

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

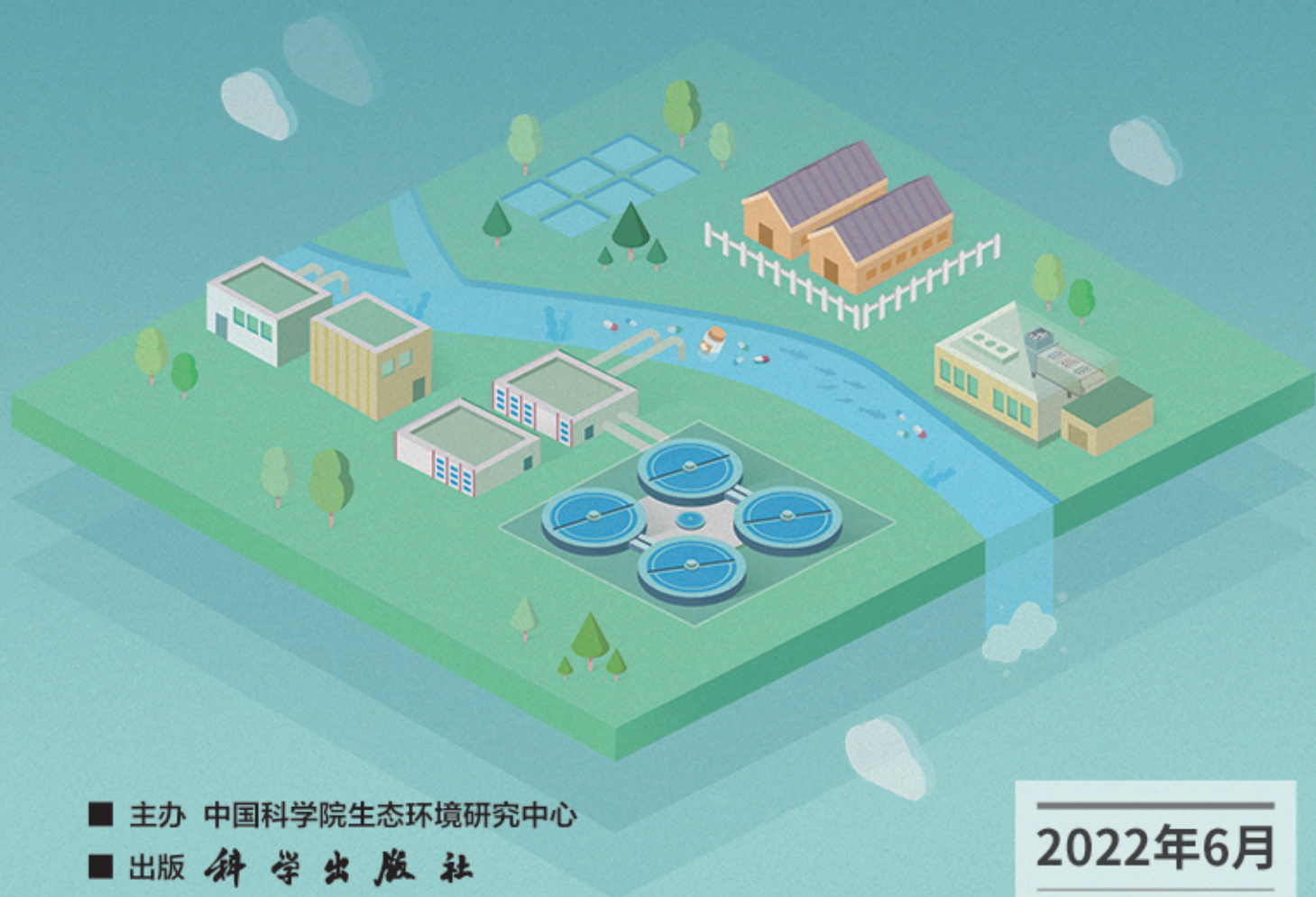
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁敏, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐藤, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

保定市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的氧化潜势特征及其影响来源分析

吴继炎^{1,2}, 杨池^{1,2}, 张春燕^{1,2}, 范美益^{1,2}, 吴爱坪^{1,2}, 章炎麟^{1,2*}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044)

摘要: 为了探究保定市郊区 2018 年冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 氧化潜势的特征及其影响来源, 利用二硫苏糖醇 (DTT) 测定法对 $\text{PM}_{2.5}$ 中活性氧进行测定, 采用皮尔逊相关分析 $\text{PM}_{2.5}$ 中各化学成分与氧化潜势的关系, 并且利用 PMF 对 DTT_v 进行污染源解析。结果表明, 冬季保定市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 平均值为 $(140.96 \pm 70.67) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 高于同时期北京 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。氧化潜势的 DTT_v 和 DTT_m 值均表现出白天高于夜间的情况 [DTT_v 白天为 $(2.37 \pm 0.76) \text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$, 夜间为 $(2.14 \pm 1.17) \text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$; DTT_m 白天为 $(0.96 \pm 0.60) \text{pmol} \cdot (\text{min} \cdot \mu\text{g})^{-1}$, 夜间为 $(0.76 \pm 0.41) \text{pmol} \cdot (\text{min} \cdot \mu\text{g})^{-1}$]。这表明白天的大气环境更有利于活性氧的生成和存活。另外, 通过对 DTT_v 与糖类化合物、无机盐离子、OC、EC 和水溶性金属等相关性分析, 发现金属 Fe、草酸根和 NH_4^+ 与 DTT_v 在昼夜均存在较高相关性 (白天: $r=0.790$, $P<0.01$, 晚上: $r=0.960$, $P<0.01$; 白天: $r=0.609$, $P<0.01$, 晚上: $r=0.577$, $P<0.01$; 白天: $r=0.627$, $P<0.01$, 晚上 $r=0.586$, $P<0.01$), 另外 OC、左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳糖仅仅在白天与 DTT_v 相关性较高 ($r=0.675$, $P<0.01$; $r=0.701$, $P<0.01$; $r=0.662$, $P<0.01$; $r=0.671$, $P<0.01$)。最后, 利用 PMF 模型对 DTT_v 进行源解析, 发现影响 DTT_v 的污染源主要有次生来源 (29.9%)、生物质燃烧 (29.2%)、扬尘 (11.2%)、矿物粉尘和工业来源 (8.6%) 和交通源 (21.1%) 这 5 种, 次生来源和生物质燃烧对 DTT_v 的影响占主要地位。

关键词: 大气颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$); 氧化潜势 (OP); 二硫苏糖醇 (DTT); 活性氧 (ROS); PMF 源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)06-2878-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202109265

Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of $\text{PM}_{2.5}$ in Baoding City in Winter

WU Ji-yan^{1,2}, YANG Chi^{1,2}, ZHANG Chun-yan^{1,2}, FAN Mei-yi^{1,2}, WU Ai-ping^{1,2}, ZHANG Yan-lin^{1,2*}

