

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响	胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019~2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析	王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略	郑镇森, 姜建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020 年中国城市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染时空演变特征	牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021 年京津冀及周边地区 PM _{2.5} 和臭氧复合污染时空特征分析	宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020 年中国典型经济区 PM _{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系	徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析	赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征	刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季 PM _{2.5} 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势	罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征	王红磊, 刘思略, 孙杰娟, 刘煥武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季 PM _{2.5} 组分特征及来源解析	谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高分辨率网格的郑州市城镇居民 PM _{2.5} 暴露浓度与健康风险变化评估	李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单	刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析	陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势	张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析	贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O ₃ 生成特征	俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应	李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估	俞珊, 张双, 张增杰, 翟艳芝, 刘桐坤 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为 CO ₂ 排放模拟	马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析	卓海华, 姜保峰, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价	李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析	吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子	谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估	李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价	张静, 胡愈圻, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用	纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素	张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑烟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响	何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
毫清河水体细菌群落的结构和分布特征	王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (<i>Sinularia microclavata</i>) 共附生细菌群落结构和功能的影响	刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价	严棋 (2136)
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性	刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布	刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估	辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别	张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析	马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估	黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量	马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估	赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险	邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测	戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析	王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析	刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征	刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响	江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应	杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔箭筈锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐璐, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响	王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)
菌渣与化肥肥施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响	耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响	胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 魏利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响	储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价	付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征	薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展	胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望	李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910)	《环境科学》征稿简则(1984)
信息	(2167, 2191, 2324)

机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征

王红磊¹, 刘思晗¹, 孙杰娟², 刘焕武², 赵天良¹, 裴宇僊¹, 可玥¹, 武自豪¹, 刘诗云³

(1. 南京信息工程大学中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 西安市环境监测站, 西安 710119; 3. 中科三清科技有限公司, 北京 100029)

摘要: 为了获取机动车源尾气和主要民用燃料源燃烧过程排放的颗粒物中含碳气溶胶的排放特征, 使用多功能便携式稀释通道采样器和 Model 5L-NDIR 型 OC/EC 分析仪, 采集分析了典型机动车源(汽油车、轻柴油车、重柴油车)、民用煤(块煤和型煤)和生物质燃料(麦秆、木板、葡萄树树枝)的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样品中的有机碳(OC)和元素碳(EC)。结果表明, 不同排放源释放的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中含碳气溶胶的质量分数存在显著差异。总碳(TC)在不同源 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中的质量分数范围分别为 40.8%~68.5% 和 30.5%~70.9%, OC/EC 范围分别为 1.49~31.56 和 1.90~87.57。不同源产生的含碳气溶胶均以 OC 为主, OC 在 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中的质量分数范围分别为 56.3%~97.0% 和 65.0%~98.7%。在 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的含碳气溶胶中 OC 质量分数按照从高到低的顺序分别为: 型煤 > 块煤 > 汽油车 > 木板 > 麦秆 > 轻柴油车 > 重柴油车和型煤 > 汽油车 > 葡萄树枝 > 块煤 > 轻柴油车 > 重柴油车。不同源排放的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 颗粒物中含碳气溶胶的主导成分不同, 通过含碳气溶胶的成分组成可以准确区分其来源。

关键词: 有机碳(OC); 元素碳(EC); 颗粒物; 排放特征; 热光碳分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-1890-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202205254

Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM₁₀ and PM_{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels

WANG Hong-lei¹, LIU Si-han¹, SUN Jie-juan², LIU Huan-wu², ZHAO Tian-liang¹, PEI Yu-xuan¹, KE Yue¹, WU Zi-hao¹, LIU Shi-yun³

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Xi'an Environmental Monitoring Station, Xi'an 710119, China; 3. Clear Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: To study the emission characteristics of carbonaceous aerosol in particulate matter emitted from vehicle exhaust and main civil combustion fuels, organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM₁₀ and PM_{2.5} samples from vehicle sources (gasoline vehicles, light duty diesel vehicles, and heavy duty diesel vehicles), civil coal (chunk coal and briquette coal), and biomass fuels (wheat straw, wood plank, and grape branches) were collected and analyzed by using a multifunctional portable dilution channel sampler and the Model 5L-NDIR OC/EC analyzer. The results showed that there were significant differences in the proportion of carbonaceous aerosols in PM₁₀ and PM_{2.5} from different emission sources. The proportions of total carbon (TC) in PM₁₀ and PM_{2.5} of different emission sources were 40.8%-68.5% and 30.5%-70.9%, respectively, and the OC/EC were 1.49-31.56 and 1.90-87.57, respectively. The carbon components produced by different emission sources were dominated by OC, and the OC/TC values in PM₁₀ and PM_{2.5} were 56.3%-97.0% and 65.0%-98.7%, respectively. The proportions of OC in carbonaceous aerosols in PM₁₀ and PM_{2.5} were in the descending order of: briquette coal > chunk coal > gasoline vehicle > wood plank > wheat straw > light duty diesel vehicle > heavy duty diesel vehicle and briquette coal > gasoline car > grape branches > chunk coal > light duty diesel vehicle > heavy duty diesel vehicle, respectively. The main components of carbonaceous aerosols in PM₁₀ and PM_{2.5} emitted from the various emission sources were different, and source apportionment of carbonaceous aerosols could be accurately distinguished by their ingredient composition profiles.

Key words: organic carbon(OC); elemental carbon(EC); particulate matter; emission factor; thermal/optical carbon

随着近几十年来我国经济的快速发展,城市群效应日益增强,以大城市为中心的城市群人口密集、工业和商业集中,人为源已成为影响区域空气质量的最主要原因。气溶胶除了降低能见度形成霾污染外,还会影响全球辐射平衡、携带有毒有害物质影响人体健康以及作为云凝结核影响降雨过程等^[1-5]。含碳气溶胶作为大气颗粒物的重要组成,在城市地区可占到 PM_{2.5} 质量浓度的 40%^[6,7]。含碳气溶胶主要由有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC)组成。EC 又被称为黑碳(black carbon, BC),主要来自燃料的不完全燃烧过

程,如机动车尾气排放、工业燃煤、烹饪和生物质燃烧等过程^[8-10]。EC 是气溶胶中最重要的吸收性组分,在城市地区可以通过穹顶效应和火炉效应影响边界层结构发展,进而影响大气污染物的扩散过程^[11,12]。此外,传输到边界层以上的 EC 气溶胶可以在大气中长期停留,吸收太阳辐射,加热大气,进而影响全球气候变化^[13]。OC 包含上百种成分复杂的有机物,其形成过程和来源更加复杂多变,包括一次

收稿日期: 2022-05-23; 修订日期: 2022-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830965, 41805096)

作者简介: 王红磊(1988~),男,博士,副教授,主要研究方向为大气气溶胶来源特征, E-mail: hongleiwang@nuist.edu.cn

有机气溶胶和二次有机气溶胶^[14~16]. OC 中包含多种有毒有害的多环芳香烃、烷烃、酯类和有机酸等物质,危害人体健康. OC 多为散射性组分,大气中的 OC 可以散射太阳辐射,起到冷却大气的效果^[16~18].

