

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017053001

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 Pan, QIN Wei, GUO Shuo, 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.

石家庄冬季道路积尘 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 碳组分污染特征分析*

周 盼¹ 秦 伟¹ 郭 硕¹ 安 塞¹ 肖捷颖^{1**} 刘 娟² 姬亚芹³

(1. 河北科技大学环境科学与工程学院, 石家庄, 050018;

2. 河北兴襄环保科技有限公司, 邢台, 054000; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 天津, 300071)

摘 要 为探讨石家庄市冬季道路积尘中 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的碳组分污染特征和来源, 利用移动式采样法对市区不同类型铺装道路积尘进行收集, 用热光碳分析仪测定样品中有机碳(OC)和元素碳(EC)的含量并分析其特征. 结果表明, OC、EC 在 $PM_{2.5}$ 中的平均质量浓度为 $166.54 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $25.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 在 PM_{10} 中的平均质量浓度为 $118.31 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $20.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 总碳(TC)占 $PM_{2.5}$ 中百分比为 19.2%, 占 PM_{10} 13.9%, 表明碳组分更容易富集到细粒径颗粒物上; 相关性分析表明 OC、EC 来源大致相同; 8 个碳组分中 OC3 的百分含量最高, OC4 次之, EC3 最低; 主成分分析及 OC、EC 相关分析结果表明冬季道路积尘中的碳主要来自于机动车尾气排放和大气降尘中的燃煤成分.

关键词 道路积尘, $PM_{2.5}$, PM_{10} , 碳组分, 石家庄, 污染特征, 冬季.

Pollution characteristics of carbonaceous components in $PM_{2.5}$ and PM_{10} of paved road dust in Shijiazhuang during winter

ZHOU Pan¹ QIN Wei¹ GUO Shuo¹ AN Sai¹ XIAO Jieying^{1**} LIU Juan² JI Yaqin³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, 050018, China;

2. Hebei Xingxiang Environmental Protection Technology Co. Ltd, Xingtai, 054000, China;

3. School of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin, 300071, China)

Abstract: To reveal the characteristics and sources of carbonaceous components in $PM_{2.5}$ and PM_{10} of paved road dust in Shijiazhuang during winter, dust samples were collected from 4 different types of roads in Jan. 2015, and were dried, sieved, weighed, particle size analyzed, and re-suspended. Then organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) were analyzed by using thermal/optical carbon analyzer. Results showed that the average mass concentrations of OC and EC in $PM_{2.5}$ were $166.54 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $25.35 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, while those in PM_{10} were $118.31 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $20.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Percentage of total carbon (TC) in $PM_{2.5}$ was 19.2%, while 13.9% in PM_{10} . It indicated that carbon component enrich easily in fine particulate matter. Correlation analysis showed that the sources of OC and EC were approximately similar. The percentage of OC3 is the highest among 8

2017 年 5 月 30 日收稿 (Received: May 30, 2017).

* 国家环保部环保公益性科研专项(201409004), 河北省自然科学基金(D2015208162), 国家自然科学基金(41471027)和河北科技大学五大平台基金(2015PT68)资助.

Supported by the Ministry of Environmental Protection Environmental Public Welfare Projects(201409004), the Natural Science Foundation of Hebei Province(D2015208162), the National Natural Foundation of China(41471027) and Five Platform Foundation of Hebei University of Science & Technology(2015PT68).

** 通讯联系人, Tel: 15803213380, E-mail: jyxiao2014@126.com

Corresponding author, Tel: 15803213380, E-mail: jyxiao2014@126.com

carbon components, then OC4, while EC3 has the lowest percentage. Through the principle component analysis, it was found that the carbon components pollution mainly come from vehicle exhaust and deposition of airborne dust with coal combustion.

Keywords: road dust, $PM_{2.5}$, PM_{10} , carbonaceous components, Shijiazhuang, pollution, Winter.

