

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精催化 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 张力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)	

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势

王擎雯¹, 陈庆彩^{1*}, 王超², 王瑞鹤², 刘国瑞^{3,4}, 李豪¹, 李艳广^{5,6}

(1. 陕西科技大学环境科学与工程学院, 西安 710021; 2. 北京中铁建建筑科技有限公司, 北京 100049; 3. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085; 4. 中国科学院生态环境研究中心环境化学与生态毒理学国家重点实验室, 北京 100085; 5. 中国地质调查局西安地质调查中心, 西安 710054; 6. 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 西安 710054)

摘要: 道路是城市人群户外活动暴露大气颗粒物的主要场所, 道路颗粒物中含有的某些氧化活性物质是诱导产生活性氧, 进而危害人体健康的重要组分. 探索西安市道路扬尘中水溶性 (WSM) 和甲醇溶性组分 (MSM) 中有机质组成特征及其氧化潜势 (OP), 并基于平行因子分析 (PARAFAC) 研究了有机组分以及分布状况, 还分析有机质类型与 OP 之间的相关性. 结果表明, 西安市道路扬尘中水不溶性组分含有更多的发色团有机物质, 其总浓度平均值为 $(4.71 \pm 1.27) \times 10^4$ R. U., 是 WSM 的 12 倍 $[(3.96 \pm 1.10) \times 10^3$ R. U.], 其中低氧化性类腐殖质 (HULIS) 是主要有机质 (占总有机质的 34.8%~43.7%). 聚类分析结果显示西安市道路扬尘中有机质的重要来源为燃料燃烧和工业生产. 扬尘氧化毒性 (以 DTT 计) 的平均值是 (0.34 ± 0.08) pmol·(min·μg)⁻¹, 其中水不溶性组分提供了扬尘颗粒物总氧化毒性的 70%, 是水溶性组分的 2.4 倍. 扬尘颗粒物氧化毒性的主要前驱物为金属元素, 特殊类型的有机物质也是重要氧化毒性前驱物质之一, 其中发色团有机质是 WSM 组分产生 OP 的主要原因 ($r=0.35$, $P<0.01$), WSM 中的类蛋白有机质和高氧化 HULIS 可能是产生 OP 的主要两类有机物质. 但 MSM 中有机质浓度与水不溶性 OP ($OP_{\text{总}} - OP_{\text{WSM}}$) 无显著相关性 ($r=-0.04$, $P>0.1$), 因此水不溶性颗粒物组分氧化毒性主要产生于非有机质.

关键词: 道路扬尘; 氧化潜势 (OP); 有机碳 (OC); 三维荧光光谱 (EEM); 类腐殖质物质 (HULIS)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3797-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208247

Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an

WANG Qing-wen¹, CHEN Qing-cai^{1*}, WANG Chao², WANG Rui-he², LIU Guo-rui^{3,4}, LI Hao¹, LI Yan-guang^{5,6}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. Beijing-China Railway Construction Technology Co., Ltd., Beijing 100049, China; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 4. State Key Laboratory of Environmental Chemistry and Ecotoxicology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 5. Xi'an Geological Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 6. Key Laboratory of Ore Formation and Mineral Search by Magmatism, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China)

Abstract: Roads are the main places where urban people are exposed to atmospheric particulate matter from outdoor activities, and certain oxidatively active substances contained in road particulate matter are important components that induce the generation of reactive oxygen species (ROS), which in turn endanger human health. Here, we explored the characteristics of organic matter composition in water-soluble (WSM) and methanol-soluble fractions (MSM) of road dust in Xi'an and its oxidation potential (OP). Additionally, we investigated the organic fractions and their distribution based on parallel factor analysis (PARAFAC) and analyzed the correlation between organic matter types and OP. The results showed that the water-insoluble fraction of road dust in Xi'an contained more chromophoric organic matter with an average total concentration of $(4.71 \pm 1.27) \times 10^4$ R. U., which was 12 times higher than that of WSM $[(3.96 \pm 1.10) \times 10^3$ R. U.], of which low-oxidizing humic-like substances (HULIS) were the main organic matter (34.8%-43.7% of the total organic matter). The results of cluster analysis showed that the important sources of organic matter in road dust in Xi'an were fuel combustion and industrial production. The mean value of dust oxidative toxicity was (0.34 ± 0.08) pmol·(min·μg)⁻¹, with the water-insoluble fraction providing 70% of the total oxidative toxicity of dust particles, which was 2.4 times higher than the water-soluble fraction. The main precursors of oxidative toxicity of dust particles were metal elements, and special types of organic substances were also one of the important oxidative toxicity precursors, among which chromophore organic matter was the main cause of OP production in the WSM fraction ($r=0.35$, $P<0.01$), and protein-like organic matter and highly oxidized HULIS in WSM may have been the main two types of organic substances for OP production. However, there was no significant correlation between organic matter concentration in MSM and water-insoluble OP ($OP_{\text{Total}} - OP_{\text{WSM}}$) ($r=-0.04$, $P>0.1$), so the oxidative toxicity of the water-insoluble particulate matter fraction was mainly generated from non-organic matter.

Key words: road dust; oxidation potential (OP); organic carbon (OC); fluorescence spectroscopy (EEM); humic-like substances (HULIS)

随着城市化进程加快及汽车保有量剧增, 大气污染对人体健康的影响越来越被重视. 大气中颗粒物 (particulate matter, PM) 能够通过多种途径进入人体, 颗粒物中的有机碳 (organic carbon, OC) 包含多环芳香烃和醛酮类羧基化合物等多种有害成分, 对人体心肺功能等方面造成的健康危害已被大量研究

收稿日期: 2022-08-27; 修订日期: 2022-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877354); 陕西省基础研究重点项目-科技新星 (2021KJXX-36); 北京中国铁路建设技术有限公司资助的道路扬尘数据采集项目 (ZY-JA-00368)

作者简介: 王擎雯 (2000~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为扬尘中有机污染物分布及其健康风险, E-mail: xwang0421@163.com

* 通信作者, E-mail: chenqingcai@sust.edu.cn

证实^[1~3]. 其中,道路扬尘作为大气颗粒物的主要无组织排放源,对大气 PM 的贡献可达 40% ~ 50%^[4,5]. 道路扬尘粒径范围分布广泛,导致更多污染物富集其上^[6]. 有研究发现,道路扬尘粒径大多集中在 0 ~ 50 μm 粒级^[6~8],而道路扬尘中粒径 < 75 μm 的颗粒可在风力和车辆的微小扰动下再悬浮,从而被人体摄入、吸入和接触^[9]. 大多学者现在对颗粒物产生健康影响普遍认为是氧化应激作用^[10,11],即活性氧(ROS)在体内的堆积. 这会造成器官炎症、癌症和神经性疾病等,甚至阿尔兹海默症和帕金森的产生也受到其影响^[2,12~15]. 道路扬尘中含有的有机质可以吸附重金属,重金属反作用诱导颗粒物产生氧化应激,危害人体健康^[6,16]. PM 对体内 ROS 的诱导存在多个机制,这些机制共同发生^[17]. 有研究也认为主要机制是 PM 中某些组分作为催化剂催化氧化物质消耗抗氧化剂,并生成 ROS^[10,18]. 因此,判断颗粒物内存在物质,对氧化毒性作用机制研究有十分重要的意义. 目前,许多生物及非生物法被用来测定 PM 产生 ROS 的能力. 例如使用二硫苏糖醇(DTT)^[19]和抗坏血酸(AA)^[20]等化学试剂或在体外培养的细胞内利用荧光探针^[21]进行 ROS 的氧化潜能(oxidative potential, OP)测定. 其中 DTT 是一种广泛使用的非生物方法,DTT 通过模拟细胞氧化剂的氧化水平来测定氧化能力,并通过 DTT 消耗速率测定 OP^[22]. 有研究表明,类腐殖质物质(humic-like substances, HULIS)^[22]、醌类物质^[23]和过渡金属^[24]等对 DTT 活性有贡献. Lin 等^[25]的研究发现, HULIS 是 DTT 活性的主要贡献者. Verma 等^[26]的研究发现 BrC 作为 HULIS 的主要疏水有机组分也与 DTT 活性呈现正相关. Tong 等^[27]的研究发现,二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)在液态水相中会形成大量羟基自由基,并产生健康危害. 大气发色团大部分由有机物质构成^[28], Chen 等^[22]的研究发现具有较大吸收波长和荧光发射波长的发色团是大气 PM 中最重要氧化活性有机物. 总而言之, PM 中的有机质对氧化应激的影响值得引起关注.

之前的研究中,对于颗粒物提取最常采用水作为介质. 然而,有研究发现,水不溶性颗粒物有明显的氧化特性,对于 DTT 活性的贡献比水溶性颗粒物更显著^[26]. 西安作为西北主要特大城市,污染物沉积严重,其粉尘问题也十分明显^[29~31]. 因此本文采用三维荧光激发-发射矩阵-平行因子分析(EEM-PARAFAC)联合使用对西安市道路扬尘中水溶性颗粒物(water-soluble material, WSM)及水不溶性颗粒物(methanol-soluble material, MSM)中有机组分进行

分析,同时采用 DTT 法对 OP 进行测定,以得到不同类型发色团物质对 OP_{DTT} 的相对贡献. 研究水不溶性颗粒物组分及其氧化潜势,有助于在毒理学及 ROS 生成机制上加深认识. 除此,分析有机碳和元素碳(humic-like substances, EC)的含量与氧化潜能相关性,以判断这些物质对氧化反应的贡献,从而综合评价西安市道路扬尘中有机质的种类及氧化毒性风险.

