

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.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈葭, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志伟, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征

梅德清¹, 朱宗宁¹, 孙天硕¹, 王向丽², 梅丛蔚¹, 肖政臻¹

(1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江 212013; 2. 南通大学机械学院, 南通 226019)

摘要: 颗粒物的粒径分布特性与碳质组分的表征已成为大气颗粒物源解析的重要方法. 利用微孔均匀沉积式碰撞采样器与有机碳/元素碳分析仪, 研究采集自不同区域的机动车源大气颗粒物粒径分布特性及其碳组分含量特征. 结果表明, 随着粒径级增大, 发动机原排颗粒物质量浓度逐渐降低. 实验室排空大气颗粒物在 0.32~0.56 μm 粒径级浓度较高; 地下停车场大气颗粒物在 1.0~1.8 μm 粒径级浓度较高. 柴油机原排颗粒物 OC1、OC2 和 OC3 所占比例较多, EC2 为元素碳的主要部分. 机动车源扩散区域大气颗粒物 OC3 和 OC4 含量所占比例较多, 地下停车场大气颗粒物 EC1 占元素碳绝大部分. 柴油机原排颗粒物的 OC/EC 比值较小, 在 0.92~2.50 之间. 实验室排空与地下停车场大气颗粒物的 OC/EC 比值分别在 1.40~2.53 与 2.36~4.82 之间. 此外, 地下停车场大气颗粒物的 OC/EC 比值均大于 2.0, 最高可达 4.82, 可以判定地下停车场有较多的二次颗粒物生成. 上述特性可为机动车源大气颗粒物的辨识提供参考依据.

关键词: 大气颗粒物; 机动车; 粒径; 碳组分; 热光碳分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0114-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201807074

Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles

MEI De-qing¹, ZHU Zong-ning¹, SUN Tian-shuo¹, WANG Xiang-li², MEI Cong-wei¹, XIAO Zheng-zheng¹

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: Characterization of the size distribution and carbon components in particulates has become important for identifying the particulates in the atmosphere. The size distribution and carbon components of atmospheric particulate matter from motor vehicles in different regions were analyzed by using Micro-orifice uniform deposition impactors (MOUDI) and the organic carbon/elemental carbon (OC/EC) analyzer. With increasing particle size, the mass concentration of raw diesel/gasoline decreases. The highest mass concentration of particles collected near the chimney of an engine laboratory was observed for particle sizes ranging from 0.32-0.56 μm , while particles with sizes from 1.0-1.8 μm in the basement garage showed the most mass fractions. The OC1, OC2, and OC3 were the major parts of the OC contents in raw diesel particles. The EC2 was the main part of EC. The atmospheric particles collected in typical regions contained more OC3 and OC4. EC1 was the main part of EC in particles collected from the basement garage. The OC/EC ratios of raw diesel particles ranged from 0.92 to 2.50. The OC/EC ratios of particles collected near the chimney of an engine laboratory ranged from 1.40 to 2.53 and that of particles collected in the basement garage ranged from 2.36 to 4.82. Moreover, the OC/EC ratios in particles collected in the basement garage normally exceeded 2.0 and reached 4.82 at the largest size, which implies that many secondary particles were generated in the basement garage. The above-mentioned characteristics provide references that are beneficial for the identification of particulates in the atmosphere originating from motor vehicles.

Key words: atmospheric particulate matter; motor vehicles; size; carbon component; thermal/optical carbon

随着机动车保有量飞速增长, 其产生的颗粒物排放已经成为大气颗粒物的重要组成部分, 对大气环境质量和人类身体健康造成严重危害^[1-3]. 机动车源颗粒物进入大气后, 经过物理吸附和化学反应等一系列复杂过程, 粒径级及组分都发生很大变化, 因而欲从大气颗粒物中识别出源自机动车尾气排放的部分, 已成为当今的难题^[4-7].

在描述和评估某区域大气颗粒物污染状况时, 大多从颗粒物浓度、粒径分布特性及组分特征等多角度加以考察. 杨柳等^[8]利用扫描电迁移率颗粒粒径谱仪研究分析了北京两个交通地区的大气颗粒物, 得出两个地区大气颗粒物粒径峰值分别为 22.5 nm 和 113.0 nm, 前者大气颗粒物中包含大量的汽

油机颗粒物, 后者大气颗粒物中柴油机颗粒物所占比重较高. Lonati 等^[9]通过对米兰城区大气颗粒物研究发现, 机动车排放的一次颗粒物扩散至大气后, 粒径大于 0.5 μm 的颗粒物质量浓度较高.

