

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

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



2019

Vol.40 No.6
第40卷 第6期

目次

北京城区大气金属元素干湿沉降特征	张国忠, 潘月鹏, 田世丽, 王永宏, 熊秋林, 李广, 顾梦娜, 吕雪梅, 倪雪, 何月欣, 黄威, 刘博文, 王跃思	(2493)
北京城郊 PM _{2.5} 中金属元素的污染特征及潜在生态风险评价	徐静, 李杏茹, 张兰, 陈曦, 杨阳, 刘永桥, 赵清	(2501)
上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响	高杰, 乔利平, 楼晟荣, 严茹莎, 周敏, 刘瑜存, 冯加良, 黄丹丹	(2510)
天津市 2017 年重污染过程二次无机化学污染特征分析	徐虹, 肖致美, 陈魁, 李立伟, 杨宁, 高璟赞, 李源, 孔君, 毕温凯, 邓小文	(2519)
典型非金属矿物制造工艺过程源成分谱特征	赵雪艳, 于高峰, 王信梧, 张向炎, 殷宝辉, 刘盈盈, 王歆华, 杨文, 赵若杰	(2526)
垃圾焚烧厂排放颗粒物组分粒径分布特征	余卓君, 吴建会, 张裕芬, 张进生, 冯银厂, 李蒲	(2533)
天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析	马妍, 姬亚芹, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾	(2540)
霾天气下城市气溶胶吸湿性的观测	杨素英, 田芷洁, 张铁凝, 于兴娜, 李艳伟, 安俊琳, 赵秀勇, 李岩, 王梓航, 吴尚	(2546)
宁东能源化工基地大气 PM _{2.5} 中硝基多环芳烃污染特征及呼吸暴露风险	刘攀亮, 剧媛丽, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民	(2556)
2014 ~ 2016 年间郑州市控制 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	韩士杰, 王佳, 燕启社, 杨留明, 赵庆炎, 王申博, 李晨, 张轶舜, 张瑞芹	(2565)
1990 ~ 2017 年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型	刘莹, 林爱文, 覃文敏, 何利杰, 李霄	(2572)
北京春季一次霾-沙天气污染特性与成因分析	王耀庭, 李青春, 郑祚芳, 窦有俊	(2582)
江苏省内河船舶大气污染物排放清单及特征	徐文文, 殷承启, 许雪记, 张玮	(2595)
亚热带稻区大气 NO ₂ 、HNO ₃ 及硝态氮污染特征及干湿沉降	欧阳秀琴, 王波, 沈健林, 朱潇, 王杰飞, 李勇, 吴金水	(2607)
长江源区降水氢氧稳定同位素特征及水汽来源	汪少勇, 王巧丽, 吴锦奎, 何晓波, 丁永建, 王利辉, 胡召富	(2615)
基于高山湖泊沉积记录的贵州北部大气重金属污染历史重建	梁梦瑶, 刘恩峰, 张恩楼, 纪明, 李小林	(2624)
青岛 4 个海水浴场微塑料的分布特征	罗雅丹, 林千惠, 贾芳丽, 徐功娣, 李锋民	(2631)
鄱阳湖湿地候鸟栖息地微塑料污染特征	刘淑丽, 简敏菲, 周隆胤, 李文华, 吴希恩, 饶丹	(2639)
三峡库区消落带土壤溶解性有机质溯源: 基于氮/碳比值的线性双端元源负荷分析	江韬, Joeri Kaal, 梁俭, 刘江, 张耀玲, 王定勇, 魏世强, 赵铮	(2647)
水生生物光合作用对雪玉洞岩溶水体中 CDOM 的影响	范佳鑫, 蒋勇军, 贺秋芳, 王家楠, 何瑞亮, 张彩云, 马丽娜, 汪啟容	(2657)
水化学和环境同位素对济南东源饮用水源地地下水演化过程的指示	张雅, 苏春利, 马燕华, 刘伟江	(2667)
崇左响水地区地下水水质分析及健康风险评价	周巾枚, 蒋忠诚, 徐光黎, 覃小群, 黄奇波, 张连凯	(2675)
云南荞麦地流域地下水水化学特征及物质来源分析	张勇, 郭纯青, 朱彦光, 于爽	(2686)
鄱阳湖流域多尺度 C、N 输送通量及其水质参数变化特征	陆瑶, 高扬, 贾珺杰, 宋贤威, 陈世博, 马明真, 郝卓	(2696)
合流制面源污染传输过程与污染源解析	房金秀, 谢文霞, 朱玉玺, 沈雷, 马玉坤, 李佳, 姜智绘, 李叙勇, 赵洪涛	(2705)
强化浅基质层干植草沟对道路径流的脱氮效果	段进凯, 李田, 张佳炜	(2715)
水源水库暴雨径流过程水体锰的迁移及其影响	邓立凡, 黄廷林, 李楠, 李凯, 吕晓龙, 毛雪静	(2722)
巢湖十五里河沉积物磷吸收潜力及对外源碳的响应	李如忠, 鲍琴, 张瑞钢, 陈慧	(2730)
金盆水库沉积物磷的来源及分布特征	毛雪静, 黄廷林, 李楠, 徐金兰, 苏露, 吕晓龙, 邓立凡	(2738)
水库水体热分层的水质及细菌群落分布特征	王禹冰, 王晓燕, 庞树江, 杨晓明, 刘洋	(2745)
不同水温分层水库沉积物间隙水营养盐垂向分布与细菌群落结构的关系	王慎, 张思思, 许尤, 官卓宇, 杨正健, 刘德富, 马骏	(2753)
表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律	朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 杜观超, 高旭, 陈红卫, 李峰东, 张海阔, 张雪, 秦文凯, 李一平	(2764)
针铁矿改性生物炭对砷吸附性能	朱司航, 赵晶晶, 尹英杰, 商建英, 陈冲, 瞿婷	(2773)
改性稻壳生物炭对水溶液中甲基橙的吸附效果与机制	史月月, 单锐, 袁浩然	(2783)
厌氧膜生物反应器处理含盐废水运行效能及膜污染特性	闫欢沙, 许振钰, 金春姬, 邵梦雨, 郭亮, 赵阳国	(2793)
污水处理厂出水有机磷污染特征及强化去除	王小东, 王子文, 陈明飞, 王燕, 王硕, 李激	(2800)
碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响	王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 胡浩林, Karasuta Chayangkun	(2807)
活性污泥物理结构对呼吸过程的影响	郭耀, 李志华, 杨成建, 王慧娟, 李亚明, 姜阳	(2813)
好氧颗粒污泥处理畜禽养殖沼液污染物的特性	廖杰, 叶嘉琦, 曾志超, 刘琳, 徐开钦, 刘超翔	(2821)
快速城市化区河流温室内空气排放的时空特征及驱动因素	刘婷婷, 王晓峰, 袁兴中, 龚小杰, 侯春丽	(2827)
生物炭对潜流人工湿地污染物去除及 NO ₃ 排放影响	邓朝仁, 梁银坤, 黄磊, 方丹丹, 陈玉成, 杜刚	(2840)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田 N ₂ O 排放的影响及其微生物机制	吴杰, 李志琳, 徐佳迎, 王珏, 蒋静艳	(2847)
不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响	胡伟, 张亚红, 李鹏, 张鹏, 李满友, 尤璟涛, 田水泉	(2858)
典型城市化区域土壤重金属污染的空间特征与风险评价	何博, 赵慧, 王铁宇, 孟晶, 肖荣波, 刘胜然, 周云桥, 史斌	(2869)
西南高锡地质背景区农田土壤与农作物的重金属富集特征	刘意章, 肖唐付, 熊燕, 宁增平, 双燕, 李航, 马良, 陈海燕	(2877)
基于 GIS 和受体模型的枸杞地土壤重金属空间分布特征及来源解析	白一茹, 张兴, 赵云鹏, 王幼奇, 钟艳霞	(2885)
喀斯特地区小尺度农业土壤砷的空间分布及污染评价	汪花, 刘秀明, 刘方, 唐启琳, 王世杰	(2895)
黄土高原不同植被带人工刺槐林土壤团聚体稳定性及其化学计量特征	瞿晴, 徐红伟, 吴旋, 孟敏, 王国梁, 薛蓑	(2904)
秸秆还田配施氮肥对喀斯特农田微生物群落及有机碳矿化的影响	徐学池, 苏以荣, 王桂红, 刘坤平, 胡亚军, 陈香碧, 郑小东, 何寻阳	(2912)
生物炭施用及老化对紫色土中抗生素吸附特征的影响	阴文敏, 关卓, 刘琛, 何杨, 杨飞, 唐翔宇	(2920)
稳定性同位素 DNA-SIP 示踪中性紫色土的氨氧化过程	刘天琳, 王智慧, 闫小娟, 赵永鹏, 贾仲君, 蒋先军	(2930)
纳米银和银离子对土壤中硝化微生物及其氨氧化速率的影响	伍玲丽, 张旭, 舒慧慧, 张丽, 司友斌	(2939)
农田沟道土壤中锰氨氧化 (Mn-ANAMMOX) 过程的探究	陈湜, 李正魁, 覃云斌, 丁帮环, 陈志浩	(2948)
污泥四环素含量对蚯蚓堆肥中氨氧化菌群的影响	吴颖, 黄魁, 夏慧, 陈景阳	(2954)
《环境科学》征订启事 (2929)	《环境科学》征稿简则 (2947)	信息 (2646, 2656, 2857)