1 材料与方法

1.1 研究区域和样品采集

西安市(E107.40° ~ 109.49°, N33.42° ~ 34.45°)为陕西省省会城市,位于渭河流域中部的关中盆地,北临渭河和黄土高原,南接秦岭山脉. 西安的气候整体上表现为四季分明,属于温带季风气候,年降水量为 500 ~ 700 mm,位于干旱和半干旱地区. 同时西安的常住人口超过 1 000 万,是中国西北地区的一个大城市,扬尘污染问题非常明显^[31].

图 1 所示,本研究设置 134 个采样点分布在西安城区内于 2019 年 12 月 24 ~ 31 日进行采样,采样时使用吸尘器(V10, 中国小米)在所设的采样点进行采样. 选择非机动车道作为采样点,铺设 2 m × 1 m 胶带方框;捡去所选 2 m² 方框内的树叶和石子等大物体;将小米 V10 真空吸尘器调速按钮放置在高效模式,并匀速在地面滚过,每个 2 m² 方框所需时间为 2 min;采集完成后,记录该点经纬度,并放入提前准备好的密封袋中,标记上日期、天气、风速和温度等情况,将收集到的样品置于锡箔纸上放入密封袋保存,运回实验室. 将运回实验室的样品进行称重(“万分之一”电子天平, AR64CN),将称重后的样品放入干燥器中干燥平衡 24 h,之后对样品进行二次称重;干燥后的样品用 200 目的筛子过筛(粒径 < 75 μm),进行称重,记下 3 次称重的数值. 过滤之后的样品转入到玻璃瓶中,用标签纸标记好每一个样品,置于 -20℃ 的冰箱保存,直至分析.

1.2 样品萃取及光学特性测定

称取 3 mg 样品于 12 mL 样品瓶(玻璃)中,在对样品进行萃取时分为水溶性组分的萃取和水不溶性组分萃取. 对于水溶性组分,在样品瓶中加入 5 mL 超纯水摇匀,超声 30 min 后静置. 然后用 5 mL 玻璃注射器和 0.45 μm 的 PTFE 滤头进行过滤,转移至另一个样品瓶等待分析. 对于水不溶性组分的测定步骤于上述相同,将加入萃取样品的超纯水换为 5 mL 甲醇进行 30 min 超声,后续步骤同水溶性组分的测定^[32].

萃取液使用的石英比色皿中(路径长度 1 cm),

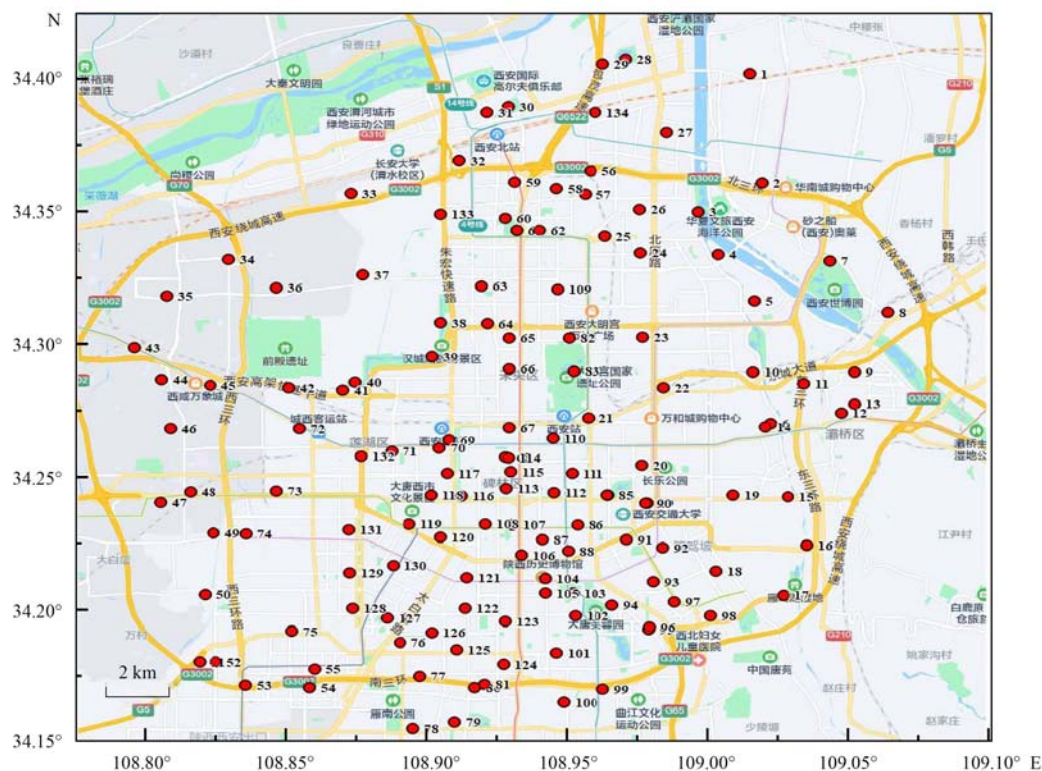


图1 西安市道路扬尘采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of road dust sampling sites in Xi'an

用 AquaLog 荧光仪 (HORIBA, 日本) 获得紫外-吸收光谱和 EEM 荧光光谱. 紫外-可见吸收光谱 (UV-Vis) 在波长 200 ~ 600 nm 范围内, 波长间隔为 2 nm, 进行测定. 三维荧光光谱激发波长在 200 ~ 600 nm 范围内, 发射波长在 250 ~ 600 nm 范围内, 设置曝光时间为 0.5 s, 激发波长间隔为 2 nm. 测定时使所有样品在 250 nm 处的吸光度小于 0.5 A. U., 以减少内部速率效应的影响^[22]. 对所有的分析方法均进行了空白分析和平行样品分析, 并验证提取过程和分析结果的重现性.

1.3 氧化潜势测定

首先, 将 0.5 mL DTT 溶液 ($1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\geq 98\%$, Sigma-Aldrich) 与 0.5 mL 样品滤液混合, 并在 37°C 水浴中进行反应. 样品反应在 0、4、13、23、32 和 41 min 进行. 然后将 0.1 mL 上述混合物加入到含有 1 mL 三氯乙酸 ($10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 的离心管中, 终止反应. 将 0.5 mL 的 2-硝基苯甲酸 (DTNB, $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\geq 98\%$, Sigma-Aldrich) 和 2 mL Tris 缓冲液 ($0.08 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ EDTA) 加入该混合物中进行显色. 最后, 用紫外-可见吸收光谱仪 (AquaLog, HORIBA, 日本) 测定了样品在 412 nm 处 (Abs_{412}) 处的吸光度. 用 Abs_{412} 的值定量分析样品溶液中 DTT 的浓度, 根据不同反应时间样品中剩余的 DTT 的浓度计算 DTT 的消耗率 [单位: $\text{pmol} \cdot (\text{min} \cdot \mu\text{g})^{-1}$]^[22].

以上分析得到 EEMs 数据使用 MATLAB 0.2.0 版本中的 drEEM 工具箱进行 PARAFAC 平行因子分析 (<http://www.models.life.ku.dk/dreem>). 详细的模型分析程序是基于 Chen 等^[33] 的研究.

2 结果与讨论

2.1 扬尘颗粒物中碳质组分污染特征

图 2 展示了西安市道路扬尘中有机碳组分和氧化毒性的空间分布状况. 可以看出, 水溶性组分中有机质含量在某些点出现了峰值, 这些采样点周围环境则主要是小区、公园等自然环境, 水不溶性组分中有机质集中在西安市西北部和中部出现较高浓度. 这些地区主要为制造业和高人流量的商贸服务区, 因此水不溶性组分可能主要受人为影响, 且工业制造、车辆磨损等来源可能是主要贡献. WSM 与 MSM 含量的差异说明在西安市道路扬尘中, 水溶性有机质和水不溶性有机质可能属于两个不同来源. OC 也被看做煤炭燃烧和机动车排放的示踪物质, 如图 2(a), OC 浓度出现峰值的区域主要为车流量较高的市中心区域, 而 WSM 和 MSM 中有机质浓度在中部区域的也较高, 说明不同种类有机质具有不同的分布特征和来源. 西安市大部分区域内扬尘总 OP_{DTT} 高于整体平均值 [$(0.34 \pm 0.08) \text{ pmol} \cdot (\text{min} \cdot \mu\text{g})^{-1}$]. 同时, OP 的分布与 WSM 和 MSM 较低的规律性也表明, OP 的产生与有机质浓

