中可知鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 ω（OC）显著低于石家庄市，稍低于天津市，稍高于其他几个城市；ω（EC）均高于这几个城市，说明 ω（EC）处于较高水平，这可能与鞍山市作为中国重要的钢铁工业基地，需要较多大型柴油车运输钢铁有关；鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中碳组分质量分数相对较高，ω（TC）仅稍低于天津市和石家庄市，说明鞍山市的道路扬尘的污染值得重视.

表 1　鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中碳组分质量分数/%

Table 1　Mass fraction of carbon fractions in road dust $PM_{2.5}$ in Anshan/%

道路	OC1	OC2	OC3	OC4	EC1	EC2	EC3	OPC	OC	EC
千山东路	1.97	1.67	3.03	2.60	1.52	0.75	0.48	0.20	9.47	2.55
千山西路	2.74	1.90	3.65	2.26	1.61	1.14	0.70	0.29	10.84	3.16
千山中路	2.84	1.82	3.24	1.85	1.71	1.02	0.62	0.50	10.25	2.85
胜利路	2.42	1.86	3.60	1.79	1.80	0.95	0.52	0.51	10.18	2.76
外环路	1.54	1.36	2.60	2.20	1.24	0.56	0.28	0.45	8.15	1.63
中华路	1.14	1.48	3.01	2.49	1.43	0.67	0.29	0.27	8.39	2.12
园林路	2.56	1.85	3.39	1.90	1.67	0.91	0.53	0.32	10.02	2.79
解放路	2.27	1.56	2.81	1.95	1.42	0.71	0.33	0.39	8.98	2.07
建国路	2.86	2.02	3.50	2.01	1.62	1.04	0.47	0.44	10.83	2.69

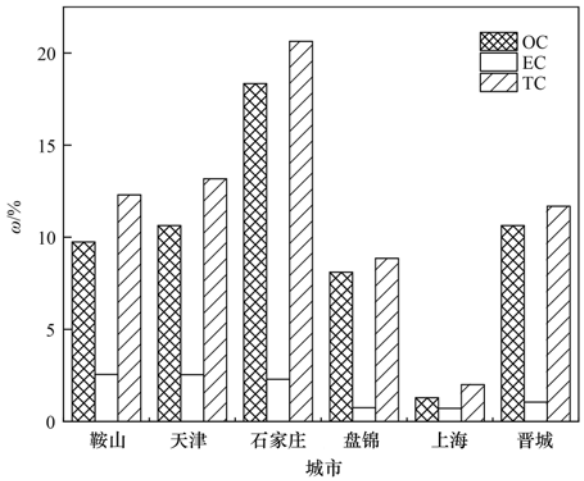

图 2 鞍山市与其他城市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中碳组分对比

Fig. 2 Mass fraction of carbon components of road dust $PM_{2.5}$ in Anshan with other cities

2.2 OC/EC 比值分析

OC/EC 比值可以被用来判断是否存在二次污染,对于分析颗粒物的二次来源具有指导意义. 有研究表明[16, 23],当 OC/EC 比值大于 2 时,则表明存在二次有机碳; 有研究表明[24, 25],比值在 1.0 ~ 4.2 之间,说明有柴油车和汽油车尾气排放; 比值在 2.5 ~ 10.5 之间,说明有燃煤排放; 比值在 8.1 ~ 12.7 之间时,说明有生物质燃烧排放. 鞍山市不同道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 含量及 OC/EC 比值如图 3 所示,鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 的 OC/EC 比值为 3.43 ~ 5.00 之间,平均值为 3.93,其中外环路的 OC/EC 比值最大为 5.00,千山西路的 OC/EC 比值最小为 3.43,数值均大于 2,表明鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 存在明显的二次污染,主要来源为汽油车与柴油车尾气排放和燃煤排放.