天津市春季样方法道路扬尘碳组分特征及来源分析

马妍, 姬亚芹*, 国纪良, 赵静琦, 李越洋, 王士宝, 张蕾

(南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350)

摘要: 为研究天津市春季道路扬尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中碳组分特征及来源, 于 2015 年 4 月用样方法采集天津市道路扬尘样品, 利用再悬浮采样器将样品悬浮到滤膜上, 经热光碳分析仪测定有机碳 (OC) 和元素碳 (EC), 利用非参数检验、OC/EC 比值分析、相关分析及聚类分析对其污染特征和来源进行探讨. 结果表明, $PM_{2.5}$ 中 $\omega(TC)$ 为 4.89% (次干道) ~ 18.83% (快速路), $\omega(OC)$ 为 3.57% (次干道) ~ 15.39% (快速路), $\omega(EC)$ 为 1.32% (次干道) ~ 3.44% (快速路); PM_{10} 中 $\omega(TC)$ 为 8.14% (次干道) ~ 19.71% (快速路), $\omega(OC)$ 为 5.91% (次干道) ~ 16.28% (快速路), $\omega(EC)$ 为 1.96% (主干道) ~ 3.43% (快速路); 快速路中各碳组分质量分数均较高, 次干道中各碳组分质量分数均较低, 可能是由于快速路中车流量较大, 机动车尾气排放量较大, 而次干道车流量较小; 各类型道路中 $\omega(OC)$ 明显大于 $\omega(EC)$, $\omega(EC)$ 在不同道路类型中差异不大; 两相关样本非参数检验表明, 各碳组分质量分数在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 间均无显著性差异; 相关性分析表明道路扬尘中 OC、EC 来源大致相同. 通过 OC/EC 比值分析及聚类分析可知, 天津市春季道路扬尘中碳组分主要来源于燃煤、机动车尾气以及生物质燃烧.

关键词: 天津市; 道路扬尘; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; 碳组分; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)06-2540-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811259

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

MA Yan, JI Ya-qin*, GUO Ji-liang, ZHAO Jing-qi, LI Yue-yang, WANG Shi-bao, ZHANG Lei