(1. International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to explore the characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ oxidation potential and its impact sources in the suburbs of Baoding City in the winter of 2018, the dithiothreitol (DTT) method was used to determine the reactive oxygen species in $\text{PM}_{2.5}$. Pearson correlation was used to analyze the relationship between the chemical components in $\text{PM}_{2.5}$ and the oxidation potential. PMF was used to analyze the pollution source of DTT_v. Firstly, the results showed that the average value of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in Baoding in winter was $(140.96 \pm 70.67) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ higher than the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing during the same period. Secondly, both the DTT_v and DTT_m values of the oxidation potential were higher during the day than those at night [DTT_v was $(2.37 \pm 0.76) \text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ during the day and $(2.14 \pm 1.17) \text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$ at night; DTT_m was $(0.96 \pm 0.60) \text{pmol} \cdot (\text{min} \cdot \mu\text{g})^{-1}$ during the day and $(0.76 \pm 0.41) \text{pmol} \cdot (\text{min} \cdot \mu\text{g})^{-1}$ at night]. This showed that the atmospheric environment during the day was more conducive to the generation and survival of active oxygen. In addition, through the analysis of the correlation between DTT_v and carbohydrates, inorganic salt ions, OC, EC, and water-soluble metals, it was found that metal Fe, oxalate, and NH_4^+ had a high correlation with DTT_v both day and night (during the day: $r=0.790$, $P<0.01$, at night: $r=0.960$, $P<0.01$; during the day: $r=0.609$, $P<0.01$, at night: $r=0.577$, $P<0.01$; during the day: $r=0.627$, $P<0.01$, at night: $r=0.586$, $P<0.01$), and OC, levoglucan, mannan, and galactan were only highly correlated with DTT_v in the daytime ($r=0.675$, $P<0.01$; $r=0.701$, $P<0.01$; $r=0.662$, $P<0.01$; $r=0.671$, $P<0.01$). Finally, according to the PMF source analysis, there were five main pollution sources that affected DTT_v: secondary sources (29.9%), biomass combustion (29.2%), dust (11.2%), mineral dust and industrial sources (8.6%), and traffic sources (21.1%). The influence of secondary sources and biomass combustion on DTT_v was dominant.

Key words: atmospheric particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$); oxidation potential (OP); dithiothreitol (DTT); reactive oxygen species (ROS); PMF source analysis

空气质量是影响人口健康的一个重要问题, 大量流行病学和毒理学研究表明, 环境颗粒物 (PM) 暴露与人类健康不良影响之间存在关系, 主要是呼吸道和心血管疾病^[1~3]。迄今为止, 已提出可靠度较高的病理生理机制均涉及活性氧 (reactive oxygen species, ROS) 的生成, 活性氧可激活许多条氧化还原信号通路, 触发一系列与炎症和潜在细胞凋亡相关的事件^[1,3~8], 氧化潜势 (OP) 被定义为粒子消耗

生理抗氧化剂 (还原剂) 并具有生成活性氧的能力。OP 被提议作为一种比 PM 浓度更具生物相关性的指标, 以代表 PM 中多种有毒成分的综合效应^[9~11]。目前常见的脱细胞 OP 分析包括电子自旋 (或顺磁)

收稿日期: 2021-09-26; 修订日期: 2021-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977305); 江苏省双创团队项目; 江苏省杰出青年基金项目 (BK20180040)

作者简介: 吴继炎 (1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物的氧化潜势特征, E-mail: 20201248014@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dryanlinzhang@outlook.com

共振(ESR)、二硫苏糖醇分析(DTT)、抗坏血酸分析(AA)和谷胱甘肽分析(GSH). 相比而言, DTT 方法的发展比较迅速, 一般认为 DTT 法是最能全面反映颗粒物化学氧化潜势大小的方法^[3,12,13].

近年来, 国内外很多学者开始关注大气环境颗粒物氧化电位的研究, 发现腐植酸(HULIS)^[14,15]、过渡金属(Fe、Cu、Mn)^[16~18]和有机碳(OC)^[19~21]在颗粒物中对氧化潜势的大小有明显的影响. 由此可见, 各区域颗粒物氧化潜势的大小与各区域大气颗粒物化学成分的不同密切相关. 保定市作为京津冀地区的交界地带, 近年来经济快速发展, 大气环境仍然存在明显的污染. 而针对京津冀地区氧化潜势的研究数量较少, 本研究基于 DTT 法模拟人体肺液环境, 测定了保定市的氧化潜势, 分析了大气中各化学组分对氧化潜势的影响, 并且利用 PMF 模型对影响氧化潜势特征的污染类型进行分析, 以期为精确的控制污染提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 采样地点

在保定市固城镇(115.74°E, 39.16°N), 固城的观测点位于中国气象科学研究院生态农业气象试验站. 采样期为2018年11月13日至12月6日, 区分白天(07:30~18:00)和夜间(18:00~次日07:30), 总共采样50个. 采样使用的石英滤膜需要用锡纸提前包被, 在马弗炉中450℃燃烧6 h, 去除杂质. 正式采样时, 通过大流量 PM_{2.5} 空气采样器以 1.0 m³·min⁻¹ 的流速采集颗粒物样品, 再将最终样品保存在 -26℃ 的冰箱中, 防止挥发性物质损失.

1.2 PM_{2.5} 样品中的离子、糖类化合物、水溶性金属、有机碳和元素碳分析

水溶性无机离子(NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺、Cl⁻、Na⁺、K⁺和Ca²⁺)由离子色谱仪(ICS 5000+, Thermo Scientific, USA)测定. 将一片面积为 2.54 cm² 的取样过滤器浸入装有 15 mL 超纯水的小瓶中, 密封超声处理 30 min 进行提取. 所有离子的方法检出限(MDL)和回收率分别处于 0.03~0.41 ng·m⁻³ 和 90%~110% 的范围内, 精密度小于 2%.

糖类化合物(左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖), 本研究使用 ICS-5000+ 型离子色谱仪检测大气颗粒物中糖类化合物含量. 离子色谱仪的检测单元为电化学检测器. 分离系统为 Dionex CarboPac MA1 保护柱与分析柱. 为更准确地分离并检测糖类, 全部样品通过两套 NaOH 梯度淋洗方案淋洗, 流速均设置为 0.4 mL·min⁻¹, 样品注射回路体积为 200 μL.

水溶性金属(Fe、Cu 和 Mn), 通过电感耦合等离子体质谱仪(ICP-OES, PerkinElmer 公司, 美国)进行分析. 切直径 16 mm 的膜两张, 加入 10 mL 超纯水, 振荡 30 min, 再用 0.22 μm 的滤头过滤后即可进样, 并通过电感耦合等离子体质谱法分析 23 种目标金属^[22]. 电感耦合等离子体质谱法的金属输出浓度单位为 ng·mL⁻¹. 水溶性金属的浓度通过以下公式从 ng·mL⁻¹ 转换为 ng·m⁻³:

$$C(\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}) = c(\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}) \times 25 \times F/v \quad (1)$$

式中, F 为每个气溶胶样品中提取的过滤面积与总采样过滤面积的比率, v 为每个气溶胶样品中的采样空气量(m³). 通过对 NIST SRM 1648(城市颗粒物)的分析来确保质量保证/质量控制. 该方法每种元素的精密度小于 2%, 回收率在 93%~116% 范围内. 所有元素的检出限为 0.01~2.09 ng·m⁻³.

使用半连续碳分析仪(型号 4, Sunset Lab. Inc. USA)进行碳分析. 在 310、480、615℃、870、0 和 550℃ 的氦气环境(99.99% He)以及 550、625、700、775、850 和 870℃ 的氧化性环境(1% O₂ + 99% He)中逐步加热 2.27 cm² 穿孔过滤器, 以获得 OC 和 EC 浓度. 检测限约为 0.20 μg·m⁻³. 在分析样品之前, 用已知量的蔗糖校准分析仪. 碳的回收率为 98%, 精密度为 4%.