作为大气颗粒物的主要成分, 碳质组分呈现多样的形态, 分为有机碳 (organic carbon, OC)、元素碳 (elemental carbon, EC) 和碳酸盐碳 (carbonate carbon, CC) 等. 由于不同源颗粒物碳组分形态的差异, 其有机碳与元素碳比值 OC/EC 已成为排放

收稿日期: 2018-07-10; 修订日期: 2018-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51876133, 51876082); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (苏政办发[2014]82号); 江苏省科技厅重点研发计划项目 (BE2016139)

作者简介: 梅德清 (1974~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为发动机排放控制与新能源, E-mail: meideqing@ujs.edu.cn

源识别以及判定二次颗粒物污染的重要指标。Tolis 等^[10]对希腊某港口大气中 $PM_{2.5}$ 的 OC 和 EC 组分进行分析, 得出 OC/EC 比值为 2 时, 颗粒物主要来源于重型柴油机车; 当 OC/EC 比值为 7.7 时, 则主要由于汽油机车增多导致。Wang 等^[11]对兰州城市大气颗粒物的碳组分进行分析, 指出煤燃烧颗粒物排放源的 OC/EC 比值范围在 0.3 ~ 7.6, 机动车颗粒物排放源的 OC/EC 比值范围在 0.7 ~ 2.4, 生物质燃烧颗粒物排放源的 OC/EC 比值范围在 4.1 ~ 14.5。

本文探索机动车源大气颗粒物的粒径、碳组分与排放源之间的关联, 通过微孔均匀沉积式碰撞采样器与有机碳/元素碳分析仪, 研究颗粒物粒径分布特性和碳质组分特征, 以期为大气颗粒物机动车排放源的辨识提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 颗粒物采集

以 4 个类型的颗粒物为研究对象, 分别为: 柴油机原排颗粒物、汽油机原排颗粒物、某发动机实验室排空烟囱大气颗粒物(主要污染源为柴油机)和某超市地下停车场大气颗粒物(主要污染源为汽油车)。其中, 原排颗粒物指在发动机排气管上采集到的未经稀释的颗粒物。柴油机原排颗粒物来源于一台单缸风冷共轨柴油机, 其主要参数见表 1; 汽油机原排颗粒物来源于一台单缸风冷四冲程汽油机, 其主要参数见表 2。当发动机运行于额定功率转速下 100%、75%、50%、25% 等 4 个负荷工况和怠速工况下, 每个工况采集发动机原排颗粒物 6 min, 累计采样时间 30 min。在采集含有机动车源颗粒物的大气颗粒物时, 累计采样时间为 10 h。由于所研究的原排颗粒物与机动车源大气颗粒物粒径绝大部分在 $2.5\ \mu m$ 以下, 在使用 MOUDI (micro-orifice uniform deposit impactor) 采集颗粒物时, 选择 0.18 ~ 0.32、0.32 ~ 0.56、0.56 ~ 1.0 和 1.0 ~ 1.8 μm 等 4 个粒径级的颗粒物作为研究对象。颗粒物采集方案如表 3 所示, 样品编号与实验方案编号相对应。使用直径 47 mm、厚度 0.05 mm 的铝质滤膜采集颗粒物样品, 用于粒径分布特性测试。使用石英纤维滤膜(Munktell Filter AB 公司)采集颗粒物样品, 用于碳组分检测, 该滤膜在出厂前已进行预处理, 无需后续高温热处理^[12]。因汽油机原排颗粒物的粒径级较小以及排放量少, 含有大量易挥发的碳氢化合物, 采集到的颗粒物样品黏结在一起, 不适合用于进一步的碳质组分检测。

表 1 实验用柴油机主要参数

Table 1 Main specifications of the test diesel engine	
项目	数值
类型	单缸, 风冷, 共轨, 4 冲程
缸径/mm	86
行程/mm	72
压缩比	19
额定功率/kW	6.5
额定功率转速/ $r \cdot min^{-1}$	3 600

表 2 实验用汽油机主要参数

Table 2 Main specifications of the test gasoline engine	
项目	数值
类型	单缸, 风冷, 4 冲程
缸径/mm	78
行程/mm	58
压缩比	8.5
额定功率/kW	5.5
额定功率转速/ $r \cdot min^{-1}$	3 600

表 3 大气颗粒物采集方案

Table 3 Particle collection schemes		
类别	方案编号	粒径级/ μm
柴油机原排颗粒物	S1	0.18 ~ 0.32
	S2	0.32 ~ 0.56
	S3	0.56 ~ 1.0
	S4	1.0 ~ 1.8
汽油机原排颗粒物	S5	0.18 ~ 0.32
	S6	0.32 ~ 0.56
	S7	0.56 ~ 1.0
	S8	1.0 ~ 1.8
发动机实验室排空大气颗粒物	S9	0.18 ~ 0.32
	S10	0.32 ~ 0.56
	S11	0.56 ~ 1.0
	S12	1.0 ~ 1.8
超市地下停车场大气颗粒物	S13	0.18 ~ 0.32
	S14	0.32 ~ 0.56
	S15	0.56 ~ 1.0
	S16	1.0 ~ 1.8