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to study the characteristics and sources of carbon fractions in $PM_{2.5}$ and PM_{10} of road dust in Tianjin, samples of road dust were collected by the quadrat sampling method in April 2015 in Tianjin, and samples were re-suspended on filters by using a NK-ZXF sampler. A Thermal Optical Carbon Analyzer (IMPROVE-TOR) was employed to measure the concentrations of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC), and the pollution characteristics and sources were investigated by non-parametric tests and OC/EC ratio, correlation, and cluster analyses. The results showed that ω (total carbon, TC) in $PM_{2.5}$ of road dust amounted to 4.89% (secondary road) - 18.83% (expressway), $\omega(OC)$ amounted to 3.57% (secondary road) - 15.39% (expressway), and $\omega(EC)$ amounted to 1.32% (secondary road) - 3.44% (expressway); meanwhile, $\omega(TC)$ in PM_{10} of road dust was 8.14% (secondary road) - 19.71% (expressway), $\omega(OC)$ was 5.91% (secondary road) - 16.28% (expressway), and $\omega(EC)$ was 1.96% (main road) - 3.43% (expressway). The mass fraction of each carbon component for the expressway was relatively high, and that for the secondary trunk road was relatively low, which may have been due to the large traffic volume on the expressway and corresponding large amounts of exhaust emissions from motor vehicles, whereas there were fewer vehicles on the secondary trunk road. Additionally, $\omega(OC)$ was significantly larger than $\omega(EC)$ for all types of roads, and $\omega(EC)$ did not vary much among the different road types. The non-parametric tests of two related samples showed that there was no significant difference in the mass fraction of each carbon component between $PM_{2.5}$ and PM_{10} . The correlation analysis showed that the sources of OC and EC in road dust were roughly the same. The OC/EC ratio analysis and cluster analysis showed that the main sources of the carbon components in the dust of roads in Tianjin in spring were coal combustion, motor vehicle exhaust, and biomass burning.

Key words: Tianjin; road dust; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; carbon components; source apportionment

近年来, 随着经济的快速发展, 大气颗粒物已成为影响我国城市空气质量的首要污染物^[1~4], 影响人体健康^[5~8]、城市能见度^[9, 10]和全球气候变化^[11]. 道路扬尘作为大气颗粒物污染的主要来源之一^[12], 日渐成为研究焦点. 张诗建^[13]基于快速检测法研究了天津市道路扬尘排放清单; 许妍等^[14]研究了天津城市交通道路扬尘排放特征及空间分布; 赵静琦等^[15]基于样方法研究了天津市春季道路扬尘中水溶性离子特征并进行了来源解析; 王士宝等^[16]研究了天津市春季道路降尘的元素特

征; 李越洋等^[17]研究了天津市春季道路降尘中重金属的污染特征和健康风险; 李树立等^[18]研究了天津市秋季道路降尘粒度乘数的分布特征; 张伟等^[19]研究了天津市春季道路降尘中碳组分特征.

碳作为道路扬尘的重要组成部分之一, 影响人体健

收稿日期: 2018-11-29; 修订日期: 2019-01-12

基金项目: 唐山市大气污染防治综合解决方案研究项目 (DQCG-05-04)

作者简介: 马妍 (1996 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物污染控制, E-mail: 1264101582@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiyuqin@nankai.edu.cn

康和环境空气质量^[19]。为探究天津市春季道路扬尘中碳组分特征及来源，本研究选取了天津市 11 条典型道路，采用样方吸尘法采集道路扬尘样品，通过再悬浮装置将样品悬浮到滤膜上，通过分析测定其碳含量，得到其碳组分特征，以期为天津市道路扬尘防治工作提供科学依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2015 年 4 月，采集天津市道路主干道、次干道、支路、快速路、外环线 5 种道路类型共 11 个路段的样品，详见表 1。每条道路分别在两侧设 4 个采样点，采样点之间间隔一般大于 800 m，采样点位置尽量避开公交站、路口等人流密集处。每个采样点在机动车道和非机动车道各采集一个道路扬尘样品（即每条道路采集 16 个样品），共采集到 176 个样品。

采样方法选择样方吸尘法。即采用样方框和吸尘器对路面积尘进行原位吸扫的方法。使用真空吸尘器和面积为 1 m² 的采样框采样，机动车道和非机动车道分别采集 4 m² 和 2 m²。采样完毕后，取下集尘盒，用细毛刷将集尘盒内的尘土扫入样品袋内编号保存，带回实验室分析。

表 1 采样典型道路

Table 1 Sampling information for typical roads

道路名称	道路类型	道路走向
卫津路	主干道	南北走向
复兴路	主干道	东西走向
黄河道	次干道	东西走向
鞍山西道	次干道	东西走向
南开二纬路(包括西市大街)	支路	东西走向
白堤路	支路	南北走向
迎水道	支路	东西走向
密云路	快速路	南北走向
红旗南路	快速路	东西走向
外环线西路 1	外环线	南北走向
外环线西路 2	外环线	南北走向

1.2 样品前处理

将样品除去树叶、垃圾等杂物，放入干燥器内平衡 3 d，然后将其分别通过 20 目（约 750 μm）和 200 目（约 75 μm）的泰勒标准筛筛分，将筛下相同道路同一侧的粉末样品进行合并，使用 NK-ZXF 再悬浮采样器再悬浮分别得到 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的颗粒物滤膜样品各 22 个；将得到的滤膜样品在恒温恒湿天平室平衡 72 h 后称重，备用。

1.3 样品分析

采用美国沙漠研究所（DRI）研制的 DRI Model 2001A 热光碳分析仪分析碳组分。分析时，升温程

序分为 2 个阶段：第 1 阶段，在无氧纯氦气环境下，分别于 140、280、480 和 580℃ 温度下加热石英膜，得到 OC 的 4 种组分（OC1、OC2、OC3 和 OC4）；第 2 阶段，在含 2% 氧气的氦气环境下，分别于 580、740 和 840℃ 逐步升温，得到 EC 的 3 种组分（EC1、EC2、EC3）。由于 OC 在碳化过程中会形成裂解碳（optical pyrolyzed carbon, OPC），因此，根据 IMPROVE 分析协议将 OC 定义为 OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OPC，将 EC 定义为 EC1 + EC2 + EC3 - OPC^[20]。

1.4 质量控制

为除去其杂质及残留碳，空白石英滤膜使用前在马弗炉中 600℃ 下灼烧 3 h；采样前后分别将石英膜在恒温恒湿的天平室内平衡 72 h，以降低湿度、温度对于滤膜称重的影响；每天开始分析样品碳组分之前，用 CH₄/He 标准气体（体积比为 1:19）校准仪器，确保初始和最终的 FID 信号漂移小于 ±3 mV 以内，校准峰面积相对偏差在 5% 以内，当天样品分析结束后仍用 CH₄/He 标准气体校准仪器。