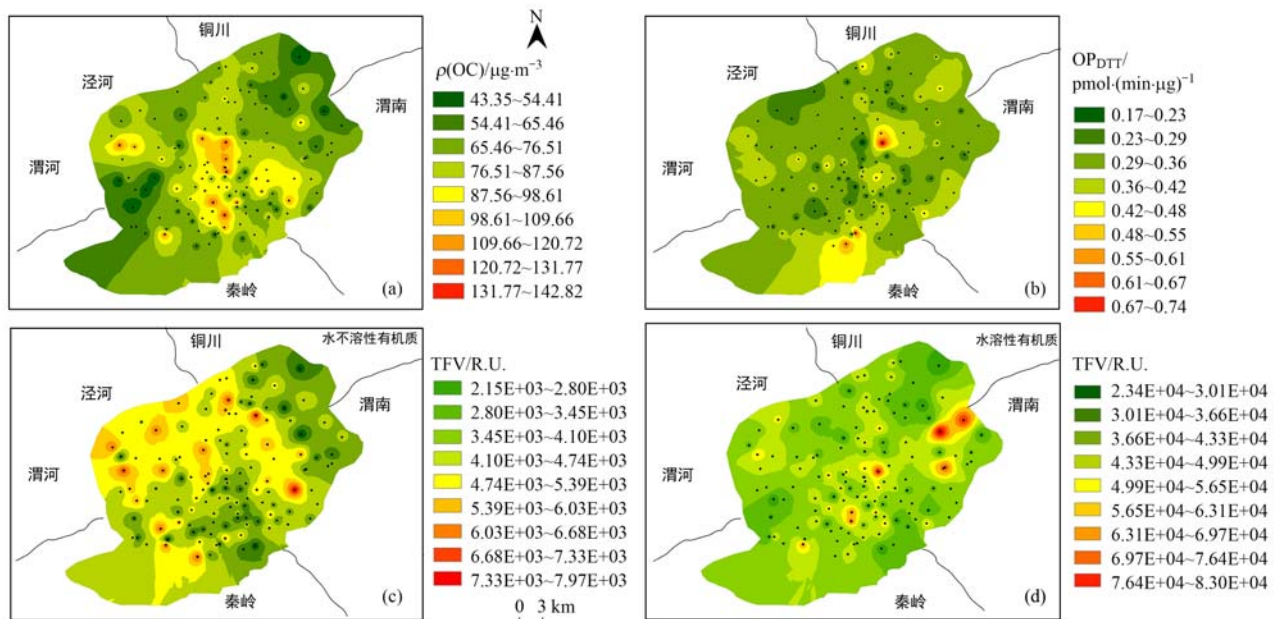


图2 西安市道路扬尘中碳质组分、有机质和 OP_{DTT} 在西安市内空间分布状况

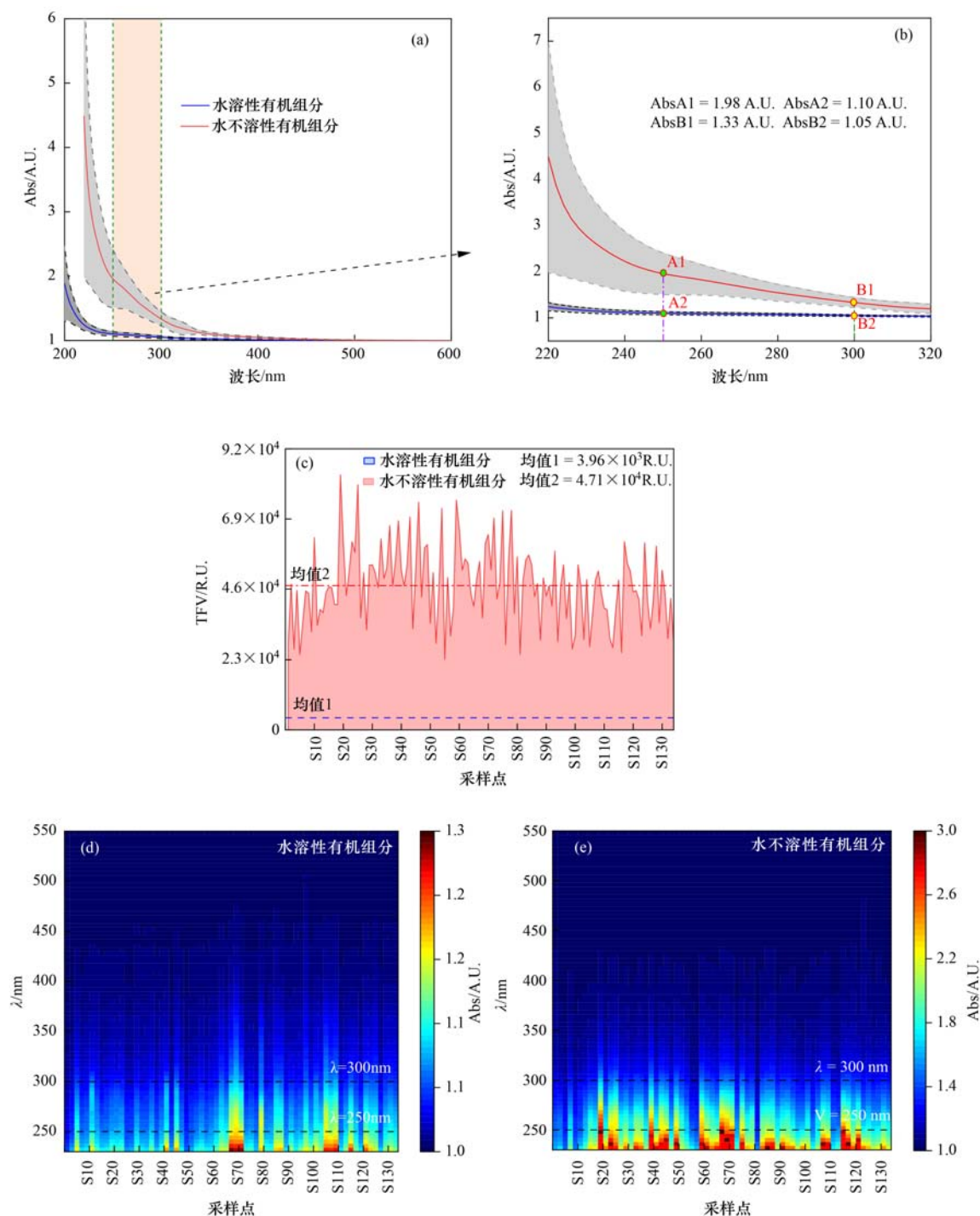
Fig. 2 Spatial distribution of carbonaceous fraction, organic matter, and OP_{DTT} in road dust in Xi'an

度并不呈现单一的线性关系,多种外部条件的影响(金属元素、颗粒物表面结构缺陷)都会导致OP含量的差异.因此对其有机物质组分进行分析,判断来源并进行污染控制有十分重要的意义.

本研究通过分析道路扬尘的光学特征来定性判定其含有的有机质组成.图3(a)展示了水溶性成分(WSM)和水不溶性成分(MSM)的平均吸光度(Abs),两种成分的吸光谱均无出现明显吸收峰,它们的吸收强度随着波长的减少快速增大,并且在紫外区域表现出较强的吸收.其中MSM的吸光度略高于WSM,这与之前对大气 $PM_{2.5}$ 的研究结果相同^[23,34].图3(d)和3(e)为各个采样点的吸收光谱图,MSM在各个采样点的吸光度都高于WSM,有的采样点可超过WSM的2倍,这说明道路扬尘的分布是具有空间差异性的,它们的化学组成和来源是不同的.为了便于理解,本文将总荧光体积(total fluorescence volume,TFV)量化结果看作有机质浓度,采用单位R.U..图3(c)展示了不同采样点总有机质浓度的变化,道路扬尘中水溶性有机质浓度(TFV_{WSM})的平均值为 $(3.96 \pm 1.10) \times 10^3$ R.U. ($2.15 \times 10^3 \sim 7.99 \times 10^3$ R.U.),水不溶性有机质浓度(TFV_{MSM})的平均值为 $(4.71 \pm 1.27) \times 10^4$ R.U. ($2.31 \times 10^4 \sim 8.35 \times 10^4$ R.U.),MSM的有机质明显高于WSM,平均含量是WSM的12倍.不同采样点MSM中有机质浓度差异明显,曲线呈现出较大的变化趋势,而WSM的有机质在各采样点之间的差异并不大.甲醇萃取的有机发色团更多,并且其含量更容易受到人为影响,不同来源产生的有机发色团

的贡献不同,而水可萃取有机物更为稳定.通过对比各采样点颗粒物质量和有机质浓度发现,总有机质浓度和扬尘浓度无线性关系.例如,MSM在S19采样点有最高的TFV值为 8.35×10^4 R.U.,然而其道路扬尘量仅为 $6.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,是最高道路扬尘浓度的0.36倍.因此,颗粒物的来源才是导致有机质不同的原因,需要对其进行分析判断.