与国内其他研究[26 ~ 28]道路扬尘 $PM_{2.5}$ 的 OC/EC 比值相比,鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC 的平均值稍低于天津市春季道路降尘 OC/EC 比值(6.65 ~ 8.91)和石家庄市冬季道路扬尘 OC/EC 比值(6.56),高于运城市道路扬尘 OC/EC 比值(1.62)和上海市道路扬尘 OC/EC 比值(1.83). 推测其受到排放源源强、气象因素和采样时间、采样方法及鞍山市钢铁冶炼活动等的影响. 本研究所利用的采集方法采集到的道路扬尘更容易受到机动车尾气排放的影响,而采用降尘缸所采集的道路降尘与大气 $PM_{2.5}$ 的关系更为紧密. 董海燕等[29]的研究表明,OC/EC 比值在冬季最高,冬季燃煤燃生物质取暖增加,导致二次有机碳前体物浓度增加,加之冬季逆温现象严重,导致二次有机碳的积累,这可能是本研究所得 OC/EC 比值低于石家庄市冬季道路扬尘 OC/EC 比值的原因.

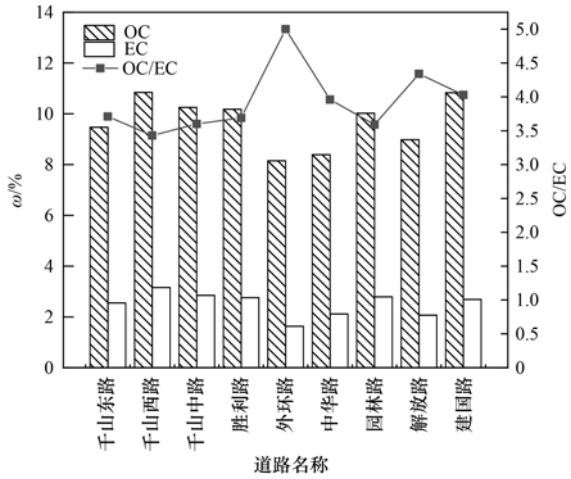

图 3 道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 和 OC/EC 对比

Fig. 3 Comparison of OC, EC, and OC/EC in road dust $PM_{2.5}$

2.3 OC、EC 相关关系分析

Turpin 等[30]的研究认为,可通过探究 OC 与 EC 之间的相关性判断碳质气溶胶粒子来源; 若相关,则表明 OC 与 EC 存在相似或相同的污染源;相反则来源复杂. 对鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 ω(OC)和 ω(EC)进行 Spearman 相关分析得出 $P = 0.000$ (<0.05),并对其进行线性拟合如图 4 所示,ω(OC)和 ω(EC)的函数关系为 EC = 0.37OC − 1.01,相关系数 R 为 0.81,显著相关,表明鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 具有相同或相似的来源.

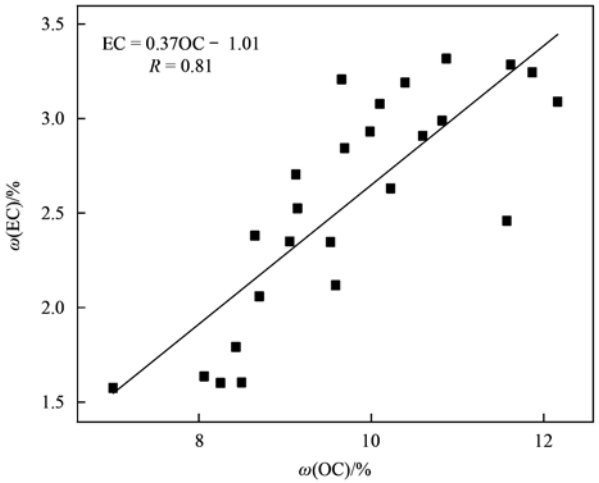

图 4 道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 OC 与 EC 相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of OC and EC in road dust $PM_{2.5}$

2.4 道路扬尘 $PM_{2.5}$ 来源解析

有研究表明,OC1 主要来自于生物质燃烧排放; OC2、OC3、OC4 和 EC1 主要来自于机动车尾气和燃煤排放[31]; OPC 主要来源于大气中水溶性极性化合物[32]; EC2 和 EC3 是柴油车尾气中丰富的碳组分[33]. 因此,根据道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中 8 种碳组分的含量可以定性判断其主要来源. 鞍山市道路扬尘

$PM_{2.5}$中 8 种碳组分的质量分数水平如图 5 所示，从中可知，ω(OC3)、ω(OC1)、ω(OC4)、ω(OC2)和ω(EC1)均较高，表明鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$中碳组分主要来源于机动车尾气排放、生物质燃烧和燃煤.