2 结果与讨论

2.1 碳组分特征分析

各道路类型道路扬尘样品的碳组分质量分数如图 1 所示。从中可知，PM_{2.5} 中 ω(TC) 为 4.89%（次干道）~ 18.83%（快速路），平均值为 13.17% ± 5.29%；PM₁₀ 中 ω(TC) 为 8.14%（次干道）~ 19.71%（快速路），平均值为 13.82% ± 4.23%。各道路类型道路扬尘 PM_{2.5} 中 ω(OC) 为 3.57%（次干道）~ 15.39%（快速路），平均值为 10.63% ± 4.47%，ω(EC) 为 1.32%（次干道）~ 3.44%（快速路），平均值为 2.54% ± 0.86%；PM₁₀ 中 ω(OC) 为 5.91%（次干道）~ 16.28%（快速路），平均值为 11.30% ± 3.80%，ω(EC) 为 1.96%（主干道）~ 3.43%（快速路），平均值为 2.51% ± 0.60%。各类型道路中 ω(OC) 明显大于 ω(EC)，ω(EC) 在不同道路类型中差异不大。

PM_{2.5} 中 ω(OC1)、ω(OC2)、ω(OC3) 和 ω(EC1) 均为快速路中最高，分别为 1.54%、4.21%、6.28% 和 2.66%；ω(OC4) 和 ω(EC2) 均表现为主干道中最高，分别为 4.27% 和 0.89%；ω(OPC) 在主干道和环线中均为 0.1%，次干道中最低为 0.01%；ω(EC3) 在各道路类型道路扬尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中均很低。PM₁₀ 中 ω(OC1)、ω(OC2)、ω(OC3)、ω(OC4)、ω(EC1) 和 ω(EC2) 均为快速路中最高，分别为 2.11%、4.10%、5.10%、4.86%、2.52% 和 1.01%；ω(OPC) 在快速路和环

线中均为 0.11%，次干道中最低为 0.

可见，道路扬尘中 $\omega(\text{TC})$ 、 $\omega(\text{OC1})$ 、 $\omega(\text{OC2})$ 、 $\omega(\text{OC3})$ 和 $\omega(\text{EC1})$ 均在快速路中最高. 有研究表明^[21]，天津市不同道路春季车流量表现出快速路 (8 790 辆·h⁻¹) 最大，次干道 (2 461 辆·h⁻¹) 较小. 因此推测由于快速路车流量较大，机动车尾气排放量较大，碳组分质量分数较高. 而次干道中各碳组分含量均较低，可能是由于次干道车流量较小.

史国良等^[22]的研究表明，天津市大气 PM_{2.5} 中 $\omega(\text{OC})$ 为 14.8%， $\omega(\text{EC})$ 为 3.2%. 可见，大气颗粒物中 OC、EC 的质量分数略高于道路扬尘颗粒物中 OC、EC 的质量分数. 这可能与大气颗粒物中碳的来源更加广泛和复杂有关. 天津道路扬尘 PM_{2.5} 中 $\omega(\text{OC})$ 和 $\omega(\text{EC})$ 与其他城市^[23~26] 对比见表 2. 从中可知，天津市道路扬尘碳组分仅低于石家庄，说明天津市的污染是不容忽视的.

为了研究 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 $\omega(\text{OC})$ 和 $\omega(\text{EC})$ 间的差异是否具有统计学意义，运用 SPSS 16.0 软件对其进行了两相关样本非参数检验，概率 P 值均高于 0.05，表明各碳组分含量在 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 间均无显著性差异.

2.2 OC/EC 比值分析

有研究表明^[27]， $\text{OC}/\text{EC} > 2$ 是 SOC 的存在依据. 由表3可知，天津市道路扬尘 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中

表 2 天津市道路扬尘 PM_{2.5} 中碳组分与其他城市对比/%

Table 2 Comparison of the carbon components of road dust in Tianjin with other cities/%

组分	天津市	石家庄市	盘锦市	鞍山市	上海市	晋城市
OC	10.63 ± 4.47	18.34 ± 2.12	8.10 ± 2.62	9.74 ± 1.30	1.29 ± 0.26	10.63 ± 1.97
EC	2.54 ± 0.86	2.29 ± 0.27	0.75 ± 0.46	2.55 ± 0.59	0.71 ± 0.08	1.05 ± 0.78

OC/EC 值均 > 2. 其中，PM_{2.5} 中 OC/EC 值为 2.70 ~ 5.00，平均值为 4.05，其中各道路类型的 OC/EC 值依次为外环线 > 快速路 > 支路 > 主干道 > 次干道；PM₁₀ 中 OC/EC 值为 2.65 ~ 6.37，平均值为 4.52，其中各道路类型的 OC/EC 值大小关系为主干道 > 快速路 > 外环线 > 支路 > 次干道. 表明道路扬尘中存在明显的二次污染. 有研究表明^[27, 28]，OC/EC 值在 1 ~ 4.2 时，主要来源为汽油车和柴油车尾气排放；比值为 2.5 ~ 10.5 时，为燃煤排放；比值为 8.1 ~ 12.7 时，为生物质燃烧. 天津市道路扬尘 PM_{2.5} 中 OC/EC 值为 2.70 ~ 5.00，PM₁₀ 中 OC/EC 值为 2.65 ~ 6.37 (表 3)，表明该道路扬尘中碳主要来源于汽油车和柴油车尾气排放以及燃煤排放.