鉴于含碳气溶胶的重要性,国内外已针对其时空分布、传输机制、源汇特征、健康效应和气候效应等方面开展了广泛的研究^[11~17,19~25]. 我国针对含碳气溶胶的研究主要集中在京津冀、长三角、珠三角和四川盆地等城市群地区^[4~6,19~21,23~32]. 李杏茹等^[26]发现北京 2008 年奥运会期间平均有 56%、55% 和 73% 的 PM、OC 和 EC 富集于粒径 <2.1 μm 的细粒子中. Zhao 等^[27]发现京津冀地区 OC 和 EC 在春夏季质量浓度较低,而在秋冬季质量浓度较高,这主要是由于取暖季造成的气溶胶排放源变化导致. 谢添等^[28]通过 2015~2019 年长期观测数据发现南京 OC 和 EC 均呈现出冬高夏低的季节特征,根据 OC/EC 特征比值判断,燃煤源和生物质燃烧源的贡献有所下降,工业源与机动车排放源的影响日益显著. 吕欢等^[29]发现 BC 对光解系数的衰减能力随着 AOD_{BC} 增大而下降. Andreae 等^[30]发现广州城区 OC/EC 的值为 3.6 ± 1.1,这主要是由于区域霾过程中的高浓度 OC 和具有较低 OC/EC 值的局部排放(主要来自交通源)共同作用造成. Pei 等^[32]基于 2018~2019 年的一年在线观测数据发现,广州当地交通源产生的机动车尾气是含碳气溶胶的主要来源. 杨国威等^[33]发现民用煤燃烧排放的颗粒物及其载带的碳组分集中在细颗粒物上,碳组分的质量中值粒径均小于 2.5 μm. 梅德清等^[34]发现柴油机原排、实验室排空和地下停车场的大气颗粒物的 OC/EC 分别为 0.92~2.50、1.40~2.53 和 2.36~4.82. 林孜等^[35]发现鞍山道路扬尘中含有较多的 OC. 马妍等^[36]发现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. 刘亚男等^[37]发现薪柴(栗树枝、桃树枝、松木)、秸秆(玉米芯、玉米秆、黄豆秆、草梗)和民用煤(蜂窝煤、烟煤)这三类物质燃烧排放 VOCs 的物种分类差异较大. 胡志远等^[38]发现国 V 柴油公交车尾气颗粒物碳质组分中 OC 占 73%~82%,OC 的主要组分是 OC₂ 和 OC₃,生物柴油对车辆尾气颗粒物 OC 组成比例没有影响.

我国目前针对含碳气溶胶的理化特征已经开展了深入的研究,但是针对含碳气溶胶排放源的研究还相对较少^[24~31]. OC 与 EC 的比值和相关性分析等多被用作含碳气溶胶排放源识别以及判定二次颗粒物污染的重要指标^[6,8,21~23]. 国内近年来针对含碳气溶胶不同来源的排放特性的研究日益增

多^[33~38],但是相比国外相关研究还是非常欠缺. 基于我国城市地区典型污染源含碳气溶胶排放特征的研究,对于大气颗粒物中含碳气溶胶准确溯源以及减排治理具有非常重要的实用和科学价值. 基于此目的,本文使用多功能便携式稀释通道采样器和 Model 5L-NDIR 型 OC/EC 分析仪,采集分析了西安市典型机动车源(汽油车、轻柴油车、重柴油车)、民用煤(块煤、型煤)和生物质燃料(麦秆、木板、葡萄树树枝)的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 样品中的有机碳和元素碳,获取了机动车源尾气和主要民用燃料源燃烧过程排放的颗粒物中含碳气溶胶的排放特征,旨在为城市地区含碳气溶胶准确溯源和治理提供科学基础依据.

1 材料与方法

1.1 实验介绍

使用 ZDA-PDSI-02P 型稀释通道采样器于 2015 年 4~6 月对西安机动车源和主要民用燃料源进行采样,具体采样数据情况见表 1. 机动车源分为汽油车源、轻柴油车和重柴油车,采样地点位于西安城南汽车检测站. 采集不同车辆在模拟正常行驶状态(包括启动和加减速)下机动车排放的尾气,使用 MFD25 稀释通道采样器按照 10:1 的稀释比进行采样,稀释切割后得到 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 样品,所有车辆均安装了尾气处理装置,样品采集与机动车检测工况同步. 民用煤分为块煤和型煤,生物质源分为麦秆、木板和葡萄树树枝. 通过模拟民用煤和生物质燃烧过程采集样品,采集过程均属正常燃烧过程,无闷烧现象,使用 MFD25 稀释通道采样器按照 10:1 的稀释比进行采样,稀释采样得到 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 样品,实验地点为西安市环境监测站. 根据文献[39]对以上类源进行采集,采集过程中尽可能保证各类污染源的独立,减少不同污染源之间产生的交叉影响.

表 1 不同源观测样本数量

Table 1 Number of samples from different emission sources

项目	PM ₁₀		PM _{2.5}	
	样本数	空白样数	样本数	空白样数
汽油车	4	2	8	4
轻柴车	4	2	8	4
重柴车	3	1	6	2
块煤	3	1	2	2
型煤	2	1	2	2
麦秆	2	1		
木板	1	1		
葡萄树枝			1	1

1.2 滤膜称重

PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的颗粒物滤膜整个过程需进行两次称重,分别是采样前初重(M₁)和采样后滤膜重量

(M2), 称重使用仪器为精度十万分之一 ($10 \mu\text{g}$) 的电子天平 (Mettler Toledo XA105, 瑞士). 样品称量前膜盒进行超声波振荡清洗, 滤膜进行热处理, 用铝膜包裹在 900°C 条件下于马弗炉 (D64, 天津继红五金机电厂) 中烘烤 2 h 以去除膜上的原有碳成分. 滤膜装盒编号后需在恒温 [$(25 \pm 1)^\circ\text{C}$] 和恒湿 [$(40 \pm 5)\%$] 条件下平衡 24 h, 才能进行称量. 称量后滤膜应放置 4°C 的冰箱中保存待用.