近年我国北方城市大气污染问题日趋严重, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 作为大气颗粒物的主要污染成分受到广泛关注^[1]. 道路交通扬尘作为大气污染物的主要来源之一^[2], 日渐成为研究焦点. 作为移动污染源的机动车产生的碳排放是大气污染源的一部分^[3], 也是道路扬尘的主要组分, 对全球气候变化、人类健康和空气能见度均有较大影响^[4]. 目前, 针对碳组分的研究多集中在大、中型城市的大气环境: 如北京市^[5] 大气中 $PM_{2.5}$ 及其碳组分季节变化特征和来源解析; 天津市^[6] 秋、冬季 $PM_{2.5}$ 碳组分化学特征与来源分析; 以及上海市^[7] 夏、冬两季 $PM_{2.5}$ 中碳组分污染特征及来源解析; 还有针对贵阳^[8]、合肥^[9] 和西安^[10] 等不同季节大气颗粒物碳组分的特征分析. 国外学者从 70 年代开始关注道路扬尘排放^[11], 国内学者多研究道路尘积尘负荷、排放因子、空间分布、来源解析、排放特征和排放清单^[2, 12-16], 目前少见针对石家庄市道路尘碳组分的研究分析.

本文对石家庄市冬季铺装道路积尘中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中碳组分进行污染特征研究和来源分析, 为明确道路交通扬尘碳排放特征和制定控制大气污染及改善区域空气质量的对策提供科学依据和数据支撑.

1 实验部分 (Experimental section)

1.1 样品采集

依据国家《城市道路工程设计规范》(CJJ37—2012)^[17] 选取石家庄市快速路、主干道、次干道和支路四种不同类型道路各两条, 如图 1 所示. 采用移动式采样法在快、中、慢车道用真空吸尘器(旋风卧式 G1007 多级真空吸尘器)等距离匀速 ($5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 吸扫路面积尘, 每条车道采集 4 个样品, 共 160 个样品, 装入事先编号的信封中密封保存. 采样时间为冬季白天(2015 年 1 月), 采样前 3 天无雨雪、当天风力小于 3 级. 用行车记录仪记录车流量、车型(图 2), 快速路车流量最高, 各道路车流量均为轻型车 > 中型车 > 重型车, 但主干道重、中型车车型比最高, 次干道轻型车车型比最高.

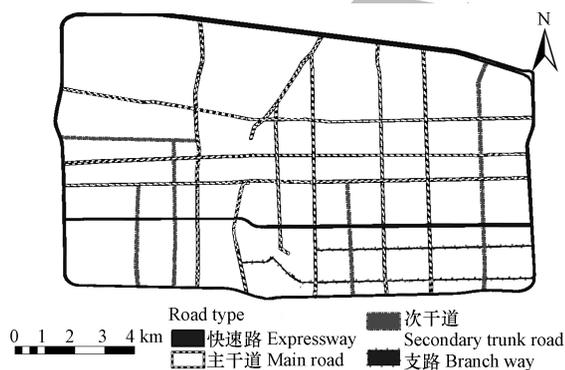


图 1 采样道路示意图

Fig.1 Illustration sampling roads

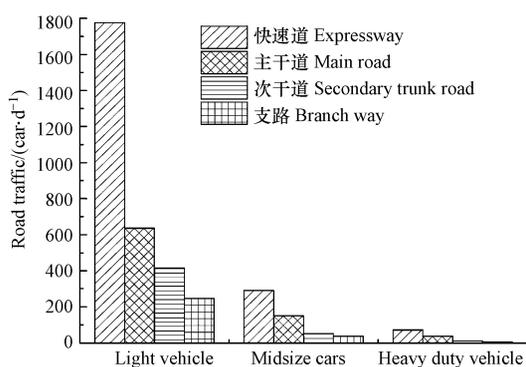


图 2 不同类型道路的平均车流量

Fig.2 Average traffic flow on different types of road

1.2 样品处理

将样品去杂质、烘干 ($105 \text{ }^\circ\text{C}$), 干燥器中平衡 3 d, 用 200 目泰勒标准筛筛分、称重并干燥保存. 将空白石英滤膜用防静电铝膜包裹, 置马弗炉内 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘烤 6 h, 去除残留碳和其他杂质, 冷却后取出放入恒温恒湿箱中平衡 72 h, 去静电, 用精度为 0.01 mg 的电子天平称量 2 次取均值, 误差不大于 0.05 mg . 将处理好的样品再悬浮到已称量石英膜上, 将附着 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的石英膜再平衡、称量, 用差值法计算滤膜上样品净重.