1.3 氧化潜势的评估

首先, 将采集样品进行萃取处理, 切割 2 份直径 16 mm 的样品膜放入棕色玻璃瓶中, 加入 5 mL 超纯水振荡 30 min, 利用 0.22 μm PTFE 注射式过滤器过滤以去除不溶物质. 然后, 取 1.5 mL 样品溶液和 5 mL 0.1 mol·L⁻¹ 的磷酸钾溶液(71.8 mmol·L⁻¹ 磷酸氢二钾 + 28.2 mmol·L⁻¹ 磷酸二氢钾, 配好后将 pH 调至 7.4)混合在一个 15 mL 混合瓶中. 加入 0.5 mL 的 100 μmol·L⁻¹ DTT 加入到反应混合物中, 并放在 37℃、转速 250 r·min⁻¹ 的恒温振荡器(THZ-D, 苏州培英实验设备有限公司)中反应. 在指定的时间间隔(0、10、20、30 和 40 min), 依次取出 0.5 mL 反应混合物, 转移到另一个装有 0.5 mL 10% (质量浓度)三氯乙酸(TCA)的反应瓶中, 用于终止 DTT 和样品溶液之间的反应. 接下来, 加入 50 μL 0.1 mmol·L⁻¹ DTNB[5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)]与溶液中剩余的 DTT 进行反应. 最后, 加入 2 mL 0.4 mol·L⁻¹ Tris 缓冲液(0.4 mol·L⁻¹ Tris + 20 mmol·L⁻¹ 的 EDTA, 配好后将 pH 调至 8.9). 利用分光光度计检测波长为 412 nm 的条件下的吸光度, 分光光度计由一个紫外可见(UV-VIS)光源(海洋光学 DT-mini-2)和一个多波长光检测器(USB4000 微型光纤光谱仪)组成. 使用数据采集软件(Spectra

Suite) 记录 412 和 700 nm 处的吸光度强度(选择作为 TNB 的基线吸光度)。

测试得到的吸光度数据需要进行斜率计算处理得到 DTT 消耗速率(r),经体积归一化和质量归一化计算得到 DTT_v [$\text{nmol} \cdot (\text{min} \cdot \text{m}^3)^{-1}$] 和 DTT_m [$\text{pmol} \cdot (\text{min} \cdot \mu\text{g})^{-1}$],其计算公式如下:

$$DTT_v = (r_s - r_b) / (V_l \times V_s / V_e) \quad (2)$$

$$DTT_m = (r_s - r_b) / (M_l \times V_s / V_e) \quad (3)$$

式中, r_s 为样品的 DTT 消耗速率($\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1}$), r_b 为空白的 DTT 消耗速率($\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1}$), V_l 为样品对应的采样体积(m^3), M_l 为样品对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), V_s 为进样体积(mL), V_e 为采样体积(mL)。 DTT_v 为每单位体积大气颗粒物对 DTT 的消耗速率,一般认为该值与人体健康有关。 DTT_m 为单位质量颗粒物的 DTT 消耗速率,被认为是衡量环境颗粒物固有的氧化潜势的指标^[23,24]。

1.4 质量控制

在采样过程中,为去除滤膜中有机杂质对分析的影响,在不开仪器的条件下收集 1 张空白膜样品作为野外空白样品,滤膜在恒温恒湿的天平室中称重(精确到 0.1 mg,采样后滤膜两次称重误差小于 0.5 mg)。

水溶性离子浓度测定后均进行空白校正,扣除采样、操作过程带入的污染,即样品值减去空白值,测标准样品(浓度为 0.05、0.1、0.2、0.5、1、2、5 和 10 $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$),制作标准曲线时保证各种离子的峰面积与浓度之间的相关系数在 99.9% 以上,标准曲线满足要求后进行测样。

在利用半连续碳分析仪进行有机碳和元素碳分析时,每次样品分析结束后,仪器都会通入定量的氮气/甲烷(He/CH_4)标气,用 CH_4 标准峰来定量样品分析结果和校正 NDIR 在每次样品分析过程中可能发生的漂移。测样开始前和结束后用标准蔗糖溶液进行外标校正,采用内外标联合校正确保仪器具有较高的精准度,其检出限为 0.5 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。分析样品过程进行空白校正。

在进行氧化潜势评估实验时,通过测量不同浓度下 DTT(0、1、2、5、10、15、20、25、50、75 和 100 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)的消耗速率进行标准曲线的绘制,制作标准曲线相关系数在 99.9% 以上,可以进行测样。每次测样之前进行空白检测,以消除空白干扰。

1.5 其他数据来源

气象数据来源于国控数据保定市地面气象站点。

1.6 污染源分析

PMF 模型基于受体点的化学组分浓度估算排

放源的组成和对有机物浓度的贡献。本研究使用的是由美国环境保护局开发的 PMF5.0 对冬季 DTT_v 进行来源解析。

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^n g_{ki} f_{kj} + e_{ij} \quad (4)$$

式中, x_{ij} 为在第 i 个样品中测量的第 j 个化学成分的浓度, g_{ki} 为第 k 个因子对第 i 个样品贡献率, f_{kj} 为第 k 个因子中第 j 种化学成分的含量, e_{ij} 为实测值和模型估值的残差, n 为因子的总数。如果输入元素的浓度大于其检测限(MDL),则不确定度(Unc)按下式计算:

$$\text{Unc} = \sqrt{(\text{concentration} \times \text{EF})^2 + \text{MDL}^2} \quad (5)$$

式中,EF 为求积相加的相对误差分数(5%)。如果浓度小于检出限(MDL),则浓度为检出限的一半,其不确定度为检出限的 5/6。

2 结果与讨论

2.1 气象数据和化学物质浓度变化

在采样期间,环境温度的平均值为 $(1.8 \pm 3.9)^\circ\text{C}$,范围为 $-5 \sim 9^\circ\text{C}$; 相对湿度的平均值为 $(65.3 \pm 23.8)\%$,范围为 19%~98%(图 1)。风速从 $0 \sim 4.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均值为 $(1.3 \pm 1.1) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。气压相对稳定保持在 102 kPa 左右。能见度从 0.5~22 km,平均值为 $(9.4 \pm 6.5) \text{ km}$ 。在能见度较低的天气明显呈现出相对湿度较高和风速较低的现象,表明冬季平静条件(风速 $< 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)和潮湿空气是形成雾和霾的重要因素^[25,26]。

保定市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 的平均值为 $(140.96 \pm 70.67) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,颗粒物浓度远高于同时期的北京地区^[27] [$(67.29 \pm 61.89) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]。白天和夜间并无明显的区别。表 1 显示了本实验测定的水溶性组分(Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-})、水溶性金属(Fe、Cu 和 Mn)、OC、EC、TC 和糖类化合物(左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖)的昼夜平均值。保定市的 $\rho(\text{OC})$ 、 $\rho(\text{EC})$ 和 $\rho(\text{TC})$ 平均值分别为 (36.09 ± 16.64) 、 (3.56 ± 1.82) 和 $(39.65 \pm 18.14) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,明显高于同时期北京地区浓度 [$\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 分别为 (17.88 ± 12.25) 、 (1.77 ± 1.32) 和 $(30.53 \pm 11.09) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]^[15]。OC 有两个主要来源,一是化石燃料燃烧直接排放到大气中形成的一次有机气溶胶,二是经过化学反应生成的二次有机气溶胶,而 EC 的主要来源于化石燃料的不完全燃烧。根据表 1,本文发现 OC、EC 和 TC 浓度夜间明显高于日间。与此同时,还发现糖类化合物(左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖)的浓度同样表现出夜间明显高于日间的现象。左旋葡聚糖、甘

露聚糖和半乳聚糖作为典型的生物质燃烧的示踪物,这一点也符合保定郊区冬季利用生物质燃烧取暖的现状.另外,保定市水溶性离子平均值大小为: $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{草酸根} > \text{Na}^+$, 最高的 $\rho(\text{NO}_3^-)$ 平均值为 $(23.20 + 16.73) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 本实验还测量了保定市大气中与气溶胶毒性相关的 3 种过渡金属^[28], 包括 Fe、Cu 和 Mn, 由表 1 可知, 在保定市的大气金属浓度中, Fe 的

浓度最高, Cu 的浓度其次, Mn 的浓度最低, 这一点与亚特兰大地区^[29] 的 Cu 和 Fe 明显高于 Mn 的报道相同. $\rho(\text{Fe})$ 在保定市地区并无明显昼夜差别, 全天的平均值为: $(81.16 \pm 39.88) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 在大气中 $\rho(\text{Cu})$ 仅为 $(4.83 \pm 3.05) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 但存在一定的昼夜差异, 白天明显高于晚上. Mn 浓度最低, 并且存在明显的昼夜差异, 在白天 $\rho(\text{Mn})$ 为 $(2.06 \pm 2.42) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 晚上 $\rho(\text{Mn})$ 为 $(1.54 \pm 1.35) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$.