与国内其他研究对比^[19, 29]，天津市道路扬尘 PM_{2.5} 中 OC/EC 平均值 (4.05) 低于天津市春季道路降尘 OC/EC 值 (6.65 ~ 8.91)，也低于石家庄冬季

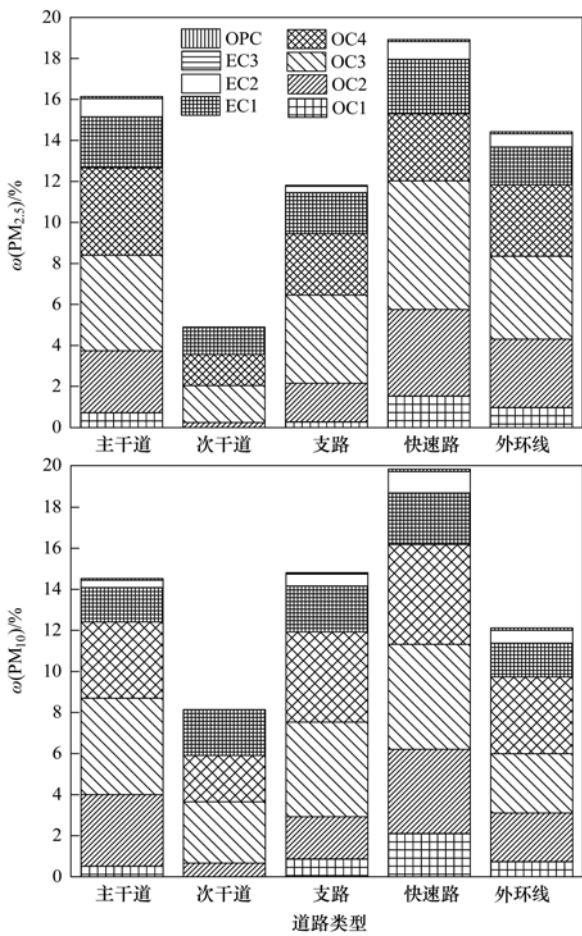


图 1 道路扬尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中碳组分的质量分数水平

Fig. 1 Mass fraction of the carbon fraction in road dust PM_{2.5} and PM₁₀

道路扬尘 OC/EC 平均值 (6.56)；天津市道路扬尘 PM₁₀ 中 OC/EC 平均值 (4.52) 低于天津市春季道路降尘 OC/EC 值 (6.15 ~ 10.76)，也低于石家庄冬季道路扬尘 OC/EC 平均值 (5.86). 推测与采样方法、采样时间不同有关，也可能受不同环境因素影响. 本研究采用样方法采集的道路扬尘与机动车尾气排放更为密切，利用降尘缸采集的降尘与大气颗粒物 PM_{2.5}、PM₁₀ 关系更密切. 有研究表明^[30]，汽油车 OC/EC 为 0.70 ~ 1.67，柴油车 OC/EC 为 0.28 ~ 0.92，所以本研究道路扬尘中 OC/EC 低于道路降尘中 OC/EC. 董海燕等^[31]的研究表明，OC/EC 冬季最高，冬季由于供暖燃煤增加，导致碳及二次有机碳前体物浓度增加，加之冬季逆温、灰霾天气较多，扩散条件更差，导致大气化学反应加剧，二次生成的有机碳浓度增加，所以本研究中 OC/EC 低于石家庄冬季 OC/EC.

表 3 各道路类型 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中 OC/EC 平均值

颗粒物	主干道	次干道	支路	快速路	外环线	平均值
PM _{2.5}	3.90	2.70	4.17	4.47	5.00	4.05
PM ₁₀	6.37	2.65	4.28	4.75	4.57	4.52

2.3 OC、EC 相关关系分析

有研究表明^[32]，可以通过判断 OC 与 EC 之间的相关性来判断碳质气溶胶粒子的来源，若 $\omega(\text{OC})$ 、 $\omega(\text{EC})$ 相关性很好，则说明其存在相似的污染源。故分析 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 $\omega(\text{OC})$ 与 $\omega(\text{EC})$ 的线性关系(如图 2)，得到 PM_{2.5} 中 $\omega(\text{OC})$

与 $\omega(\text{EC})$ 的函数关系为 $\text{OC} = 4.0027 \text{ EC} + 0.6189$ ，相关系数 $R^2 = 0.8304$ ；PM₁₀ 中 $\omega(\text{OC})$ 与 $\omega(\text{EC})$ 的函数关系为 $\text{OC} = 4.3765 \text{ EC} + 0.6317$ ，相关系数 $R^2 = 0.7384$ ；相关系数均接近 1，相关性较好，说明道路扬尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 OC、EC 来源大致相同。

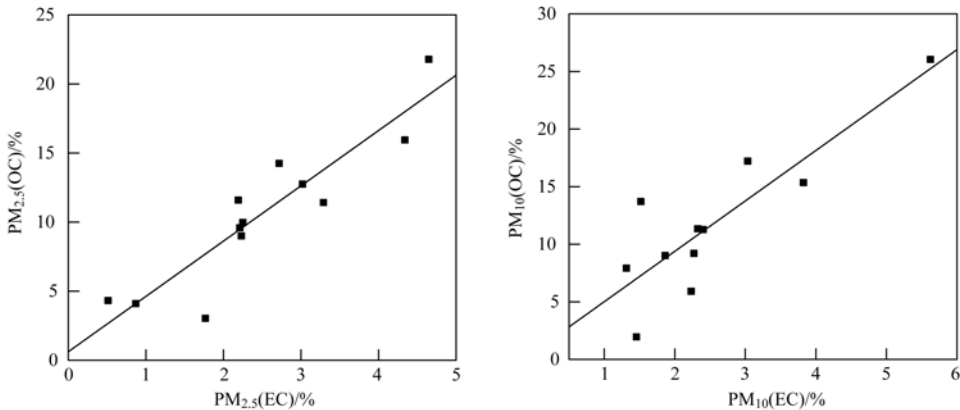


图 2 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 OC、EC 的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis between OC and EC in PM_{2.5} and PM₁₀

2.4 含碳道路扬尘的来源解析

有研究表明^[33~36]，OC1 和 OPC 主要来源于生物质燃烧，OC2、OC3、OC4 和 EC1 主要来自燃煤和机动车尾气，EC2、EC3 来源于柴油车排放，根据 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 中各碳组分分布特征可初步判断污染来源。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 8 种碳组分的含量见图 3。从中可知，PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 $\omega(\text{OC2})$ 、 $\omega(\text{OC3})$ 、 $\omega(\text{OC4})$ 和 $\omega(\text{EC1})$ 均较高，说明道路扬尘中的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 主要来源于燃煤和机动车尾气，道路

扬尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的来源大致相同。

为了对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的来源进行进一步分析，用 SPSS 25.0 对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中的碳组分进行聚类分析，结果见图 4。从中可知，PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中碳组分可分为两类，第一类均为 OC2、OC3、OC4 和 EC1，主要来源于燃煤和机动车尾气；第二类均为 OC1、EC2、EC3 和 OPC，来源于生物质燃烧和柴油车排放。由此可见，天津市春季道路扬尘 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 主要来源于燃煤、机动车尾气以及生物质燃烧。