图4展示了道路扬尘中出现的特征有机组分.水溶性有机质和水不溶性有机质呈现了不同的峰值和轮廓.WSM中被识别出6种有机组分,MSM中鉴定出7种有机组分.根据之前的研究,对于不同出峰位置的有机质主要包含以下3类.当激发波长(E_x)在240 nm~310 nm左右,发射波长(E_m)在390 nm~430 nm左右,被认为属于低氧化性HULIS有机质; E_x 在220 nm~280 nm, E_m 在325 nm~340 nm;被认为属于类蛋白样有机质; E_x 在240 nm~340 nm左右, E_m 在440 nm~500 nm被认为属于高氧化性HULIS有机质^[23,35].在水溶性组分提取的6个荧光成分中,成分1(C1)和成分2(C2)分别代表了低氧化性和高氧化性的类腐殖质;成分5(C5)在220/440 nm(E_x/E_m)和265/440 nm(E_x/E_m)处分别出现了两个强峰,在350/440 nm(E_x/E_m)处出现了一个弱峰,可能属于高氧化性HULIS或芳香烃或醌^[23];成分6(C6)在210/430 nm(E_x/E_m)出现了一个强峰,在340/430 nm(E_x/E_m).C6的出峰位置在之前的研究中被发现可能属于生物气溶胶的某种荧光指示剂,且常被发于灰尘之中^[36].成分3(C3)和成分4(C4)出现了相似的出峰位置,可能属



(a) 和 (b) 为不同波长下不同有机组分的吸光度, 其中灰色阴影表示不同波长下吸光度的标准偏差, (c) 为不同采样点有机质浓度, (d) 为不同采样点水溶性有机组分在不同波长下的吸光度, (e) 为不同采样点水不溶性有机组分在不同波长下的吸光度; 其中 (d) 和 (e) 两根虚横线表明 λ 为 250 ~ 300 nm 之间的吸光度, 这个区间内特征有机质结构为芳环结构, 而颗粒物中主要有机质 HULIS 的中心结构为芳核, 因此这个区间吸光度的大小在一定程度上表明了 HULIS 的含量高低

图3 道路扬尘水溶性和水不溶性碳质组分的吸光光谱图及有机质浓度分布差异

Fig. 3 UV-Vis absorbance spectra of water-soluble and water-insoluble carbonaceous fractions of road dust and organic matter concentration

于色氨酸类和络氨酸类物质^[37]. 但是一些酚类化合物与类蛋白质物质发色团出峰位置相近, 可能影响判断^[28,36]. 水不溶性组分中 C1 和 C3 分别代表低氧化性和高氧化性腐殖质; C2、C5 和 C6 可能属于类蛋白质物质; C4 也出现了两个强峰, 与 WSM 中 C5 相似, 但不同的是 MSM 中的 C4 可能属于低氧化性腐

殖质, 而 WSM 中 C5 属于高氧化性腐殖质. 有研究指出, C4 所在出峰位置可能与大分子的光降解分解有关, 代表陆地腐殖质^[38]. 在 MSM 中出现一个特殊的荧光发色团 C7, 在 430/680 nm (E_x/E_m) 出现了强峰. 一些研究指出, 激发波长在 470 nm 附近产生的荧光发色团可能是由重组发光导致, 即由大分子内

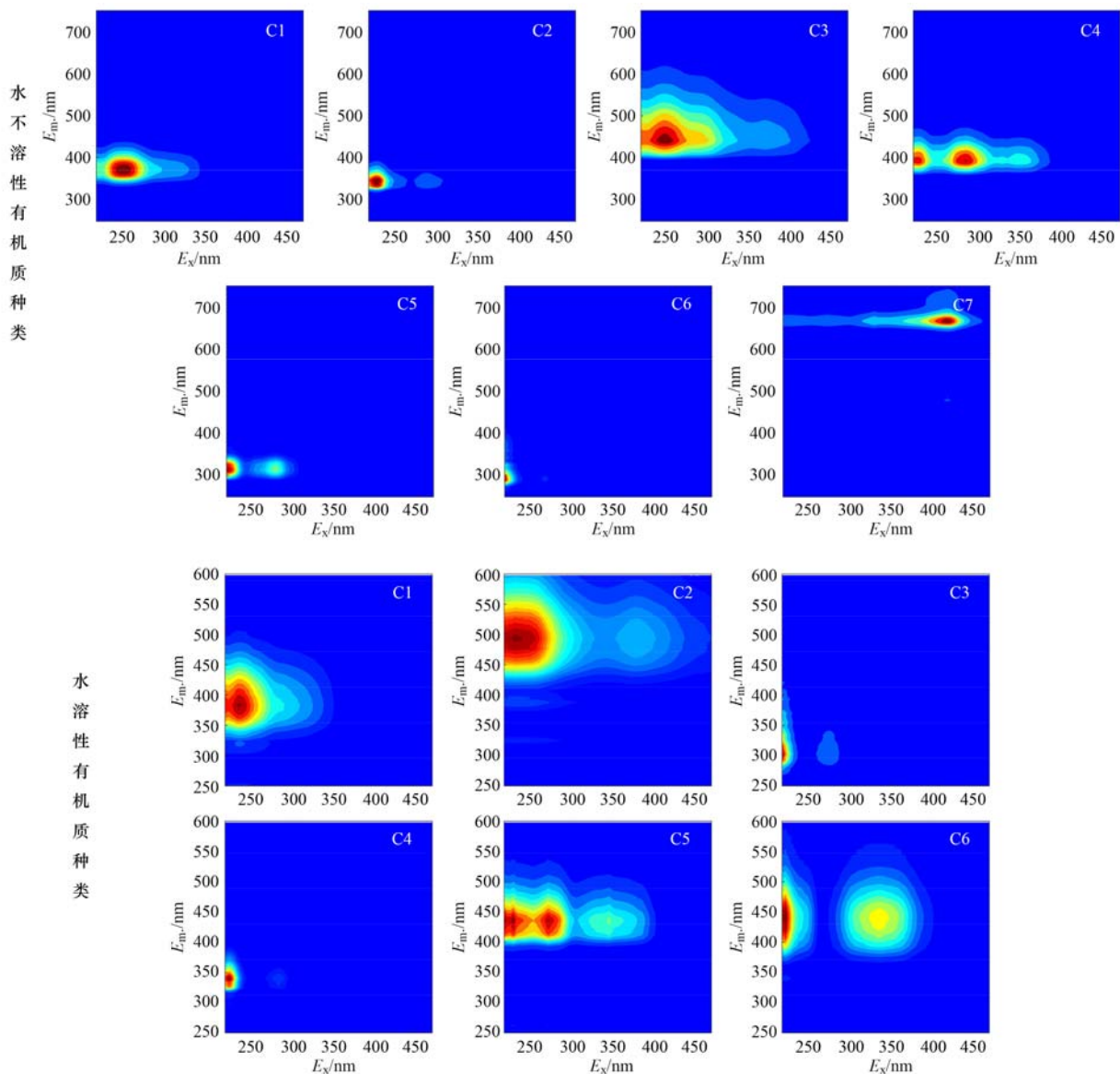


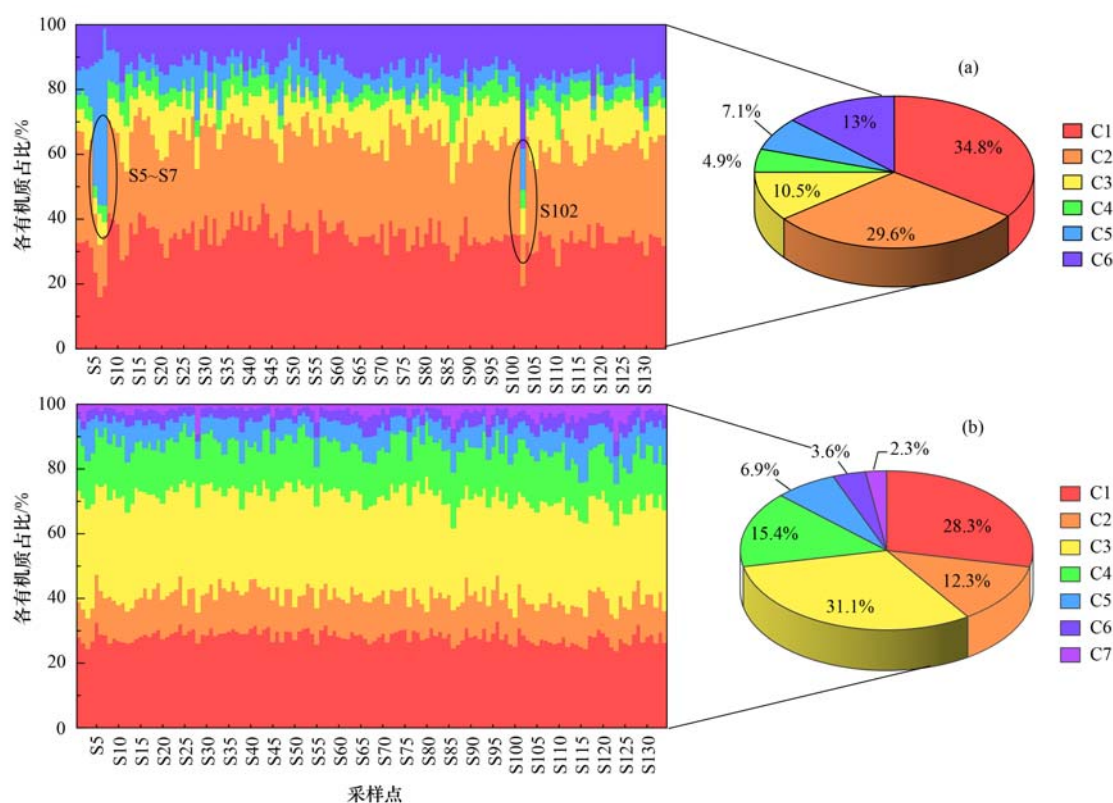
图4 道路扬尘水溶性和水不溶性组分中鉴定出来的不同类型有机质三维谱图

Fig. 4 Chromophore spectrum of water-soluble components and water-insoluble components in road dust

低能量电荷转移态分布产生.但也可能是由于一些外部条件的改变,如金属离子、pH 和粒径大小等而引起^[39].