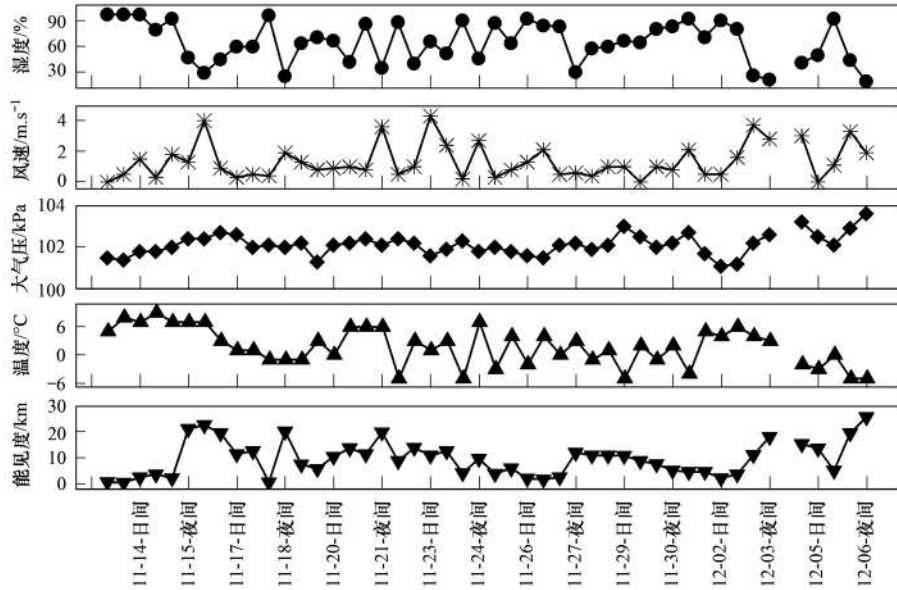


图 1 2018 年采样期间气象数据日变化
Fig. 1 Daily changes in meteorological data during the sampling period in 2018

表 1 PM_{2.5} 化学成分的平均值

项目	保定市全天		白天		晚上	
	平均数	标准偏差	平均数	标准偏差	平均数	标准偏差
PM _{2.5} /μg·m ⁻³	140.96	71.43	141.55	70.83	151.80	71.39
OC/μg·m ⁻³	36.09	16.64	31.29	15.87	43.30	15.31
EC/μg·m ⁻³	3.56	1.82	3.18	1.97	4.22	1.41
TC/μg·m ⁻³	39.65	18.14	34.47	17.37	47.52	16.50
半乳聚糖/ng·m ⁻³	425.21	358.22	312.72	311.89	543.62	365.60
甘露聚糖/ng·m ⁻³	153.56	120.08	118.14	109.02	190.84	119.89
左旋葡聚糖/ng·m ⁻³	1329.07	953.86	974.39	797.91	1702.41	962.09
Cl ⁻ /μg·m ⁻³	5.66	3.15	5.09	2.77	6.40	3.42
NO ₃ ⁻ /μg·m ⁻³	23.20	16.73	24.25	18.52	22.07	14.50
SO ₄ ²⁻ /μg·m ⁻³	12.97	10.95	13.04	12.48	13.00	8.94
草酸根/μg·m ⁻³	0.51	0.31	0.59	0.30	0.45	0.28
Na ⁺ /μg·m ⁻³	0.34	0.25	0.44	0.27	0.26	0.17
NH ₄ ⁺ /μg·m ⁻³	13.26	9.39	13.06	10.18	13.51	8.58
K ⁺ /μg·m ⁻³	1.87	0.99	1.73	0.94	2.08	0.99
Mg ²⁺ /μg·m ⁻³	0.91	0.63	1.01	0.72	0.80	0.47
Ca ²⁺ /μg·m ⁻³	3.27	2.42	4.52	2.71	2.21	1.48
Cu(水溶性)/ng·m ⁻³	4.83	3.05	5.55	3.27	4.35	2.70
Fe(水溶性)/ng·m ⁻³	81.16	39.88	82.99	32.64	82.56	48.86
Mn(水溶性)/ng·m ⁻³	1.77	1.90	2.06	2.42	1.54	1.35

2.2 保定市氧化潜势的特征分布

利用 DTT 法测量了保定市地区大气样品的氧化潜势(OP),通过体积归一化氧化潜势 DTT_v 和质

量归一化氧化潜势 DTT_m 作为吸入空气的暴露指标,来表征粒子耗尽相关抗氧化剂的内在能力. 观测期间,保定市的 DTT_v 和 DTT_m 日变化如图 2 所示,

DTT_v 在白天和夜间分别是 (2.37 ± 0.76) nmol·(min·m³)⁻¹ 和 (2.14 ± 1.17) nmol·(min·m³)⁻¹, DTT_m 在白天和夜间分别是 (0.96 ± 0.60) pmol·(min·μg)⁻¹ 和 (0.76 ± 0.41) pmol·(min·μg)⁻¹. 由此可见, 无论是 DTT_v 还是 DTT_m, 白天的相关数值均高于夜间, 这表明白天的 大气环境更有利于活性氧的生成和存活. 与北京 2012 年 春季时^[30] 的 DTT_v [城区: 0.24 nmol·(min·m³)⁻¹, 郊区: 0.19 nmol·(min·m³)⁻¹] 和 浙 江 大 学^[31] 全 年 的 DTT_v 平 均 值 0.62 nmol·(min·m³)⁻¹ 相比, 本实验结果偏高; 与北京大

学^[32] 2015 年全年的 DTT_v 平均值 [(12.26 ± 6.82) nmol·(min·m³)⁻¹] 和 DTT_m 平均值 [(130 ± 100) pmol·(min·μg)⁻¹], 以及广州^[33] 在 2017 年 冬 季 [DTT_v: (4.67 ± 1.06) nmol·(min·m³)⁻¹, DTT_m: (13.47 ± 3.86) pmol·(min·μg)⁻¹] 和 2018 年 春 季 的 [DTT_v: (4.45 ± 1.02) nmol·(min·m³)⁻¹, DTT_m: (14.66 ± 4.49) pmol·(min·μg)⁻¹] 相比, 本实验值 偏低, 这可能与当时的季节和排放因素有关. 如图 2 所示, 在严重污染期间, DTT_v 的值也相应显示高 值, 但 DTT_m 没有这种趋势, 表明颗粒物中的物质并 非都能引发活性氧的产生, 并改变氧化潜势.