1.2 天平差重法

将采集有颗粒物样品的铝膜放置于烘箱中, 中低温烘干 6 h, 避免部分颗粒物氧化, 随后放置干燥处若干小时, 以减少挥发和水蒸气的干扰, 称重时要保证环境温度为 20 ~ 30℃, 湿度在 20% ~ 45%, 最后用微量天平进行称量 3 次, 取其平均值以减小误差, 在称重过程中相近两次称重误差不得超过 0.1 mg。最后依据采样前后铝膜质量差以及流经采样泵的大气体积计算得到颗粒物粒径浓度分布。

1.3 热碳分析仪

DRI 2001A 型碳组分分析仪(美国 Atmoslytic Inc.)利用热光法测量样品中的有机碳与元素碳, 其原理^[13, 14]为: 先将氦气通入热光炉中, 在无氧氛

围下逐步升温,当温度上升至 140、280、480 和 580℃时,对应地检测出 OC1、OC2、OC3 和 OC4. 然后通入 98% 氮气与 2% 氧气的混合气作为工作气,依据 580、740 和 840℃这 3 个温度阶梯逐步升温,将元素碳先氧化成二氧化碳,然后在还原炉中还原成甲烷,再由氢火焰离子检测器定量检测出 EC1、EC2 和 EC3. 部分有机碳可在非氧气状态下裂解成裂解碳(organic pyrolysis carbon, OPC),为了测量这部分裂解碳的含量,使用波长为 633 nm 的 He-Ne 激光照射样品. 由上述原理可以得到总有机碳(total organic carbon, TOC)和总元素碳(total elemental carbon, TEC):

$$\text{TOC} = \text{OC1} + \text{OC2} + \text{OC3} + \text{OC4} + \text{OPC} \quad (1)$$

$$\text{TEC} = \text{EC1} + \text{EC2} + \text{EC3} - \text{OPC} \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 原排颗粒物粒径分布

图 1 为柴油机和汽油机原排颗粒物质量浓度分布. 从中可见,柴油机和汽油机原排颗粒物质量浓度最大值都出现在最小粒径级颗粒物中,分别是 $5.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 占总颗粒物质量的 58.3% 和 84.3%. 随着粒径级增大,原排颗粒物质量浓度均逐渐降低. 其次,柴油机颗粒物浓度比汽油机颗粒物浓度要大很多,柴油机颗粒物直径大部分处在 $0.18 \sim 0.56 \mu\text{m}$ 范围之间,此范围内的颗粒物占柴油机颗粒物总量的 90%,因而柴油机排放的颗粒物大多处于聚集态,少部分处于粗粒子态;汽油机颗粒物因其主要处于成核态,主要粒径级在 100 nm 以下,不易被 MOUDI 捕集,因而在采集过程中,4 个粒径级汽油机颗粒物质量浓度均远远小于柴油机颗粒物质量浓度.

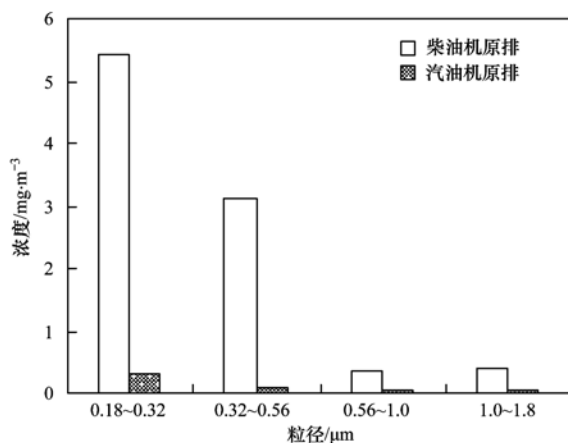


图 1 原排颗粒物粒径分布规律

Fig. 1 Size distribution of the raw particulate matter

2.2 扩散区域大气颗粒物粒径分布

图 2 为实验室排空大气颗粒物和地下停车场扩

散区域大气颗粒物粒径质量浓度分布. 从中可见,两个区域大气颗粒物的质量浓度峰值均在 $0.56 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 粒径级处. 主要由于大量柴油机原排颗粒物进入大气后,吸附空气中的其他物质,颗粒物直径增大,以及地下停车场汽油机排出的颗粒物和气态污染物与环境中水蒸气及其他有机物反应生成了粒径级较大的二次颗粒物. 就 $0.32 \sim 0.56 \mu\text{m}$ 粒径级采集的颗粒物而言,实验室排空大气颗粒物质量浓度相比地下停车场大气颗粒物较高,主要因为此粒径级的实验室排空大气颗粒物含有大量的柴油机原排颗粒物. 地下停车场大气颗粒物在 $1.0 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 这一粒径级质量浓度超过实验室排空大气颗粒物一倍,这是由于地下停车场环境半封闭,大粒径级的大气颗粒物不易扩散,大量堆积在环境中,因而此粒径级的地下停车场大气颗粒物浓度较高.