1.3 观测仪器介绍

颗粒物采样器为陕西正大环保科技有限公司研制的 ZDA-PDSI-02P 型稀释通道采样器. 采样器主要由烟尘采样枪 (或尾气取样探头)、四通道采样箱、一级稀释箱、二级稀释箱、稀释停留仓和外部连接部件组成. 通过不同的等速采样装置, 将原烟气采入一级稀释仓与一级洁净空气以一定的比例混合, 利用空气动力学原理混合均匀, 进入停留仓停留, 根据采样要求不同, 可以选择一级稀释和二级稀释, 达到不同的稀释比, 利用空气动力学原理模拟颗粒物在大气环境中的自然扩散、凝结、成核和稀释过程. 最后通过流量平衡控制系统完成对 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的均匀切割采样.

碳组分分析使用 Model5L-NDIR 型 OC/EC 分析仪 (Sunset Laboratory Inc), 采用热光透射法, 该仪器遵循 NIOSH870 温度协议, OC 和 EC 的最低检出限为 $0.05 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 详细原理介绍参见文献 [40, 41].

1.4 数据质量控制

为确保数据的准确性, 整个实验过程中必须进行规范化实施, 称重期间和采样时操作必须携带口罩和丁腈橡胶手套, 保证过程无携带污染. 稀释通道采样器每个点位监测前进行流量校准, 切割头清洗. 称量过程中每张滤膜须进行多次称量取平均值, 保证误差值小于 $\pm 40 \mu\text{g}$. OC 和 EC 样品分析前需进行清炉操作并用一定质量浓度的蔗糖溶液进行仪器校准, 多次校准结果实测误差在 $\pm 5\%$ 以内可以进行实验. 每批实验样品需要测定空白膜.

2 结果与讨论

2.1 颗粒物中有机碳和元素碳质量分数

由图 1 可知机动车尾气排放的含碳气溶胶在颗粒物中的质量分数, 总碳 (total carbon, TC) 在 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中的质量分数分别为 $48.4\% \sim 68.5\%$ 和 $55.0\% \sim 70.9\%$, 但是不同类型机动车排放的颗粒物中 OC 和 EC 的排放特征不同. 机动车尾气排放的颗粒物中 OC 质量分数较高, EC 质量分数较低. 柴油车和汽油车排放的颗粒物中 OC 质量分数的差异较

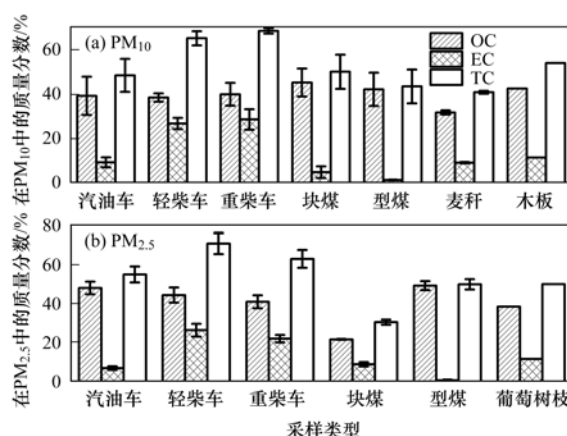


图 1 不同源 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中含碳气溶胶的质量分数

Fig. 1 Proportion of carbonaceous aerosols in PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ from different emission sources

小, 而 EC 质量分数的差异较大.

由图 1 可知不同类型机动车尾气排放的 PM_{10} 颗粒物中 OC 和 EC 质量分数存在显著差异, 汽油车的质量分数差异较大, 柴油车的质量分数差异较小. 汽油车和柴油车排放的 PM_{10} 中 OC 质量分数的差异较小, EC 质量分数的差异较大. 汽油车排放的 PM_{10} 中 OC 质量分数为 39.2% , 范围为 $25.4\% \sim 62.9\%$; 轻柴油车和重柴油车排放的 PM_{10} 中 OC 质量分数分别为 38.4% 和 39.8% , 范围分别为 $32.9\% \sim 41.3\%$ 和 $31.7\% \sim 49.3\%$. 不同类型机动车尾气排放的 PM_{10} 中 EC 质量分数特征差异较大. 汽油车排放的 PM_{10} 中 EC 质量分数较小, 为 9.2% , 范围为 $3.9\% \sim 14.0\%$; 轻柴油车和重柴油车排放的 PM_{10} 中 EC 质量分数分别为 26.7% 和 28.6% , 范围分别为 $19.4\% \sim 31.3\%$ 和 $21.1\% \sim 37.0\%$.

不同类型机动车尾气排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物中 OC 和 EC 质量分数的排放特征与 PM_{10} 中类似 (图 1). 汽油车排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 质量分数为 48.1% , 范围为 $37.3\% \sim 63.7\%$; 轻柴油车和重柴油车排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 质量分数分别为 44.4% 和 41.0% , 范围分别为 $29.7\% \sim 65.9\%$ 和 $28.8\% \sim 48.8\%$. 汽油车排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 中 EC 质量分数较小, 为 6.9% , 范围为 $2.6\% \sim 9.8\%$; 轻柴油车和重柴油车排放的 PM_{10} 中 EC 质量分数分别为 26.4% 和 22.0% , 范围分别为 $13.0\% \sim 36.1\%$ 和 $19.0\% \sim 31.5\%$.

由图 1 可知块煤和型煤排放颗粒物中含碳气溶胶的排放特征在 PM_{10} 中差异较小, 块煤和型煤排放 TC 质量分数分别为 50.0% 和 43.4% ; 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中差异较大, 块煤和型煤排放 TC 质量分数分别为 30.5% 和 50.0% . 由图 1 可知块煤和型煤排放的颗粒物中 OC 和 EC 的排放特征类似, 均是以 OC 为主. 块煤和型煤排放的 PM_{10} 中 OC 质量分数差异较

小,分别为 45.2% 和 42.1%,范围分别为 33.8% ~ 55.5% 和 34.6% ~ 49.6%; 在 $PM_{2.5}$ 中 OC 质量分数差异较大,分别为 21.7% 和 49.3%,范围分别为 21.4% ~ 21.9% 和 47.0% ~ 51.6%。块煤排放的颗粒物中 EC 质量分数较高,在 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中质量分数分别为 4.8% 和 8.8%; 型煤排放的颗粒物中 EC 质量分数较低,多低于 1.3%。

由图 1 可知 3 种生物质燃烧排放的颗粒物含碳气溶胶的排放特征类似。由图 1(a) 可知麦秆燃烧排放的 PM_{10} 中含碳气溶胶质量分数最低,TC 质量分数为 40.8%,与型煤和汽油车比较接近,但是远低于柴油车、块煤和木板 (53.9%)。麦秆燃烧排放的 PM_{10} 中 OC 和 EC 质量分数分别为 31.7% 和 9.1%,木板燃烧排放的 PM_{10} 中 OC 和 EC 质量分数分别为 42.5% 和 11.4%。葡萄树枝燃烧排放的 $PM_{2.5}$ 中 TC 质量分数为 50.0%,与型煤和汽油车类似,高于块煤,低于柴油车。葡萄树枝燃烧排放的 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 质量分数分别为 38.5% 和 11.6%。