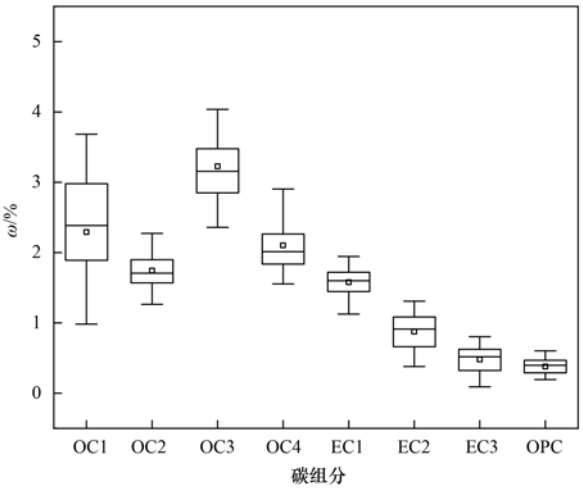

图 5　$PM_{2.5}$中 8 种碳组分质量分数水平

Fig. 5　Mass fraction of eight carbon fractions in $PM_{2.5}$

聚类分析(CA)是按照事物之间的相似性进行科学地区分和分类的过程，通过在变量间定义可代表变量间相似程度的相似系数，按照相似程度的大小，将变量逐个归类，最终形成一个可表征相似程度的谱系图[34]. 为了对鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$的来源进行进一步的分析，运用 SPSS 22.0 软件对 $PM_{2.5}$中 8 种碳组分进行聚类分析，结果如图 6 所示. 从中可知，鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$中的碳组分可分为两类，第一类为 EC2、EC3 和 OPC，主要来源为柴油车尾气排放，这可能受到鞍山市盛产钢铁，需要较多大型柴油车运输钢铁的影响；第二类为 OC2、EC1、OC4、OC1 和 OC3，主要来源为燃煤、生物质燃烧和汽车尾气排放的混合源，这可能与鞍山市的产业结构以钢铁冶金、煤炭消耗为主有关. 综上所述，鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$中的碳组分主要来源于汽车尾气的排放、生物质燃烧和燃煤排放.

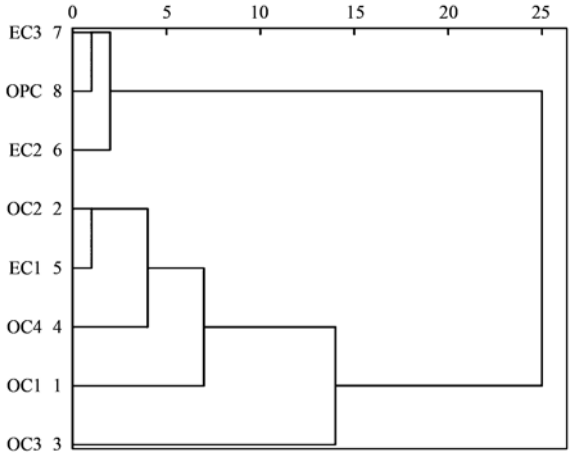

图 6　道路扬尘 $PM_{2.5}$中 8 种碳组分的聚类分析

Fig. 6　Cluster analysis of eight carbon fractions in road dust $PM_{2.5}$

3　结论

(1)鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$中 ω(TC)为 9.78% ~14.00%(千山西路)，ω(OC)为 8.15%(外环路) ~10.84%(千山西路)，ω(EC)为 1.63%(外环路) ~2.85%(千山西路)，OC 所占质量分数远高于 EC，说明各道路扬尘 $PM_{2.5}$中含有较多的有机碳，既包括直接排放的一次有机碳，也可能由二次转化而来.

(2)鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$中 OC/EC 比值为 3.43 ~5.00 之间，平均值为 3.93，比值均大于 2，表明道路扬尘 $PM_{2.5}$存在二次碳污染，主要来源为汽油车与柴油车尾气排放和燃煤排放.

(3)相关分析表明，鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$中 OC、EC 的相关系数为 R 为 0.81，表明 OC、EC 来源大致相同.

(4) 聚类分析表明，鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$中的碳组分主要来源于汽车尾气的排放、生物质燃烧和燃煤排放.