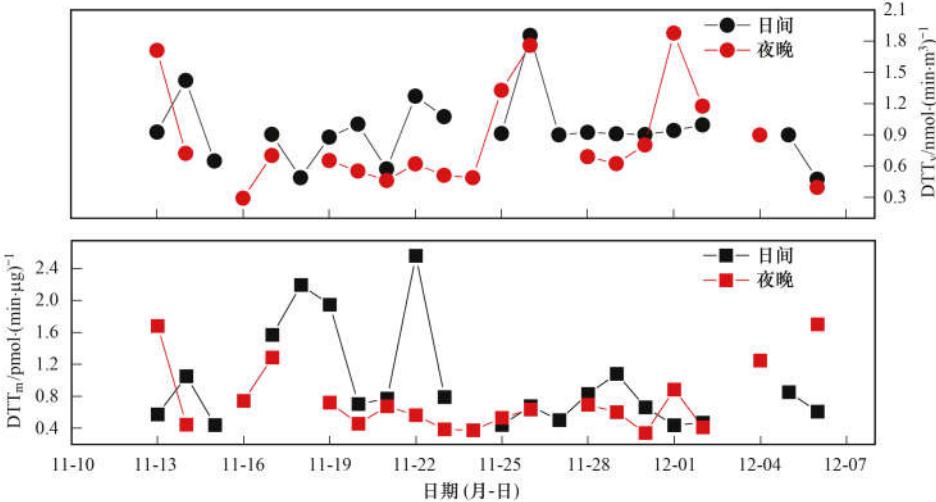


图 2 2018 年观测期间保定市的 DTT_v 和 DTT_m 时间序列

Fig. 2 Time series of DTT_v and DTT_m in Baoding during the observation period in 2018

2.3 DTT_v 与各化学成分相关性分析

通过计算 OP 响应与实测环境参数之间的线性 回归, 确定了气象特征 (大气压、湿度、温度和能见 度) 和 PM 化学成分对氧化潜势的影响. 如表 2 所 示, 在白天和夜晚 DTT_v 与温度无显著相关, DTT_v 与相对湿度 (RH)、大气压和风速有一定的关系. 保定市夜晚的湿度与 DTT_v 相关性更强 (*r* = 0.702, *P* < 0.01). 这一点与 Perrone 等^[34] 的研 究结果一致, 在一定相对湿度范围中下, RH 是影响 了 DTT_v 的大小. 然而, 大气压与 DTT_v 呈现明显的 负相关 (*r* = -0.458, *P* < 0.01), 尤其是夜晚 (*r* = -0.611, *P* < 0.01), 可能是由于冬季夜晚大气层 结稳定, 边界层高度低, 降水少, 污染物易于积聚 累积. 这些结果表明, 气象参数与 DTT_v 值的高相 关性可能分别与低风速、大气压和湿度有利于形 成粒子有关, 而对大气的温度有利于形成的颗粒 不太敏感^[35-37].

为了更好地研究昼夜氧化潜势和 PM 化学成分 之间的联系, 应用简单线性回归 (图 3 中的皮尔逊 相关系数 *r*) 研究特定 PM_{2.5} 组分对氧化潜势的贡

献. 总的来说, DTT_v 响应在显著性水平 *P* < 0.05 上 与 18 种物种广泛相关, 即 OC、EC、TC, 金属 (如 Cu、Fe、Mn), 糖类化合物以及水溶性无机成分. Calas 等^[35] 的研究指出夏蒙尼市 (法国) PM_{2.5} 样 品的 OP 响应和化学成分出现类似的结果. 根据昼夜 性 (即白天和夜晚) 对数据进行的区分, 清楚地显示 了相关系数的昼夜差异性, 表明昼夜变化对 DTT_v 的影响.

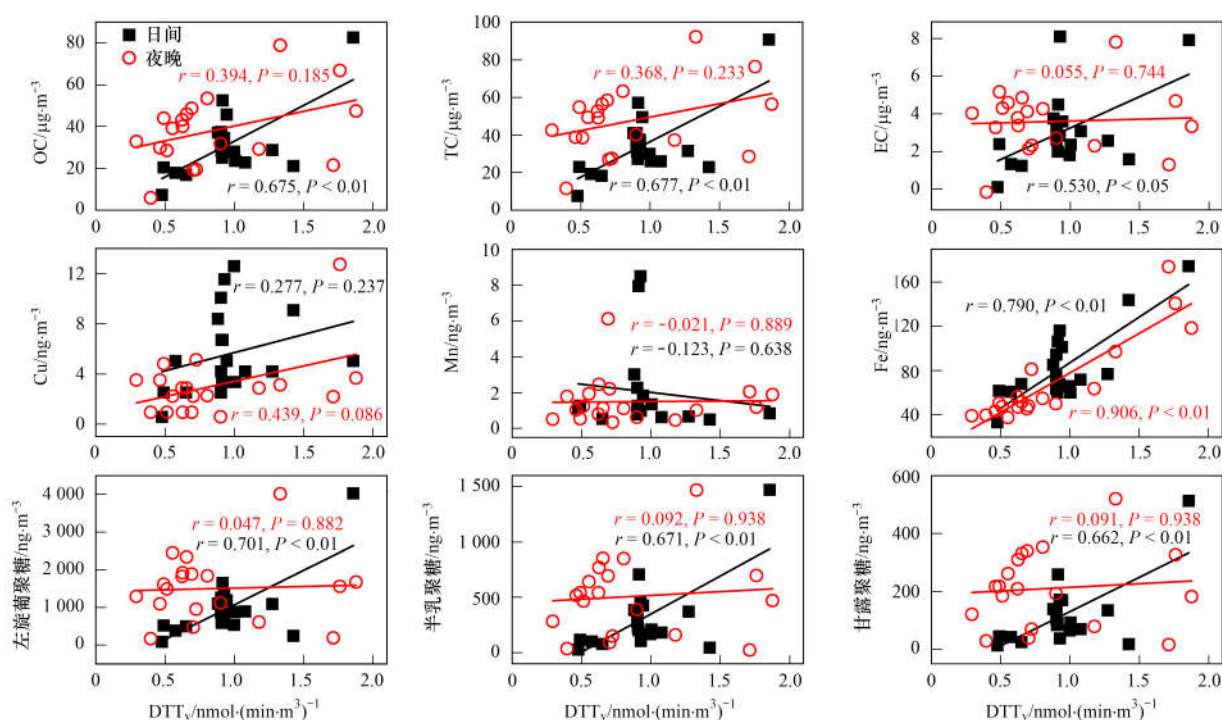
表 2 DTT_v 与气象参数的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 2 Correlation analysis between DTT_v and meteorological parameters

	DTT _v		
	白天	夜晚	全天
湿度	0.268	0.702 **	0.520 **
风速	-0.015	-0.203	-0.132
大气压	-0.394	-0.611 **	-0.458 **
温度	-0.037	0.246	0.078
能见度	-0.296	-0.758 **	-0.580 **

1) ** 表示 *P* < 0.01, * 表示 *P* < 0.05

分析表明: OC、EC 和 TC 在白天与 DTT_v 存在 明显的相关性 (*r* = 0.675, *P* < 0.01; *r* = 0.530, *P* <

图3 化学成分与 DTT_v 相关性分析Fig. 3 Correlation analysis of chemical composition and DTT_v

0.05; $r=0.676$, $P<0.01$), 而夜晚 OC、EC 和 TC 并不存在相关性. 这可能是昼夜气象条件的不同造成的. 温度、湿度和光照对二次气溶胶的形成、半挥发性气溶胶浓度的变化和雾的形成起着重要作用. 这些过程可以改变颗粒物组分的化学性质, 从而改变它们的 DTT 活性. 除此之外, 作为生物质燃烧示踪物的左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖与 DTT_v 昼夜相关性差异更加明显, 白天左旋葡聚糖、甘露聚糖和半乳聚糖与 DTT_v 存在较强相关性 ($r=0.701$, $P<0.01$; $r=0.671$, $P<0.01$; $r=0.662$, $P<0.01$;) 这与早期研究有机化合物催化 DTT 氧化的能力一致^[38,39], 这也表明生物质或化石燃料燃烧对 DTT_v 活性的具体影响.

大气中 Mn 的来源主要是矿物粉尘, 而水溶性 Cu 和 Fe 具有更强的交通源 (车辆制动, 车辆排放). 如图 3 所示, Cu 和 Mn 在白天和夜晚与 DTT_v 无明显相关性, 这是因为 Cu 与 DTT 反应形成络合物, 作为催化剂氧化游离 DTT 而不产生任何 ROS^[40,41]. 由于 Mn 并不参与活性氧生成, 因此与 DTT_v 未呈现明显的相关性. 相反, 金属 Fe 与 DTT_v 在白天和夜晚有着明显的相关性 (白天: $r=0.790$, $P<0.01$; 夜晚: $r=0.904$, $P<0.01$). 造成这种现象的原因, Xiong 等^[14] 的研究认为单一的水溶性 Fe 并不能对 DTT_v 做出贡献, 但是在酸性环境下与有机物发生协同反应 (Fenton 反应) 参与活性氧的生成. 然而, 通过观察 SO_4^{2-} 的昼夜浓度也很好地验证了这一点.