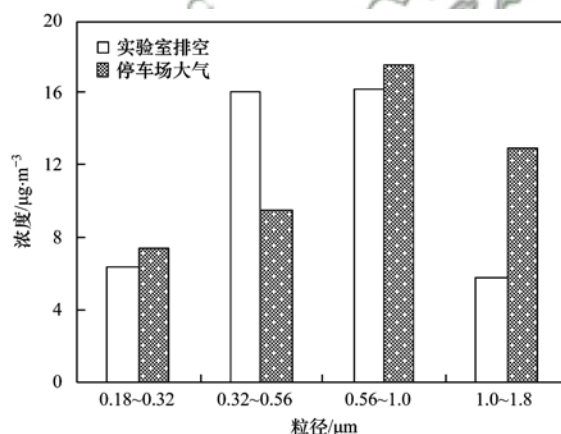


图 2 扩散区域颗粒物的粒径分布规律

Fig. 2 Size distribution of diluted particulate matter collected from different sites

2.3 柴油机原排颗粒物碳组分分析

图 3 为柴油机原排颗粒物样品各种碳组分占总碳的比例,各颗粒物样品的碳组分质量见表 4.

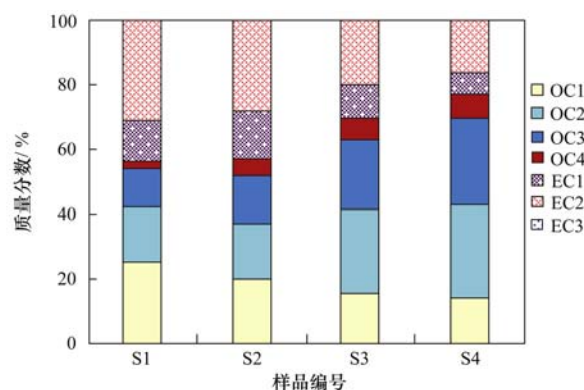


图 3 柴油机原排颗粒物各种碳组分占总碳的比例

Fig. 3 Mass fraction of various carbon components in total carbon of raw diesel particulate matter

由图 3 和表 4 可见,柴油机原排颗粒物有机碳中 OC1、OC2 和 OC3 占绝大部分,对 4 个不同粒径

表 4 柴油机原排颗粒物各种碳组分的质量/ μg
Table 4 Various carbon components in raw diesel particulate matter/ μg

样品编号	OC1	OC2	OC3	OC4	EC1	EC2	EC3	OPC
S1	11.89	8.41	5.91	0.78	6.46	15.12	—	-3.71
S2	8.57	7.32	6.38	2.47	6.47	12.24	—	-3.67
S3	4.76	7.85	6.56	2.05	3.32	6.25	—	-2.05
S4	3.47	7.31	6.78	1.99	1.52	4.32	—	-1.41

级颗粒物而言, OC1 ~ OC3 占有有机碳的比例均超过 89%, 这是由于 OC4 一般存在于大粒径级颗粒物中, 而本文研究的柴油机颗粒物粒径均小于 1.8 μm . 与此同时, 有研究表明, OC1 与 OC2 主要是一些挥发性有机组分, 机动车源排放是大气颗粒物中挥发性有机组分的重要来源, 因而机动车原排颗粒物中 OC1 与 OC2 含量较高^[15]. 随着颗粒物粒径级增加, OC1 组分所占比例逐渐减小, 这是由于小粒径级颗粒物具有较大的比表面积, 容易吸附更多的挥发性有机组分如 SOFs 等. 元素碳主要由 EC1 与 EC2 组成, 且随着粒径级增加, 颗粒物中 EC 含量比例逐渐减小, 两个较小粒径级颗粒物中的 EC 所占比例明显大于两个较大粒径级颗粒物中的 EC 所占比例, 这是由于柴油机原排颗粒物中元素碳主要存在于较小粒径级颗粒物中. 此外, EC2 为元素碳中的主要部分, 分别占元素碳总量的 70%、65%、65% 和 74%.