以往的研究中往往使用 OC/EC 的值来判断颗粒物中含碳气溶胶的比值。有研究表明,烟煤/沥青煤燃烧的 OC/EC 为 0.32 ~ 13.6,无烟煤燃烧的比值为 1.49 ~ 14.8,平均值为 6.3^[42,43],机动车尾气污染为 4.1^[44],柴油机动车的比值小于 1.0^[45],汽油机动车的比值为 2.1 ~ 2.4^[46,47],煤炭燃烧的比值为 2.7^[48],木材燃烧为 16.8 ~ 40.0^[17]。由于生物质燃烧的种类较多,国内外对生物质燃烧污染的 OC/EC 存在差异,Cachier 等^[49]的研究结果为 9,Saarikoski 等^[50]的研究结果为 6.6,Chen 等^[43]得到国内部分地区生物质燃烧中 OC/EC 为 13 ~ 15。由此可知,不同源排放的 OC/EC 显著不同,即使同一类排放源,由于具体组成的差异所得到的比值也存在显著差异。

由图 2 可知不同类型燃烧源产生的颗粒物中 OC/EC 显著不同。从中可知汽油车 OC/EC 要明显高于柴油车。汽油车在 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC 分别为 5.79 和 7.89,范围分别为 1.98 ~ 10.36 和 5.55 ~ 14.09; 轻柴油车在 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC 分别为 1.49 和 1.93,范围分别为 1.16 ~ 2.02 和 0.93 ~ 3.69; 重柴油车在 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC 分别为 1.53 和 1.90,范围分别为 0.86 ~ 2.33 和 1.44 ~ 2.39。块煤和型煤在 PM_{10} 中 OC/EC 比较高,分别为 18.86 和 31.56,范围分别为 4.72 ~ 37.31 和 28.63 ~ 34.49; 在 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC 分别为 2.48 和 87.57,范围分别为 2.19 ~ 2.77 和 50.16 ~ 124.98。麦秆和木板燃烧产生的 PM_{10} 中 OC/EC 分别为 3.49 和 3.72,葡萄树枝燃烧产生的 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC 为 3.32。综上

所述,使用 OC/EC 法可以大概来判断含碳气溶胶的来源,但是存在较大误差。比如虽然汽油车和柴油车 OC/EC 的比值差异较大,但是比值范围存在重合部分。而像麦秆、木板和葡萄树枝这三类木质燃烧源的 OC/EC 值相差不大,无法明确区分。

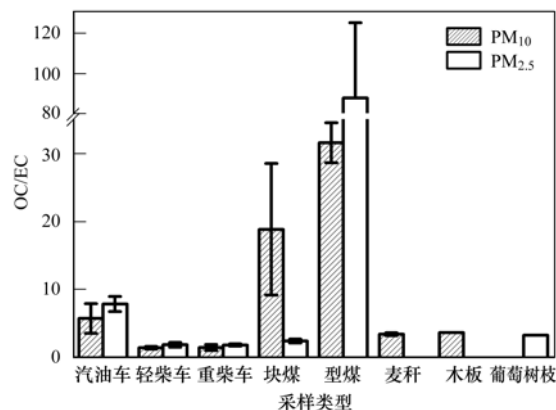


图 2 不同源 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中 OC/EC

Fig. 2 OC/EC in PM_{10} and $PM_{2.5}$ from different emission sources

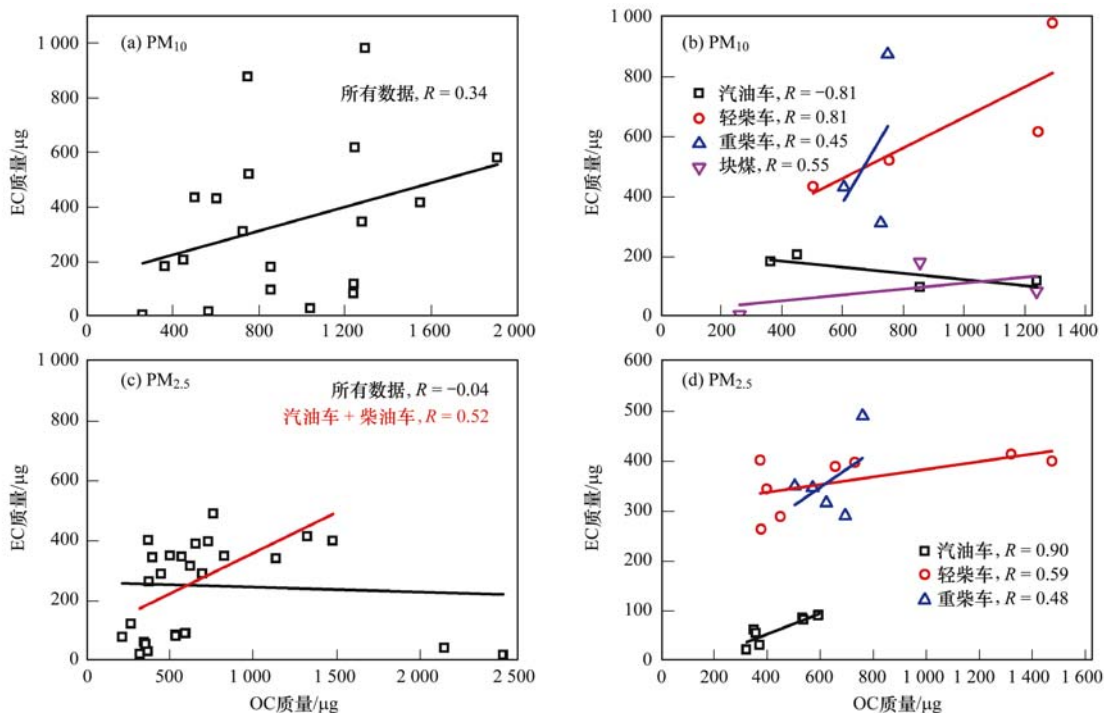
2.2 不同源 OC 与 EC 相关性分析

相关性分析也是目前大气颗粒物中 OC 和 EC 来源判断常用的方法之一^[51],一般认为相关性较高则 OC 和 EC 就具有同源性。本研究中先将所有类型含碳气溶胶进行拟合,然后针对不同类型含碳气溶胶分别拟合,来验证相关性分析法判断 OC 和 EC 来源的准确性。