通过分析各有机质占比及其浓度,判断道路扬尘中有机质组分的可能来源,提供治理依据.图5展示了道路扬尘中水溶性和水不溶性有机质占比,水溶性组分中 C1 占比最大(平均值为 34.8%),其次为 C2(平均值为 29.6%),水不溶性组分中 C3 含量最大(平均值为 31.1%),其次为 C1(平均值为 28.3%).这些有机质均为 HULIS,它是大气样品中最主要的物质,西安市道路扬尘中 HULIS 同样也为主要物质^[40].在之前的研究中,西安市大气有机质中 HULIS 在甲醇溶性样品中占比为 42%,比本研究少了 17.4%^[28],这主要是因为道路扬尘和大气 PM_{2.5} 的来源和化学组分不同^[41].在 HULIS 中,又含

有许多不同的物质.水不溶性组分中 C3 的出峰位置与多环芳烃类物质(PAH-Like)相似,由于汽车尾气排放,多环芳烃类物质在道路扬尘颗粒物中普遍存在^[42].PAH-Like 在 MSM 样品中具有更高的贡献,这与之前的研究一致^[32].类蛋白质物质在两种组分中贡献均不是很大,说明扬尘颗粒物中微生物气溶胶并不是主导组成^[28,43,44].在某些采样点处,各有机质浓度出现了明显的变化.在 WSM 中,采样点 S5、S6 和 S7 处 C5 有机质浓度贡献出现了明显的峰值. C5 这类具有较高激发波长的物质($E_m = 440$ nm)可能是含有大共轭电子官能团的物质,这些物质可能与化石燃料燃烧排放来源相关^[23].采样点 S5、S6 和 S7 处周围建筑多为小区和餐馆等,聚集的油烟排放可能造成了局部地区的 C5 有机质的高贡献.在采样点 S102 处, C5 和 C6 的有机质浓度出现



(a) 水溶性有机质, (b) 水不溶性有机质; C1 ~ C7 表示不同有机质组分

图5 道路扬尘中各有机质占比

Fig. 5 Proportions of various organic matter components in road dust

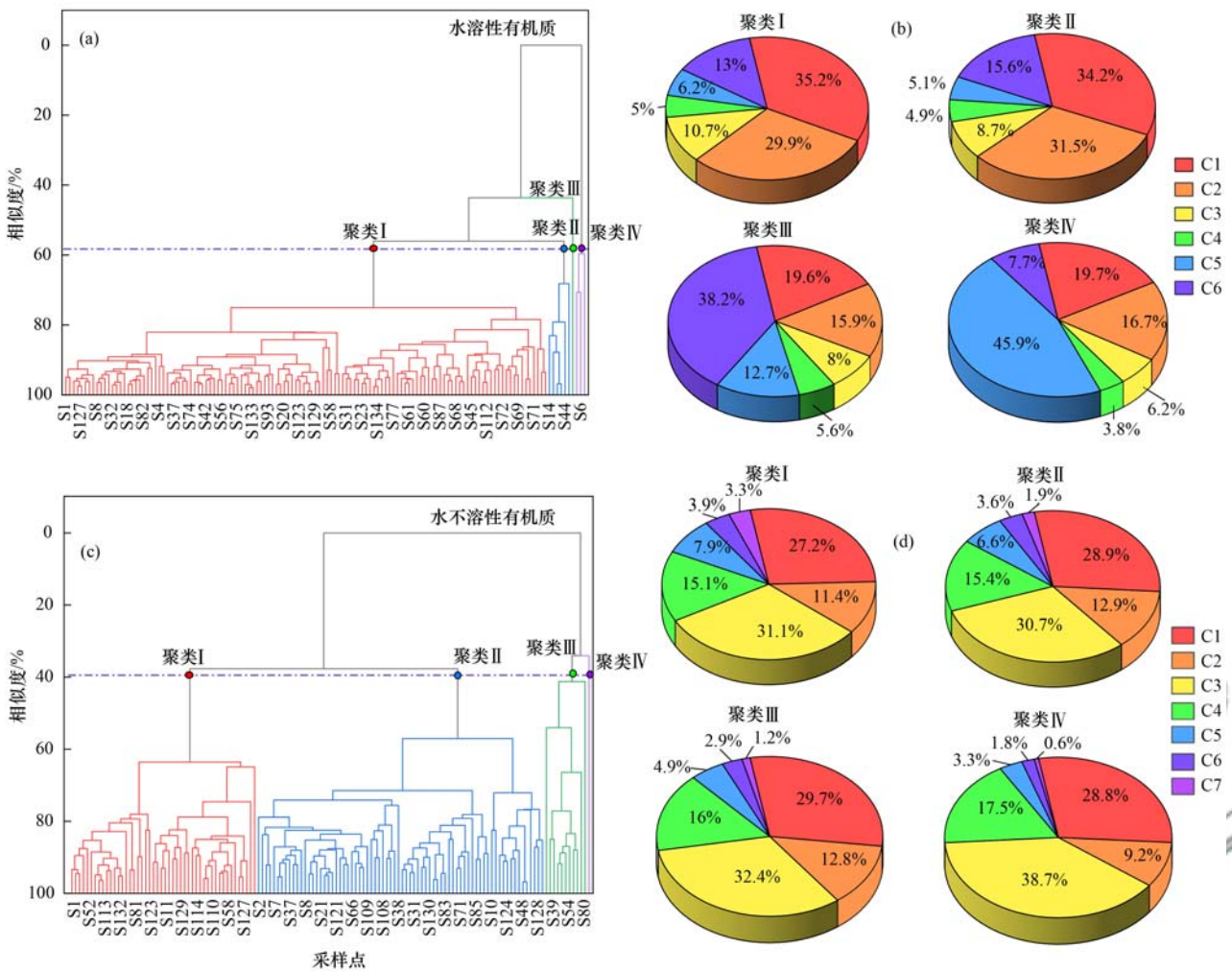
了峰值. S102 处周围建筑比较混合复杂, 有社区、餐饮和景点等, 这可能造成了道路扬尘浓度的增大, 导致扬尘中生物气溶胶指示有机质 C6 的浓度增大.

图 6 为基于各有机质浓度对 134 个采样点进行聚类分析的结果, 以探讨有机质来源及产生差异的原因. 通过聚类分析将样品分为 4 类, 在 WSM 中 125 个样品属于聚类 I, MSM 中大多数样品 (75 个) 属于聚类 II. 对 WSM 来说, 聚类 I 和聚类 II 的有机质种类相似, 主要为 C1, 其次是 C2; 聚类 III 主要有有机质为 C6, 聚类 IV 主要有有机质是 C5. WSM 中 C1 和 C2 分别属于高、低氧化程度的腐殖质. 在之前的研究发现, C1 对微量元素存在主要贡献, 但也有研究显示 C1 与乙酸离子呈现相关性, 因此判断其可能来自于工业排放源或生物质燃烧源^[31,32]. 道路扬尘中物质具有明显的区域性差异, 周围环境对其影响十分明显, 因此结合采样周围建筑类型, 大多属于在建工地或工业场地, 判断 C1 在道路扬尘中可能属于工业排放源. C2 是高氧化性腐殖质, 其对 OC 和 EC 有一定贡献, 并与 CO、SO₂ 和 NO₂ 有较好的相关性, 因此可能属于不完全燃烧源^[28]. C6 被认为属于花粉物质中的蛋白类物质, 特属于扬尘中植物源颗粒物. C5 可能与生物质燃烧排放相关^[43]. 对于

MSM, 4 个聚类中各有机质的含量差异不大, 主要有有机质是 C3 和 C1, 分别代表高、低氧化性腐殖质. 因此可能主要来源是工业源和不完全燃烧源, 且其来源可能更为固定.