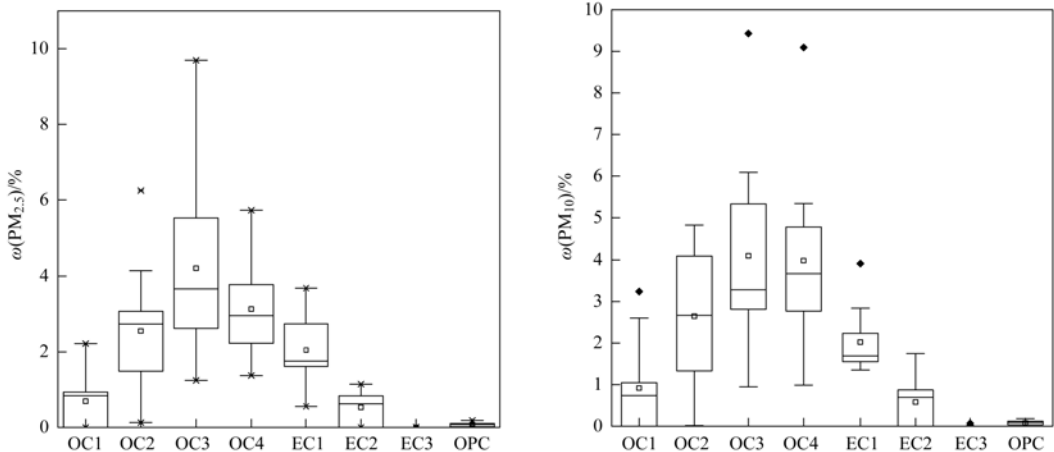


图 3 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中 8 种碳组分的质量分数水平

Fig. 3 Mass fraction results for eight carbon fractions in PM_{2.5} and PM₁₀

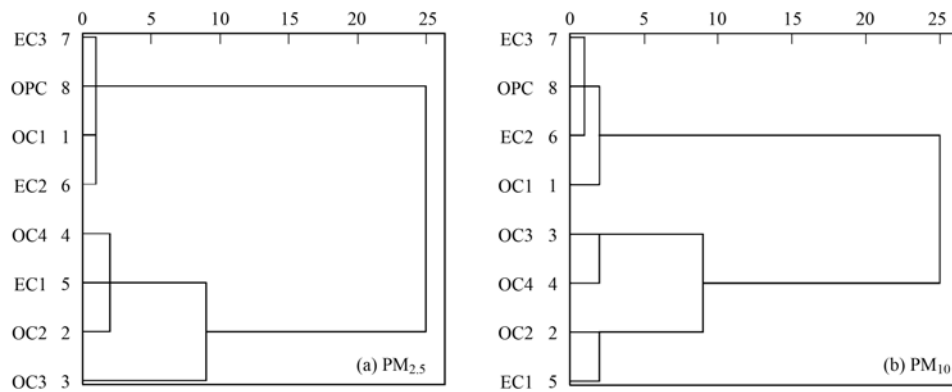


图4 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中8种碳组分的聚类分析

Fig. 4 Cluster analysis results for eight carbon fractions in $PM_{2.5}$ and PM_{10}

3 结论

(1)天津市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 $\omega(TC)$ 分别为4.89%(次干道)~18.83%(快速路)和8.14%(次干道)~19.71%(快速路); $\omega(OC)$ 分别为3.57%(次干道)~15.39%(快速路)和5.91%(次干道)~16.28%(快速路); $\omega(EC)$ 分别为1.32%(次干道)~3.44%(快速路)和1.96%(主干道)~3.43%(快速路)。总体来看,快速路中各碳组分质量分数均较高,次干道中各碳组分质量分数均较低。

(2)天津市道路扬尘中 OC/EC 的值均大于2。 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC 值为2.70~5.00, PM_{10} 中 OC/EC 值为2.65~6.37,表明道路扬尘中存在明显的二次污染,道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 主要来源于汽油车和柴油车尾气排放以及燃煤排放。

(3)相关分析表明, OC 与 EC 相关性较好,说明 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 OC 、 EC 来源大致相同。

(4)聚类分析表明,天津市春季道路扬尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 主要来源于燃煤、机动车尾气以及生物质燃烧。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周海军,刘涛,都达古拉,等.包头市大气污染特征及其影响因素[J].环境科学研究,2017,30(2):202-213.
Zhou H J, Liu T, Dudagula, et al. Characteristics of atmospheric pollutants and influencing factors in Baotou [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(2): 202-213.
- [3] 余峰.兰州地区大气颗粒物的化学特征及沙尘天气对其影响研究[D].兰州:兰州大学,2011.
- [4] 尹晓梅,李梓铭,熊亚军,等.2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估[J].环境科

学,2019,40(3):1011-1023.

Yin X M, Li Z M, Xiong Y J, et al. Contribution assessment of meteorology conditions and emission change for air quality improvement in Beijing during 2014-2017 [J]. Environmental Science, 2019, 40(3):1011-1023.

- [5] Andreão W L, Albuquerque T T, Kumar P. Excess deaths associated with fine particulate matter in Brazilian cities [J]. Atmospheric Environment, 2018, 194: 71-81.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Zou M L, Zhang C X, Li X P. Preliminary analysis of influencing factors of low visibility on a hazy day in winter in Binzhou City [J]. Meteorological and Environmental Research, 2018, 9(2): 16-19.
- [10] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. $PM_{2.5}$ in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation [J]. Particology, 2014, 13: 1-26.
- [11] Nair P R, George S K, Sunilkumara S V, et al. Chemical composition of aerosols over peninsular India during winter [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(34): 6477-6493.
- [12] Zhang W, Ji Y Q, Zhang S J, et al. Determination of silt loading distribution characteristics using a rapid silt loading testing system in Tianjin, China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, 17(9): 2129-2138.
- [13] 张诗建.基于快速检测法的天津市道路扬尘排放清单研究[D].天津:南开大学,2016.
- [14] 许妍,周启星.天津城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]. China Environmental Science, 2012, 32(12): 2168-2173.