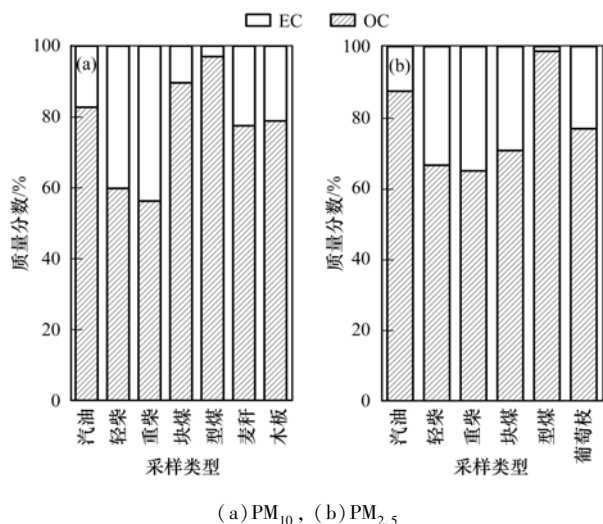
由图 3 可发现不同源作为整体进行拟合,OC 和 EC 的相关性较低。 PM_{10} 中,不同源整体拟合时 OC 和 EC 的相关系数为 0.34,汽油车、轻柴油车、重柴油车和块煤单独拟合时 OC 和 EC 的相关系数分别为 -0.81、0.81、0.45 和 0.55。 $PM_{2.5}$ 中,不同源整体拟合时 OC 和 EC 的相关系数仅为 -0.04,汽油车和柴油车作为机动车源拟合时 OC 和 EC 的相关系数为 0.52,汽油车、轻柴油车和重柴油车单独拟合时 OC 和 EC 的相关系数分别为 0.90、0.59 和 0.48。综上所述,OC 和 EC 的相关性如果越高,则表明同源性越好。含碳气溶胶的来源差异较大,则通过相关性分析判断 OC 和 EC 的同源性效果更好;反之,含碳气溶胶的来源差异较小,相关性分析判断 OC 和 EC 的同源性效果较差。

2.3 不同源含碳气溶胶的排放特征

由图 4 可知在不同源产生的含碳气溶胶均以 OC 为主,OC 在 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中占 TC 的质量分数范围分别为 56.3% ~ 97.0% 和 65.0% ~ 98.7%。不同源产生的含碳气溶胶中 OC 和 EC 质量分数不同。在 PM_{10} 的含碳气溶胶中 OC 质量分数按照从高到低的顺序为:型煤 > 块煤 > 汽油车 > 木板 > 麦秆 > 轻柴

图3 不同源PM₁₀和PM_{2.5}中OC与EC相关分析Fig. 3 Correlation between OC and EC in PM₁₀ and PM_{2.5} from different emission sources

车>重柴车. 在PM_{2.5}的含碳气溶胶中OC质量分数按照从高到低的顺序为: 型煤>汽油车>葡萄树枝>块煤>轻柴车>重柴车. 机动车类源排放的PM₁₀和PM_{2.5}中的含碳气溶胶均为柴油车排放尾气中的OC质量分数最低, EC质量分数最高, 汽油车排放的尾气中OC质量分数较高. 型煤在PM₁₀和PM_{2.5}的含碳气溶胶中OC质量分数最高, 而块煤OC在PM₁₀中的质量分数要远高于PM_{2.5}中的. 麦秆、木板和葡萄树枝含碳气溶胶中OC质量分数类似, 为77.5%~78.8%.

图4 不同源PM₁₀和PM_{2.5}中OC和EC占TC的质量分数Fig. 4 Mass fraction of OC and EC in total carbon of PM₁₀ and PM_{2.5} from different emission sources

由上文分析可知, 不同源排放的颗粒物中含碳气溶胶的排放特征具有一定的相似性, 因此如果仅仅通过OC和EC的占比、比值和相关性等手段很难准确地定位排放源特征. 基于现有的分析仪器, 可以将颗粒物中的含碳气溶胶分为四类OC和六类EC, 不同的源可获得不同的碳气溶胶排放特征.

图5给出了不同源排放的PM₁₀颗粒物中的含碳气溶胶详细的排放特征. 由图5(a)可知汽油车排放的含碳气溶胶以OC1为主, 可占TC的55.4%; 其次是EC2和EC1, 分别占TC的17.7%和12.1%. 轻柴车排放的含碳气溶胶中EC4质量分数最高, 为32.1%; 其次是EC5和EC3, 质量分数分别为18.1%和16.5%. 重柴车排放的含碳气溶胶中EC4质量分数最高, 为51.1%; 其次是OC1和EC3, 质量分数分别为17.8%和14.9%. 块煤燃烧排放的含碳气溶胶中OC1质量分数最高, 为42.0%; 其次是EC2和OC2, 质量分数分别为16.4%和14.1%. 型煤燃烧排放的含碳气溶胶中OC1质量分数最高, 为64.6%; 其次是OC2和EC2, 质量分数分别为9.2%. 块煤和型煤含碳气溶胶的排放特征类似, 区别最为明显的是块煤EC3的含量较高为4.2%, 而在型煤中EC3的含量可以忽略不计, 仅为0.06%. 麦秆燃烧排放的含碳气溶胶中OC1质量分数最高, 为29.4%; 其次是EC3和OC2, 质量分数分别为25.1%和16.7%. 木板燃烧排放的含碳气溶胶中OC1质量分数最高, 为

33.7%；其次是 EC4、EC3 和 OC2,质量分数分别为 19.0%、16.8% 和 11.3%。因此在实际大气颗粒物观测过程中,可通过含碳物质的排放特征来区分 PM₁₀ 的不同来源,汽油车主导成分为 OC1、EC1 和

EC2,轻柴车为 EC3、EC4 和 EC5,重柴车为 OC1、EC3 和 EC4,块煤为 OC1、OC2、EC2 和 EC3,型煤为 OC1、OC2 和 EC2,麦秆为 OC1、OC2 和 EC3,木板为 OC1、OC2、EC3 和 EC4。