2.2 扬尘颗粒物氧化毒性特征

图 7 展示了西安市道路扬尘水溶性组分和水不溶性组分的氧化毒性 (用 DTT 活性表示), 即氧化潜势 [OP, pmol·(min·μg)⁻¹]. 结果显示, MSM 可能是道路扬尘中 DTT 活性的主要贡献者. 道路扬尘中 OP 平均值为 (0.34 ± 0.08) pmol·(min·μg)⁻¹, 其中水不溶性组分 OP 占总 OP 的 70%, 是水溶性 OP 的 2.4 倍. 甲醇提取出的多余水不溶性有机质显然对 DTT 氧化活性有更明显的贡献^[26]. 这可能是因为, 在甲醇提取的样品中检测到了 PAH-Like 的有机质 (C3), 是醌类化合物的重要前体物质^[45]. 虽然醌类化合物并不直接贡献 DTT 活性^[46], 但 HULIS 可以在于醌类化合物催化促进氢原子的转移^[47], 从而产生 DTT 活性. 有研究发现, 扬尘样品的氧化毒性低于非扬尘样品, 颗粒物的氧化毒性随着粒径的减小而增大^[48]. 例如, Li 等^[49]的研究表明超细颗粒物 (<0.1 μm) 对 OP 的贡献是粗颗粒物 (2.5 ~ 10 μm) 的 21.7 倍. 因此, 虽然道路扬尘中 DTT 并不高, 但作为城市区域大气颗粒物的主要无组织排放



(a) 和 (c) 中的虚线的作用是辅助识别聚类结果,此线上与聚类结果的交点表示不同的聚类

图 6 不同类型道路扬尘样品中有机质组分特征和差异

Fig. 6 Cluster analysis of road dust samples and the content and composition characteristics of organic materials in samples with different classifications

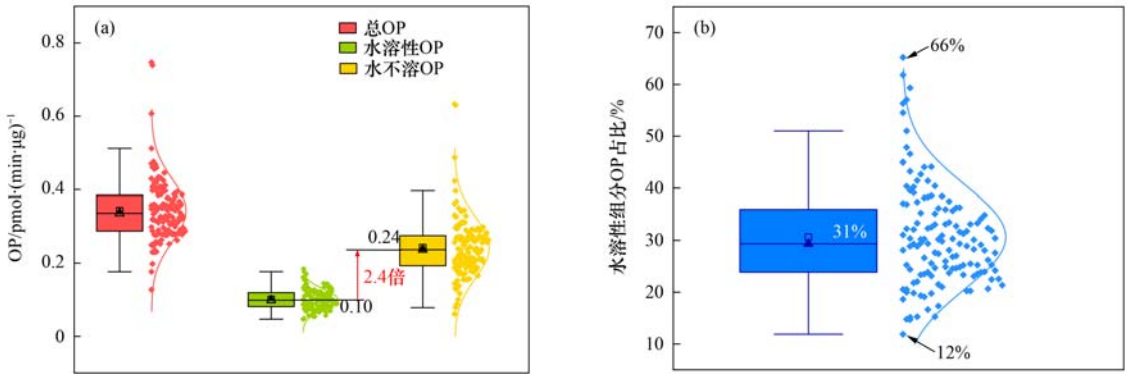


图 7 道路扬尘中各组分氧化潜势箱线图

Fig. 7 Boxplot of oxidation potential of each component in road dust

源以及人们户外活动主要的大气颗粒物暴露环境, 对其进行治理和管控仍具有重要意义。

有研究发现, 过渡金属发生 Fenton 反应诱导产生 ROS 是造成氧化毒性的机制之一^[50,51]。因此, 为了判断有机组分对道路扬尘中 OP 的贡献, 本研究也对水溶性及水不溶性金属与 OP 进行了相关性分

析。表 1 展示了金属元素与 OP 相关性系数和显著水平。结果显示水溶性金属与总 OP 的相关性更高, 这之前研究的结果一致^[52]。其中 Pb 和 Mn 呈现出一定的相关性, r 分别为 0.29 和 0.23。值得注意的是, Pb 和 Mn 的水溶性金属含量并不是最高的, 但是它们却贡献了较多的 DTT 活性, 因此它们对于

ROS 产生的机制值得研究. 之前研究发现 Mn 对 OP 有很强的相关性^[52]. 但也有研究结果表明, 以分子氧为电子受体的游离溶解的 Mn(II) 的氧化非常缓慢^[53], 但当 Mn(II) 吸附于石英或矿物颗粒上时, 与分子氧发生的反应会得十分迅速, 从而促进 ROS 的产生^[16]. 有研究也表明西安市降尘中磁性矿物浓度相对较高^[54], 这可能是西安市道路扬尘中 Mn 对 OP 产生贡献的原因之一.

表 1 道路扬尘中水溶性金属和总金属与 OP 的相关系数及显著水平¹⁾

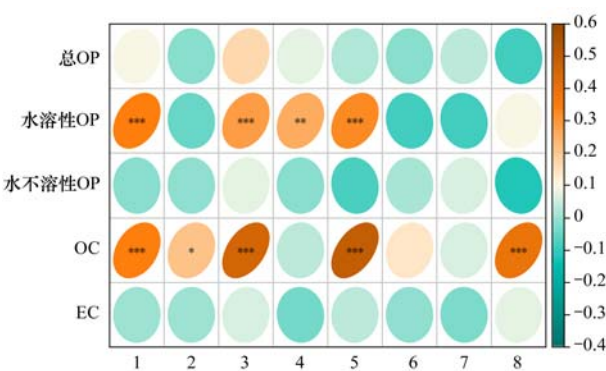
Table 1 Correlation coefficients and significant levels of water-soluble metals and total metals in road dust with OP					
水溶性金属	OP _{Total}		总金属	OP _{Total}	
	<i>r</i>	<i>P</i>		<i>r</i>	<i>P</i>
Cr	-0.11	<0.001	Cr	-0.05	<0.001
Pb	0.29	<0.001	Pb	-0.17	<0.001
Mn	0.23	<0.001	Mn	0.06	<0.001
Co	-0.14	<0.001	Co	-0.01	<0.001
Ni	-0.03	<0.001	Ni	-0.01	<0.001
Cu	-0.09	<0.001	Cu	-0.1	<0.001
Zn	-0.06	<0.001	Zn	-0.19	<0.001
Fe	-0.05	<0.001	Fe	-0.06	<0.001
V	0.07	<0.001	V	0.16	<0.001
Sc	-0.01	<0.001	Sc	0.05	<0.001

1) OP_{Total} 表示总有机质产生的氧化潜势(以 DTT 计)

如图 8, 本研究发现 OC 和 EC 与 OP 均无显著相关性($r = -0.05$ 和 $r = -0.03$), 因此从整体来看 OC 和 EC 对氧化毒性贡献可能并不大. 但由于 OC 是综合性组分指标, 其中包含了较多的非氧化毒性物质, 而且有机物并不能像金属元素那样进行完全分析, 因此 OC 中的某些有机物仍然可能直接贡献扬尘颗粒物的氧化毒性, 比如 PAHs 等具有一定光学性质的有机物. 在对 WSM 和 MSM 的 TFV 与 OC 和 EC 进行相关性分析时, 结果显示, OC 与 WSM 和 MSM 的有机质浓度都呈现出了一定相关性($r = 0.34$ 和 $r = 0.21$), 而 EC 则与两者均无显著相关性($r = 0.009$ 和 $r = 0.007$). 这说明, OC 中仅仅部分是发色团有机物, 而它们对 OP_{WSM} 具有潜在贡献, 并且发色团有机质可能并不是主要来源于燃烧源^[55-57].

2.3 扬尘颗粒物光学特征与氧化毒性相关性研究

如上所述过渡金属是扬尘颗粒物产生 ROS 的主要前驱物质, 而有机质对 OP 的贡献也可能比较重要. 如图 8 展示了道路扬尘中有机质与水溶性和水不溶性提取物 DTT 活性的相关性. 结果显示, 水溶性组分有机质浓度与 DTT_{WSM} 活性呈现出一定的相关性($r = 0.35$, $P < 0.01$), 这说明水溶性有机质对氧化毒性具有一定贡献. 在之前的研究中已经证实水溶性颗粒物组分对 DTT 的贡献, 主要是由水溶



1. TFV_{WSM}, 2. TFV_{MSM}, 3. 低氧化性 HULIS_{WSM}, 4. 高氧化性 HULIS_{WSM}, 5. 类蛋白质_{WSM}, 6. 低氧化性 HULIS_{MSM}, 7. 高氧化性 HULIS_{MSM}, 8. 类蛋白质_{MSM}; * 表示 $P \leq 0.05$, ** 表示 $P \leq 0.01$, *** 表示 $P \leq 0.001$; 色柱表示各组分之间的相关系数 r , 椭圆颜色对应其相关系数, 椭圆向左倾斜表示正相关, 形状越扁平表示正相关程度越大, 反之表示负相关, 越扁平表示负相关程度越大

图 8 道路扬尘氧化潜势与有机质和有机碳、元素碳和不同有机质含量之间的相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of oxidation potential of road dust with organic material and organic carbon, elemental carbon, and organic matter concentration

性有机质提供的^[21,26], 也有研究发现 HULIS 是水溶性组分中提供 ROS 最主要的物质, 而 HULIS 是最重要的有机质^[49]. 表 2 展示了对 WSM 和 MSM 中各类有机质分别进行相关性分析的结果, WSM 中类蛋白质有机质与水溶性 OP 呈现最明显的相关性. 其中 C6 与 OP_{WSM} 呈现出相对较高的相关性($r = 0.350$, $P < 0.01$), 其次是 C1 ($r = 0.285$, $P < 0.01$) 和 C2 ($r = 0.276$, $P < 0.01$). C6 被认为是孢子聚合蛋白^[23,31], 由花粉的外细胞壁组成^[58], 其产生的荧光范围是各类有机质的混合物^[59,60]. C1 和 C2 分别是低、高氧化性 HULIS, 它们与 OP_{WSM} 呈现一定的相关性, 这与之前研究的结果一致^[40].