利用 DRIModel2001A 热光碳分析仪(美国沙漠研究所)测量 PM_{2.5}和 PM₁₀样品碳组分含量.从滤膜上截取 0.558 cm²较均匀待测样品送入分析仪,在无氧纯氦气环境下阶段性加温到 140 ℃、280 ℃、480 ℃、580 ℃,滤膜上碳组分被氧化得到 OC1、OC2、OC3、OC4 等 4 种组分,再将样品在含 2 %氧气的氦气环境下阶段性加温到 580 ℃、740 ℃、840 ℃,得到 EC1、EC2、EC3 等 3 种组分.由于有机碳在碳化过程形成 OPC(裂解碳),据 IMPROVE 协议:OC(有机碳)=OC1+OC2+OC3+OC4+OPC,EC(元素碳)=EC1+EC2+EC3-OPC^[18].文中 TC(总碳)=OC+EC.OC 中除工业源和机动车排放的一次有机碳之外,还有来自大气过程的二次有机碳^[19],EC 来源于含碳物质的不完全燃烧,是一次污染物的代表^[20],OC 和 EC 主要源于汽油车尾气、柴油车尾气、煤碳燃烧、工业污染和生物质燃烧等^[21].

2 结果与讨论(Results and discussion)

2.1 OC、EC 浓度分析

PM_{2.5}和 PM₁₀中 OC 质量浓度均远高于 EC(图 3),说明道路尘中含有大量有机碳,也可能存在部分二次污染.碳组分含量在 PM_{2.5}中远高于在 PM₁₀中,表明细颗粒物更容易聚集碳组分.OC 在各类型道路积尘 PM_{2.5}和 PM₁₀中质量浓度顺序均为:主干道>快速路>次干道>支路;EC 在各类型道路上相差不大.

通过计算得出 OC、EC 在 PM_{2.5}中的平均质量浓度分别为 166.54 mg·g⁻¹、25.35 mg·g⁻¹,在 PM₁₀中的平均质量浓度分别为 118.31 mg·g⁻¹、20.3 mg·g⁻¹,且 TC 占 PM_{2.5}中百分比为 19.2%,占 PM₁₀ 13.9%,也是细粒径颗粒物上含量高.

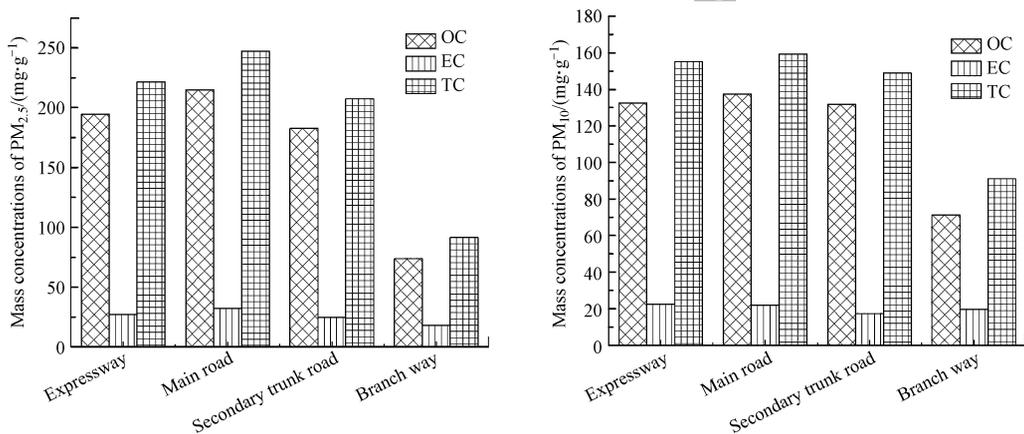


图 3 PM_{2.5}和 PM₁₀中 OC、EC 和 TC 的质量浓度(mg·g⁻¹)

Fig.3 The mass concentrations of OC, EC and TC in PM_{2.5} and PM₁₀(mg·g⁻¹)

2.2 OC/EC 比值分析及同石家庄大气和其他城市扬尘对比分析

有研究^[22-23]认为,用 OC/EC 的比值大于 2 来确定二次污染程度,作为 SOC 存在依据.本研究中 OC/EC 数值均大于 2(表 1),PM_{2.5}中 OC/EC 比值在 2.42—12.19 之间,平均值 6.56.PM₁₀中 OC/EC 比值在 2.08—8.03,平均值为 5.85.表明道路积尘中存在二次污染,且次干道最高,支路最低,推测次干道受周边建筑工地影响,其他道路则与其车流量大小有关.