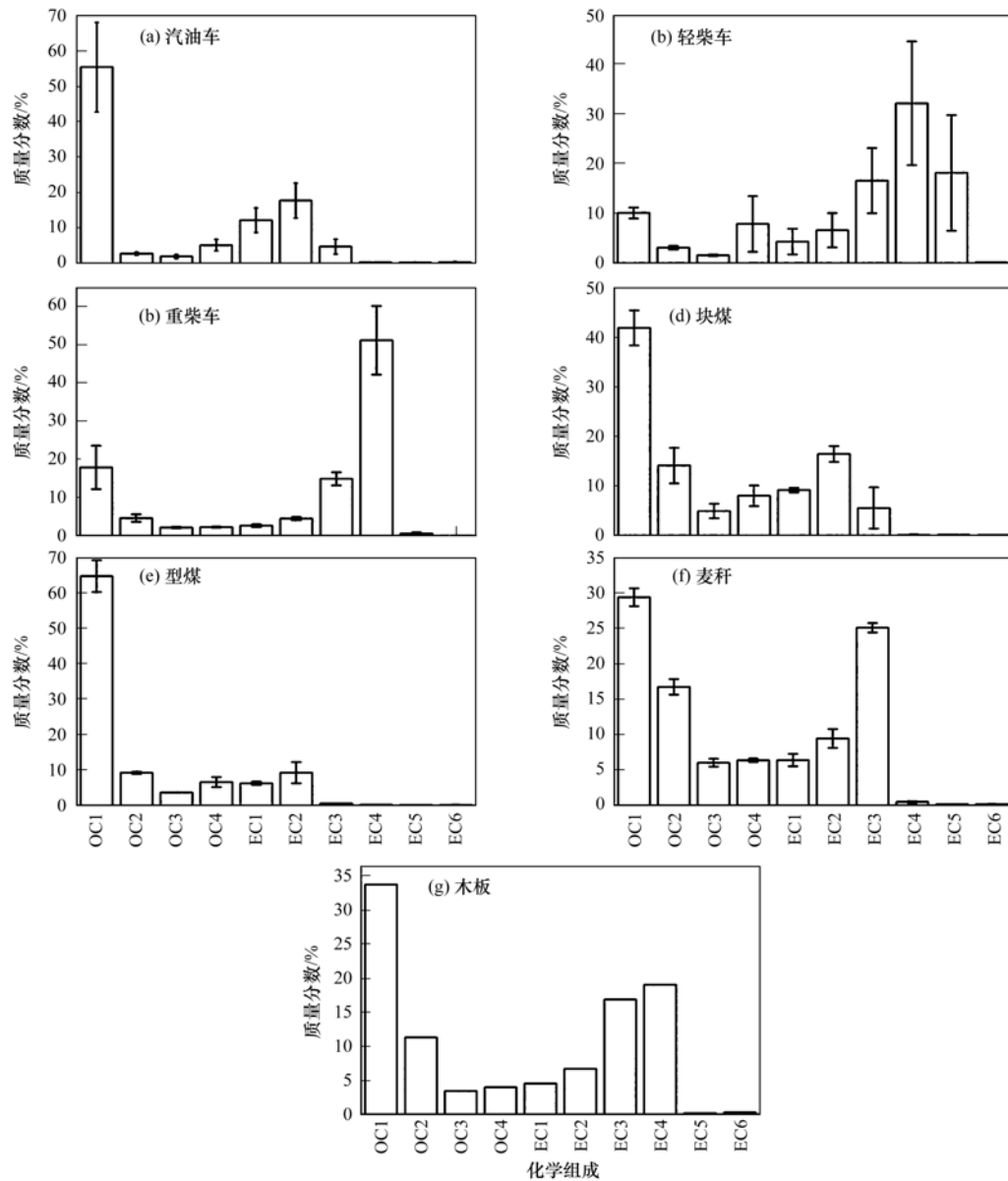
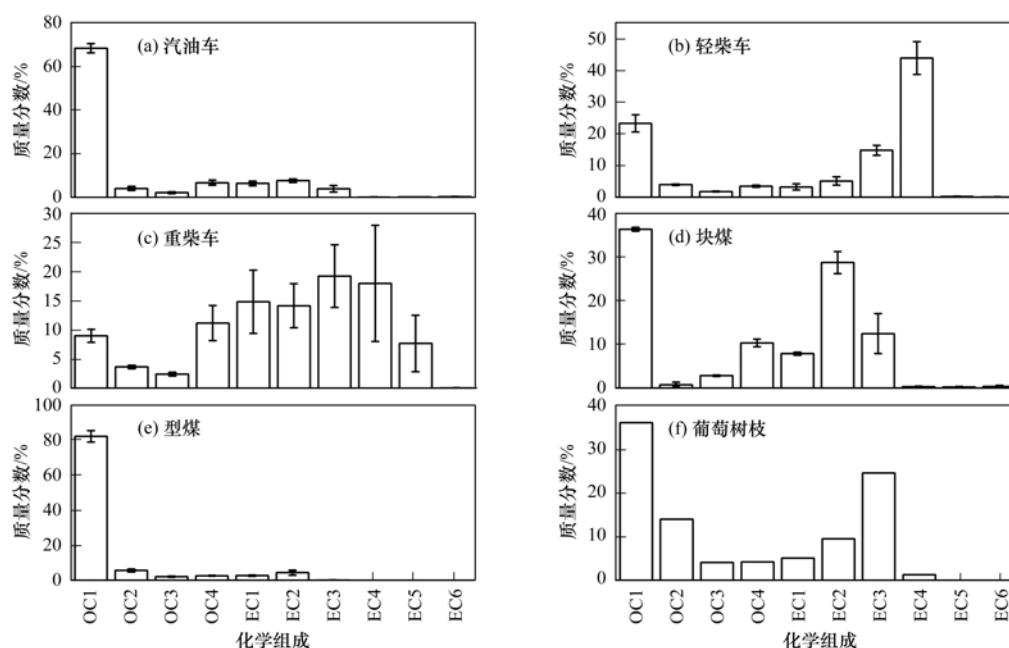


图 5 不同源 PM₁₀ 碳气溶胶排放特征

Fig. 5 Ingredient composition profiles of carbonaceous aerosols in PM₁₀ from different emission sources

图 6 给出了不同源排放的 PM_{2.5} 颗粒物中的含碳气溶胶详细的排放特征. 由图 6(a) 可知,汽油车排放的含碳气溶胶以 OC1 为主,可占 TC 的 68.3%；其次时 EC2、OC4 和 EC1,分别占 TC 的 7.7%、6.7% 和 6.4%。轻柴车排放的含碳气溶胶中 EC4 质量分数最高,为 44.0%；其次是 OC1 和 EC3,质量分数分别为 23.3% 和 14.8%。重柴车排放的含碳气溶胶中 OC1、OC4、EC1、EC2、EC3、EC4 和 EC5 质量分数均较高,分别为 9.0%、11.2%、14.8%、14.1%、19.2%、18.0% 和 7.7%。块煤燃烧排放的

含碳气溶胶中 OC1 质量分数最高,为 36.3%；其次是 EC2、EC3 和 OC4,质量分数分别为 28.7%、12.4% 和 10.3%。型煤燃烧排放的含碳气溶胶中 OC1 质量分数最高,为 81.8%；其次是 OC2 和 EC2,质量分数分别为 5.7% 和 4.4%。葡萄树枝燃烧排放的含碳气溶胶中 OC1 质量分数最高,为 36.2%；其次是 EC3、OC2 和 EC2,质量分数分别为 24.7%、14.1% 和 9.6%。与 PM₁₀ 中不同来源含碳气溶胶排放特征类似,在实际观测过程中,也可通过含碳物质的排放特征来区分 PM_{2.5} 的不同来源,汽油车