值得注意的是, 在本研究中水不溶性组分与 DTT_{MSM} 无显著相关性($r = -0.004$), 这与之前对 PM_{2.5} 研究的结果并不相同^[26]. 在对 MSM 中各组分进行相关性分析时发现, 大部分有机质与 DTT 活性呈负相关, 仅 C1 ($r = 0.002$)、C3 ($r = 0.060$) 和 C4 ($r = 0.029$) 呈现正相关. 而这 3 种有机质为 HULIS 物质, 因此 HULIS 不仅是 WSM 中重要的产生 ROS 的成分, HULIS 可能在 DTT_{MSM} 贡献中也是重要的角色. 但目前对水不溶性颗粒物对 OP 造成较高贡献值的机制还并不明确^[24,61], 主要可能并不是这些有机物质本身造成的, 而是由于具有催化活性的金属矿物颗粒造成的^[26,49,58], 因此对水不溶性有机质产生 ROS 机制是当前亟待研究的一个科学问题.

表 2 展示了不同样品中不同聚类对 OP 的贡献

值,WSM 中聚类Ⅲ的总 OP 值最大,其中,WSM 中聚类Ⅲ含量最丰富的发色团为 C6(38.2%),属于生物源类蛋白物质,但是对水溶性 OP 贡献最大的是聚类Ⅳ,其主要发色团是 C5 为高氧化 HULIS. 因此,WSM 中生物源类蛋白物质和高氧化 HULIS 分别对总 OP 和水溶性 OP 具有最大贡献. 对 MSM 来说,聚类Ⅰ对总 OP 贡献最大,聚类Ⅳ最小. 对比这两种聚类发色团的异同发现,C3 在聚类Ⅳ和聚类Ⅰ的占比分别是 38.7% 和 31.1%,都是两种聚类中主要的发色团,这说明 C3 对 OP 有一定贡献但并不是最主要的. 从而 MSM 中影响 OP 值的发色团可能是 C5、C6 和 C7. 因为两种聚类中发色团含量的差异主要体现在这 3 个发色团的含量上,在聚类Ⅰ中 3 个发色团含量占 15.1%,聚类Ⅳ中占 5.7%. C5 和 C6 属于类蛋白物质,C7 是一个特殊发色团,具体的物质难以确定,根据之前的研究^[39],采样点周围主要排放属于交通排放^[62],分析该发色团可能属于芳香烃类物质. 因此,类蛋白物质在 MSM 中也是产生 OP 的有机物中的重要贡献者.

表 2 道路扬尘中各类有机质和碳组分与 OP 的相关系数 r

Table 2 Correlation coefficient of each organic material and OP in road dust

样品组别		平均值	
		OP _{Total}	OP _{WSM}
水不溶性有机质	聚类Ⅰ	0.349	0.102
	聚类Ⅲ	0.345	0.093
	聚类Ⅱ	0.340	0.102
	聚类Ⅳ	0.256	0.056
水溶性有机质	聚类Ⅲ	0.401	0.113
	聚类Ⅱ	0.351	0.115
	聚类Ⅰ	0.343	0.099
	聚类Ⅳ	0.332	0.130

3 结论

(1) 类腐殖质(HULIS)是西安市道路扬尘中主要的有机组分,水溶性和水不溶性组分中 HULIS 物质分别占比 72% 和 75%. 水不溶性颗粒物为道路扬尘中氧化潜能的主要贡献者,其贡献总氧化潜能(OP)的 70%,是水溶性 OP 的 2.4 倍.

(2) 大部分 HULIS 发色团与 OP 呈现出一定相关性,HULIS 是道路扬尘中对 OP 有重要贡献的物质之一,其中高氧化性 HULIS 是 OP_{WSM} 的主要贡献者,而对 OP_{MSM} 中类蛋白物质及非发色团物质可能是主要贡献.

(3) OC 和 EC 与 OP 均无相关性,但 OC 与 TFV_{WSM} 呈现一定相关性,OC 中仅少量的发色团有有机物对氧化毒性有一定贡献,并且可能主要来源并非燃烧来源.

参考文献:

- [1] 熊胜春,陈颖军,支国瑞,等. 上海市大气颗粒物中多环芳烃的季节变化特征和致癌风险评价[J]. 环境化学, 2009, 28(1): 117-120.
- [2] Xiong S C, Chen Y J, Zhi G R, *et al.* Seasonal variation and carcinogenic assessment of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons in Shanghai, China[J]. Environmental Chemistry, 2009, 28(1): 117-120.
- [3] Charrier J G, Anastasio C. Impacts of antioxidants on hydroxyl radical production from individual and mixed transition metals in a surrogate lung fluid[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(40): 7555-7562.
- [4] Peel J L, Tolbert P E, Klein M, *et al.* Ambient air pollution and respiratory emergency department visits [J]. Epidemiology, 2005, 16(2): 164-174.
- [5] 李冬,陈建华,张月帆,等. 道路扬尘中 PM_{2.5} 粒度乘数的测定方法及特征[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1642-1648.
- [6] Li D, Chen J H, Zhang Y F, *et al.* Determination method and characteristics of particle size multiplier of PM_{2.5} in road dust [J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 1642-1648.
- [7] 胡月琪,郭建辉,张超,等. 北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 3924-3934.
- [8] Hu Y Q, Guo J H, Zhang C, *et al.* Pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metals in road dust in Beijing [J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 3924-3934.
- [9] 王钰. 哈尔滨市主城区道路扬尘重金属污染研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.
- [10] 汪志荣,刘珊珊,李洁,等. 城市不同级别道路扬尘的粒径特性分析[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 282-289.
- [11] Wang Z R, Liu S S, Li J, *et al.* Particle size characteristics of dust in different grade urban roads [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(2): 282-289.
- [12] 周恋彤,董黎明,赵钰,等. 北京城区道路扬尘季节性粒度分布及分形特征[J]. 中国环境科学, 2015, 35(6): 1610-1619.
- [13] Zhou L T, Dong L M, Zhao Y, *et al.* Particle size distribution and fractal dimension characteristics of urban road dust in four seasons in Beijing[J]. China Environmental Science, 2015, 35(6): 1610-1619.
- [14] Malakootian M, Mohammadi A, Nasiri A, *et al.* Spatial distribution and correlations among elements in smaller than 75 μm street dust: ecological and probabilistic health risk assessment[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43(1): 567-583.
- [15] Verma V, Fang T, Guo H, *et al.* Reactive oxygen species associated with water-soluble PM_{2.5} in the southeastern United States: spatiotemporal trends and source apportionment [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(23): 12915-12930.
- [16] Delfino R J, Staimer N, Tjoa T, *et al.* Airway inflammation and oxidative potential of air pollutant particles in a pediatric asthma panel [J]. Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology, 2013, 23(5): 466-473.
- [17] Koh C H V, Whiteman M, Li Q X, *et al.* Chronic exposure to U18666A is associated with oxidative stress in cultured murine cortical neurons[J]. Journal of Neurochemistry, 2006, 98(4): 1278-1289.
- [18] Barnham K J, Masters C L, Bush A I. Neurodegenerative diseases and oxidative stress [J]. Nature Reviews Drug Discovery, 2004, 3(3): 205-214.