表 1 PM_{2.5}与 PM₁₀中各道路 OC/EC 平均值
Table 1 Average value of OC/EC in PM_{2.5} and PM₁₀

OC/EC	快速路 Expressway	主干道 Main road	次干道 Secondary trunk road	支路 Branch way	平均值 Average value
PM _{2.5}	7.2	6.95	7.73	4.37	6.56
PM ₁₀	5.95	6.28	7.29	3.91	5.86

和石家庄相近时段大气中 OC/EC 进行对比(表 2),路面积尘 OC/EC 高于大气颗粒物的比值,主要

和交通因素相关。

表 2 道路积尘和石家庄大气颗粒物中 OC/EC 比较

Table 2 Comparison of OC/EC in road dust and atmosphere in Shijiazhuang

OC/EC	本研究 This research	12月 ^[24] December	11月 ^[25] November	2月 ^[26] February
PM _{2.5}	6.56	3.95	4.80	2.91
PM ₁₀	5.86	3.79	4.83	3.53

和国内其他城市道路扬尘 OC/EC 对比,本研究平均值(6.21)高于运城^[27](1.62)和上海^[16](1.83),推测受不同地理因素和环境因素影响,低于石家庄市5月份道路扬尘^[28](7.58),与采样季节不同及采样方法差异有关。

2.3 OC、EC 相关关系分析

Brand 等学者^[29]认为可通过研究 OC 和 EC 之间的相关性来判断碳质气溶胶粒子的来源,相关性良好则表明 OC、EC 来自相同污染源,反之则来源复杂^[30]。据此分析 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 OC、EC 的线性关系(图 4),得到 PM_{2.5} 中 OC、EC 函数关系为 $OC=0.50+6.61EC$, R 为 0.84; PM₁₀ 中 OC、EC 函数关系为 $OC=2.52+5.67EC$, 相关系数为 0.97, 均接近 1, 表明道路积尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 OC、EC 来源大致相同。依据前人研究^[22]结果,机动车尾气 OC/EC 数值为 1.0—4.2, 燃煤 OC/EC 数值为 2.5—10.5, 生物质燃烧 OC/EC 数值为 8.1—12.7。而本研究 PM_{2.5} 中 OC/EC 范围为 2.42—12.19, PM₁₀ 中 OC/EC 范围为 2.08—8.03, 表明大气降尘中的燃煤成分和机动车尾气排放是道路积尘的主要来源。

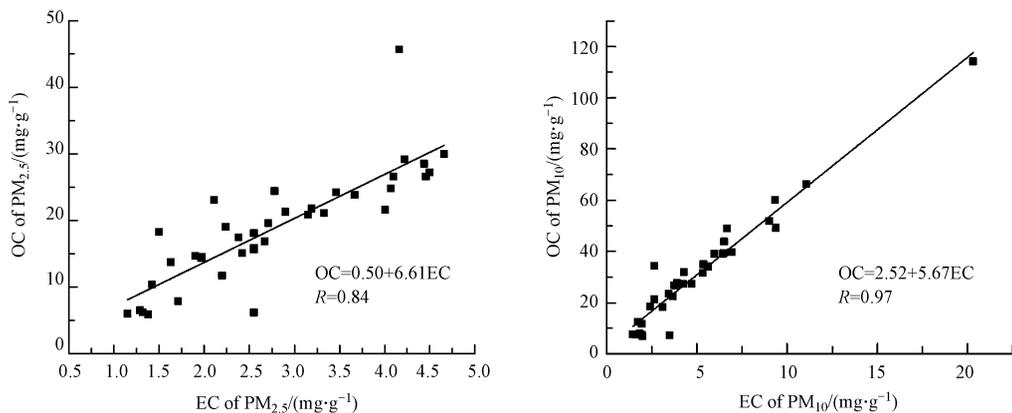


图 4 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 OC、EC 的相关性分析

Fig.4 Correlation analysis between OC and EC in PM_{2.5} and PM₁₀

2.4 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 碳组分含量及来源分析

8 种碳组分在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的百分含量如图 5 所示, OC3 的百分含量最高, OC4、OC2、EC1 次之, EC3 最低。文献报导 OC2、OC3、OC4 和 EC1 主要来自燃煤和机动车尾气, EC2 和 EC3 是柴油车尾气中主要成分, OC1、OPC 在生物质燃烧时产生^[1,18-19,31]。据此判断样品中的碳主要来自于机动车尾气和排放到大气中的燃煤成分沉积。不同类型道路尘碳组分百分含量相差不大。