图6 不同源 $\text{PM}_{2.5}$ 碳气溶胶排放特征Fig. 6 Ingredient composition profiles of carbonaceous aerosols in $\text{PM}_{2.5}$ from different emission sources

主导成分为 OC1、OC4、EC1 和 EC2,轻柴为 OC1、EC3 和 EC4,重柴为 OC1、OC4、EC1、EC2、EC3、EC4 和 EC5,块煤为 OC1、OC4、EC2 和 EC3,型煤为 OC1、OC2 和 EC2,葡萄树枝为 OC1、OC2、EC2 和 EC3。

3 结论

(1)不同排放源释放的颗粒物中含碳气溶胶的质量分数存在显著差异.汽油车、轻柴车、重柴车、块煤、型煤、麦秆和木板排放的 PM_{10} 中 TC 质量分数分别为 48.4%、65.2%、68.5%、50.0%、43.4%、40.8% 和 53.9%,OC/EC 分别为 5.79、1.49、1.53、18.86、31.56、3.49 和 3.72.汽油车、轻柴车、重柴车、块煤、型煤和葡萄树枝排放 $\text{PM}_{2.5}$ 中 TC 质量分数分别为 55.0%、70.9%、63.0%、30.5%、50.0% 和 50.1%,OC/EC 分别为 7.89、1.93、1.90、2.48、87.57 和 3.32。

(2)不同源产生的含碳气溶胶均以 OC 为主,OC 在 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中占 TC 的质量分数范围分别为 56.3%~97.0% 和 65.0%~98.7%.不同源产生的含碳气溶胶中 OC 和 EC 质量分数不同.在 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的含碳气溶胶中 OC 质量分数按照从高到低的顺序分别为:型煤>块煤>汽油车>木板>麦秆>轻柴车>重柴车和型煤>汽油车>葡萄树枝>块煤>轻柴车>重柴车。

(3)不同源排放的 PM_{10} 颗粒物中含碳气溶胶的主导成分不同.汽油车主导成分为 OC1、EC1 和 EC2,轻柴车为 EC3、EC4 和 EC5,重柴车为 OC1、

EC3 和 EC4,块煤为 OC1、OC2、EC2 和 EC3,型煤为 OC1、OC2 和 EC2,麦秆为 OC1、OC2 和 EC3,木板为 OC1、OC2、EC3 和 EC4。

(4)不同源排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物中含碳气溶胶的主导成分不同.汽油车主导成分为 OC1、OC4、EC1 和 EC2,轻柴车为 OC1、EC3 和 EC4,重柴车为 OC1、OC4、EC1、EC2、EC3、EC4 和 EC5,块煤为 OC1、OC4、EC2 和 EC3,型煤为 OC1、OC2 和 EC2,葡萄树枝为 OC1、OC2、EC2 和 EC3。

参考文献:

- [1] Lohmann U, Feichter J. Global indirect aerosol effects: a review [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(3): 715-737.
- [2] Shang D J, Peng J F, Guo S, *et al.* Secondary aerosol formation in winter haze over the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2021, **15**(2), doi: 10.1007/s11783-020-1326-x.
- [3] Gao J H, Woodward A, Vardoulakis S, *et al.* Haze, public health and mitigation measures in China: a review of the current evidence for further policy response [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **578**: 148-157.
- [4] 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 等. 嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4116-4125.
Zhang Y L, Li L, Wu W C, *et al.* Variation characteristics and source analysis of carbonaceous aerosols in winter in Jiashan [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4116-4125.
- [5] 丁净, 张裕芬, 郑乃源, 等. 天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 574-583.
Ding J, Zhang Y F, Zheng N Y, *et al.* Size distribution of aerosol hygroscopic growth factors in winter in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 574-583.
- [6] 徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 等. 杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3511-3517.
Xu H H, Xu J S, He J, *et al.* Characteristics and source analysis

- of atmospheric carbonaceous aerosols in the cities of Hangzhou and Ningbo[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3511-3517.
- [7] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* [M]. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- [8] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶污染特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1529-1536.
Mu Z, Chen Q C, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol pollution in PM_{2.5} in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1529-1536.
- [9] Turpin B J, Huntzicker J J. Secondary formation of organic aerosol in the Los Angeles basin: a descriptive analysis of organic and elemental carbon concentrations [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(2): 207-215.
- [10] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, *et al.* Black carbon emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(25): 4281-4296.
- [11] Ding A J, Huang X, Nie W, *et al.* Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(6): 2873-2879.
- [12] Zhao D D, Xin J Y, Gong C S, *et al.* The impact threshold of the aerosol radiative forcing on the boundary layer structure in the pollution region [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(7): 5739-5753.
- [13] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221-227.
- [14] 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.
- [15] Sudheer A K, Aslam M Y, Upadhyay M, *et al.* Carbonaceous aerosol over semi-arid region of western India: heterogeneity in sources and characteristics [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **178-179**: 268-278.
- [16] 陈卓, 刘峻峰, 陶玮, 等. 中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 2815-2822.
Chen Z, Liu J F, Tao W, *et al.* Spatiotemporal distribution and source attribution of SOA in China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 2815-2822.
- [17] Safai P D, Raju M P, Rao P S P, *et al.* Characterization of carbonaceous aerosols over the urban tropical location and a new approach to evaluate their climatic importance [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 493-500.
- [18] Vedal S, Hannigan M P, Dutton S J, *et al.* The Denver aerosol sources and health (DASH) study: overview and early findings [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(9): 1666-1673.
- [19] Hu R, Wang H L, Yin Y, *et al.* Mixing state of ambient aerosols during different fog-haze pollution episodes in the Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **178**: 1-10.
- [20] 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 等. 重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(8): 3502-3510.
Peng X L, Hao Q J, Wen T X, *et al.* Pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric aerosols in Beibei district, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3502-3510.
- [21] 康晖, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角典型站点冬季大气 PM_{2.5} 中 OC、EC 污染特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 961-971.
- Kang H, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characterization and variation of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM_{2.5} during the winter in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 961-971.
- [22] 张毓秀, 任万辉, 王嘉禾, 等. 沈阳市冬季不同污染程度 PM_{2.5} 中 OC 和 EC 污染特征 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3066-3075.
Zhang Y X, Ren W H, Wang J H, *et al.* Characteristics of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) under different pollution levels of PM_{2.5} during winter in Shenyang [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3066-3075.
- [23] 薛凡利, 牛红亚, 武振晓, 等. 邯郸市 PM_{2.5} 中碳组分的污染特征及来源分析 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(5): 1885-1894.
Xue F L, Niu H Y, Wu Z X, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbon components in PM_{2.5} in Handan City [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(5): 1885-1894.
- [24] 刘玺, 孔少飞, 郑淑睿, 等. 春节前后华北平原农村地区黑碳浓度及来源 [J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(8): 3169-3177.
Liu X, Kong S F, Zheng S R, *et al.* Levels and sources of black carbon around the spring festival at a rural site of the North China Plain [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(8): 3169-3177.
- [25] Ni M J, Huang J X, Lu S Y, *et al.* A review on black carbon emissions, worldwide and in China [J]. *Chemosphere*, 2014, **107**: 83-93.
- [26] 李杏茹, 王英锋, 郭雪清, 等. 2008 年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 313-318.
Li X R, Wang Y F, Guo X Q, *et al.* Size distribution and characterization of EC and OC in aerosols during the Olympics of Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 313-318.
- [27] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 389-398.
- [28] 谢添, 曹芳, 章炎麟, 等. 2015~2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(6): 2858-2866.
Xie T, Cao F, Zhang Y L, *et al.* Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(6): 2858-2866.
- [29] 吕欢, 安俊琳, 苏筱倩, 等. 南京北郊地区黑碳气溶胶对光解系数的影响 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(4): 1421-1428.
Lü H, An J L, Su X Q, *et al.* Study on the influence of black carbon aerosol on photolysis coefficient in northern suburb of Nanjing [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(4): 1421-1428.
- [30] Andreae M O, Schmid O, Yang H, *et al.* Optical properties and chemical composition of the atmospheric aerosol in urban Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6335-6350.
- [31] 孙嘉胤, 吴晟, 吴兑, 等. 广州城区黑碳气溶胶吸光增强特性研究 [J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4177-4189.
Sun J Y, Wu C, Wu D, *et al.* The light absorption enhancement characteristics of black carbon aerosols in urban Guangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4177-4189.
- [32] Pei C L, Wu Y F, Tao J, *et al.* Seasonal variations of mass absorption efficiency of elemental carbon in PM_{2.5} in urban