不同粒径级柴油机原排颗粒物的 OC/EC 比值如图 4 所示. 对于 0.18 ~ 0.32 μm 与 0.32 ~ 0.56 μm 较小粒径级颗粒物, 其 OC/EC 比值均小于 1, 分别为 0.92 与 0.94; 而对于 0.56 ~ 1.0 μm 与 1.0 ~ 1.8 μm 较大粒径级颗粒物, 其 OC/EC 比值大于 1, 分别为 1.65 与 2.50. 不难发现, OC/EC 比值随粒径级增大而增大. 这是由于柴油机原排颗粒物中的大部分 EC 存在于小粒径级颗粒物中, 粒径级越大, EC 所占比例越小. 另外, 柴油车尾气颗粒物中

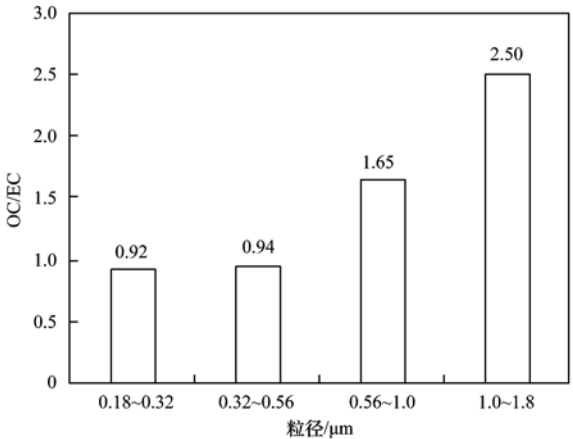


图 4 柴油机原排不同粒径级颗粒物的 OC/EC 比值
Fig. 4 OC/EC ratios for raw diesel particulate matter with different sizes

OC/EC 一般在 1 左右, 本文不同粒径级柴油机原排颗粒物的 OC/EC 比值经宏观平均后, 其结果符合 Khan 等^[16] 和段卿等^[17] 的研究发现.

2.4 实验室排空大气颗粒物碳组分分析

图 5 为实验室排空大气颗粒物样品各种碳组分占总碳的比例, 各颗粒物样品的碳组分质量见表 5. 从中可见, 相对于柴油机原排颗粒物, 实验室排空大气颗粒物有机碳中最易挥发的 OC1 组分明显含量减少, 而 OC2、OC3 和 OC4 组分成为有机碳的主要部分, 这是由于在实验室排空烟囱采集到的颗粒物, 主要是由柴油机燃烧产生的, 柴油机颗粒物排放到大气中后, 大多数的 OC1 组分挥发, 导致其含量减少. 随着颗粒物粒径级增加, OC3 与 OC4 组分所占比例逐渐增大, 说明此时大粒径级颗粒物中含有较多分子质量较大、不易挥发的有机组分^[18]. 相比于柴油机原排颗粒物, 实验室排空大气颗粒物中 EC2 组分的比例明显降低, 且低于 EC1 所占比例, 这是由于大气颗粒物中含有较多金属元素, 起到了催化氧化作用, 使一部分 EC2 组分在检测时在较低温度下被氧化, 从而归类于 EC1 组分^[19].

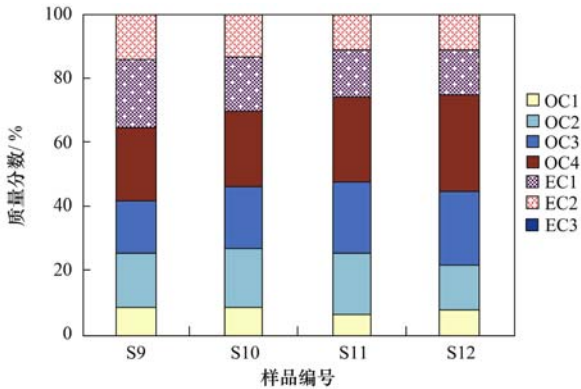


图 5 实验室排空大气颗粒物各种碳组分占总碳比例

Fig. 5 Mass fraction of various carbon components in total carbon of atmospheric particulate matter collected near the chimney of an engine laboratory

不同粒径级实验室排空大气颗粒物的 OC/EC 比值如图 6 所示. 对 0.18 ~ 0.32 μm 与 0.32 ~ 0.56 μm 较小粒径级颗粒物, 其 OC/EC 比值均小于 2, 分别为 1.53 与 1.40; 而对于 0.56 ~ 1.0 μm 与 1.0 ~ 1.8 μm 较大粒径级颗粒物, 其 OC/EC 比值大于 2, 分别为 2.53 与 2.19. 较小粒径级颗粒物由于含

有大量源自柴油机的 EC，从而其 OC/EC 比值比大粒径级颗粒物的值小，然而，对于 0.18 ~ 0.32 μm 粒径级颗粒物，大量的有机组分与气态 HC 附着在颗粒物上导致 OC 增加，因而此粒径级 OC/EC 比值大于 0.32 ~ 0.56 μm 粒径级颗粒物 OC/EC 比值。在 0.56 ~ 1.0 μm 粒径级颗粒物中，大气中碳氧化

合物附着于聚集态颗粒物上，导致 OC 相对于 1.0 ~ 1.8 μm 粒径级颗粒物较多，与此同时这两个粒径级颗粒物 EC 含量较小，OC/EC 值较高。Pio 等^[20]和孙友敏等^[21]进行大量实验研究发现，来自道路柴油机动车源大气颗粒物的 OC/EC 值均在 1 ~ 2 之间，本文得到的结论与其一致。