应用软件 SPSS16.0 将 4 个类型道路的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 8 个碳组分含量作为变量进行主成分分析, 将因子载荷大于 0.6 的碳组分作为特征组分, 提取特征值大于 1 的因子, 使用最大方差法旋转, 得到因子载荷矩阵(表 3)。在 PM_{2.5} 的因子 1 中 OC2、OC3、OC4、EC1 贡献较大, 推断是受机动车尾气和大气降尘中燃煤因素的影响, 因子 2 中贡献较大的是 OC1、EC2、EC3, 可认为源自机动车尾气; 因子 3 中 OPC 贡献显著, 代表生物质燃烧的贡献。3 个因子的特征值分别为 3.87、1.52、1.12, 解释方差累计达 81.3%。因子 1 解释方差最大, 为 48.37%, 因子 3 的解释方差最小, 仅为 1.12%。在 PM₁₀ 的因子 1 中 OC2、OC3、OC4、EC1、EC2 较大, 可认为受大气降尘中的燃煤成分和机动车尾气影响; 因子 2 中 OPC 贡献显著, 应该来自生物质燃烧。2 个因子的特征值分别为 5.89 和 1.17, 解释方差累计为 88.25%, 表明 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的碳组

分主要源于大气降尘中的燃煤成分、机动车尾气和生物质燃烧,且降尘中的燃煤成分和机动车尾气的贡献最大,此结果与 OC/EC 数值分析基本结果一致。

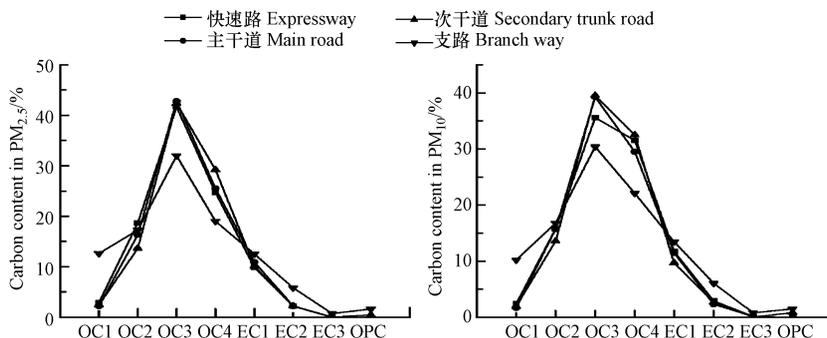


图 5 8 种碳组分的质量分数

Fig.5 Mass fractions of eight carbonaceous components

表 3 主成分分析结果

Table 3 Result of principal component analysis

成分 Components	$PM_{2.5}$			PM_{10}	
	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2	因子 3 Factor 3	因子 1 Factor 1	因子 2 Factor 2
OC1	0.012	0.597	-0.108	0.098	-0.324
OC2	0.211	0.088	-0.31	0.172	0.086
OC3	0.249	-0.041	0.038	0.173	0.146
OC4	0.244	-0.57	0.111	0.172	0.118
EC1	0.245	0.027	0.021	0.171	0.054
EC2	0.133	0.339	-0.073	0.162	-0.035
EC3	-0.118	0.413	0.339	0.124	-0.206
OPC	0.038	-0.45	0.866	0.060	0.824
解释方差%	48.37	19.02	13.94	73.64	14.61
特征值	3.87	1.52	1.12	5.89	1.17
来源	燃煤	机动车尾气	生物质燃烧	燃煤和机动车尾气	生物质燃烧

3 结论 (Conclusion)

(1) OC、EC 在 $PM_{2.5}$ 中的平均质量浓度均高于其在 PM_{10} 中的平均质量浓度,总碳在 $PM_{2.5}$ 中占百分比为 19.2%,在 PM_{10} 中为 13.9%,表明碳组分容易在细粒径颗粒物上富集。

(2) 石家庄道路积尘中 OC/EC 高于大气颗粒物中比值,主要和交通因素相关,且道路积尘中 OC、EC 来源大致相同。

(3) $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 OC3 百分含量最高,OC2、OC4、EC1 次之,EC3 百分含量最低,表明机动车尾气的排放与大气降尘中的燃煤成分对道路积尘碳组分的贡献最大。