- Guangzhou of South China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2022, doi: 10.1016/j.jes.2022.04.019.
- [33] 杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 等. 民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3524-3534.
Yang G W, Kong S F, Zheng S R, *et al.* Size-resolved emission factors of carbonaceous particles from domestic coal combustion in China[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3524-3534.
- [34] 梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 等. 机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 114-120.
Mei D Q, Zhu Z N, Sun T S, *et al.* Size distribution and carbon component characteristics of atmospheric particulate matter from motor vehicles[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 114-120.
- [35] 林孜, 姬亚芹, 林宇, 等. 鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3918-3923.
Lin Z, Ji Y Q, Lin Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of carbon components in road dust in Anshan[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3918-3923.
- [36] 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 PM₁₀ during spring in Tianjin derived by using the quadrat sampling method[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2540-2545.
- [37] 刘亚男, 钟连红, 闫静, 等. 民用燃料燃烧碳质组分及 VOCs 排放特征[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(4): 1412-1418.
Liu Y N, Zhong L H, Yan J, *et al.* Carbon compositions and VOCs emission characteristics of civil combustion fuels [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(4): 1412-1418.
- [38] 胡志远, 章昊晨, 谭丕强, 等. 国 V 公交车燃用生物柴油的颗粒物碳质组分排放特性[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(8): 2921-2926.
Hu Z Y, Zhang H C, Tan P Q, *et al.* Emission of carbonaceous components from a bus fueled with waste cooking oil based biodiesel blends[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(8): 2921-2926.
- [39] 南开大学, 中国环境科学研究院, 中国科学院大气物理研究所, 等. 大气颗粒物来源解析技术指南 (试行)[EB/OL]. <https://www.66law.cn/tiaoli/52443.aspx>, 2013-08-14.
- [40] 康宝荣, 刘立忠, 刘焕武, 等. 关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3431-3437.
Kang B R, Liu L Z, Liu H W, *et al.* Pollution characteristics and sources of carbonaceous components in PM_{2.5} in the Guanzhong area [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3431-3437.
- [41] Bian Q J, Alharbi B, Shareef M M, *et al.* Sources of PM_{2.5} carbonaceous aerosol in Riyadh, Saudi Arabia[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(6): 3969-3985.
- [42] Tian J, Ni H Y, Cao J J, *et al.* Characteristics of carbonaceous particles from residential coal combustion and agricultural biomass burning in China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2017, **8**(3): 521-527.
- [43] 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), doi: 10.1029/2006GL026966.
- [44] 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.
- [45] Chuang M T, Lee C T, Chou C C K, *et al.* Carbonaceous aerosols in the air masses transported from Indochina to Taiwan: long-term observation at Mt. Lulin [J]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 507-516.
- [46] Cadle S H, Mulawa P A, Hunsanger E C, *et al.* Composition of light-duty motor vehicle exhaust particulate matter in the Denver, Colorado area[J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(14): 2328-2339.
- [47] Liu W, Wang Y H, Russell A, *et al.* Enhanced source identification of southeast aerosols using temperature-resolved carbon fractions and gas phase components [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(S2): 445-466.
- [48] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995 [J]. Chemosphere, 2001, **43**(8): 1141-1151.
- [49] Cachier H, Brémond M P, Buat-Ménard P. Carbonaceous aerosols from different tropical biomass burning sources [J]. Nature, 1989, **340**(6232): 371-373.
- [50] Saarikoski S, Timonen H, Saarnio K, *et al.* Sources of organic carbon in fine particulate matter in northern European urban air [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, **8**(20): 6281-6295.
- [51] Na K, Sawant A A, Song C, *et al.* Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(9): 1345-1355.

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i> (1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter	WANG Hao-qí, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i> (1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-píng, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i> (1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM _{2.5} and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i> (1841)
Spatio-temporal Variation in PM _{2.5} Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i> (1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM _{2.5} Over Xi'an	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i> (1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM ₁₀ and PM _{2.5} from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i> (1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in the Core Area of Ili River Valley in Spring	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i> (1899)
Evaluation of Changes in PM _{2.5} Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i> (1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, <i>et al.</i> (1933)
Changes in O ₃ -VOCs-NO ₃ Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i> (1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i> (1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i> (1962)
Characteristics of O ₃ Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i> (1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect	LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i> (1998)
Simulation of Anthropogenic CO ₂ Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i> (2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i> (2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i> (2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i> (2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i> (2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i> (2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i> (2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i> (2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i> (2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i>	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i> (2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai	YAN Qi (2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i> (2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i> (2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i> (2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i> (2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i> (2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i> (2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i> (2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i> (2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i> (2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i> (2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i> (2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i> (2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i> (2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i> (2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i> (2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i> (2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i> (2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i> (2395)