表 5 实验室排空大气颗粒物各种碳组分的质量/μg

Table 5 Carbon components in atmospheric particulate matter collected near the chimney of an engine laboratory/μg								
样品编号	OC1	OC2	OC3	OC4	EC1	EC2	EC3	OPC
S9	1.84	3.87	3.57	5.06	4.79	3.11	—	-0.88
S10	1.57	3.52	3.67	4.38	3.24	2.56	—	-2.09
S11	1.38	3.9813	4.55	5.55	3.10	2.31	—	-0.50
S12	1.33	2.24	3.83	5.09	2.24	1.96	—	-1.03

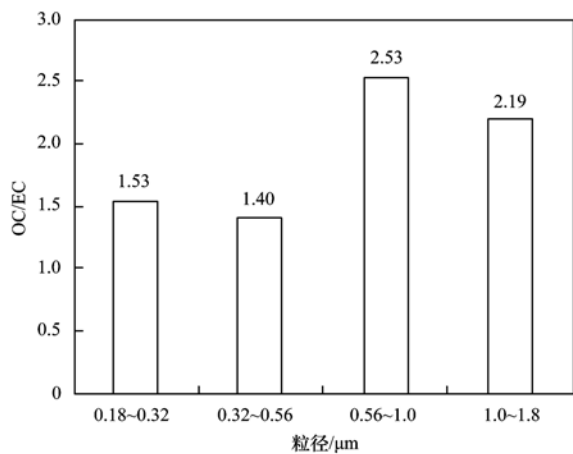


图 6 实验室排空大气颗粒物 OC/EC 比值
Fig. 6 OC/EC of atmospheric particulate matter collected near the chimney of an engine laboratory

2.5 地下停车场大气颗粒物碳组分分析

图 7 为地下停车场大气颗粒物样品各种碳组分占总碳的比例，各颗粒物样品的碳组分质量见表 6。从中可见，地下停车场大气颗粒物有机碳组分主要由 OC2、OC3 和 OC4 组成，含有易挥发组分 OC1 的较小粒径级颗粒物排放到地下停车场相对密闭空间，在一段时间后持续吸附其他物质或者发生化学反应，而转化为大粒径级颗粒物。在较小粒径级 0.18 ~ 0.32 μm 颗粒物中仍然存在着一些挥发性有

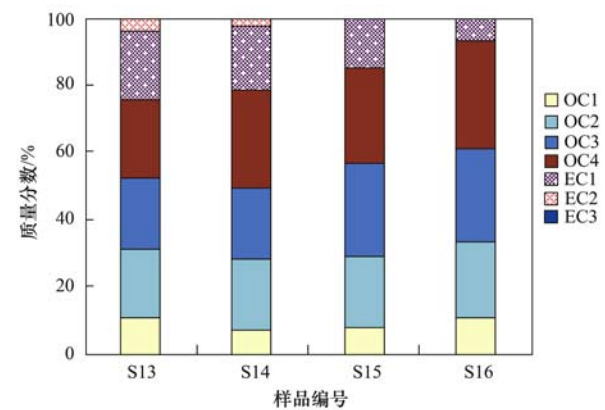


图 7 地下停车场大气颗粒物各种碳组分占总碳比例
Fig. 7 Mass fraction of the carbon component in total carbon of atmospheric particulate matter collected in the basement garage

机组分，特别是汽油车排放的气态污染物，从而导致 OC1 和 OC2 所占比例较其他粒径级高。由于停车场空间封闭，一次颗粒物经过很长时间逐渐转化为二次颗粒物，一些气态 HC 经吸附或氧化等物理化学变化后形成大粒径级有机颗粒物，使大粒径级颗粒物中 OC3 和 OC4 组分的比例增加。地下停车场颗粒物元素碳中 EC1 为主要成分，而 EC2 的含量微乎其微，这主要是由于该样品颗粒物主要源自于 EC1，而柴油机燃烧过程会出现更多的高温缺氧状态，使燃料深度脱氢形成 soot-EC。

表 6 停车场大气颗粒物各种碳组分的质量/μg

Table 6 Carbon components in atmospheric particulate matter collected in the basement garage/μg								
样品编号	OC1	OC2	OC3	OC4	EC1	EC2	EC3	OPC
S13	2.84	5.43	5.68	6.15	5.43	1.11	0	-0.92
S14	1.48	4.67	4.59	6.38	4.12	0.56	0	-1.79
S15	1.79	4.86	6.27	6.64	3.34	0.06	0	-1.50
S16	2.56	5.32	6.65	7.76	1.59	0.02	0	-2.01