参考文献 (References)

- [1] 田鹏山,曹军骥,韩永明,等.关中地区冬季 $PM_{2.5}$ 中碳气溶胶的污染特征及来源解析[J].环境科学,2016,37(2):427-433.
TIAN P S, CAO J J, HAN Y M, et al. Pollution characteristics and sources of carbonaceous aerosol in $PM_{2.5}$ during winter in Guanzhong Area[J]. Environmental Science,2016,37(2):427-433(in Chinese).
- [2] 樊守彬,张东旭,田灵娣,等.北京市交通扬尘 $PM_{2.5}$ 排放清单及空间分布特征[J].环境科学研究,2016,29(1):20-28.
FAN S B, ZHANG D X, TIAN L D, et al. Emission inventory and spatial distribution of road fugitive dust $PM_{2.5}$ in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1): 20-28(in Chinese).
- [3] 郝艳召,邓顺熙,邱兆文,等.基于 MOVES 的轻型车颗粒物排放来源和特征分析[J].环境工程学报,2015,9(8):3915-3922.
HAO Y Z, DENG S X, QIU Z W, et al. Particle sources and characteristics of light duty vehicle based on MOVES model[J]. Chinese

- Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(8):3915-3922(in Chinese).
- [4] 彭康, 杨杨, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区铺装道路扬尘排放因子与排放清单研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(10):2657-2663.
PENG K, YANG Y, ZHENG J Y, et al. Emission factor and inventory of paved road fugitive dust sources in the Pearl River Delta region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(10):2657-2663(in Chinese).
- [5] 周家茂, 曹军骥, 张仁健. 北京大气中 PM_{2.5} 及其碳组分季节变化特征与来源[J]. 过程工程学报, 2009, 9(S2):248-252.
ZHOU J M, CAO J J, ZHANG R J. Variations and sources of PM_{2.5} and Its carbonaceous components in Beijing[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(S2):248-252(in Chinese).
- [6] 霍静, 李彭辉, 韩斌, 等. 天津秋冬季 PM_{2.5} 碳组分化学特征与来源分析[J]. 中国环境科学, 2011, 31(12):1937-1942.
HUO J, LI P H, HAN B, et al. Character and source analysis of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} during autumn-winter period, Tianjin[J]. China Environmental Science, 2011, 31(12):1937-1942(in Chinese).
- [7] 黄众思, 修光利, 朱梦雅, 等. 上海市夏冬两季 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源解析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4):124-129.
HUANG Z S, XIU G L, ZHU M Y, et al. Characteristics and sources of carbonaceous species in PM_{2.5} in summer and winter in Shanghai[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(4):124-129(in Chinese).
- [8] 王珍, 郭军, 陈卓. 贵阳市秋、冬季 PM_{2.5} 中碳组分污染特征及来源分析[J]. 地球与环境, 2015, 43(3):285-289.
WANG Z, GUO J, CHEN Z. Characteristics and source analysis of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} of Guiyang City, P. R. China during Autumn-winter Period[J]. Earth and Environment, 2015, 43(3):285-289(in Chinese).
- [9] 施学美, 李学德, 魏枫, 等. 合肥市春季大气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中碳组分的污染特征[J]. 环境监测管理与技术, 2015, 27(6):27-32.
SHI X M, LI X D, WEI Z, et al. Pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ sampled in Hefei during the spring[J]. The Environmental Monitoring Management and Technology, 2015, 27(6):27-32(in Chinese).
- [10] 代志光, 张承中, 李勇, 等. 西安夏季 PM_{2.5} 中碳组分与水溶性无机离子特征分析[J]. 环境工程学报, 2014, 8(10):4366-4372.
DAI Z G, ZHANG C A, LI Y, et al. Analysis of carbon components and water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} of Xi' an during summer[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(10):4366-4372(in Chinese).
- [11] DYCK R I J, STUKEL J J. Fugitive dust emissions from trucks on unpaved roads[J]. Environmental Science and Technology, 1976, 10(10):1045-1048.
- [12] 许妍, 周启星. 天津市市交通道路扬尘排放特征及空间分布研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12):2168-2173.
XU Y, ZHOU Q X. Emission characteristics and spatial distribution of road fugitive dust in Tianjin, China[J]. 2012, 32(12):2168-2173(in Chinese).
- [13] 刘泽常, 张猛, 郝长瑞, 等. 济南市道路扬尘排放因子估算及其影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(1):150-154.
LIU Z C, ZHANG M, HAO C R, et al. Road dust emission factors in Jinan City[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 35(1):150-154(in Chinese).
- [14] 程健. 重庆市主城区铺装道路扬尘排放因子与特征研究[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2015.
CHENG J. Emission factors and emission characteristics of paved roads fugitive dust in Chongqing urban[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University(in Chinese).
- [15] 彭康. 珠江三角洲铺装道路扬尘源污染物排放及特征研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
PENG K. Emission Characteristics of paved road fugitive dust in Pearl River Delta[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013(in Chinese).
- [16] 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(in Chinese).
- [17] 城市道路工程设计规范(CJJ37-2012)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Code for design of urban road engineering(CJJ37-2012)[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012(in Chinese).
- [18] CHOW J C, WATSON J G, PRITCHETT L C, et al. The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: Description, evaluation and application in U.S. air quality studies[J]. Atmospheric Environment, 1993, 27(8):1185-1201.
- [19] 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.
ZHANG C, ZHOU Z E, ZHAI C Z, et al. Carbon source apportionment of PM_{2.5} in Chongqing based on local carbon profiles[J]. Environmental Science, 2014, 35(3):810-819(in Chinese).
- [20] 程水源, 刘超, 韩力慧, 等. 北京市采暖期 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征与来源解析[J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(4):586-591, 597.
CHENG S Y, LIU C, HAN L H, et al. Characteristics and source apportionment of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} during the heating season in Beijing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(4):586-591, 597(in Chinese).
- [21] STREET D G, GUPTA S, WALDHOF S T, et al. Black carbon emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(25):4281-4296.
- [22] CHOW J C, WATSON J G, LUZ Q, 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.