参考文献：

[1] 王燕，彭林，李丽娟，等. 晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析[J]. 环境科学，2016，**37**(1)：82-87.
Wang Y, Peng L, Li L J, *et al*. Chemical compositions and sources apportionment of re-suspended dust in Jincheng[J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 82-87.

[2] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, *et al*. Winter and summer $PM_{2.5}$ chemical compositions in fourteen Chinese cities[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, **62**(10): 1214-1226.

[3] 赵静琦，姬亚芹，张蕾，等. 基于样方法的天津市春季道路扬尘 $PM_{2.5}$中水溶性离子特征及来源解析[J]. 环境科学，2018，**39**(5)：1994-1999.
Zhao J Q, Ji Y Q, Zhang L, *et al*. Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in road dust $PM_{2.5}$ during spring in Tianjin using the quadrat sampling method[J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 1994-1999.

[4] 张智胜，陶俊，谢绍东，等. 成都城区 $PM_{2.5}$季节污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报，2013，**33**(11)：2947-2952.
Zhang Z S, Tao J, Xie S D, *et al*. Seasonal variations and source apportionment of $PM_{2.5}$ at urban area of Chengdu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(11): 2947-2952.

[5] 王敬，毕晓辉，冯银厂，等. 乌鲁木齐市重污染期间 $PM_{2.5}$污染特征与来源解析[J]. 环境科学研究，2014，**27**(2)：113-119.
Wang J, Bi X H, Feng Y C, *et al*. Pollution characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ during heavy pollution process in Urumchi City[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(2): 113-119.

[6] 王苏蓉，喻义勇，王勤耕，等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. 中国环境科学，2015，**35**(12)：3535-3542.
Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, *et al*. Source apportionment of

$PM_{2.5}$ in Nanjing by PMF[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3535-3542.

[7] 樊守彬, 田刚, 李钢, 等. 北京铺装道路交通扬尘排放规律研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(10): 2396-2399.
Fan S B, Tian G, Li G, *et al*. Emission characteristics of paved roads fugitive dust in Beijing[J]. Environmental Science, 2007, **28**(10): 2396-2399.

[8] 张伟, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季样方法道路扬尘 $PM_{2.5}$ 粒度乘数特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 1955-1959.
Zhang W, Ji Y Q, Li S L, *et al*. $PM_{2.5}$ size multiplier feature of road dust in Tianjin during spring with quadrat sampling method [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 1955-1959.

[9] Liu E F, Yan T, Birch G, *et al*. Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China[J]. Science of the Total Environment, 2014, **476-477**: 522-531.

[10] Amato F, Favez O, Pandolfi M, *et al*. Traffic induced particle resuspension in Paris: emission factors and source contributions [J]. Atmospheric Environment, 2016, **129**: 114-124.

[11] Andreão W L, Albuquerque T A, Kumar P. Excess deaths associated with fine particulate matter in Brazilian cities[J]. Atmospheric Environment, 2018, **194**: 71-81.

[12] 王庚辰, 王普才. 中国 $PM_{2.5}$ 污染现状及其对人体健康的危害[J]. 科技导报 2014, **32**(26): 72-78.
Wang G C, Wang P C. $PM_{2.5}$ pollution in China and its harmfulness to human health[J]. Science & Technology Review, 2014, **32**(26): 72-78.

[13] 陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(3): 592-597.
Tao Y, Liu Y M, Mi S Q, *et al*. Atmospheric pollution characteristics of fine particles and their effects on human health [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(3): 592-597.

[14] Mohammed M O A, Song W W, Ma W L, *et al*. Potential toxicological and cardiopulmonary effects of $PM_{2.5}$ exposure and related mortality: Findings of recent studies published during 2003-2013[J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2016, **29**(1): 66-79.

[15] 申铠君, 张向云, 刘頔, 等. 华北典型城市 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶的季节变化与组成特征[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(3): 458-463.
Shen K J, Zhang X Y, Liu D, *et al*. Characterization and seasonal variation of carbonaceous aerosol in urban atmosphere of a typical city in North China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, **25**(3): 458-463.

[16] 马妍, 姬亚芹, 国纪良, 等. 天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2540-2545.
Ma Y, Ji Y Q, Guo J L, *et al*. Characteristics and source apportionment of carbon components in road dust $PM_{2.5}$ and PM_{10} during spring in Tianjin derived by using the quadrat sampling method[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2540-2545.