不同粒径级地下停车场大气颗粒物的 OC/EC 比值如图 8 所示。可见对于不同粒径级，地下停车场大气颗粒物的 OC/EC 比值较实验室排空大气颗

粒物的 OC/EC 比值更高，均大于 2。其原因在于，除了空气中灰尘外，实验室排空大气颗粒物主要来源于柴油机颗粒物，地下停车场大气颗粒物主要来

源于汽油机颗粒物. 不同于实验室排空大气颗粒物, $1.0 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 大粒径级的地下停车场大气颗粒物 OC/EC 比值最高, 达到了 4.82, 这主要是由于停车场环境相对密闭, 可能存在着二次污染, 由水蒸气、有机气体、发动机排放的颗粒物及扬尘等物质经过化学反应与物理凝聚后, 逐渐形成含 OC 较多的大粒径级二次颗粒物. Chow 等^[22] 认为 EC 是稳定的石墨化学结构, 主要来自于燃烧排放, 而 OC 包含碳氢化合物化学催化氧化过程的二次产物. 在特定环境下, OC/EC 值大于 2 可作为判断是否存在二次颗粒物形成的依据^[23~25].

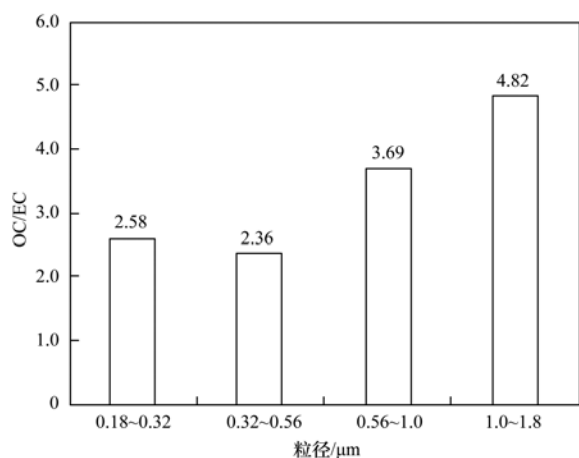


图8 地下停车场大气颗粒物 OC/EC 比值

Fig. 8 OC/EC of atmospheric particulate matter collected in the basement garage

3 结论

(1) 随着粒径级增加, 原排颗粒物质量浓度均逐渐降低. 柴油机颗粒物浓度比汽油机颗粒物浓度大. 对于机动车源扩散区域大气颗粒物而言, 颗粒物质量浓度峰值均在 $0.56 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 范围内. 实验室排空大气颗粒物在 $0.32 \sim 0.56 \mu\text{m}$ 粒径级质量浓度较高; 地下停车场大气颗粒物在 $1.0 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 粒径级质量浓度较高.

(2) 柴油机原排颗粒物有机碳中 OC1、OC2 和 OC3 所占比例较多, OC4 所占比例较少, EC 中 EC2 所占比例较多. 实验室排空与地下停车场大气颗粒物的有机碳组分主要包含 OC2、OC3 和 OC4, 其中 OC4 含量最多, OC3 与 OC4 组分含量比例都随着颗粒物粒径级的增大而增大. 实验室排空与地下停车场大气颗粒物中 EC 主要由 EC1 与 EC2 构成.

(3) 柴油机原排颗粒物的 OC/EC 比值较小, 在 $0.92 \sim 2.50$ 之间. 实验室排空及地下停车场大气两个典型扩散区域的大气颗粒物的 OC/EC 比值分别落在 $1.40 \sim 2.53$ 与 $2.36 \sim 4.82$ 区间, 较原排颗粒物的 OC/EC 比值有所上升. 总体而言, 无论

原排和扩散状态, 较大粒径级颗粒物其 OC/EC 比值较高. 此外, 地下停车场大气颗粒物的 OC/EC 比值均大于 2, 最高可达 4.82, 可以判定地下停车场有较多的二次颗粒物生成.

参考文献:

- [1] 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 等. 交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3741-3748.
Luo N N, Zhao W J, Yan X, *et al.* Study on influence of traffic and meteorological factors on inhalable particle matters of different size [J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3741-3748.
- [2] Dorman S C, Sutcliffe K M, Abourbih J, *et al.* Inhalation of nebulized diesel particulate matter: A safety trial in healthy humans [J]. Journal of Respiratory Medicine, 2014, **2014**: 797050.
- [3] Gao Y, Yang T T, Jin J. Nanoparticle pollution and associated increasing potential risks on environment and human health: a case study of China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(23): 19297-19306.
- [4] Dallmann T R, Onasch T B, Kirchstetter T W, *et al.* Characterization of particulate matter emissions from on-road gasoline and diesel vehicles using a soot particle aerosol mass spectrometer [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(14): 7585-7599.
- [5] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区 $\text{PM}_{2.5}$ 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 sources of organic carbon and elemental carbon in $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai urban area [J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3263-3270.
- [6] Ren L H, Wang W, Wang Q Y, *et al.* Comparison and trend study on acidity and acidic buffering capacity of particulate matter in China [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(39): 7503-7519.
- [7] 卢慧剑. 典型沿海城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及其来源解析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2016. 1-5.
- [8] 杨柳, 吴烨, 宋少洁, 等. 不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征 [J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 694-700.
Yang L, Wu Y, Song S J, *et al.* Particle number size distribution near a major road with different traffic conditions [J]. Environmental Science, 2012, **33**(3): 694-700.
- [9] Lonati G, Giugliano M. Size distribution of atmospheric particulate matter at traffic exposed sites in the urban area of Milan (Italy) [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(2): 264-274.
- [10] Tolis E I, Saraga D E, Filiou K F, *et al.* One-year intensive characterization on $\text{PM}_{2.5}$ nearby port area of Thessaloniki, Greece [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(9): 6812-6826.
- [11] Wang Y N, Jia C H, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in a semi-arid and petrochemical-industrialized city, Northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **573**: 1031-1040.
- [12] 周黎鹏, 许朕, 李新令, 等. 喷涂策略及 EGR 对柴油机排放微粒中碳质组分的影响 [J]. 上海交通大学学报, 2013, **47**(11): 1745-1751.

- Zhou L P, Xu Z, Li X L, *et al.* Effects of fuel injection strategies and EGR on diesel particle carbon components[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2013, **47**(11): 1745-1751.
- [13] 窦筱艳, 徐珣, 刘宇, 等. 西宁市城区冬季 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中有机碳、元素碳污染特征[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(2): 44-49.
- Dou X Y, Xu X, Liu Y, *et al.* Characteristics of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} and PM₁₀ in Xining in the winter [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(2): 44-49.
- [14] 张雪莹, 王鑫, 周越, 等. 兰州市夏季大气中碳类气溶胶含量变化特征及其来源分析[J]. 高原气象, 2017, **36**(2): 528-537.
- Zhang X Y, Wang X, Zhou Y, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols and their source in the atmosphere during summer in Lanzhou [J]. Plateau Meteorology, 2017, **36**(2): 528-537.
- [15] Zhu C S, Cao J J, Tsai C J, *et al.* Comparison and implications of PM_{2.5} carbon fractions in different environments[J]. Science of the Total Environment, 2014, **466-467**: 203-209.
- [16] Khan B, Hays M D, Geron C, *et al.* Differences in the OC/EC ratios that characterize ambient and source aerosols due to thermal-optical analysis [J]. Aerosol Science and Technology, 2012, **46**(2): 127-137.
- [17] 段卿, 安俊琳, 王红磊, 等. 南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2460-2467.
- Duan Q, An J L, Wang H L, *et al.* Pollution characteristics of organic and elemental carbon in atmospheric particles in Nanjing northern suburb in summer [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2460-2467.
- [18] Diab J, Streibel T, Cavalli F, *et al.* Hyphenation of a EC/OC thermal-optical carbon analyzer to photo-ionization time-of-flight mass spectrometry: an off-line aerosol mass spectrometric approach for characterization of primary and secondary particulate matter [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2015, **8**(8): 3337-3353.
- [19] Zhu C S, Chen C C, Cao J J, *et al.* Characterization of carbon fractions for atmospheric fine particles and nanoparticles in a highway tunnel [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(23): 2668-2673.
- [20] Pio C, Cerqueira M, Harrison R M, *et al.* OC/EC ratio observations in Europe: re-thinking the approach for apportionment between primary and secondary organic carbon [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(34): 6121-6132.
- [21] 孙友敏, 李少洛, 陈春竹, 等. 济南市机动车排气污染特征及对市区 PM_{2.5} 的影响 [J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1384-1391.
- Sun Y M, Li S L, Chen C Z, *et al.* Study on characteristics of vehicle exhaust and the influence on PM_{2.5} in Jinan city [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(4): 1384-1391.
- [22] Chow J C, Watson J G, Lu Z 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] Zhou S Z, Wang Z, Gao R, *et al.* Formation of secondary organic carbon and long-range transport of carbonaceous aerosols at Mount Heng in South China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **63**: 203-212.
- [24] Deng X J, Wu D, Yu J Z, *et al.* Characterization of secondary aerosol and its extinction effects on visibility over the Pearl River Delta Region, China [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2013, **63**(9): 1012-1021.
- [25] 古金霞, 侯鲁健, 武鑫, 等. 济南市大气细颗粒物中的碳组分特征 [J]. 南开大学学报(自然科学版), 2015, **48**(6): 61-67.
- Gu J X, Hou L J, Wu J, *et al.* The characteristics of carbon components in atmospheric fine particulate matter of Jinan city [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis, 2015, **48**(6): 61-67.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)