在本研究中发现, 次级无机离子 (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+) 也与 DTT_v 活性之间有很强的相关性 (图 4). Cho 等^[23] 的研究指出这些物质对 DTT 活性并没有实际贡献. 如表 3 显示, NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 与水溶性 Fe 相关 ($r>0.65$, $P<0.01$), 进一步表明它们与水溶性 Fe 的共线性, 而不是对 DTT 活性的实际贡献, 这一点与 Verma 等^[21] 的研究结果一致. 草酸根作为光化学氧化有机前体物的二次排放生成物质^[42], 在白天和夜晚均与 DTT_v 有着明显的相关性, 草酸根昼夜相关性都较强 ($r=0.609$ 和 $r=0.577$, $P<0.01$), 表明 DTT 活性可能与大气中光化学氧化途径和二次污染有关. 另外, Cl^- 、 K^+ 和 Mg^{2+} 仅仅在白天与 DTT_v 呈现相关性 ($r=0.591$, $P<0.01$; $r=0.719$, $P<0.01$; $r=0.459$, $P<0.05$), 这与 Liu 等^[43] 在渤海沿岸城市的研究结果相同, 很显然, 这是因为华北地区冬季燃煤导致的. Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 是常见的地壳金属, 大气颗粒物中其来源是扬尘. 为此, 本研究考察了扬尘对 DTT_v 影响, 发现采样期间的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 浓度并不高, 采样期间低风速也很好验证了这一点, 并且 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 与 DTT_v 相关性不高. 说明冬季保定市活性氧的生成与扬尘关系较小.

2.4 PMF 来源解析

为了进一步了解影响氧化潜势的污染来源, 采用 PMF 模型直接对 DTT_v 进行源解析^[33]. 在本研究中, 分解了 3~7 个因子, 并计算每个解的 $Q_{\text{true}}/Q_{\text{expected}}$ 值, 以确定 PMF 模型的最佳解. 当分解因子

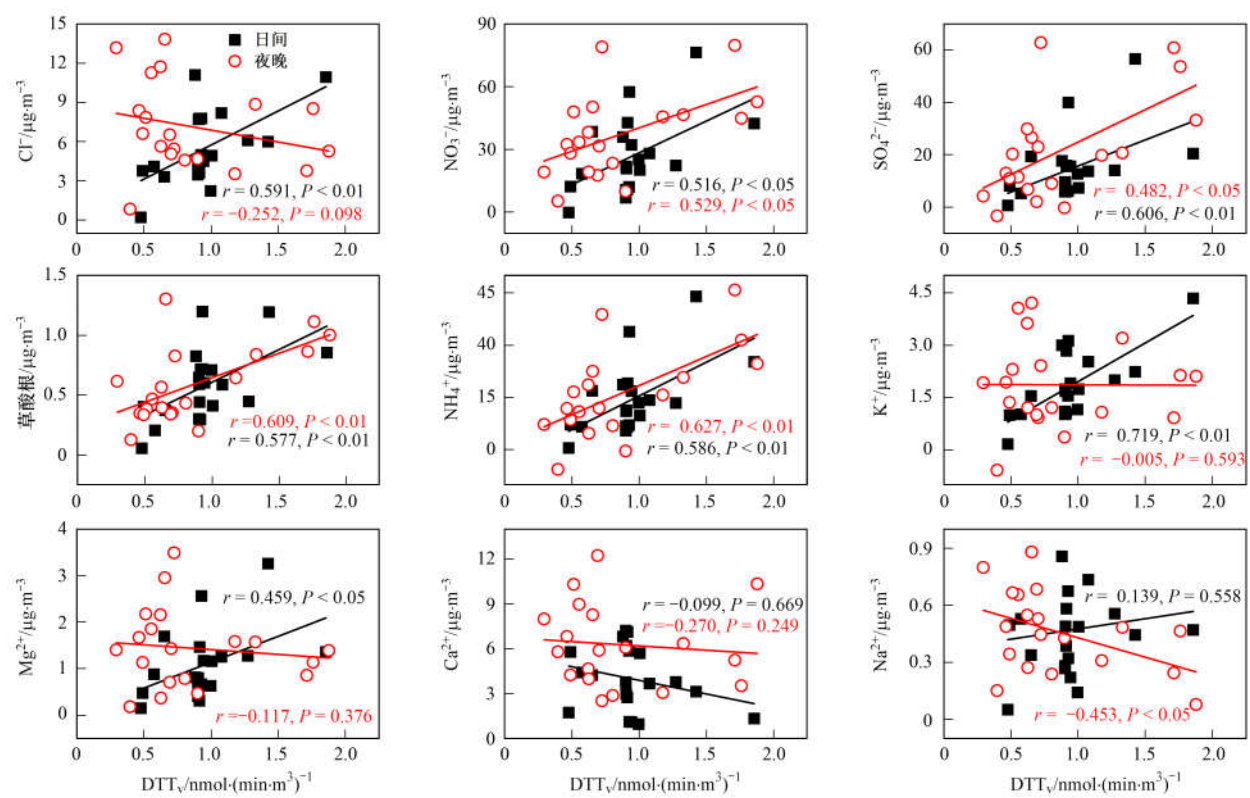


图 4 化学成分与 DTT_v 相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis of chemical composition and DTT_v

表 3 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 与其他物质之间的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficient between NO_3^- , SO_4^{2-} , and NH_4^+ and other substances

项目	白天			晚上		
	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+	NO_3^-	SO_4^{2-}	NH_4^+
OC	0.160	0.098	0.276	0.019	0.042	0.155
EC	0.370	0.359	0.492 *	0.030	-0.069	0.066
甘露聚糖	0.079	-0.017	0.160	-0.107	-0.178	-0.053
半乳聚糖	0.048	-0.044	0.134	-0.171	-0.205	-0.075
左旋葡聚糖	0.119	0.037	0.216	-0.025	-0.143	-0.007
Cu(水溶性)	0.463 *	0.539 *	0.549 *	0.321	0.566 *	0.463
Fe(水溶性)	0.755 **	0.718 **	0.818 **	0.688 **	0.788 **	0.805 **
Mn(水溶性)	-0.404	-0.319	-0.323	-0.227	-0.211	-0.026
Cl^-	0.542 **	0.450 *	0.588 **	0.267	0.111	0.313
Na^+	0.049	0.113	0.101	-0.135	-0.170	-0.096
K^+	0.690 **	0.578 **	0.723 **	0.543 **	0.371	0.528 *
Mg^{2+}	0.925 **	0.936 **	0.929 **	0.706 **	0.549 **	0.615 **
Ca^{2+}	-0.445 *	-0.366	-0.382	-0.141	-0.362	-0.115
草酸根	0.509 *	0.607 **	0.626 **	0.601 **	0.588 **	0.671 **

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

从3增加到7时, $Q_{true}/Q_{expected}$ 比值从3.63 减少到0.35. 从4个因子到5个因子, $Q_{true}/Q_{expected}$ 比值下降了1.24. 相反, 从5个因子到6个因子 $Q_{true}/Q_{expected}$ 值下降0.62, 说明拟合因子过多. 因此, 在这种情况下, 5个因子是最佳的解决方案. 所有污染源贡献率如图5所示.