- [23] 姚青,赵普生,韩素芹,等.天津城区 PM_{2.5}中碳组分污染特征分析[J].环境化学,2014,33(3):404-410.
YAO Q, ZHAO P S, HAN S Q, et al. Pollution character of carbonaceous aerosol in PM_{2.5} in Tianjin City [J]. Environmental Chemistry, 2014, 33(3):404-410 (in Chinese).
- [24] 康苏花,李海峰,杨丽杰,等.石家庄市大气颗粒物碳组分特征分析[J].科学技术与工程,2014,14(30):280-282+288.
KANG S H, LI H F, YANG L J, et al. Carbon fraction analysis of atmospheric particles in Shijiazhuang [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(30):280-282+288 (in Chinese).
- [25] 姜建彪,常青,冯媛,等.石家庄市大气颗粒物中有机碳和元素碳的季节变化特征[J].环境监控与预警,2017,9(2):41-45.
JIANG J B, CHANG Q, FENG Y, et al. Seasonal variation of organic carbon and elemental carbon in atmospheric particles in Shijiazhuang [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2017, 9(2):41-45 (in Chinese).
- [26] 康苏花,高康宁,赵鑫,等.石家庄市春节期间大气颗粒物有机碳和元素碳的变化特征[J].中国环境监测,2014,30(6):77-82.
KANG S H, GAO K N, ZHAO X, et al. Atmospheric particles of organic carbon and elemental carbon variation during the spring festival in Shijiazhuang [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(6):77-82 (in Chinese).
- [27] 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 (in Chinese).
- [28] 张涛,孙彦敏.石家庄市城市道路扬尘成分谱及特征分析[J].河北工业科技,2017,34(2):150-154.
ZHANG T, SUN Y M. Component spectrum and emission characteristic analysis of the urban road dust in Shijiazhuang City [J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2017, 34(2):150-154 (in Chinese).
- [29] TURPIN B J, LIRA H J. Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: Revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. Aerosol Science and Technology, 2001, 35(1):602-610.
- [30] 方冬青,魏永杰,黄伟,等.北京市2014年10月重霾污染特征及有机碳来源解析[J].环境科学研究,2016,29(1):12-19.
FANG D Q, WEI Y J, HUANG W, et al. Characterization and source apportionment of organic carbon during a heavy haze episode in Beijing in October 2014 [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(1):12-19 (in Chinese).
- [31] CAO J J, LEE S C, CHOW J C, et al. Spatial and seasonal distributions of carbonaceous aerosols over China [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112doi:10.1029/2006JD008205