- [14] Mattson M P. Pathways towards and away from Alzheimer's disease[J]. *Nature*, 2004, **430**(7000): 631-639.
- [15] Wersinger C, Sidhu A. Differential cytotoxicity of dopamine and H_2O_2 in a human neuroblastoma divided cell line transfected with α -synuclein and its familial Parkinson's disease-linked mutants [J]. *Neuroscience Letters*, 2003, **342**(1-2): 124-128.
- [16] Schoonen M A A, Cohn C A, Roemer E, *et al.* Mineral-induced formation of reactive oxygen species [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, **64**(1): 179-221.
- [17] McWhinney R D, Badali K, Liggio J, *et al.* Filterable redox cycling activity: a comparison between diesel exhaust particles and secondary organic aerosol constituents [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(7): 3362-3369.
- [18] Tao F, Gonzalez-Flecha B, Kobzik L. Reactive oxygen species in pulmonary inflammation by ambient particulates [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2003, **35**(4): 327-340.
- [19] 张曼曼, 李慧蓉, 杨闻达, 等. 基于 DTT 法测量广州市区 $PM_{2.5}$ 的氧化潜势[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(6): 2258-2266.
- Zhang M M, Li H R, Yang W D, *et al.* Measurement based on DTT method of the $PM_{2.5}$ oxidative potential in Guangzhou urban area[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(6): 2258-2266.
- [20] DiStefano E, Eiguren-Fernandez A, Delfino R J, *et al.* Determination of metal-based hydroxyl radical generating capacity of ambient and diesel exhaust particles [J]. *Inhalation Toxicology*, 2009, **21**(9): 731-738.
- [21] Landreman A P, Shafer M M, Hemming J C, *et al.* A macrophage-based method for the assessment of the reactive oxygen species (ROS) activity of atmospheric particulate matter (PM) and application to routine (daily-24 h) aerosol monitoring studies[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2008, **42**(11): 946-957.
- [22] Chen Q C, Wang M M, Wang Y Q, *et al.* Oxidative potential of water-soluble matter associated with chromophoric substances in $PM_{2.5}$ over Xi'an, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(15): 8574-8584.
- [23] Kumagai Y, Koide S, Taguchi K, *et al.* Oxidation of proximal protein sulfhydryls by phenanthraquinone, a component of diesel exhaust particles[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2002, **15**(4): 483-489.
- [24] Verma V, Fang T, Xu L, *et al.* Organic aerosols associated with the generation of reactive oxygen species (ROS) by water-soluble $PM_{2.5}$ [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(7): 4646-4656.
- [25] Lin P, Yu J Z. Generation of reactive oxygen species mediated by humic-like substances in atmospheric aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(24): 10362-10368.
- [26] Verma V, Rico-Martinez R, Kotra N, *et al.* Contribution of water-soluble and insoluble components and their hydrophobic/hydrophilic subfractions to the reactive oxygen species-generating potential of fine ambient aerosols[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(20): 11384-11392.
- [27] Tong H J, Arangio A M, Lakey P S J, *et al.* Hydroxyl radicals from secondary organic aerosol decomposition in water [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(3): 1761-1771.
- [28] Li J W, Chen Q C, Hua X Y, *et al.* Occurrence and sources of chromophoric organic carbon in fine particulate matter over Xi'an, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **725**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138290.
- [29] 罗浩. 典型城市和区域大气颗粒物浓度时空变化及辐射效应[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- Luo H. Spatiotemporal variations and radiative effects of atmospheric particulate matter concentration in typical cities and region[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2020.
- [30] 白冰. 我国北方地区大气气溶胶分布输送特征及其对夏季风活动的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- Bai B. The distribution and transport of air aerosol in Northern China and its response to the summer monsoon[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [31] 张帅, 李光华, 邓顺熙, 等. 西安市典型道路扬尘排放清单及化学组分[J]. *环境科学学报*, 2022, **42**(6): 318-328.
- Zhang S, Li G H, Deng S X, *et al.* Emission inventory and chemical compositions of fugitive dust sources at typical roads in Xi'an, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, **42**(6): 318-328.
- [32] Chen Q C, Li J W, Hua X Y, *et al.* Identification of species and sources of atmospheric chromophores by fluorescence excitation-emission matrix with parallel factor analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **718**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137322.
- [33] Chen Q C, Miyazaki Y, Kawamura K, *et al.* Characterization of chromophoric water-soluble organic matter in urban, forest, and marine aerosols by HR-ToF-AMS analysis and excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(19): 10351-10360.
- [34] 朱鑫, 陈庆彩, 王擎雯, 等. 西安市大气颗粒物中棕碳的吸光性研究[J]. *大气与环境光学学报*, 2022, **17**(1): 125-134.
- Zhu X, Chen Q C, Wang Q W, *et al.* Absorbance of brown carbon in atmospheric particulate matter in Xi'an[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2022, **17**(1): 125-134.
- [35] Chen Q C, Ikemori F, Mochida M. Light absorption and excitation-emission fluorescence of urban organic aerosol components and their relationship to chemical structure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(20): 10859-10868.
- [36] Pöhlker C, Huffman J A, Pöschl U. Autofluorescence of atmospheric bioaerosols-fluorescent biomolecules and potential interferences[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, **5**(1): 37-71.
- [37] 汪鹏, 郭洁, 陆旦, 等. 基于光谱法解析污水厂 DOM 转化与 DBPs 生成特征[J]. *中国给水排水*, 2023, **39**(5): 53-59.
- Wang P, Guo J, Lu D, *et al.* Dissolved organic matter conversion and disinfection by-products formation characteristics in wastewater treatment plant based on spectral analysis [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, **39**(5): 53-59.
- [38] 马晓云. 南京地区 $PM_{2.5}$ 氧化潜能及细胞毒性研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [39] Boyle E S, Guerriero N, Thiallet A, *et al.* Optical properties of humic substances and CDOM: relation to structure [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(7): 2262-2268.
- [40] 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 等. 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[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1882-1889.
- Luo Y, Huang S S, Zhang T, *et al.* Pollution characterizations and oxidative potentials of different polarity level's water-soluble organic matters in winter $PM_{2.5}$ over Xi'an [J]. *Environmental*

- Science, 2023, **44**(4): 1882-1889.
- [41] Chen Q C, Mu Z, Song W H, *et al.* Size - resolved characterization of the chromophores in atmospheric particulate matter from a typical coal - burning city in China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, **124**(19): 10546-10563.
- [42] 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 等. 承德市 PM_{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- He B W, Nie S S, Li Y L, *et al.* Seasonal distribution characteristics, source analysis, and health risk evaluation of PAHs in PM_{2.5} in Chengde[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2343-2354.
- [43] Cao J J, Zhu C S, Tie X X, *et al.* Characteristics and sources of carbonaceous aerosols from Shanghai, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(2): 803-817.
- [44] Yang H N, Chen J, Wen J J, *et al.* Composition and sources of PM_{2.5} around the heating periods of 2013 and 2014 in Beijing: implications for efficient mitigation measures[J]. Atmospheric Environment, 2016, **124**: 378-386.
- [45] Ntziachristos L, Froines J R, Cho A K, *et al.* Relationship between redox activity and chemical speciation of size-fractionated particulate matter[J]. Particle and Fibre Toxicology, 2007, **4**(1): 5.
- [46] Chung M Y, Lazaro R A, Lim D, *et al.* Aerosol-borne quinones and reactive oxygen species generation by particulate matter extracts[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(16): 4880-4886.
- [47] 王嘉琦, 赵时真, 田乐乐, 等. 基于 DTT 法评估大气颗粒物氧化潜能的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, **17**(2): 20-32.
- Wang J Q, Zhao S Z, Tian L L, *et al.* Research advance in use of dithiothreitol assay to evaluate particulate matter oxidative potential[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, **17**(2): 20-32.
- [48] Fang T, Zeng L H, Gao D, *et al.* Ambient size distributions and lung deposition of aerosol dithiothreitol-measured oxidative potential: contrast between soluble and insoluble particles[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(12): 6802-6811.
- [49] Li N, Sioutas C, Cho A, *et al.* Ultrafine particulate pollutants induce oxidative stress and mitochondrial damage [J]. Environmental Health Perspectives, 2003, **111**(4): 455-460.
- [50] Jiang H H, Ahmed C M S, Canchola A, *et al.* Use of dithiothreitol assay to evaluate the oxidative potential of atmospheric aerosols[J]. Atmosphere, 2019, **10**(10): 571.
- [51] Charrier J G, Anastasio C. On dithiothreitol (DTT) as a measure of oxidative potential for ambient particles: evidence for the importance of soluble transition metals [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(5): 11317-11350.
- [52] See S W, Wang Y H, Balasubramanian R. Contrasting reactive oxygen species and transition metal concentrations in combustion aerosols[J]. Environmental Research, 2007, **103**(3): 317-324.
- [53] Komárek M, Vaněk A, Ettler V. Chemical stabilization of metals and arsenic in contaminated soils using oxides-a review [J]. Environmental Pollution, 2013, **172**: 9-22.
- [54] 张俊辉, 张健, 王晓静, 等. 西安市大气降尘的磁学特征及其环境意义[J]. 中国沙漠, 2015, **35**(3): 699-706.
- Zhang J H, Zhang J, Wang X J, *et al.* Magnetic properties of dustfall and its environmental significance in Xi'an, China[J]. Journal of Desert Research, 2015, **35**(3): 699-706.
- [55] 李建军, 沈振兴, 同帆, 等. 西安冬春季 PM₁₀ 中碳气溶胶的昼夜变化特征[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1506-1513.
- Li J J, Shen Z X, Tong Z, *et al.* Day-night variation of carbonaceous aerosols in PM₁₀ during winter and spring over Xi'an [J]. Environmental Science, 2009, **30**(5): 1506-1513.
- [56] 谭学士. 天津市大气颗粒物中 OC/EC 污染特征与细粒径来源解析[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- Tan X S. Concentration and size distribution of OC/EC in atmospheric aerosol in Tianjin, China [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [57] 吴继炎, 杨池, 张春燕, 等. 保定市冬季 PM_{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(6): 2878-2887.
- Wu J Y, Yang C, Zhang C Y, *et al.* Analysis on the characteristics of oxidation potential and influence sources of PM_{2.5} in Baoding City in winter[J]. Environmental Science, 2022, **43**(6): 2878-2887.
- [58] Brooks J, Shaw G. Sporopollenin: a review of its chemistry, palaeochemistry and geochemistry[J]. Grana, 1978, **17**(2): 91-97.
- [59] Roshchina V V. Autofluorescence of plant secreting cells as a biosensor and bioindicator reaction[J]. Journal of Fluorescence, 2003, **13**(5): 403-420.
- [60] Roshchina V V, Yashin V A, Kononov A V. Autofluorescence of developing plant vegetative microspores studied by confocal microscopy and microspectrofluorimetry [J]. Journal of Fluorescence, 2004, **14**(6): 745-750.
- [61] 孙浩堯, 王玛敏, 陈庆彩. 大气活性氧物质污染特征、机制及其来源研究进展[J]. 环境化学, 2022, **41**(6): 2052-2061.
- Sun H Y, Wang M M, Chen Q C. Advances in research on the pollution characteristics, mechanisms and sources of active reactive oxygen species in the atmosphere [J]. Environmental Chemistry, 2022, **41**(6): 2052-2061.
- [62] 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 等. 郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5429-5441.
- Qi Y J, Wang L L, Ni J W, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient summer volatile organic compounds in Zhengzhou, China[J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5429-5441.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhui River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)