[17] 胡月琪, 李萌, 颜旭, 等. 北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1645-1655.
Hu Y Q, Li M, Yan X, *et al*. Characteristics and interannual variation of chemical components in typical road dust in Beijing [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1645-1655.

[18] 郭森, 王蕾, 周盼, 等. 石家庄夏季道路尘有机碳和元素碳特征及来源[J]. 环境工程, 2018, **36**(4): 122-126.
Guo S, Wang L, Zhou P, *et al*. Characterisitics and source of organic carbon and element carbon from paved road dust in Shijiazhuang during summer[J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(4): 122-126.

[19] 安塞, 肖捷颖, 刘娟, 等. 石家庄市夏季道路交通扬尘排放特征研究[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(9): 1010-1016.
An S, Xiao J Y, Liu J, *et al*. Emission characteristics of road dust during summer in Shijiazhuang[J]. Environmental Pollution & Control, 2017, **39**(9): 1010-1016.

[20] 张伟, 姬亚芹, 张军, 等. 辽宁省典型城市道路尘 $PM_{2.5}$ 成分谱研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(2): 412-417.
Zhang W, Ji Y Q, Zhang J, *et al*. Study on the road dust source profile of $PM_{2.5}$ in Liaoning Province typical cities[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(2): 412-417.

[21] 陈筱佳, 程金平, 江璇, 等. 上海市中心城区主干道道路扬尘组分特征及来源解析[J]. 环境污染与防治, 2015, **37**(6): 10-13.
Chen X J, Cheng J P, Jiang X, *et al*. Study on the chemical compositions characteristics and source apportionment in road dust of main roads in Shanghai central district[J]. Environmental Pollution & Control, 2015, **37**(6): 10-13.

[22] 王燕. 大气颗粒物开放源尘成分谱特征分析及重金属风险评价[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.

[23] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al*. Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(12): 2079-2112.

[24] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al*. Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C_1-C_{32} organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(6): 1169-1180.

[25] Chen Y J, Zhi G R, Feng Y L, *et al*. Measurements of emission factors for primary carbonaceous particles from residential raw-coal combustion in China[J]. Geophysical Research Letters, 2006, **33**(20): L20815.

[26] 张伟, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中碳组分特征[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(2): 239-244.
Zhang W, Ji Y Q, Li S L, *et al*. Characteristics of carbon fractions in $PM_{2.5}$ and PM_{10} of road dust fall during spring in Tianjin City[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(2): 239-244.

[27] 周盼, 秦伟, 郭硕, 等. 石家庄冬季道路积尘 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 碳组分污染特征分析[J]. 环境化学, 2018, **37**(1): 123-129.
Zhou P, Qin W, Guo S, *et al*. Pollution characteristics of carbonaceous components in $PM_{2.5}$ and PM_{10} of paved road dust in Shijiazhuang during winter[J]. Environmental Chemistry, 2018, **37**(1): 123-129.

[28] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1799-1806.
Wu Y Y, Li R M, Peng L, *et al*. Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng [J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1799-1806.

[29] 董海燕, 古今霞, 陈魁, 等. 天津市区 $PM_{2.5}$ 中碳组分污染特征及来源分析[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(1): 34-38.
Dong H Y, Gu J X, Chen K, *et al*. Character and source analysis of carbonaceous aerosol in $PM_{2.5}$ in the center of Tianjin City[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, **29**(1): 34-38.

[30] 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.

[31] 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.

[32] Li W F, Bai Z P. Characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric fine particles in Tianjin, China[J]. Particuology, 2009, **7**(6): 432-437.

[33] 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*. Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in atmosphere in Xi'an duringautumn-winter period in 2003[J]. Progress in Natural Science, 2005, **15**(12): 1460-1466.

[34] 姚雪倩, 李云祯, 徐友, 等. 基于熵权法和聚类分析法的成都市空气质量综合评价[J]. 环境保护科学, 2017, **43**(1): 100-104.
Yao X Q, Li Y Z, Xu Y, *et al*. Comprehensive evaluation of air quality in Chengdu City based on entropy weight and cluster analysis methods[J]. Environmental Protection Science, 2017, **43**(1): 100-104.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2020

CONTENTS