- [15] 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.
- [16] 王士宝, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 990-996.
Wang S B, Ji Y Q, Li S L, *et al.* Characteristics of elements in $PM_{2.5}$ and PM_{10} in road dust fall during spring in Tianjin[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 990-996.
- [17] 李越洋, 姬亚芹, 王士宝, 等. 天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(5): 853-859.
Li Y Y, Ji Y Q, Wang S B, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of $PM_{2.5}$ -bound heavy metals in road dust deposition during spring in Tianjin City[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(5): 853-859.
- [18] 李树立, 姬亚芹, 朱振宇, 等. 天津市秋季道路降尘粒度乘数的分布特征[J]. 环境化学, 2017, **36**(3): 480-485.
Li S L, Ji Y Q, Zhu Z Y, *et al.* Distribution of the particle size multiplier of road dust fall during autumn in Tianjin[J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(3): 480-485.
- [19] 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.
- [20] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* The differential thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U. S. Air quality studies[J]. Atmospheric Environment. Part A: General Topics, 1993, **27**(8): 1185-1201.
- [21] 赵静琦, 姬亚芹, 李越洋, 等. 天津市道路车流量特征分析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(3): 399-405.
Zhao J Q, Ji Y Q, Li Y Y, *et al.* Distribution characteristics of traffic volume for typical roads in Tianjin[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(3): 399-405.
- [22] 史国良, 陈刚, 田瑛泽, 等. 天津大气 $PM_{2.5}$ 中碳组分特征和来源分析[J]. 环境污染与防治, 2016, **38**(1): 1-7.
Shi G L, Chen G, Tian Y Z, *et al.* Characteristic and sources of carbon fractions in $PM_{2.5}$ in Tianjin urban area[J]. Environmental Pollution & Control, 2016, **38**(1): 1-7.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 王燕. 大气颗粒物开放源生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.
- [27] 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 SJAQS/AUSPEX[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [28] 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.* Characteristics and source of organic carbon and elemental carbon from paved road dust in Shijiazhuang during summer[J]. Environmental Engineering, 2018, **36**(4): 122-126.
- [29] 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.
- [30] Gillies J A, Gertler A W. Comparison and evaluation of chemically speciated mobile source $PM_{2.5}$ particulate matter profiles[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, **50**(8): 1459-1480.
- [31] 董海燕, 古金霞, 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.