图6为PMF解析出的污染源贡献, 共确定5种可能的排放源, 即次生来源、生物质燃烧源、扬尘、

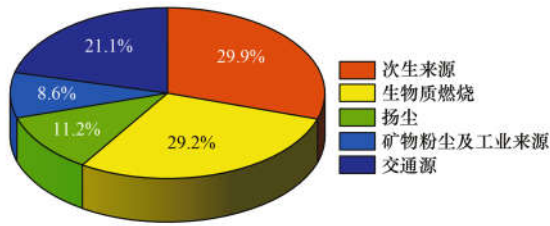


图 5 各个污染源对 DTT_v 的贡献率

Fig. 5 Contribution rate of each pollution source to $PM_{2.5}$

矿物粉尘及工业来源和交通源. 因子 1 被确定为次生来源, 主要以 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和草酸根为代表, 二次辐射源来源于一系列的大气反应, 而不仅仅是局部的表面辐射过程. 一些已确定的来源, 如生物质燃烧、煤炭燃烧以及工业和车辆排放物, 可能通过其前体成分 (如 NO_x 、 SO_2 和 VOCs) 的排放通过光氧化或降解而形成二次无机和有机气溶胶. 次生来源对氧化潜势的贡献为 29.9%, 是保定市最主要的氧化潜势生成源. 因子 2 具有 OC、EC、TC、 K^+ 、 Cl^- 和左旋葡聚糖高浓度的特点, 这些物种是典型的生物质燃烧和煤燃烧的示踪物^[44,45], 该因子对氧

化潜势生成的贡献率 29.2%. 由于采样地区位于华北地区, 时值冬季, 煤炭燃烧是大气污染物的重要排放源. 因子 3 被确定为扬尘, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 浓度过高, 与地壳尘埃密切相关. 该因子对氧化潜势的贡献最小, 仅为 11.2%. 因子 4 被确定为矿物粉尘及工业来源, 具有高浓度 Mn 和 Ca^{2+} 的特点. 由于保定郊区监测点附近并没有大型工厂等设施, 该污染源对氧化潜势的贡献率最小, 仅为 8.6%. 因子 5 被确定为交通源, 特征为 Cu 和 Fe 浓度较高, Cu 和 Fe 是车辆制动, 车辆排放最明显的示踪物, 该因子对氧化潜势生成的贡献为 21.1%.

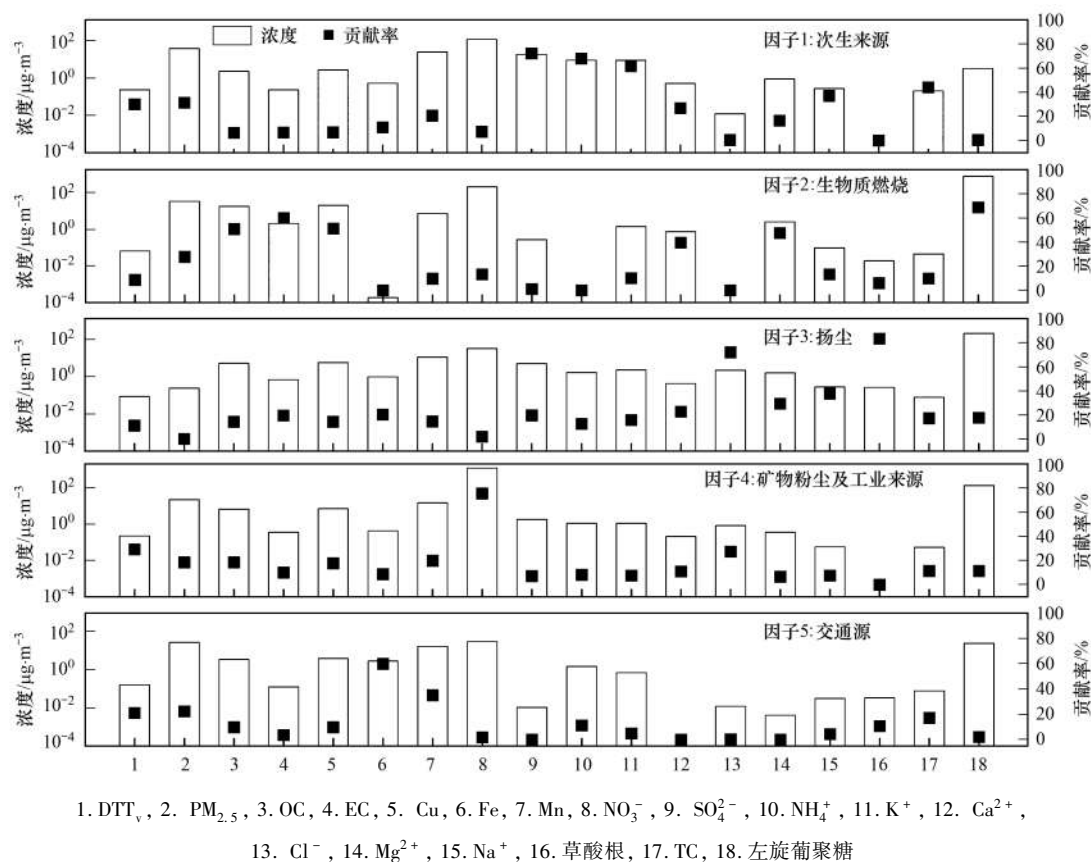


图6 保定市冬季采样期间 DTT_v 污染来源解析因子

Fig. 6 Resolved factors of DTT_v pollution sources during the winter sampling period in Baoding City

3 结论

(1) 基于 DTT 法测定了保定市的 PM_{2.5} 昼夜氧化潜势, 无论是 DTT_v 还是 DTT_m, 白天值均高于夜间, 这表明白天的大气环境更有利于活性氧的生成和存活. 在严重污染期间, DTT_v 的值也相应显示高值, 但 DTT_m 没有这种趋势, 表明并非颗粒物中的所有物质都能引发活性氧的产生, 并由此改变氧化潜势.

(2) DTT_v 与 PM_{2.5} 中各化学成分和污染性气体的昼夜相关性存在明显差别, 可能是由气象条件的昼夜差异造成的. 温度、湿度和光照对二次气溶胶

的形成、半挥发性气溶胶浓度的变化和雾的形成起着重要作用. 这些过程可以改变颗粒物组分的化学性质, 从而改变它们的 DTT 活性.

(3) 本研究还利用 PMF 模型, 分析了不同污染源对氧化潜势生成的贡献. 污染类型主要包括次生来源 (贡献率为 29.9%)、生物质燃烧 (贡献率 29.2%)、扬尘 (贡献率为 11.2%)、矿物粉尘及工业来源 (贡献率为 8.6%) 和交通源 (贡献率为 21.1%).

参考文献:

- [1] Delfino R J, Sioutas C, Malik S. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and