CONTENTS

Concurrent Measurement of Wet and Bulk Deposition of Trace Metals in Urban Beijing	ZHANG Guo-zhong, PAN Yue-peng, TIAN Shi-li, <i>et al.</i> (2493)
Concentration and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Urban and Suburban Areas of Beijing	XU Jing, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (2501)
Secondary Aerosol Formation in Urban Shanghai: Insights into the Roles of Photochemical Oxidation and Aqueous-Phase Reaction	GAO Jie, QIAO Li-ping, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (2510)
Secondary Inorganic Pollution Characteristics During Heavy Pollution Episodes of 2017 in Tianjin	XU Hong, XIAO Zhi-mei, CHEN Kui, <i>et al.</i> (2519)
Characterization of PM ₁₀ and PM _{2.5} Source Profiles for Emissions from Nonmetal Mineral Products Manufacturing Processes	ZHAO Xue-yan, YU Gao-feng, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (2526)
Characteristics of Component Particle Size Distributions of Particulate Matter Emitted from a Waste Incineration Plant	YU Zhuo-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (2533)
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	MA Yan, JI Ya-qin, GUO Ji-liang, <i>et al.</i> (2540)
Urban Aerosol Hygroscopicity During Haze Weather	YANG Su-ying, TIAN Zhi-jie, ZHANG Tie-ning, <i>et al.</i> (2546)
Atmospheric Pollution Characteristics and Inhalation Exposure Risk of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} at the Ningdong Energy and Chemical Industry Base, Northwest China	LIU Pan-liang, JU Yuan-li, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (2556)
Health Benefit Evaluation for PM ₁₀ and PM _{2.5} Pollution Control in Zhengzhou, China, 2014-2016	HAN Shi-jie, WANG Jia, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (2565)
Spatial-temporal Distribution of Aerosol Optical Depth and Its Main Influence Types in China During 1990-2017	LIU Ying, LIN Ai-wen, QIN Wen-min, <i>et al.</i> (2572)
Research on the Pollution Characteristics and Causality of Haze-sand Air Pollution in Beijing in Spring	WANG Yao-ting, LI Qing-chun, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (2582)
Vessel Emission Inventories and Emission Characteristics for Inland Rivers in Jiangsu Province	XU Wen-wen, YIN Cheng-qi, XU Xue-ji, <i>et al.</i> (2595)
Atmospheric Nitrogen Dioxide, Nitric Acid, Nitrate Nitrogen Concentrations, and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	OUYANG Xiu-qin, WANG Bo, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2607)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Moisture Sources in the Headwaters of the Yangtze River	WANG Shao-yong, WANG Qiao-li, WU Jin-kui, <i>et al.</i> (2615)
Historical Trends of Atmospheric Trace Metal Pollution in Northern Guizhou Province as Reconstructed from Alpine Lake Sediments	LIANG Meng-yao, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in Qingdao Coastal Beaches	LUO Ya-dan, LIN Qian-hui, JIA Fang-li, <i>et al.</i> (2631)
Pollution Characteristics of Microplastics in Migratory Bird Habitats Located Within Poyang Lake Wetlands	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZHOU Long-yin, <i>et al.</i> (2639)
Use of the Nitrogen/Carbon Ratio (N/C) and Two End-Member Sources Mixing Model to Identify the Origins of Dissolved Organic Matter from Soils in the Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, JOERI Kaal, LIANG Jian, <i>et al.</i> (2647)
Effects of Photosynthesis of Submerged Aquatic Plants on CDOM in a Karst Water System: A Case Study from Xueyu Cave, Chongqing, China	FAN Jia-xin, JIANG Yong-jun, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (2657)
Indicators of Groundwater Evolution Processes Based on Hydrochemistry and Environmental Isotopes: A Case Study of the Dongyuan Drinking Water Source Area in Ji'nan City	ZHANG Ya, SU Chun-li, MA Yan-hua, <i>et al.</i> (2667)
Water Quality Analysis and Health Risk Assessment for Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2675)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Buckwheat Field, Yunnan Province	ZHANG Yong, GUO Chun-qing, ZHU Yan-guang, <i>et al.</i> (2686)
C and N Transport Flux and Associated Changes of Water Quality Parameters from a Multiscale Subtropical Watershed in the Poyang Lake Area	LU Yao, GAO Yang, JIA Jun-jie, <i>et al.</i> (2696)
Pollutant Transport Analysis and Source Apportionment of the Entire Non-point Source Pollution Process in Combined Sewer Systems	FANG Jin-xiu, XIE Wen-xia, ZHU Yu-xi, <i>et al.</i> (2705)
Nitrogen Removal Efficiencies from Road Runoff by Dry Grass Swales with a Shallow Substrate Layer	DUAN Jin-kai, LI Tian, ZHANG Jia-wei (2715)
Migration Characteristics of Manganese During Rainfall Events and Its Impacts on Water Quality in a Drinking Water Source Reservoir	DENG Li-fan, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2722)
Potential for Phosphorus Uptake by Bed Sediments and Its Response to Carbon Additions in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, ZHANG Rui-gang, <i>et al.</i> (2730)
Sources and Distribution of Phosphorus in Sediments of the Jinpen Reservoir	MAO Xue-jing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2738)
Water Quality Characteristics and Distribution of Bacterial Communities During Thermal Stratification in the Miyun Reservoir	WANG Yu-bing, WANG Xiao-yan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (2745)
Relationship Between the Vertical Distribution of Nutrients and Bacterial Community Structures in Sediment Interstitial Waters of Stratified Reservoirs with Different Water Temperatures	WANG Shen, ZHANG Si-si, XU You, <i>et al.</i> (2753)
Accumulation Characteristics and Release Regularity of Nutrients in Sediments of a Surface-flow Constructed Wetland After Long-term Operation	ZHU Yi-meng, JIANG Cui-ling, ZHU Li-qin, <i>et al.</i> (2764)
Application of Goethite Modified Biochar for Arsenic Removal from Aqueous Solution	ZHU Si-hang, ZHAO Jing-jing, YIN Ying-jie, <i>et al.</i> (2773)
Effects and Mechanisms of Methyl Orange Removal from Aqueous Solutions by Modified Rice Shell Biochar	SHI Yue-yue, SHAN Riu, YUAN Hao-ran (2783)
Performance and Membrane Fouling Properties in an Anaerobic Membrane Bioreactor for Salty Wastewater	YAN Huan-xi, XU Zhen-yu, JIN Chun-ji, <i>et al.</i> (2793)
Pollution Characteristics and Enhanced Removal of Organic Phosphorus in Effluent from a Wastewater Treatment Plant	WANG Xiao-dong, WANG Zi-wen, CHEN Ming-fei, <i>et al.</i> (2800)
Effects of Alkalinity on Partial Nitrification in a Zeolite Sequencing Batch Reactor	WANG Rui-xin, CHEN Jing, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (2807)
Effects of the Physical Structure of Activated Sludge on Respiration Processes	GUO Yao, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (2813)
Performance of an Aerobic Granular Reactor Treating Biogas Slurry from Pig Farm	LIAO Jie, YE Jia-qi, ZENG Zhi-chao, <i>et al.</i> (2821)
Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of Greenhouse Gas Emissions from Rivers in a Rapidly Urbanizing Area	LIU Ting-ting, WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, <i>et al.</i> (2827)
Influences of Biochar on Pollutant Removal Efficiencies and Nitrous Oxide Emissions in a Subsurface Flow Constructed Wetland	DENG Chao-ren, LIANG Yin-kun, HUANG Lei, <i>et al.</i> (2840)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on N ₂ O Emissions and the Associated Microbiological Mechanism in a Rice Field	WU Jie, LI Zhi-lin, XU Jia-ying, <i>et al.</i> (2847)
Effects of Different Levels of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration Rates and Soil Biochemical Properties in an Alfalfa Grassland	HU Wei, ZHANG Ya-hong, LI Peng, <i>et al.</i> (2858)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils from a Typical Urbanized Area	HE Bo, ZHAO Hui, WANG Tie-yu, <i>et al.</i> (2869)
Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils and Crops from an Area with a High Geochemical Background of Cadmium, Southwestern China	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, XIONG Yan, <i>et al.</i> (2877)
Spatial Distribution Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Chinese Wolfberry Land Based on GIS and the Receptor Model	BAI Yi-ru, ZHANG Xing, ZHAO Yun-peng, <i>et al.</i> (2885)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of As at a Small Scale in Agricultural Soils of the Karst Region	WANG Hua, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (2895)
Soil Aggregate Stability and Its Stoichiometric Characteristics in <i>Robinia pseudoacacia</i> Forest within Different Vegetation Zones on the Loess Plateau, China	QU Qing, XU Hong-wei, WU Xuan, <i>et al.</i> (2904)
Straw Returning Plus Nitrogen Fertilizer Affects the Soil Microbial Community and Organic Carbon Mineralization in Karst Farmland	XU Xue-chi, SU Yi-rong, WANG Gui-hong, <i>et al.</i> (2912)
Effects of Biochar Application and Ageing on the Adsorption of Antibiotics in Purple Soil	YIN Wen-min, GUAN Zhuo, LIU Chen, <i>et al.</i> (2920)
Ammonia Oxidation in a Neutral Purple Soil Measured by the ¹³ C-DNA-SIP Method	LIU Tian-lin, WANG Zhi-hui, YAN Xiao-juan, <i>et al.</i> (2930)
Effects of Silver Nanoparticles and Silver Ions on Soil Nitrification Microorganisms and Ammonoxidation	WU Ling-li, ZHANG Xu, SHU Kun-hui, <i>et al.</i> (2939)
Insight into the Process of Mn-ANAMMOX in Soils of Agricultural Drainage Ditches	CHEN Shi, LI Zheng-kui, QIN Yun-bin, <i>et al.</i> (2948)
Effects of Different Concentrations of Tetracycline in Sludge on Ammonia Oxidizers During Vermicomposting	WU Ying, HUANG Kui, XIA Hui, <i>et al.</i> (2954)