- cardiovascular health [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2005, **113**(8): 934-946.
- [2] Pöschl U, Shiraiwa M. Multiphase chemistry at the atmosphere-biosphere interface influencing climate and public health in the anthropocene [J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 4440-4475.
- [3] Ghio A J, Carraway M S, Madden M C. Composition of air pollution particles and oxidative stress in cells, tissues, and living systems [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part B: Critical Reviews*, 2012, **15**(1): 1-21.
- [4] Borm P J A, Kelly F, Künzli N, *et al.* Oxidant generation by particulate matter: from biologically effective dose to a promising, novel metric [J]. *Occupational & Environmental Medicine*, 2007, **64**(2): 73-74.
- [5] Akhtar U S, McWhinney R D, Rastogi N, *et al.* Cytotoxic and proinflammatory effects of ambient and source-related particulate matter (PM) in relation to the production of reactive oxygen species (ROS) and cytokine adsorption by particles [J]. *Inhalation Toxicology*, 2010, **22**(S2): 37-47.
- [6] Lodovici M, Bigagli E. Oxidative stress and air pollution exposure [J]. *Journal of Toxicology*, 2011, **2011**, doi: 10.1155/2011/487074.
- [7] 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.
- [8] Ahmad M, Yu Q, Chen J, *et al.* Chemical characteristics, oxidative potential, and sources of PM_{2.5} in wintertime in Lahore and Peshawar, Pakistan [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, **102**: 148-158.
- [9] Ayres J G, Borm P, Cassee F R, *et al.* Evaluating the toxicity of airborne particulate matter and nanoparticles by measuring oxidative stress potential—a workshop report and consensus statement [J]. *Inhalation Toxicology*, 2008, **20**(1): 75-99.
- [10] Hellack B, Quass U, Nickel C, *et al.* Oxidative potential of particulate matter at a German motorway [J]. *Environmental Science Processes & Impacts*, 2015, **17**(4): 868-876.
- [11] Janssen N A H, Strak M, Yang A L E, *et al.* Associations between three specific a-cellular measures of the oxidative potential of particulate matter and markers of acute airway and nasal inflammation in healthy volunteers [J]. *Occupational and Environmental Medicine*, 2015, **72**(1): 49-56.
- [12] Bates J T, Fang T, Verma V, *et al.* Review of acellular assays of ambient particulate matter oxidative potential: methods and relationships with composition, sources, and health effects [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(8): 4003-4019.
- [13] Hedayat F, Stevanovic S, Miljevic B, *et al.* Review-evaluating the molecular assays for measuring the oxidative potential of particulate matter [J]. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 2015, **21**(1-2): 201-210.
- [14] Xiong Q S, Yu H R, Wang R R, *et al.* Rethinking dithiothreitol-based particulate matter oxidative potential: measuring dithiothreitol consumption versus reactive oxygen species generation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(11): 6507-6514.
- [15] Xu X Y, Lu X H, Li X, *et al.* ROS-generation potential of Humic-like substances (HULIS) in ambient PM_{2.5} in urban Shanghai: association with HULIS concentration and light absorbance [J]. *Chemosphere*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127050.
- [16] Fang T, Guo H Y, Zeng L H, *et al.* Highly acidic ambient particles, soluble metals, and oxidative potential: a link between sulfate and aerosol toxicity [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(5): 2611-2620.
- [17] Li Y, Zhu T, Zhao J C, *et al.* Interactive enhancements of ascorbic acid and iron in hydroxyl radical generation in quinone redox cycling [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(18): 10302-10309.
- [18] 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**(19): 9321-9333.
- [19] Dou J, Lin P, Kuang B Y, *et al.* Reactive oxygen species production mediated by humic-like substances in atmospheric aerosols: enhancement effects by pyridine, imidazole, and their derivatives [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(11): 6457-6465.
- [20] Rohrer F, Berresheim H. Strong correlation between levels of tropospheric hydroxyl radicals and solar ultraviolet radiation [J]. *Nature*, 2006, **442**(7099): 184-187.
- [21] 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.
- [22] Fan M Y, Zhang Y L, Lin Y C, *et al.* Specific sources of health risks induced by metallic elements in PM_{2.5} during the wintertime in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **246**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.118112.
- [23] Cho A K, Sioutas C, Miguel A H, *et al.* Redox activity of airborne particulate matter at different sites in the Los Angeles Basin [J]. *Environmental Research*, 2005, **99**(1): 40-47.
- [24] Liu Q Y, Baumgartner J, Zhang Y X, *et al.* Oxidative potential and inflammatory impacts of source apportioned ambient air pollution in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(21): 12920-12929.
- [25] Charrier J G, McFall A S, Vu K K T, *et al.* A bias in the “mass-normalized” DTT response—an effect of non-linear concentration-response curves for copper and manganese [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **144**: 325-334.
- [26] Fan M Y, Zhang Y L, Lin Y C, *et al.* Isotope-based source apportionment of nitrogen-containing aerosols: a case study in an industrial city in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **212**(1): 96-105.
- [27] Yu S Y, Liu W J, Xu Y S, *et al.* Characteristics and oxidative potential of atmospheric PM_{2.5} in Beijing: source apportionment and seasonal variation [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 277-287.
- [28] Velali E, Papachristou E, Pantazaki A, *et al.* Redox activity and *in vitro* bioactivity of the water-soluble fraction of urban particulate matter in relation to particle size and chemical composition [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **208**: 774-786.
- [29] Vreeland H, Weber R, Bergin M, *et al.* Oxidative potential of PM_{2.5} during atlanta rush hour: measurements of in-vehicle dithiothreitol (DTT) activity [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **165**: 169-178.
- [30] Liu Q Y, Zhang Y X, Liu Y J, *et al.* Characterization of springtime airborne particulate matter-bound reactive oxygen species in Beijing [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(15): 9325-9333.
- [31] Puthussery J V, Zhang C, Verma V. Development and field

- testing of an online instrument for measuring the real-time oxidative potential of ambient particulate matter based on dithiothreitol assay [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(10): 5767-5780.
- [32] Sameenoi Y, Koehler K, Shapiro J, *et al.* Microfluidic electrochemical sensor for on-line monitoring of aerosol oxidative activity [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2012, **134**(25): 10562-10568.
- [33] Fang T, Verma V, Bates J T, *et al.* Oxidative potential of ambient water-soluble PM_{2.5} in the southeastern United States: contrasts in sources and health associations between ascorbic acid (AA) and dithiothreitol (DTT) assays [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(6): 3865-3879.
- [34] Perrone M G, Zhou J, Malandrino M, *et al.* PM chemical composition and oxidative potential of the soluble fraction of particles at two sites in the urban area of Milan, Northern Italy [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **128**: 104-113.
- [35] Calas A, Uzu G, Kelly F J, *et al.* Comparison between five acellular oxidative potential measurement assays performed with detailed chemistry on PM₁₀ samples from the city of Chamonix (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(11): 7863-7875.
- [36] Stevanovic S, Vaughan A, Hedayat F, *et al.* Oxidative potential of gas phase combustion emissions - an underestimated and potentially harmful component of air pollution from combustion processes [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **158**: 227-235.
- [37] Ehhalt D H, Rohrer F. Dependence of the OH concentration on solar UV [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2000, **105**(D3): 3565-3571.
- [38] Wang J P, Lin X, Lu L P, *et al.* Temporal variation of oxidative potential of water soluble components of ambient PM_{2.5} measured by dithiothreitol (DTT) assay [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **649**: 969-978.
- [39] Patel A, Rastogi N. Oxidative potential of ambient fine aerosol over a semi-urban site in the Indo-Gangetic Plain [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **175**: 127-134.
- [40] Eiguren-Fernandez A, Kreisberg N, Hering S. An online monitor of the oxidative capacity of aerosols (o-MOCA) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, **10**(2): 633-644.
- [41] Fang T, Verma V, Guo H, *et al.* A semi-automated system for quantifying the oxidative potential of ambient particles in aqueous extracts using the dithiothreitol (DTT) assay: results from the Southeastern Center for Air Pollution and Epidemiology (SCAPE) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(1): 471-482.
- [42] Yang A, Jedynska A, Hellack B, *et al.* Measurement of the oxidative potential of PM_{2.5} and its constituents: the effect of extraction solvent and filter type [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **83**: 35-42.
- [43] Liu W J, Xu Y S, Liu W X, *et al.* Oxidative potential of ambient PM_{2.5} in the coastal cities of the Bohai Sea, northern China: seasonal variation and source apportionment [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **236**: 514-528.
- [44] Guo Z Y, Guo Q J, Chen S L, *et al.* Study on pollution behavior and sulfate formation during the typical haze event in Nanjing with water soluble inorganic ions and sulfur isotopes [J]. *Atmospheric Research*, 2019, **217**: 198-207.
- [45] Sauvain J J, Rossi M J, Riediker M. Comparison of three acellular tests for assessing the oxidation potential of nanomaterials [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2013, **47**(2): 218-227.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)